Groupe de travail « base climatique »

Les données climatiques utilisées pour la construction des scénarios de mix électrique à horizon 2050

Table des matières

1. Contexte et objectifs du groupe de travail 4

2. Le dimensionnement du système électrique est déterminé par des situations climatiques spécifiques 7

2.1 Les principaux paramètres pour l'équilibre offre-demande électrique sont dès aujourd'hui fortement dépendants des variables météorologiques 7

2.2 Les analyses de sécurité d'approvisionnement en électricité sont basées sur une approche probabiliste 10

2.3 L'approche probabiliste repose en grande partie sur des données météorologiques 12

2.4 À horizon 2050, l'évolution du climat et la transformation du mix électrique sont susceptibles de modifier la nature des situations dimensionnantes 13

2.5 Les attendus de la base climatique pour la modélisation de l'équilibre offre-demande long terme 14

3. Différentes sources de données climatiques pour les études EOD 16

3.1 Les bases de données météorologiques et climatiques 16

3.2 Une base climatique qui s'est enrichie au fur et à mesure des Bilans prévisionnels, des demandes de RTE et des travaux de Météo-France 17

3.3 D'autres études prospectives se basent sur des sources de données variées 18

4. La prise en compte des effets du changement climatique 19

4.1 D'importants changements climatiques passés et à venir 19

4.2 Les trajectoires d'évolution du climat décrites par le GIEC 19

4.3 Des simulations pour comprendre les futurs du climat en Europe 21

5. Les simulations à climat constant réalisées par Météo-France et utilisées dans les analyses de RTE 22

5.1 Le principe des scénarios à climat constant 22

5.2 Des modèles physiques pour simuler un climat constant 23

5.3 Trois jeux de scénarios à climat constant pour évaluer les effets du changement climatique à horizon 2050 25

5.4 Ajustement des biais et représentation des extrêmes 25

5.5 Un point intermédiaire à horizon 2025 pour la température 26

6. Caractéristiques statistiques de la base climatique du Bilan prévisionnel 28

DOCUMENT DE TRAVAIL

6.1 Un plus grand nombre de situations météorologiques permettant une évaluation affinée des risques climatiques 28

6.2 Le changement climatique a des effets majeurs sur la température 29

6.3 La représentation des caractéristiques de la ressource éolienne, un enjeu majeur pour les études d'équilibre offre-demande 33

6.4 D'autres variables à prendre en compte dans la modélisation de l'offre et de la demande 35

6.5 Les autres données météorologiques utilisées dans les analyses du Bilan prévisionnel 38

7. Prolongements 39

DOCUMENT DE TRAVAIL

1. Contexte et objectifs du groupe de travail

Cadre général : la construction de scénarios de mix électrique à horizon 2050

Dans le cadre de ses missions prévues par le Code de l'énergie, RTE établit périodiquement un Bilan prévisionnel pluriannuel de l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité en France. Celui-ci contribue à l'élaboration de la politique énergétique, en éclairant le paysage du système électrique à long terme.

Pour répondre à des demandes de certaines parties prenantes, le prochain Bilan prévisionnel à long terme intégrera un volet portant sur l'horizon 2050 et proposera des scénarios d'évolution possibles du mix électrique français, dans un contexte de transition énergétique et d'ambition de l'atteinte de la neutralité carbone de la France à ce même horizon, portée par la Stratégie nationale bas carbone (SNBC).

Les premiers éléments de cadrage pour la construction des scénarios à horizon 2050 ont été présentés par RTE et discutés avec l'ensemble des parties prenantes au cours de la réunion plénière de la Commission perspectives système et réseau (CPSR)[1] du 17 mai 2019.

La gouvernance des travaux d'élaboration des scénarios 2050 est articulée autour de plusieurs piliers, visant notamment à renforcer la transparence et la robustesse des analyses :

- **des groupes de travail** lancés dès juin 2019 et réunissant l'ensemble des experts et parties prenantes intéressées sur des thématiques précises, notamment : la consommation, la base climatique, la scénarisation, le couplage entre les différents vecteurs, la modélisation de la production, les flexibilités, l'acceptabilité sociétale ou encore l'inertie et la stabilité du réseau…

- **une consultation publique** très large, structurée sous forme d'appels à contributions prévus pour l'automne 2019 et qui viendront enrichir les échanges initiés dans les premiers groupes de travail ;

- **la CPSR**, qui servira d'instance de cadrage stratégique des travaux, et d'arbitrage des orientations.

Des premières réunions du groupe de travail sur la consommation se sont d'ores et déjà tenues aux mois de mars et mai 2019, et des réunions des groupes de travail sur la base climatique et sur la scénarisation sont programmées pour juin et juillet. D'autres réunions thématiques suivront dans les prochains mois et s'étaleront jusqu'en 2020.

Pour chacun de ces ateliers, RTE diffusera un document de cadrage visant à présenter de manière synthétique la méthodologie et les jeux d'hypothèses envisagés pour la construction des scénarios. Le document présent porte sur la « base climatique », c'est-à-dire l'ensemble des variables climatiques et météorologiques qui sont utilisées pour la modélisation du fonctionnement du système électrique à long terme.

[1] Les supports de présentation des réunions plénières de la CPSR sont disponibles sur le site de la concertation : https://www.concerte.fr/content/actualité-de-la-commission-perspectives-système-et-réseau

DOCUMENT DE TRAVAIL

Objectifs du groupe de travail sur la base climatique

Dans le cadre du Bilan prévisionnel, l'élaboration des scénarios s'appuient sur une modélisation explicite du fonctionnement du système électrique, et en particulier sur des simulations détaillées de l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité pour un grand nombre de situations possibles.

Ces simulations visent à reproduire le fonctionnement du système électrique dans des situations particulières, et notamment pour différentes chroniques météorologiques. Elles permettent de tester la résilience du système aux situations extrêmes et d'évaluer les risques de déséquilibre entre l'offre et la demande.

Le système électrique français est depuis longtemps marqué par une sensibilité à la température. Le développement du chauffage électrique conduit en effet à une thermosensibilité importante de la demande en hiver, qui peut ainsi atteindre des niveaux significatifs lors des journées les plus froides. Historiquement, les infrastructures du système électrique français (capacités de production et infrastructures de réseau) sont donc en large partie dimensionnées par rapport à des situations de vague de froid hivernales, qui correspondent aux situations les plus contraignantes.

Dans le cadre de ses différentes missions de gestionnaire du réseau de transport d'électricité, RTE attache une importance toute particulière à la représentation des aléas météorologiques. Ces aléas sont considérés à la fois pour des échéances de long terme (bilans prévisionnels de l'équilibre offre-demande, études décisionnelles pour l'adaptation du réseau…) et de court terme (prévisions de marges, ajustement de l'équilibre offre-demande et exploitation du réseau en temps réel…). Cette représentation s'appuie sur des travaux et des échanges de données.

La transformation en cours du système électrique, et notamment le développement des énergies renouvelables et des interconnexions, renforce le besoin de disposer d'un référentiel climatique robuste et intégrant l'ensemble des corrélations temporelles et spatiales. Les principes de dimensionnement du système électrique évoluent et sont désormais également déterminés par les aléas sur le vent ou l'ensoleillement qui affectent la production renouvelable, en France et en Europe. Les questions adressées à RTE par de nombreux acteurs dans le cadre du débat public sur l'évolution du mix électrique illustrent l'état du débat : de nombreuses interrogations portent notamment sur l'occurrence des périodes « sans vent » et la capacité du système électrique à couvrir la demande lors de ces périodes, sur la corrélation des régimes de vent entre les différents pays et la probabilité qu'il existe des périodes d'absence de vent simultanément dans tous les pays de la plaque européenne, ou encore sur la corrélation entre les vagues de froid et les périodes faiblement venteuses.

Les travaux de modélisation menés depuis plusieurs années par RTE, en partenariat avec Météo-France, permettent aujourd'hui de disposer d'un référentiel climatique complet, permettant de répondre à ces questions. Celui-ci intègre plusieurs variables (température, vent, nébulosité, rayonnement, précipitations, débits), pour un très grand nombre de configurations météorologiques annuelles possibles, au pas horaire et sur un périmètre géographique large (échelle européenne), pouvant ainsi être utilisé pour les simulations du fonctionnement du système électrique.

À horizon 2050, le réchauffement climatique affectera inévitablement l'ensemble des variables climatiques, et en premier lieu la température. La représentation de l'équilibre du système électrique à cet horizon nécessite donc un travail spécifique pour prendre en compte les effets du changement climatique sur les variables météorologiques et énergétiques. **La prise en compte de ces effets**

DOCUMENT DE TRAVAIL

constitue un enjeu de premier ordre, qui n'est que rarement intégré dans les études existantes sur les trajectoires de transition énergétique.

Le groupe de travail sur la base climatique s'inscrit dans une démarche de transparence et de concertation qui vise à alimenter la construction des scénarios à horizon 2050 du prochain Bilan prévisionnel de long terme. Son objectif est de permettre des échanges avec les parties prenantes sur la méthodologie et les données utilisées pour la représentation des variables climatiques dans les scénarios de long terme.

Le document présent vise à présenter de manière synthétique les éléments méthodologiques sur le référentiel climatique, issu des travaux de Météo-France en partenariat avec RTE, et qui alimentent la modélisation du fonctionnement du système électrique.

Il s'agit d'une version de travail, préalable aux premiers échanges prévus avec le groupe de travail lors de la réunion du 21 juin 2019. Le document sera progressivement enrichi au fur et à mesure de la concertation.

Ce document et la première réunion du groupe de travail porteront à ce stade essentiellement sur les variables climatiques (température, vent, rayonnement, nébulosité, précipitations…). Une autre réunion du groupe de travail portera sur les fonctions de transfert permettant de calculer des données énergétiques associées (consommation, production éolienne, photovoltaïque…).

DOCUMENT DE TRAVAIL

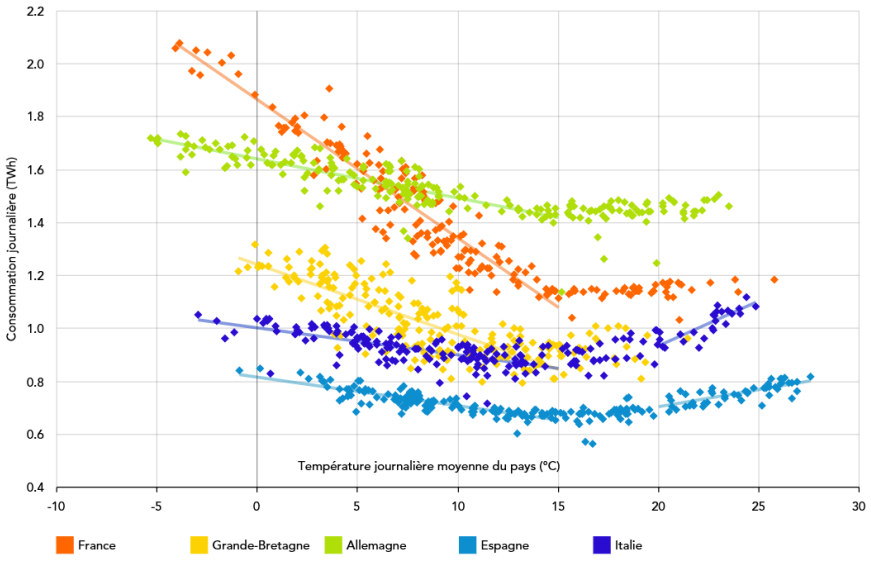
2. Le dimensionnement du système électrique est déterminé par des situations climatiques spécifiques

2.1 Les principaux paramètres pour l'équilibre offre-demande électrique sont dès aujourd'hui fortement dépendants des variables météorologiques

Les situations extrêmes auxquelles le système électrique est confronté, qu'elles résultent de vagues de froid, de chaleur ou de tempête, jouent un rôle clé dans le dimensionnement du système électrique.

Pour l'équilibre offre-demande en France, un des principaux facteurs de risque correspond aujourd'hui à la survenue de vagues de froid, durant lesquelles la consommation électrique française peut atteindre des niveaux élevés. La consommation électrique est en effet largement thermosensible : en hiver, en-dessous de 15°C, la perte de 1°C sur la France conduit à une augmentation de l'ordre de 2 400 MW de la consommation. Ce phénomène est particulièrement marqué en France qui compte pour environ 40% de la thermosensibilité hivernale d'Europe de l'Ouest. En été, la consommation française est également thermosensible mais dans une moindre mesure, alors que d'autres pays, notamment l'Espagne et l'Italie, le sont davantage, du fait de la consommation des appareils de climatisation. La nébulosité peut également affecter la consommation, en lien avec la demande électrique pour l'éclairage notamment, mais dans une mesure bien moindre.

Figure 1 Consommation journalière en fonction de la température (jours ouvrés juillet 2016-juin 2017)



Source : RTE, Bilan électrique 2017

À titre d'exemple, la vague de froid de 2012 a par exemple conduit au pic historique de consommation (102 GW le 8 février 2012). Pour comparaison, le Bilan prévisionnel 2017 estimait la pointe à une chance sur dix entre 98 et 100 GW. Quoique l'épisode hivernal de 2012 ait été tout à fait exceptionnel, que ce soit en termes de durée ou d'intensité globale, il reste malgré tout bien loin de certaines vagues de froid historiques comme celles de 1956, 1963 ou encore 1985[2].

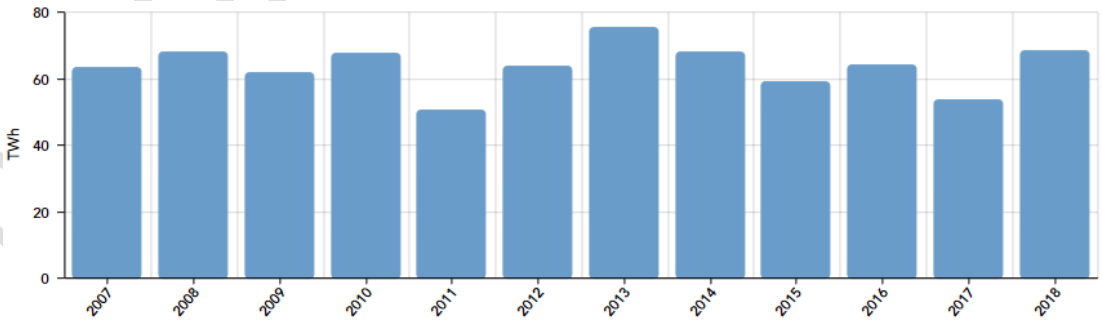
[2] Source : Météo-France, 2012. Retour sur la vague de froid en France durant la première moitié de février. Publié le 14/02/2012. http://www.meteofrance.fr/actualites?articleId=210724

Si les vagues de froid ont un impact important sur la consommation d'électricité en France, les vagues de chaleur observées ces dernières années ont également influencé la production, en particulier des centrales nucléaires. Ces moyens de production doivent en effet disposer d'une source froide dont la température reste suffisamment faible et leur débit suffisamment élevé pour assurer leur bon fonctionnement. Par ailleurs, les moyens de production placés sur des fleuves ou rivières font l'objet d'arrêtés fixant la valeur maximale de la température de l'eau qu'ils rejettent dans ces cours d'eau, afin de protéger la faune et la flore aquatique. Dans des situations de canicule, les arrêtés de rejet peuvent néanmoins faire l'objet de dérogation en cas de risque pour la sécurité d'approvisionnement du système électrique. Les centrales nucléaires peuvent être ainsi temporairement autorisées à rejeter une eau plus chaude qu'habituellement[3]. Dans certains cas, elles peuvent également être amenées à réduire leur niveau de production, voire à s'arrêter, comme ce fut le cas pour plusieurs d'entre elles en 2003 ou au cours de l'été 2018[4]. À l'heure actuelle, ce phénomène représente des pertes de production limitées à l'échelle de la production d'énergie annuelle mais peut néanmoins constituer des pertes de puissance disponible importantes sur certains jours précis.

La température n'est pas la seule variable climatique ayant une influence sur les paramètres du système électrique. Les variations des données de vent, de rayonnement ou encore de précipitations affectent naturellement la production d'électricité d'origine renouvelable.

- **La production hydraulique** est dépendante de la disponibilité de la ressource en eau et donc fortement déterminée par les précipitations (neige et pluie) ainsi que les conditions de températures (et leur influence sur la chute des neiges). À l'échelle annuelle, des variations importantes de la production hydraulique peuvent ainsi être observées d'une année sur l'autre (de 50 à 75 TWh environ sur l'historique), alors même que la capacité du parc hydraulique est stable depuis plusieurs années. Sur des échelles de temps plus courtes, des situations de faibles précipitations et de sécheresse peuvent conduire à des limitations fortes de la production hydraulique sur certaines périodes spécifiques.

Figure 2 Production hydraulique annuelle



Source : RTE, Bilan électrique 2018

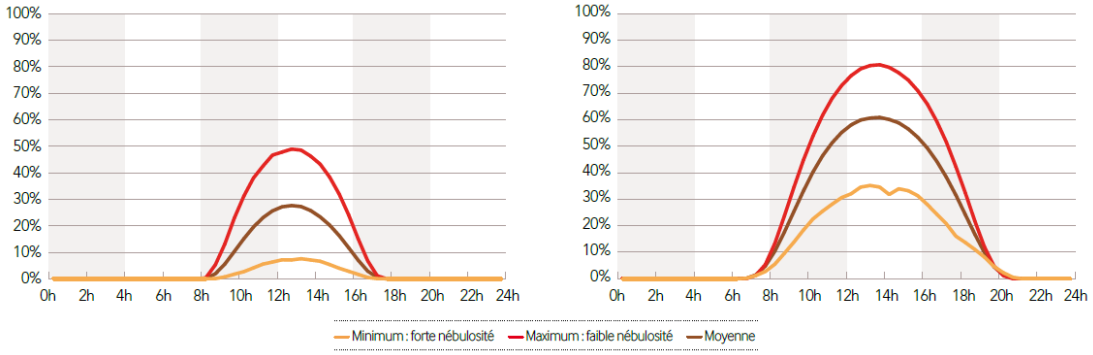
[3] Ainsi, durant la canicule de 2006, à Golfech, l'eau restituée l'a été à un maximum de 30°C contre 28°C habituellement, tandis qu'à Bugey, elle l'a été à un maximum de 27°C contre 24°C normalement (source : https://www.lemonde.fr/planete/article/2006/07/23/les-centrales-nucleaires-d-edf-autorisees-a-rejeter-des-eaux-plus-chaudes_797878_3244.html)

[4] Source : https://www.lemonde.fr/economie/article/2018/08/02/canicule-pourquoi-edf-doit-diminuer-la-production-des-centrales-nucleaires_5338748_3234.html

DOCUMENT DE TRAVAIL

- **La production photovoltaïque** est sensible au rayonnement solaire et à la nébulosité. À l'échelle nationale, le foisonnement naturel conduit à lisser la courbe de production selon un profil journalier caractéristique. Le niveau de production peut toutefois varier de manière significative d'une journée à l'autre selon les conditions météorologiques. Dans une moindre mesure, la production photovoltaïque est également sensible aux conditions de température et de vent qui influencent le refroidissement des panneaux et donc leur rendement.

Figure 3 Facteur de charge photovoltaïque horaire à l'échelle nationale sur une journée des mois de janvier (gauche) et août (droite) sur la période 2011-2014 pour différentes nébulosités



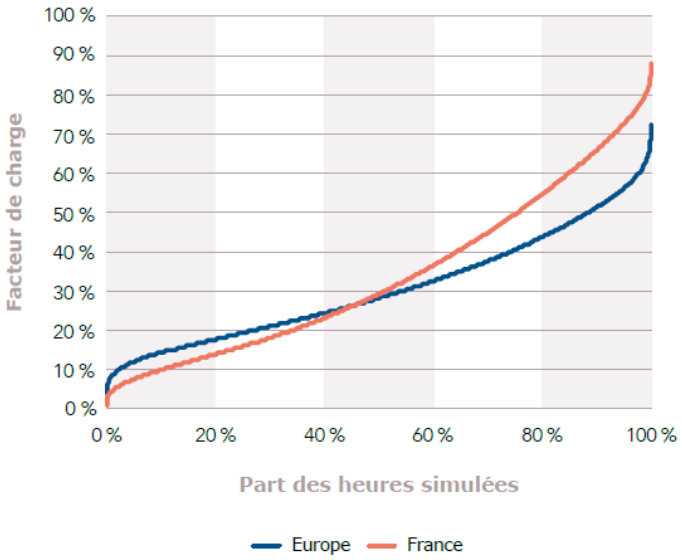
Source : RTE, Bilan prévisionnel 2015

- **La production éolienne**, terrestre et en mer, qui représente désormais plus de 15 GW de capacité installée en France peut fortement varier à l'échelle de quelques heures en fonction des conditions de vent. Dans certaines situations, les éoliennes peuvent même ne pas fonctionner, soit en cas de vent trop faible (inférieur à un seuil de l'ordre de 10 km/h) ne permettant pas d'enclencher le mouvement du moyeu, ou en cas de vent trop fort conduisant à un « décrochage » des éoliennes (diminution des performances aérodynamiques des pâles) ou à un arrêt des installations pour contrainte de sécurité et / ou pour éviter l'usure accélérée du matériel. Le foisonnement de la production à l'échelle nationale, voire européenne, permet toutefois de limiter la probabilité d'absence totale de la production éolienne.

  L'occurrence des situations de vent faible (et donc de production éolienne faible) sont devenues un point d'attention récurrent dans le débat public sur l'évolution du système électrique, au niveau national mais également européen. Si le principal risque sur l'équilibre offre-demande d'électricité en France reste aujourd'hui largement déterminé par les situations de vague de froid et la disponibilité des centrales nucléaires, la diversification du mix électrique et la croissance de la production éolienne en France et en Europe pourrait conduire à terme à des situations de vigilance spécifiques liées à la disponibilité de la ressource en vent. Dans des pays ayant déjà fortement développé la filière éolienne (tels que l'Allemagne), des variations de production éolienne de plusieurs dizaines de gigawatts en l'espace de quelques jours peuvent d'ores et déjà être observées.

DOCUMENT DE T

Figure 4 Monotone de facteur de charge éolien moyen dans les simulations du Bilan prévisionnel 2017 sur le mois de janvier, à la maille France et Europe



Source : RTE, Bilan prévisionnel 2017

Les études de dimensionnement du système électrique doivent pouvoir intégrer la palette des conditions climatiques et leur fréquence, y compris des évènements rares.

De manière générale, le développement des énergies renouvelables conduit à porter une attention croissante à la prise en compte des aléas météorologiques sur la production des installations correspondantes.

De même, le développement des interconnexions conduit à accroître le foisonnement des productions à la maille européenne, mais également les interdépendances entre les différents pays européens. La simulation de l'équilibre offre-demande passe donc par une représentation fine de la corrélation des données météorologiques entre les différentes zones géographiques.

2.2 Les analyses de sécurité d'approvisionnement en électricité sont basées sur une approche probabiliste

La sensibilité du fonctionnement du système électrique, et en particulier de l'équilibre offre-demande, aux aléas météorologiques, conduit à dimensionner le système selon une analyse de risque probabiliste.

Du point de vue réglementaire, ceci se traduit par un critère de sécurité d'approvisionnement défini par les pouvoirs publics comme une durée de défaillance (i.e. appels aux moyens post-marché tels que l'interruptibilité des consommateurs industriels, la baisse contrôlée de la tension de 5%, contrats de secours ou en dernier recours le délestage ciblé de certains consommateurs) devant être inférieure à trois heures par an en espérance [5]. Ce critère signifie que sur l'ensemble des configurations

[5] Le projet de PPE publié par le Gouvernement début 2019 vise à confirmer ce critère de 3 heures, et de lui associer un critère complémentaire de durée de délestage inférieur à 2 heures par an en moyenne. Les analyses de RTE montrent toutefois que ces deux critères sont équivalents.

d'approvisionnement (configurations météorologiques – température, vent, nébulosité, rayonnement, etc. – disponibilités des moyens de production pilotables – thermiques, nucléaires, hydrauliques), le système électrique ne doit pas présenter plus de trois heures de déséquilibre entre l'offre et la demande (nécessitant l'appel aux moyens post-marché) en moyenne.

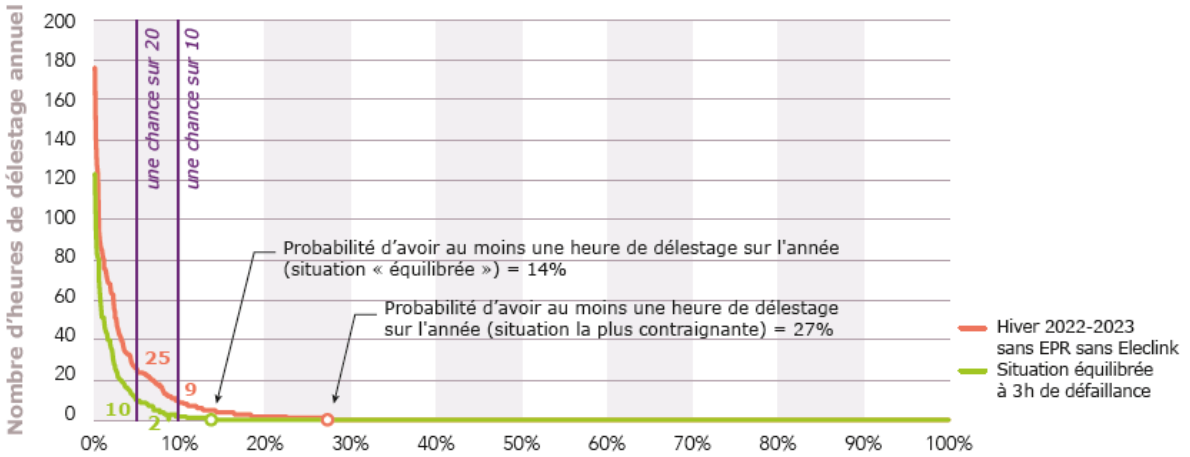
Compte tenu de l'expression en espérance du critère public de sécurité d'approvisionnement et de la forte variabilité de différentes grandeurs du système électrique, une approche probabiliste a été progressivement mise en place par RTE au fil des publications du Bilan prévisionnel[6] pour les analyses de sécurité d'approvisionnement.

En pratique, l'équilibre offre-demande est simulé au pas horaire et sur un périmètre géographique large (Europe de l'Ouest), sur 1000 configurations annuelles possibles, reproduisant divers aléas selon la méthode de Monte-Carlo. Des évaluations peuvent également être menées pour rejouer des situations passées, par exemple la vague de froid de 2012 ou la disponibilité du parc nucléaire sur l'hiver 2016-2017, en retenant les chroniques historiques des grandeurs météorologiques et électriques concernées et en maintenant l'approche probabiliste pour les autres grandeurs.

La variabilité des conditions météorologiques peut ainsi conduire à des configurations d'équilibre offre-demande très différentes d'une année sur l'autre. Les exercices récents du Bilan prévisionnel ont illustré cette variabilité et ont montré que, dans un système électrique équilibré par rapport au critère de 3 heures de défaillance en espérance, certaines configurations d'aléas n'induiront pas du tout de défaillance ou de délestage (seulement 14% des configurations annuelles simulées présentent au moins une heure de délestage) tandis que d'autres conduiront à plusieurs dizaines d'heures de défaillance.

Ces analyses mettent en évidence l'enjeu à disposer d'une modélisation fine des événements extrêmes (« queues de distribution ») pour capter les situations de risque pour le système électrique.

Figure 5 Répartition du risque de délestage selon les années simulées

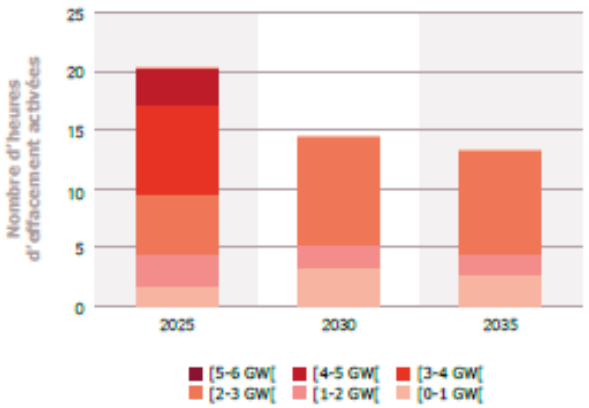


Source : RTE, Analyses complémentaires sur l'équilibre offre-demande d'électricité en France sur la période 2019-2023

[6] Une approche similaire est également mise en œuvre à l'échelle européenne dans le cadre du *Medium Adequacy Forecast* réalisé par les gestionnaires de réseau de transport européens au sein d'ENTSO-E.

Ces aspects de modélisation sont également cruciaux pour déterminer la contribution des différentes capacités à la sécurité d'approvisionnement, notamment pour les moyens sollicités de manière peu fréquente tels que les turbines à combustion ou les effacements, en particulier dans le cadre des évaluations associées au mécanisme de capacité[7].

Figure 6 Répartition du nombre moyen d'heures d'activation des effacements en fonction de la capacité activée – scénario Ampère (Bilan prévisionnel 2017)



2.3 L'approche probabiliste repose en grande partie sur des données météorologiques

L'approche probabiliste retenue pour évaluer les risques sur la sécurité d'approvisionnement du système électrique français nécessite de disposer de chroniques pour les différentes données d'entrées du système électrique : consommation, production intermittente (éolienne et photovoltaïque), productible hydraulique, disponibilité des moyens de production thermiques et nucléaires, et des effacements, disponibilité des capacités d'échange sur les réseaux notamment interconnexions. Ces données doivent être représentées non seulement pour la France mais aussi pour les autres pays modélisés en tenant compte des corrélations éventuelles entre ces grandeurs, tant entre elles (par exemple si la production renouvelable est susceptible d'être plus faible en cas de pics de consommation) que d'un point de vue géographique (entre pays).

Comme détaillé précédemment, toutes ces grandeurs sont sensibles aux conditions météorologiques. Une description *bottom-up* du système électrique est ainsi nécessaire pour intégrer les fondamentaux météorologiques des grandeurs électriques tout en prenant en compte l'évolution du parc (usages électriques, capacité et localisation de la production éolienne, photovoltaïque et hydraulique).

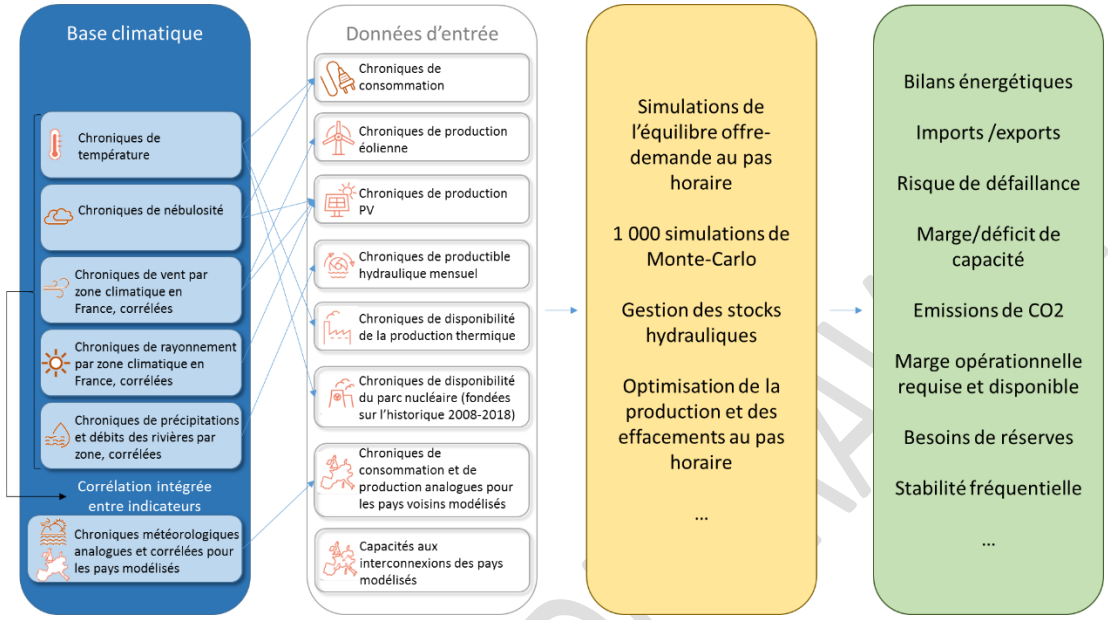
Les consommations thermosensibles sont simulées à l'échelle des pays à partir des données de températures et nébulosité, et de projections sur l'évolution des usages thermosensibles. Les facteurs de charge solaires sont simulés à l'échelle régionale à partir de modèles d'apprentissage statistiques basés sur les données de rayonnement horizontal global, la température, le vent et la relation historique entre ces données et la production des parcs. Pour un parc de production donné, les simulations régionales sont agrégées afin d'obtenir la production solaire nationale. Une approche

[7] Voir notamment : RTE, 2018. Analyse d'impact du mécanisme de capacité. Une contribution au débat européen pour un approvisionnement sûr en électricité.

DOCUMENT DE TRAVAIL

similaire est retenue pour la détermination des facteurs de charge éoliens à partir des données de vent à 100 mètres d'altitude.

Figure 7 Prise en compte des fondamentaux climatiques dans les simulations du système électrique



Selon cette approche, la construction de séries temporelles pour les simulations du système électrique (équilibre offre-de demande, variations infra-horaires, etc.) doit s'appuyer sur des séries temporelles de données météorologiques, qui doivent ainsi répondre à un cahier des charges très contraint.

La suite de ce document porte essentiellement sur la construction des données de la base climatique et leurs caractéristiques. La problématique des fonctions de transfert permettant de construire des données énergétiques correspondant aux variables climatiques (consommation et production) fera l'objet d'un document et d'une réunion ultérieurs.

2.4 À horizon 2050, l'évolution du climat et la transformation du mix électrique sont susceptibles de modifier la nature des situations dimensionnantes

À horizon de long terme, la sensibilité de l'équilibre du mix électrique aux variables climatiques évolue de manière significative en lien avec deux effets :

- D'une part, la diversification du mix électrique et des usages de l'électricité tend à modifier fortement la sensibilité aux aléas météorologiques. En premier lieu, le développement de la production renouvelable variable (multiplication par 4 à 5 d'ici 2035 dans le scénario de la PPE) contribue à modifier les conditions d'équilibre entre l'offre et la demande, et les risques associés. Par ailleurs, l'évolution des usages électriques joue sur la sensibilité de la consommation à la météo mais avec deux effets opposés. D'un côté, l'électrification de certains usages tels que le chauffage et le développement de la climatisation tendent à accroître la sensibilité à la température. De l'autre, les efforts d'efficacité énergétique et le remplacement des équipements par des technologies plus efficaces peut réduire la sensibilité de la consommation aux aléas météorologiques.

DOCUMENT DE TRAVAIL

- D'autre part, l'évolution du climat a une influence certaine sur les données météorologiques et donc par conséquent sur les données énergétiques. Toutes les trajectoires d'émissions envisagées conduisent ainsi à une augmentation de la température moyenne. Les vagues de chaleur sont amenées à devenir plus fréquentes, plus longues et plus intenses. A l'inverse, les événements extrêmes froids devraient se faire plus rares sans pour autant être exclus[8]. Les épisodes de vagues de chaleur peuvent également avoir des répercussions sur la disponibilité des centrales thermiques sur fleuve, les capacités de transit des réseaux électriques ou encore le facteur de charge photovoltaïque. Le changement climatique risque également d'influencer la ressource hydraulique, avec notamment de plus faibles précipitations en neige et une fonte plus précoce. Les effets sur la ressource en vent et en rayonnement sont plus incertains.

  Prendre en compte le changement climatique constitue donc un enjeu majeur pour la juste évaluation du risque climatique dans le Bilan prévisionnel, notamment dans l'exercice qui portera sur l'horizon 2050.

2.5 Les attendus de la base climatique pour la modélisation de l'équilibre offre-demande long terme

Etant donné l'approche retenue pour simuler l'offre et la demande électrique à long terme, la base climatique doit pouvoir tenir compte de plusieurs besoins spécifiques pour disposer de la modélisation la plus fine possible :

1) **La base climatique doit comprendre les variables météorologiques déjà mentionnées précédemment** afin de représenter fidèlement la variabilité des grandeurs du système électrique :
   - la température,
   - la couverture nuageuse (nébulosité),
   - le vent à 100 mètres d'altitude,
   - le rayonnement global horizontal,
   - les précipitations et les débits des rivières.

2) **La base climatique doit intégrer les corrélations entre ces variables météorologiques, afin de reproduire les corrélations entre les grandeurs électriques**. Par exemple, de premières analyses menées dans le Bilan prévisionnel ont montré que la production éolienne tend à être plus faible durant les vagues de froid. La base climatique doit ainsi garantir que les corrélations entre variables météorologiques, favorables ou défavorables au fonctionnement du système électrique, soient représentées dans les bonnes proportions.

3) **Le fonctionnement du système électrique doit pouvoir être simulé au pas de temps horaire** – le critère de sécurité d'approvisionnement étant défini en heures de défaillance – et nécessite donc des données d'entrée décrites à cette échelle de temps[9]. Le pas de temps horaire permet d'intégrer la dynamique (corrélation entre les pas de temps) des productions solaire et éolienne et la consommation (pour sa part sensible aux conditions météorologiques) ainsi que les

[8] Voir le site Climat HD de Météo-France dédié au changement climatique http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd

[9] Pour certaines études (par exemple, étude Réseaux électriques intelligents sur la flexibilité des solutions *smart grids*), les simulations sont réalisées à un pas de temps infra-horaire permettant de représenter les besoins d'ajustement du système électrique à des échéances de très court terme.

DOCUMENT DE TRAVAIL

principales contraintes dynamiques de fonctionnement des centrales thermiques et nucléaires. La base climatique doit ainsi permettre de générer des chroniques au pas horaire pour les variables météorologiques influençant le fonctionnement du système électrique.

4) **La base climatique doit décrire les variables météorologiques à l'échelle de l'Europe suivant un découpage géographique suffisamment fin**. En effet, les échanges entre pays aux interconnexions jouent un rôle croissant dans les équilibres offre-demande nationaux, du fait de l'intensification des échanges et de la croissance des capacités d'interconnexion. Des chroniques de consommation et de production renouvelable sont ainsi nécessaires sur l'ensemble des pays modélisés (maintenant 18 pays européens). Cela doit s'accompagner d'un découpage géographique fin des zones de production renouvelable pour deux raisons. Tout d'abord, leurs ressources sont parfois très différentes d'une région à une autre. Ensuite, les études de réseau menées par RTE et les autres gestionnaires de réseau nécessitent des données décrites à l'échelle de zones électriques voire par poste du réseau de transport. A titre d'illustration, le facteur de charge annuel moyen de la production photovoltaïque, à technologie actuelle, peut varier sur une plage de l'ordre 11% à 16% en fonction de la localisation considérée.

5) **La base climatique doit intégrer les corrélations géographiques entre les fondamentaux météorologiques**. Les analyses sur l'équilibre du système électrique peuvent en effet aboutir à des conclusions très différenciées selon que l'on considère que les situations de vague de froid ou de vent faible peuvent toucher de manière simultanée l'ensemble des pays européens, ou qu'il existe une décorrélation des situations climatiques régionales et un foisonnement naturel conduisant à limiter les risques associés à ce type de situations.

6) **La base climatique doit permettre de représenter la variété des situations météorologiques possibles,** notamment les situations les plus contraignantes pour le fonctionnement du système électrique. Elles sont souvent associées à des situations climatiques extrêmes comme les vagues de froid ou les vagues de chaleur, mais pas uniquement (par exemple la disponibilité du parc nucléaire durant l'hiver 2016-2017). La base climatique doit donc comprendre suffisamment de configurations annuelles de conditions météorologiques afin de représenter convenablement la survenue des épisodes extrêmes. L'utilisation de plusieurs dizaines voire plusieurs centaines d'années climatiques possibles doit ainsi être privilégiée pour représenter la fréquence des épisodes météorologiques extrêmes et de capter les « queues de distribution ».

7) Enfin, le changement climatique, quelle qu'en soit l'ampleur, affectera le fonctionnement du système électrique à l'horizon 2050 (voir ci-dessous). Afin de prendre dès aujourd'hui des décisions en tenant compte de ces effets et de préparer au mieux le système électrique**, il est nécessaire de disposer d'un référentiel permettant de représenter les effets du changement climatique dans les simulations du système électrique**.

DOCUMENT DE TRAVAIL

3. Différentes sources de données climatiques pour les études EOD

3.1 Les bases de données météorologiques et climatiques

Afin de prendre représenter autant que possible les attendus de la base climatique, différentes sources de données peuvent être utilisées :

- **Les historiques d'observations en stations météorologiques**
  En France, la station la plus ancienne est celle de Paris-Montsouris avec des mesures de température remontant jusqu'à la fin du XIXe siècle. Le réseau de stations s'est ensuite renforcé avec désormais plusieurs centaines de stations, permettant l'observation sur l'ensemble du territoire. Ces mesures permettent de reconstituer un très long historique de température sur la France. En revanche, les données anciennes sont moins complètes, présentent plus d'incertitudes liées aux instruments de mesures, et reflètent un climat passé, en moyenne plus froid que le climat actuel. En outre certains paramètres (vent, nébulosité, rayonnement) ne sont pas disponibles dans toutes les stations, ou à un pas de temps ne permettant pas la modélisation des productions éoliennes et solaires.

- **Les réanalyses climatiques**
  Les réanalyses climatiques sont des bases de données dans lesquelles les conditions météorologiques historiques sont évaluées en tout point d'une région voire du globe entier. Elles sont issues de modélisations atmosphériques guidées par les historiques de mesures de nombreux moyens d'observations à travers le monde. Il est ainsi possible de représenter environ 35 années du passé avec un niveau de qualité satisfaisant (pour les dates plus anciennes, les inhomogénéités et lacunes dans les mesures rendent ces simulations moins performantes). Les différents paramètres climatiques sont ainsi représentés sur toute l'Europe à un pas de temps relativement fin (souvent 6 heures voire 3 heures, des réanalyses en cours de finalisation donneront accès à des données horaires) en reflétant les variabilités et corrélations spatio-temporelles. Le nombre restreint d'années disponibles, et le fait que cette période soit marquée par le réchauffement climatique sont néanmoins des éléments limitants pour l'analyse probabiliste.

- **Les simulations issues de modèles climatiques**
  Les modèles climatiques permettent également de générer des données à l'échelle planétaire. Comme les réanalyses, ils reposent sur la mise en équation des phénomènes physiques régissant l'évolution des paramètres météorologiques sur l'ensemble du globe. Les données générées sont des situations réalistes mais fictives : elles sont sans lien avec les situations climatiques du passé et ne sont pas non plus des prévisions. Elles donnent également accès aux paramètres climatiques d'intérêt sur toute l'Europe, à un pas de temps fin et en reflétant les variabilités et corrélations spatio-temporelles. Ces modèles sont typiquement utilisés pour réaliser des projections climatiques prenant en compte l'évolution des concentrations de gaz à effet de serre. Ils peuvent également générer des jeux de données explorant la variabilité du climat tout en s'affranchissant des contraintes liées à l'historique. En constante amélioration, ils comportent néanmoins des limites structurelles liées à la modélisation numérique.

DOCUMENT DE TRAVAIL

L'observation du climat, les réanalyses et les modèles climatiques s'améliorent constamment avec les avancées scientifiques sur le sujet. En parallèle, les contraintes liées à la modélisation de l'équilibre offre-demande évoluent avec l'étude d'horizons plus lointains et de mix électriques de plus en plus interconnectés et météo-sensibles. De ce fait, le référentiel climatique pour le Bilan prévisionnel est régulièrement mis à jour.

3.2 Une base climatique qui s'est enrichie au fur et à mesure des Bilans prévisionnels, des demandes de RTE et des travaux de Météo-France

La base climatique utilisée par RTE a été progressivement enrichie, intégrant progressivement les besoins de simulations du système électrique explicités dans la section 2.3 (variables climatiques pertinentes pour le système électrique, avec une corrélation entre ces variables, au pas de temps horaire, décrites à l'échelle de l'Europe suivant un découpage géographique suffisamment fin pour les études de réseaux, intégrant une corrélation géographique, représentatives de l'ensemble des situations météorologiques y compris des épisodes extrêmes, reflétant les trajectoires possibles de changement climatique).

Lors des premiers Bilans prévisionnels, la part thermosensible de la consommation était construite sur la base de 120 chroniques de températures issues des observations en station et redressées du changement climatique. Dans le même temps, la production des énergies renouvelables était simulée séparément, sans recours aux données météorologiques et donc sans prise en compte de la corrélation avec la consommation.

L'édition 2011 du Bilan prévisionnel a vu un changement notable dans la construction des chroniques de consommation : « *Un ensemble de 100 chroniques de températures tri-horaires, jugé représentatif des conditions climatiques et des corrélations géographiques susceptibles d'être rencontrées à l'horizon 2010, a été fourni par Météo France pour l'ensemble de l'Europe. La sensibilité de la consommation aux températures a été établie à partir de données fournies par Météo France et des consommations observées sur l'historique des quatre à cinq dernières années.*[10] » Le Bilan prévisionnel 2011 intègre ainsi la première base climatique à climat constant. Elle a permis de s'affranchir des limites liées aux historiques en station, et de mieux modéliser la variabilité de la consommation en France et dans le reste de l'Europe.

A partir de 2016, la production renouvelable a été modélisée à partir des données de vent et de rayonnement le nombre de chroniques climatiques a été porté à 200 afin d'affiner la représentation des évènements extrêmes et d'accroître la précision d'estimation de la durée de défaillance.

DOCUMENT DE TRAVAIL

[10] Page 139 du Bilan prévisionnel 2011

3.3 D'autres études prospectives se basent sur des sources de données variées

A l'échelle européenne, la quasi-totalité des études de long terme qui cherchent à représenter finement le fonctionnement du système électrique se basent sur des réanalyses, avec des variations sur le modèle de réanalyse, les années choisies et leur nombre. Le tableau ci-dessous synthétise les données météorologiques retenues par différentes études prospectives du système électrique français ou européen. Certaines études ne précisent toutefois pas les sources de données utilisées.

Références[11]	Type de données utilisées			Nombre de chroniques climatiques annuelles utilisées
	Historiques d'observations en stations météo	Réanalyses climatiques	Simulations issues de modèles climatiques	
ADEME, 2019		X		7
E-Highway 2050		X		22
EDF, 2015		X		30
EUC, 2018	Non précisé			1
ENTSO-E, 2018		X		34
IDDRI Agora 2018		X		10
négaWatt, 2017	Non précisé			34
RTE, 2017			X	200

DOCUMENT DE TRAVAIL

[11] Les références complètes identifiées sont les suivantes :

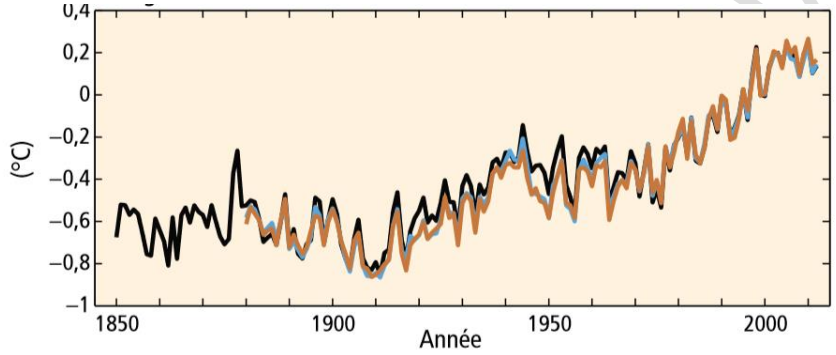
- ADEME et Artelys, 2018. Trajectoires d'évolution du mix électrique à horizon 2020-2060 ;
- E-Highway 2050, 2015. e-Highway2050 Main results ;
- EDF, 2015. Technical and economic analysis of the European electricity system with 60% RES ;
- Energy Union Choices, 2017. Cleaner, Smarter, Cheaper: responding to opportunities in Europe's changing energy system;
- ENTSO-E, 2018, Mid-Term Adequacy Forecast (MAF) ;
- IDDRI – Agora Energiewende, 2018, L'Energiewende et la transition énergétique à l'horizon 2030 ;
- négaWatt, 2017. Scénario négaWatt 2017-2050 ;
- RTE, 2017. Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité.

4. La prise en compte des effets du changement climatique

4.1 D'importants changements climatiques passés et à venir

Depuis le début du XX^{e} siècle, on observe un important réchauffement de l'atmosphère et des océans, avec une accélération rapide au cours des dernières décennies. Ce réchauffement est principalement attribué aux émissions de gaz à effet de serre liées à des activités humaines. A l'échelle du globe, on estime ainsi que la température a d'ores et déjà augmenté de presque 1°C par rapport à l'ère pré-industrielle[12].

Figure 8 Moyenne mondiale des anomalies de la température en surface, combinant les terres émergées et les océans[13]



Source GIEC, 5^{e} rapport, Changements climatiques 2014. Résumé à l'attention des décideurs

Les perturbations des systèmes naturels conséquentes au réchauffement climatique prennent diverses formes, comme la diminution de la couverture de neige et de glace, ou encore la montée du niveau des mers. Le réchauffement affecte également la fréquence et la sévérité des événements climatiques et météorologiques extrêmes tels que les vagues de froid, les vagues de chaleur et les épisodes de fortes précipitations. L'ensemble de ces effets présentent de fortes disparités régionales. Par ailleurs, le réchauffement lié aux émissions des gaz à effet de serre est un processus à forte inertie, de sorte que des changements climatiques continueront d'avoir lieu au cours du siècle prochain. L'ampleur et la rapidité des phénomènes resteront cependant largement déterminées par les niveaux d'émissions à venir.

Pour l'horizon 2050, les changements climatiques envisagés peuvent avoir une influence majeure dans l'évaluation de la sécurité d'approvisionnement, compte tenu de la sensibilité de l'offre et la demande électrique aux conditions météorologiques. Il convient donc de réévaluer le risque climatique à cette échéance.

4.2 Les trajectoires d'évolution du climat décrites par le GIEC

L'étude du changement climatique, ses conséquences et les solutions d'atténuation font l'objet de nombreux travaux à travers le monde. Afin d'évaluer et de synthétiser les publications scientifiques sur ce sujet, un groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) a été créé en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale et le Programme des Nations Unis pour

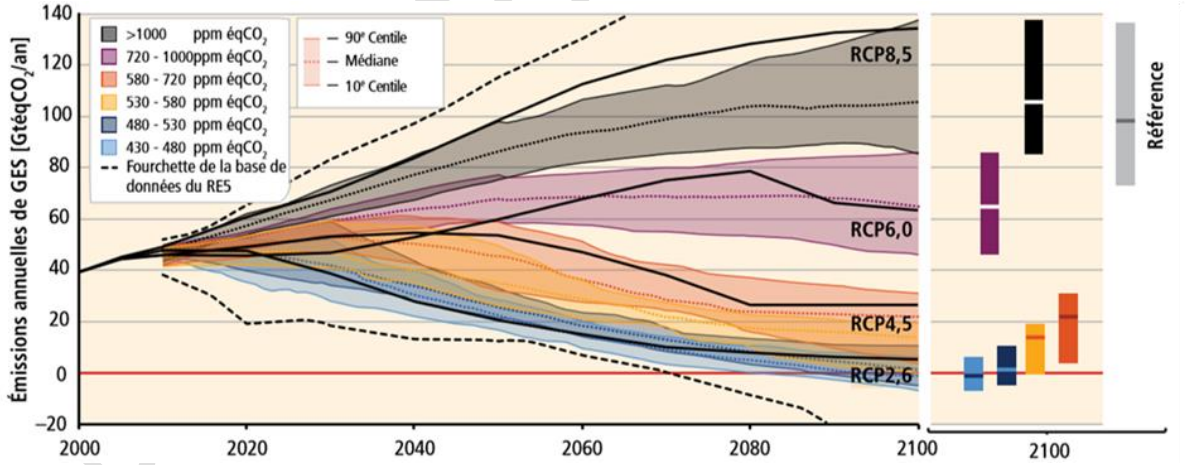
[12] Dans son 5ème rapport de synthèse, le GIEC estime que la température de surface a augmenté de 0,85°C au cours de la période 1880-2012.
[13] Les courbes de couleur représentent les différents ensembles de données historiques disponibles.

l'environnement. Le GIEC publie tous les cinq à six ans un rapport d'évaluation synthétisant l'état des connaissances sur le changement climatique.

Dans son dernier rapport d'évaluation, le GIEC pose un nouveau cadre d'étude du phénomène, basé sur l'étude de quatre trajectoires de référence pour l'évolution des concentrations de gaz à effet de serre, d'ozone et de précurseurs des aérosols. Ces scénarios, appelés RCP [14] (*Representative Concentration Pathway*) constituent quatre profils différenciés, représentatifs des évolutions des émissions envisageables pour le siècle prochain. Chaque scénario RCP est associé à un nombre représentant la valeur du forçage radiatif[15] estimé en 2100 :

- Le RCP2.6 correspond à un scénario strict d'atténuation, caractérisé par des faibles niveaux d'émissions et un point culminant avant 2050, correspondant à une hausse de la température estimée entre +0,3°C et +1,7°C à la fin du XXI^{e} siècle.
- Deux scénarios intermédiaires prévoient une stabilisation des émissions avant 2100 avec une nuance sur le niveau, plus faible pour RCP4.5 que pour RCP6.0. Ces scénarios correspondent à des hausses de la température estimée entre +1,1°C et +2,6°C à la fin du XXI^{e} siècle pour RCP4.5 et entre +1,4°C et +3,1°C pour RCP6.0.
- Enfin, le scénario RCP 8.5 correspond à un scénario d'émissions très élevées, sans effort particulier destiné à les contenir. Il conduit à une augmentation de la température estimée entre +2,6°C et +4,8°C à la fin du XXI^{e} siècle.

Figure 9 : Profils d'évolution des émissions de gaz à effet de serre dans les différentes trajectoires RCP



Source GIEC, 5^{e} rapport, Changements climatiques 2014. Résumé à l'attention des décideurs

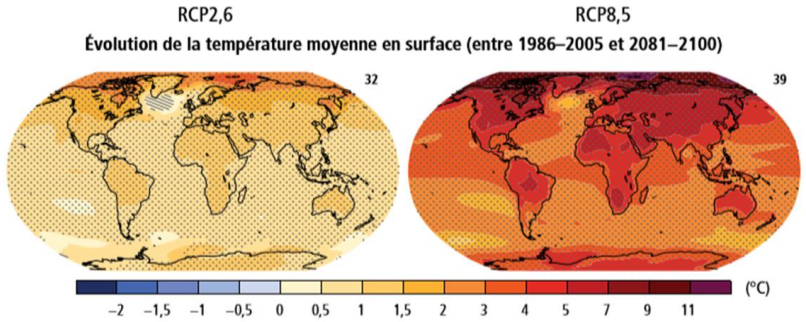
[14] Des informations plus détaillées sur les scénarios RCP sont disponibles dans le 5e rapport de synthèse du GIEC ou dans la fiche explicative de l'ONERC.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf
https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/ONERC_Fiche_scenarios_evolution_GES_GIEC.pdf

[15] Le forçage radiatif peut être défini comme la différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise par un système climatique. Par exemple, dans la trajectoire RCP2.6, la différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise par le système climatique Terre-atmosphère est de +2,6 W/m². Plus ce nombre est élevé, plus le réchauffement climatique est important.

4.3 Des simulations pour comprendre les futurs du climat en Europe

Ces trajectoires d'émissions se traduisent en évolution des concentrations de gaz à effet de serre sur l'ensemble du XXI^{e} siècle. Les données de concentration en GES alimentent ensuite des modèles climatiques qui peuvent simuler le fonctionnement du climat selon les différentes trajectoires envisagées. Ces modèles climatiques globaux permettent ainsi de traduire les scénarios RCP en évolution des paramètres climatiques, et d'estimer les impacts du changement climatique à l'échelle mondiale.

Figure 10 : évolution de la température moyenne à la fin du siècle dans les scénarios RCP2.6 et RCP8.5



Source GIEC, 5^{e} rapport, Changements climatiques 2014. Résumé à l'attention des décideurs

Des modèles climatiques régionaux viennent ensuite détailler l'analyse sur des zones géographiques plus restreintes. Au niveau européen, les principaux laboratoires de modélisation du climat ont travaillé à la production de simulations de référence[16] à l'aide des meilleurs modèles climatiques existants. Ces projections climatiques européennes traduisent les trajectoires RCP du GIEC en simulations climatiques sur la période 2000-2100. Divers services d'analyse climatique se sont mis en place afin de partager les données et analyses utiles à la compréhension des futurs possibles du climat :

- Le portail DRIAS[17] permet par exemple l'accès aux simulations en provenance de laboratoires français de modélisations du climat (IPSL, CERFACS, CNRM-GAME).
- A l'échelle européenne, le *Copernicus Climate Change Service* (C3S)[18] vise également à diffuser des données et analyses permettant d'appréhender les futurs du climat en Europe.

[16] On peut notamment citer les simulations EURO-CORDEX, branche européenne de l'initiative CORDEX
[17] http://www.drias-climat.fr/
[18] https://climate.copernicus.eu/

DOCUMENT DE TRAVAIL

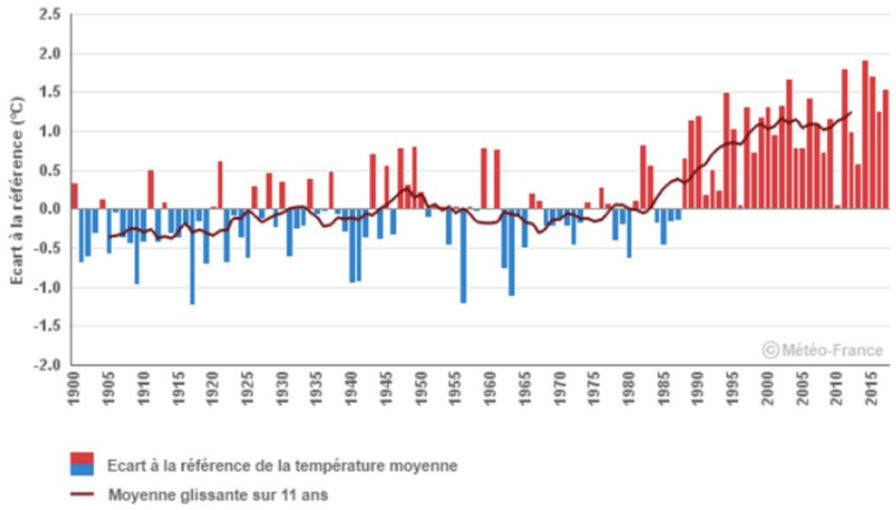
5. Les simulations à climat constant réalisées par Météo-France et utilisées dans les analyses de RTE

Les études d'équilibre offre-demande fondent une partie de leur analyse sur l'étude probabiliste des situations climatiques pouvant affecter le système électrique européen. Pour un mix électrique donné, la variabilité du climat constitue en effet la principale source de variabilité des consommations et productions à l'échelle de l'Europe. Afin de bien prendre en compte le climat dans ses études, RTE travaille avec Météo-France depuis 2008 afin de constituer un référentiel climatique spécifiquement adapté aux contraintes des études d'équilibre offre-demande long terme : les scénarios à climat constant. Ce référentiel a évolué au fil des années avec les avancées méthodologiques de Météo-France dans la modélisation du climat et l'évolution des besoins de RTE pour le Bilan prévisionnel. Il inclut désormais un volet permettant la prise en compte du changement climatique à horizon 2050.

5.1 Le principe des scénarios à climat constant

La majorité des simulations climatiques disponibles sont à climat évolutif. C'est d'abord le cas des historiques : avec des données disponibles depuis le début des années 1980, ils présentent une certaine tendance de réchauffement climatique.

Figure 11 : Ecart de la température moyenne annuelle en France métropolitaine à la référence 1961-1990



Source : Météo-France

C'est également une caractéristique des projections climatiques qui, pour une trajectoire de forçage radiatif donnée, simulent l'évolution des variables climatiques sur l'ensemble de la période 2000-2100.

A l'inverse, les scénarios à climat constant conçus par Météo-France permettent de simuler un grand nombre de situations météorologiques possibles sous un même climat. Les études du Bilan prévisionnel font appel à une simulation de 200 années interprétées comme 200 chroniques annuelles équiprobables sous le climat actuel. Ces simulations comprennent les différents paramètres météorologiques d'intérêt pour le système électrique (température, nébulosité, vent à 100 mètres, rayonnement, débits des rivières), disponibles au pas de temps horaire sur plus de 37 000 points couvrant l'Europe.

DOCUMENT DE TRAVAIL

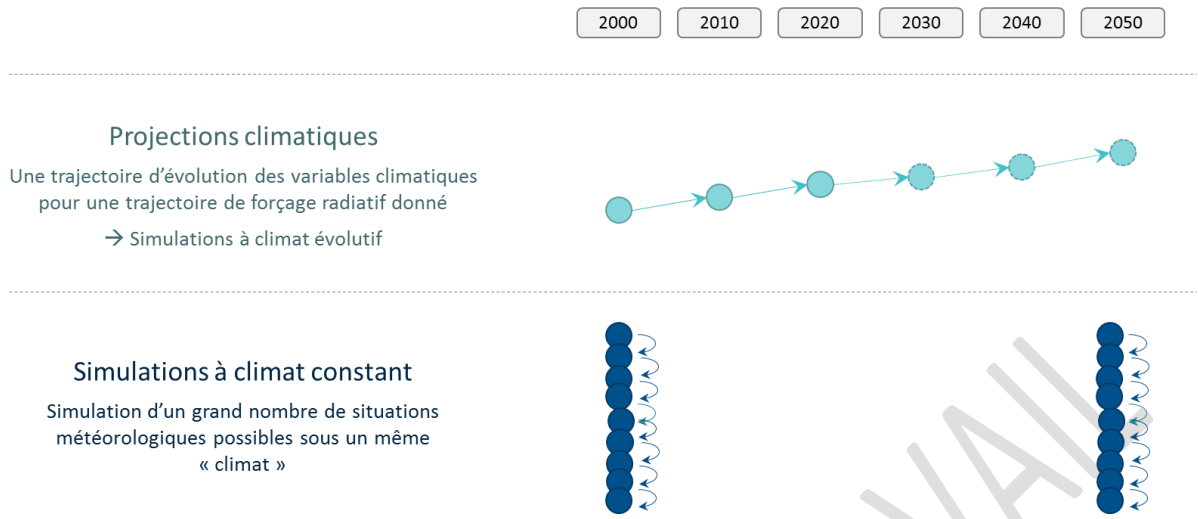


Figure 12. Illustration du principe des projections climatiques et des simulations à climat constant

Afin de prendre en compte le changement climatique, Météo-France a récemment produit une nouvelle version des scénarios à climat constant incluant des jeux de 200 tirages annuels de simulation à climat 2050, selon deux trajectoires GIEC[19] de changement climatique (RCP4.5 et RCP8.5). Les simulations du Bilan prévisionnel à horizon 2050 s'appuieront sur ces scénarios.

5.2 Des modèles physiques pour simuler un climat constant

Les scénarios climatiques ont été obtenus grâce à un modèle climatique, ARPEGE-Climat, développé depuis les années 1990 par le CNRM[20] en collaboration avec le Centre Européen de Prévision. Dans ce modèle, l'atmosphère est décrite grâce à un maillage couvrant le globe entier, avec des valeurs pour les principales variables climatiques (température, vent, pression, humidité…) à chaque localisation et à différents niveaux d'altitude. La simulation décrit plus finement l'Europe de l'Ouest, où la résolution de la grille est de l'ordre de 20 km.

Les différentes équations de la physique régissant l'évolution de l'atmosphère sont intégrées dans le modèle. La modélisation mise en œuvre par Météo-France comprend en outre un modèle de surface (SURFEX) permettant de tenir compte des interactions entre la surface du globe et l'atmosphère.

Les scénarios à climat constant s'obtiennent grâce à des simulations qui gardent fixés les différents paramètres déterminants du climat (concentration des gaz à effet de serre, ozone stratosphérique et aérosols…). Des séries chronologiques de température de surface des océans sont calculées avec ces paramètres fixées. Un état initial fictif mais réaliste de l'atmosphère est créé, avec des valeurs pour les différents paramètres météorologiques sur l'ensemble du maillage. Le modèle climatique simule alors l'évolution de cette situation initiale de pas de temps en pas de temps, pour un pas de temps 10 minutes et sur une durée totale de 200 années. Une sélection de variables d'intérêt est archivée au pas de temps horaire sur l'ensemble d'une grille régulière de 37 000 points de grille couvrant l'Europe (mers et océans compris).

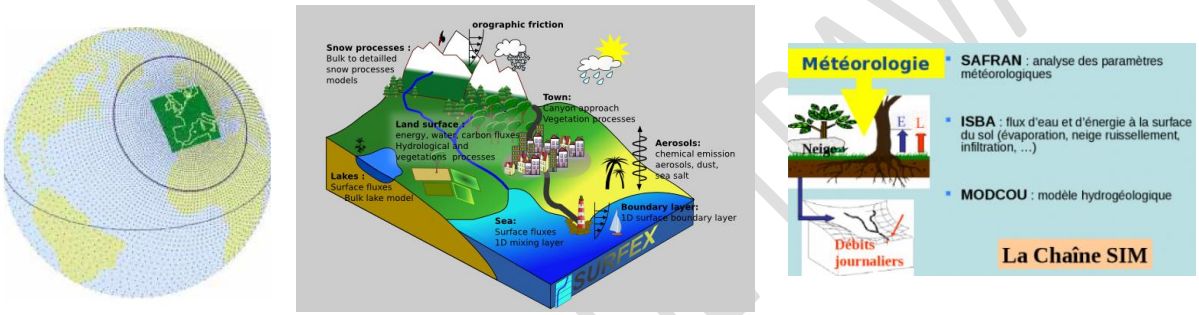
[19] Voir section 5.2 Les trajectoires d'évolution du climat décrites par le GIEC
[20] Centre Nationale de Recherches Météorologiques, unité mixte de recherche CNRS - Météo-France

DOCUMENT DE TRAVAIL

Le découpage du résultat des simulations climatiques, en 200 chroniques annuelles, permet ainsi de disposer de 200 réalisations météorologiques possibles, et équiprobables, pour un « climat » donné.

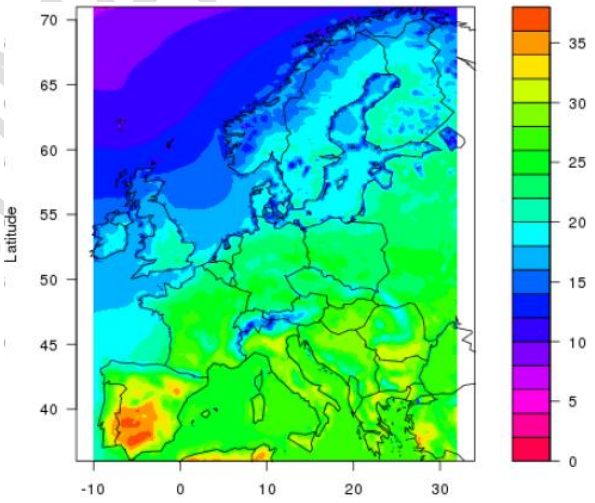
Une modélisation hydraulique a également été introduite en complément des simulations climatiques. Celle-ci s'appuie sur la chaîne de modélisation Safran-Isba-Modcou (SIM2) afin de traduire les résultats des simulations climatiques à climat constant en débits des rivières. Les différents paramètres en point de grille (précipitations liquides et solides, vitesse et direction du vent, flux de rayonnement, pression, température, humidité de l'air, nébulosité) sont analysés via le modèle SAFRAN, convertis en flux d'eau et d'énergie à la surface du sol grâce au modèle ISBA, puis en débits avec le modèle hydrogéologique Modcou. Les débits obtenus sont des cumuls journaliers sur un peu plus de 1 000 sites en France et sont interprétés comme le débit qui serait obtenu en ces points en l'absence d'action humaine (barrages, prélèvements agricoles…).

Figure 13 : Les modèles ARPEGE-Climat, SURFEX et la chaîne SIM permettent une modélisation physique de l'évolution des principaux paramètres météorologiques



Source : Météo-France

Figure 14 : Extraction de température moyenne en juillet à 18h, en sortie du modèle de Météo-France



Source : Météo-France

DOCUMENT DE TRAVAIL

5.3 Trois jeux de scénarios à climat constant pour évaluer les effets du changement climatique à horizon 2050

Les trajectoires RCP construites dans le cadre des travaux du GIEC[21] fournissent une évaluation des paramètres déterminants du climat à horizon 2050 dans les différents scénarios d'émissions. Ces valeurs peuvent alors être utilisées en entrée des modèles mis en œuvre par Météo-France qui a ainsi constitué deux bases climatiques pour l'horizon 2050 : une correspondant à la trajectoire RCP4.5 et l'autre à la trajectoire RCP8.5. Les simulations réalisées avec le modèle décrit ci-dessus permettent alors d'obtenir 200 chroniques annuelles simulées sur une grille couvrant l'ensemble de l'Europe. Celles-ci sont interprétées comme 200 réalisations équiprobables d'un climat 2050 tel que décrit par le GIEC dans chacune de ces trajectoires.

Un scénario à climat 2000 a également été constitué. En fixant les paramètres déterminants du climat aux valeurs de l'an 2000, la simulation aboutit à un jeu de 200 années de scénario à climat constant 2000, interprétées comme 200 chroniques annuelles équiprobables du climat dans les conditions de l'an 2000.

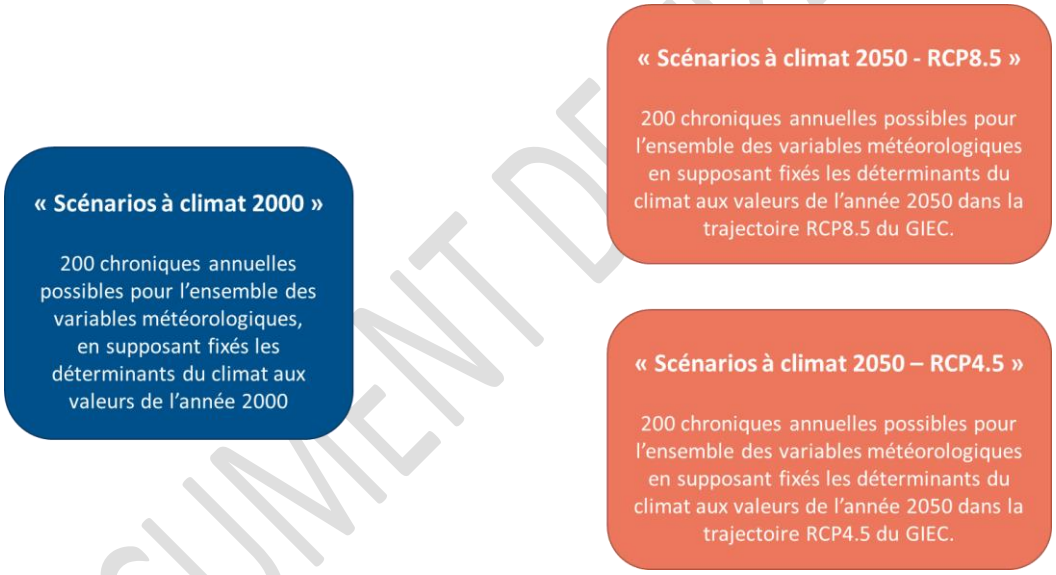


Figure 15. Résultats des simulations climatiques à climat constant, utilisables pour la modélisation du système électrique

5.4 Ajustement des biais et représentation des extrêmes

Les sorties brutes des modèles climatiques présentent localement des biais liés aux diverses simplifications de modélisation. Ces défauts sont atténués par une correction statistique qu'on appelle *recalage*. Cette étape fait appel à des données historiques de référence, ici 30 années[22] centrées sur l'an 2000. Ces historiques donnent une première approximation des distributions statistiques attendues pour les différents paramètres météorologiques (température, vent…) en chaque point de grille et chaque période de l'année autour de l'an 2000. Par comparaison avec les distributions statistiques issues des sorties brutes des scénarios à climat 2000, il est alors possible d'estimer les biais et de calibrer des fonctions de correction, afin de les appliquer ensuite aux trois bases climatiques.

[21] Voir section 5.2 Les trajectoires d'évolution du climat décrites par le GIEC.
[22] Les données de la climatologie de référence sélectionnée proviennent de la réanalyse HIRLAM

DOCUMENT DE TRAVAIL

Des travaux particuliers ont été menés pour le traitement des valeurs extrêmes, notamment pour la température. En effet, un des enjeux de la démarche consiste à représenter les occurrences d'événements rares. La simulation de 200 chroniques climatiques annuelles doit donc faire apparaître dans des proportions réalistes des situations plus extrêmes que celles rencontrées dans les 30 années d'historiques. La technique de recalage employée vise à préserver cette caractéristique attendue.

Les méthodes utilisées portent sur les distributions statistiques des différents paramètres climatiques. A chaque pas de temps de la simulation, les valeurs des paramètres sur l'ensemble de la grille sont donc modifiées à la marge, tout en assurant que les situations météorologiques de la simulation gardent leur originalité et leur cohérence spatio-temporelle.

5.5 Un point intermédiaire à horizon 2025 pour la température

Les scénarios à climat constant traitent du climat autour des années 2000 et 2050. Le climat évolue cependant à un rythme soutenu depuis 2000, si bien qu'aucune des simulations ne peut être considérée comme représentative du climat actuel[23]. Cela vaut surtout pour les températures, nettement plus chaudes dans les scénarios 2050 que dans les scénarios 2000.

Afin de disposer d'un scénario à climat constant à une échéance intermédiaire, une approche basée sur les sorties des scénarios à climat constant 2000 et 2050 a été développée. Celle-ci consiste à interpoler les distributions statistiques de la température entre 2000 et 2050 aux différentes périodes de l'année, afin d'estimer des distributions réalistes pour l'horizon 2025 sur les différents points de la grille de simulation. Étant donné les niveaux de concentration et d'émissions de gaz à effet de serre actuels, les prochaines années semblent plutôt orientées sur la trajectoire RCP8.5 de sorte qu'il a été choisi d'utiliser les distributions des scénarios 2050 RCP8.5 pour ces interpolations à horizon 2025.

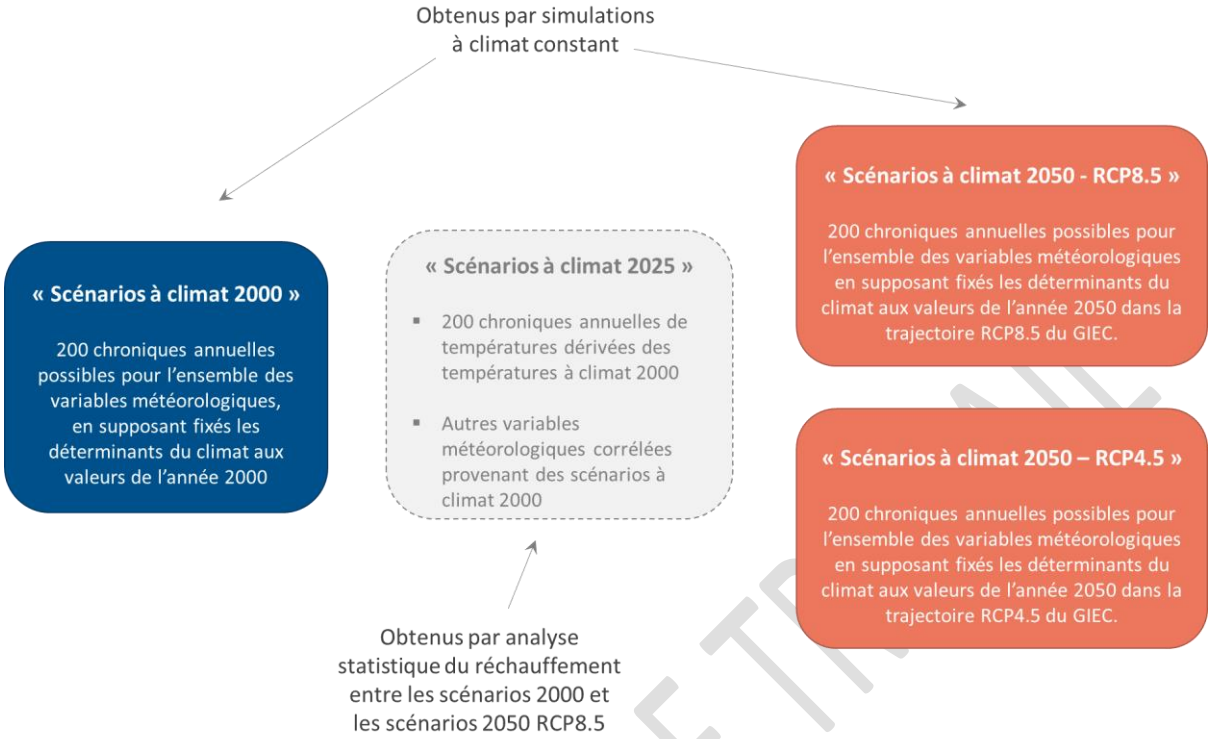
Les séries de températures des scénarios 2000 sont alors recalées sur les distributions ainsi estimées. Comme pour les fonctions d'ajustement des biais, le traitement modifie les valeurs des températures pour modifier leur distribution statistique, mais les séries chronologiques de températures obtenues conservent une cohérence spatio-temporelle et une corrélation aux autres variables de la simulation à climat constant 2000. La simulation regroupant ces 200 nouvelles années de températures et les autres paramètres des scénarios à climat 2000 est appelée « scénarios 2025 » dans la suite du document.

Les prochains scénarios de long terme du Bilan prévisionnel porteront sur l'horizon 2050, avec une étude de la trajectoire d'évolution du mix incluant des échéances intermédiaires. Les scénarios 2025 pourront donc être utilisés pour étudier l'équilibre offre-demande sur la première partie de la trajectoire.

DOCUMENT DE TRAVAIL

[23] Dans la version utilisée dans les précédents Bilans prévisionnels, les températures étaient également redressées afin d'être représentatives de la décennie en cours.

Figure 16. Ensemble des scénarios climatiques utilisables dans les analyses du Bilan prévisionnel



DOCUMENT DE TRAVAIL

6. Caractéristiques statistiques de la base climatique du Bilan prévisionnel

Les chroniques climatiques obtenues par les simulations décrites dans la partie précédente serviront à générer des chroniques de consommation d'électricité et production d'énergie renouvelable selon différents scénarios d'évolution du mix électrique européen. Elles sont conçues pour représenter dans des proportions réalistes les événements climatiques auxquels le système électrique pourrait être confronté, y compris les plus stressants (vagues de froid, vagues de chaleur, périodes de vent faible, combinaisons d'aléas…). Nous présentons ici quelques indicateurs liés à ces paramètres afin d'appréhender les situations météorologiques qui seront envisagées dans les simulations probabilistes d'équilibre offre-demande.

6.1 Un plus grand nombre de situations météorologiques permettant une évaluation affinée des risques climatiques

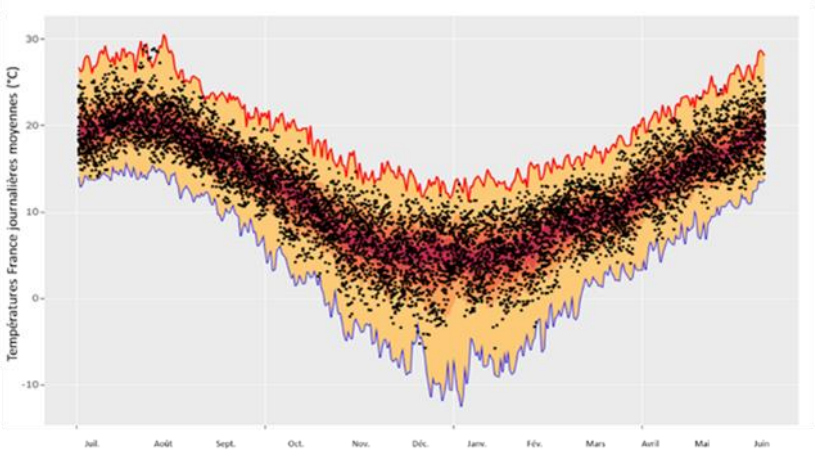
La base climatique proposée pour le Bilan prévisionnel est constituée d'un scénario à climat constant 2000, de deux scénarios à horizon 2050, et d'une échéance intermédiaire à 2025. Chacun des scénarios climatiques est constitué de 200 chroniques annuelles équiprobables archivées au pas de temps horaire, sur une grille de 37 000 points couvrant l'Europe, et pour différents paramètres d'intérêt (température, nébulosité, précipitations, vent à 100 mètres, rayonnement).

Le grand nombre d'années disponibles permet une bonne représentation en probabilités des situations climatiques envisageables sur l'Europe. Les scénarios permettent notamment d'envisager des situations jamais rencontrées par le passé. C'est le cas pour toutes les périodes de l'année, à la fois du point de vue des journées exceptionnellement chaudes que des journées exceptionnellement froides. On peut ainsi considérer des événements avec des temps de retour[24] de plusieurs décennies, telles que des vagues de froid ou des vagues de chaleur exceptionnelles. Au-delà de ces événements extrêmes, le grand nombre de scénario permet aussi de prendre en compte des combinaisons d'aléas climatiques plus variées. Par exemple, les effets de températures froides en France peuvent être considérées dans de multiples situations de disponibilité des capacités éoliennes et photovoltaïques en France et en Europe.

DOCUMENT DE TRAVAIL

[24] Le temps de retour d'un événement climatique est la durée moyenne qui sépare deux occurrences de cet événement.

Figure 17 : Répartition annuelle des températures historiques et simulées

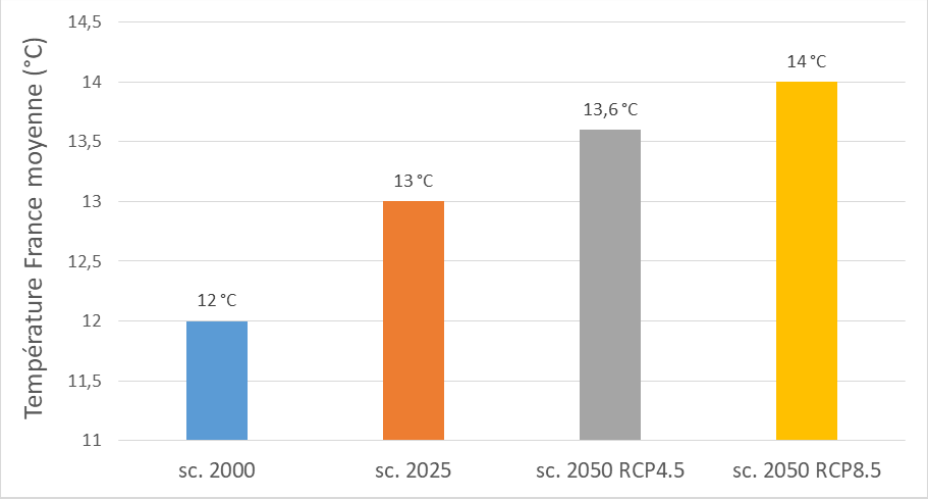


Les températures des scénarios à climat 2000 atteignent des valeurs dans toute la zone orangée, les historiques des 33 dernières années sont représentés par les points noirs

6.2 Le changement climatique a des effets majeurs sur la température

La température est la variable pour laquelle les effets du changement climatique sont les plus marqués. On constate ainsi une forte augmentation des moyennes et des extrêmes dans les deux trajectoires de changement climatique considérées. A l'échelle de la France, les températures moyennes passent ainsi de 12°C pour les scénarios à climat constant 2000 jusqu'à 14°C pour les scénarios 2050 RCP8.5.

Figure 18 : Température France moyenne dans les différentes bases climatiques

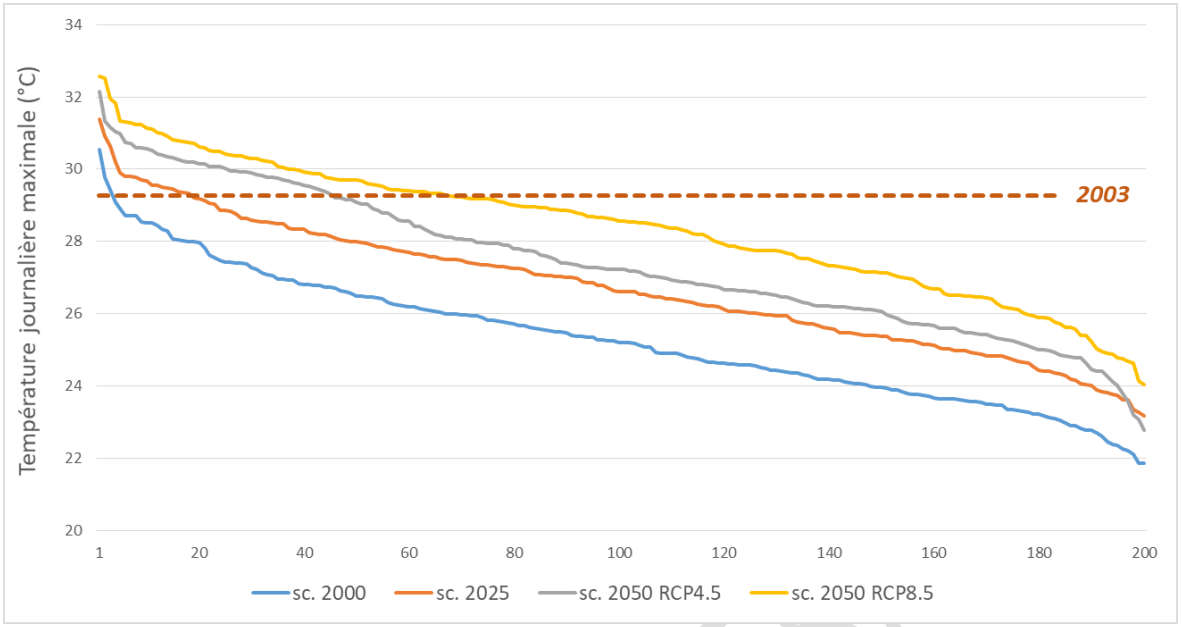


6.2.1 Épisodes de canicule

Les températures extrêmes les plus chaudes se font également de plus en plus fréquentes dans les scénarios à horizon 2050. Dans le scénario le plus pessimiste (2050 RCP8.5), le record d'août 2003 à 29,3°C de moyenne journalière France est ainsi dépassé dans plus de 30% des tirages annuels (soit plus de 60 chroniques annuelles sur les 200 simulées), et parfois plusieurs fois par an. Ces épisodes concernent également 23% des tirages annuels du scénario 2050 RCP4.5, 10% des tirages annuels du scénario 2025 et seulement 2% des tirages pour le scénario à climat 2000. Le record absolu des simulations se trouve à plus de 32°C pour la température journalière France, avec des températures dépassant localement les 45°C.

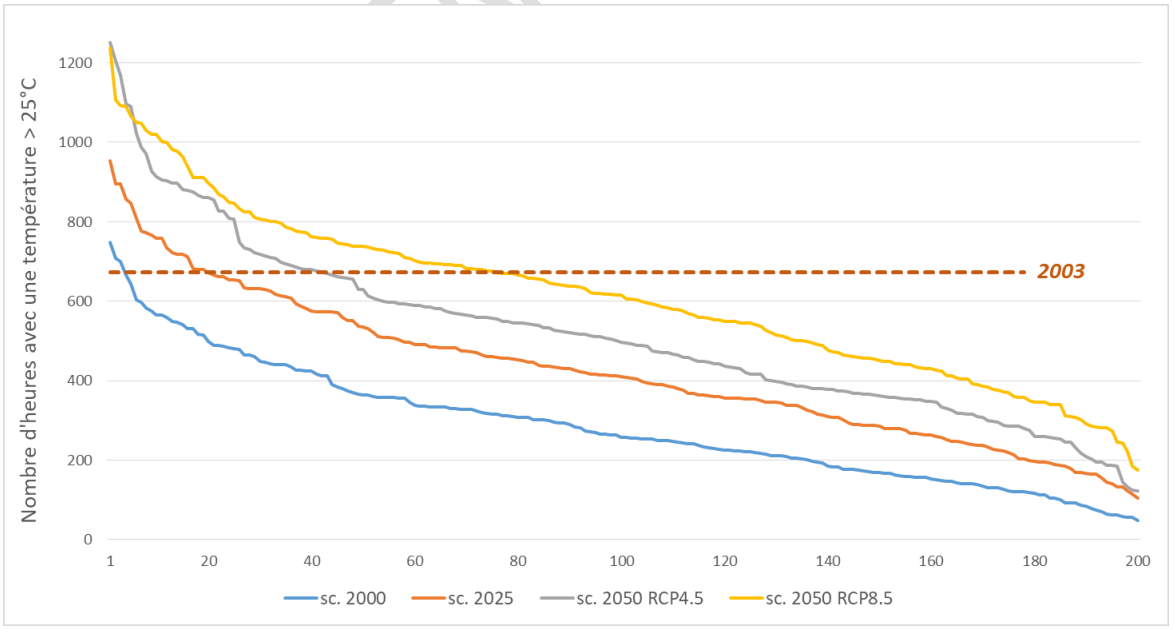
DOCUMENT DE TRAVAIL

Figure 19 : Monotone de maximums annuels de température journalière pour chaque simulation de 200 années à climat constant



Enfin, les durées des épisodes chauds augmentent sensiblement. Le nombre d'heures pour lesquelles la température moyenne France dépasse la valeur de 25°C passe de 285 heures en moyenne pour les scénarios 2000 à 420 pour 2025, 515 pour 2050 RCP4.5 et 610 pour 2050 RCP8.5. Sur certaines années de simulation, ces valeurs vont jusqu'à plus de 1 200 heures par an.

Figure 20 : Monotone du nombre annuel d'heures de température journalière supérieure à 25°C pour chaque simulation de 200 années à climat constant



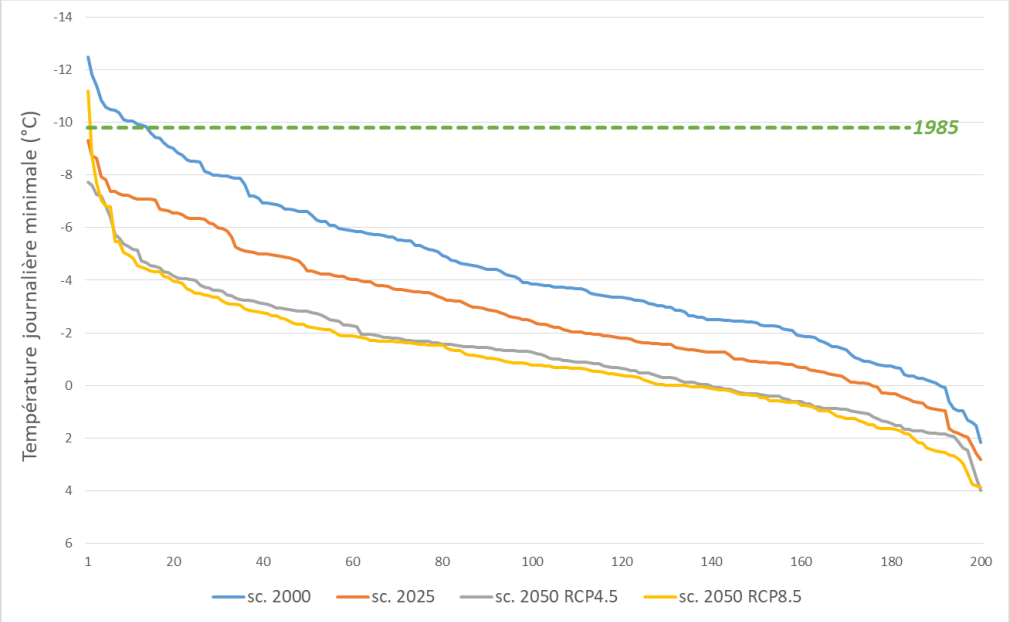
6.2.2 Épisodes de vagues de froid

A l'inverse, les épisodes froids deviennent moins intenses, moins longs et plus rares. La température France des configurations météorologiques annuels simulées peut être comparée à deux épisodes froids historiques :

- La vague de froid de février 2012, avec une journée à -4,9°C (température moyenne France) le 8 février 2012, date du pic historique de consommation électrique.
- La vague de froid de janvier 1985, avec une journée à -9,6°C (température France).

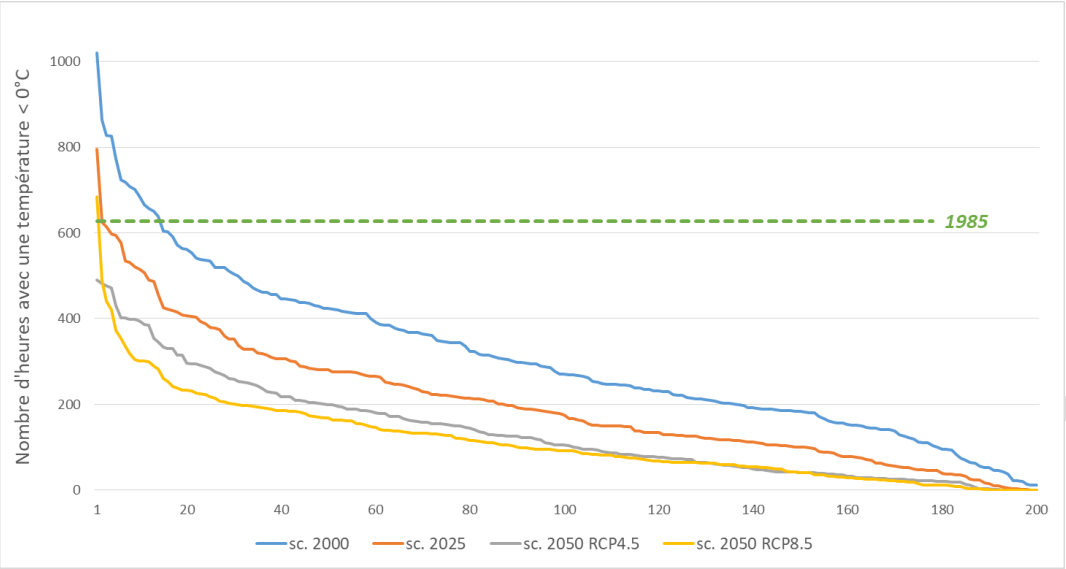
Les pics de froid se font de plus en plus rares dans les scénarios 2050 avec seulement 5% des chroniques annuelles simulées incluant au moins un épisode plus froid que le pic de 2012 pour les scénarios 2050. Les extrêmes froids ne sont donc pas pour autant exclus de l'analyse à cet horizon, la simulation à climat 2050 RCP8.5 présente par exemple une très longue vague de froid comportant un pic journalier à -11,2°C, plus froid que celui de janvier 1985.

Figure 21 : Monotone de minima annuels de température journalière pour chaque simulation de 200 années à climat constant



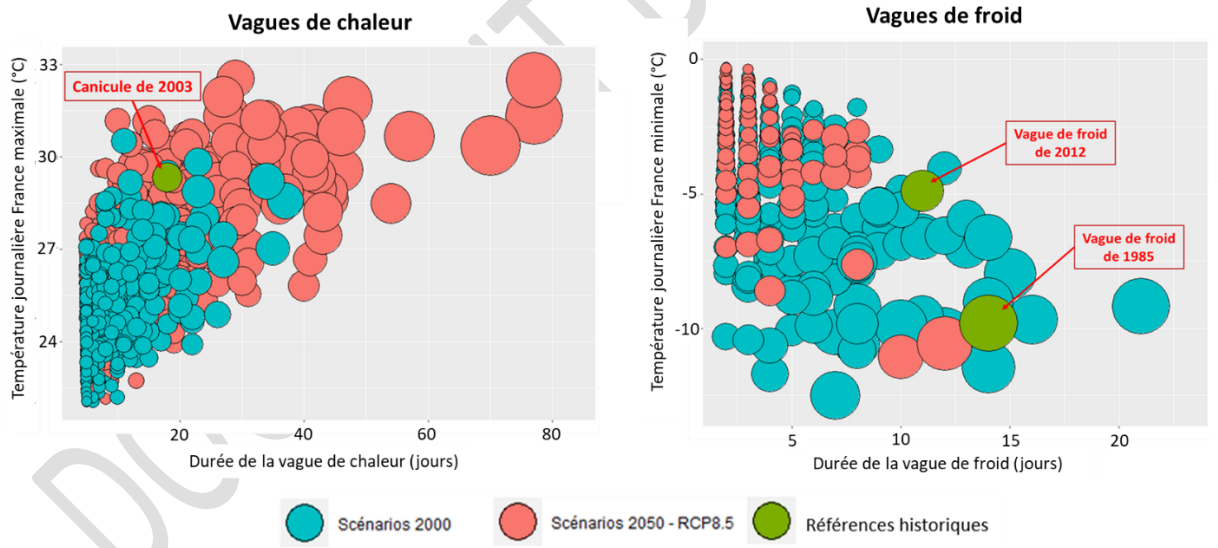
De même, les durées des épisodes froids diminuent dans les scénarios 2050. Le nombre annuel d'heures pour lesquelles la température est négative passe ainsi de 310 en moyenne dans les scénarios à climat constant 2000 à 201 pour l'horizon 2025, 135 pour les scéarios 2050 RCP4.5 et 114 dans la version RCP8.5.

Figure 22 : Monotone du nombre annuel d'heures de température journalière inférieure à 0°C pour chaque simulation de 200 années à climat constant



De manière générale, les fréquences, durées et intensités des vagues de froid et de chaleur sont modifiées sous l'effet du changement climatique. Une représentation croisant les durées et les températures[25] permet de l'illustrer.

Figure 23 : Intensité des vagues de froid et de chaleur dans les scénarios simulés et comparaison avec les épisodes historiques



Les phénomènes sont ici décrits pour la température France, mais les scénarios présentent aussi un réchauffement en moyenne et en extrême à l'échelle de l'Europe, avec quelques disparités régionales. La Scandinavie, l'Espagne et l'Europe continentale présentent ainsi un réchauffement plus prononcé que la moyenne.

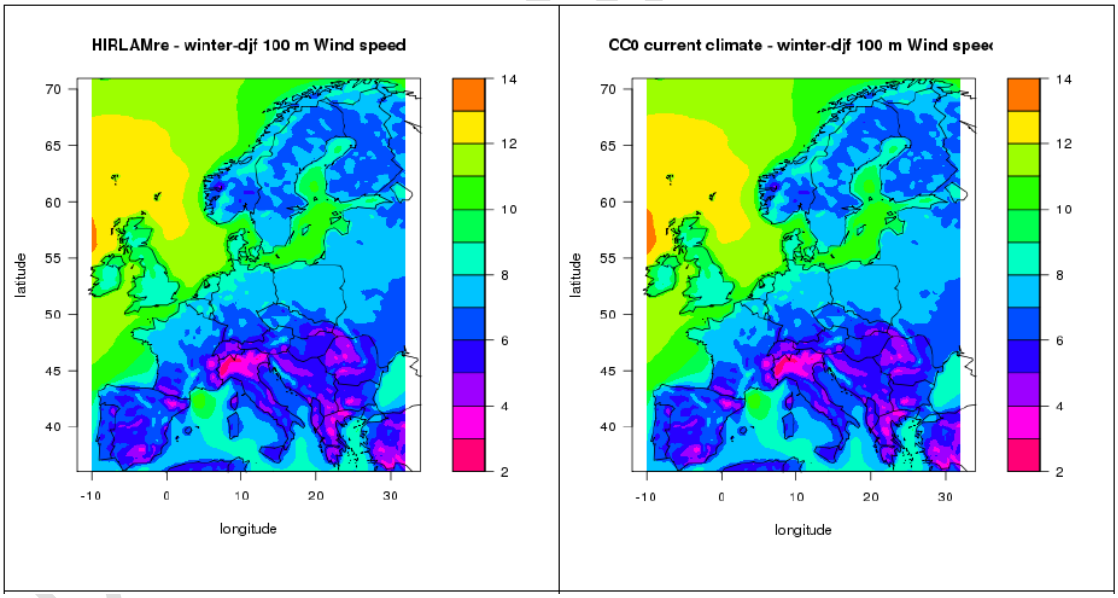
[25] Les vagues de froid et de chaleur sont représentées dans des graphiques à bulle à trois dimensions : la durée est lue en abscisse, la température journalière la plus extrême au cours de l'épisode est lue en ordonnée et la surface de la bulle représente l'écart cumulé à un seuil de température sur l'ensemble de l'épisode.

6.3 La représentation des caractéristiques de la ressource éolienne, un enjeu majeur pour les études d'équilibre offre-demande

Le vent à 100 mètres d'altitude est le paramètre climatique utilisé pour la modélisation de la disponibilité éolienne sur la France et les pays européens modélisés dans le Bilan prévisionnel. La production éolienne est soumise aux aléas sur la ressource en vent qui se caractérisent notamment par d'importantes disparités régionales, une forte variabilité à toutes les échelles de temps, une saisonnalité marquée et des corrélations notables avec les aléas de température. Dans un contexte d'augmentation de la part des capacités éoliennes dans les mix électriques européens, la bonne représentation de ces caractéristiques est un enjeu important des études d'équilibre offre-demande.

Dans les scénarios à climat constant, les données de vent à 100 mètres, de même que l'ensemble des paramètres météorologiques sont disponibles sur l'ensemble de l'Europe. De fortes disparités régionales existent dans les vitesses de vent à 100 mètres (y compris au sein du territoire français). Le graphique ci-dessous présente les vitesses moyennes du vent à 100 mètres sur l'Europe en hiver, à gauche sur la climatologie de référence (30 années d'historique météo) et à droite dans les scénarios à climat 2000. Plus généralement, les caractéristiques statistiques des vitesses de vent dans les scénarios à climat constant sont fidèles à celles observées dans les historiques. Dans les scénarios à climat 2050, seules des évolutions très localisées existent.

Figure 24 : Les scénarios à climat constant présentent des moyennes saisonnières proches de celles de l'historique. Les moyennes hivernales de l'historique sont ici à gauche, celles des simulations à climat constant 2000 à droite

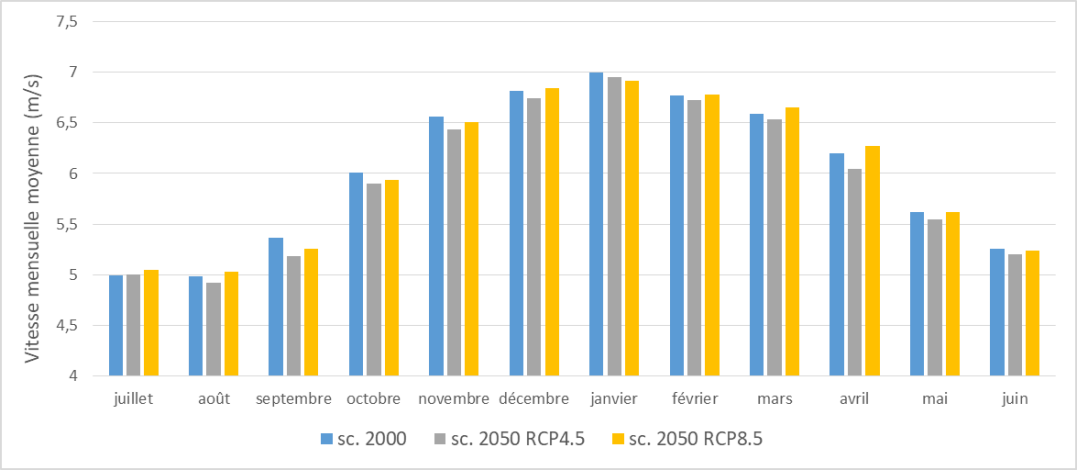


Source : Météo-France

La variabilité de la vitesse du vent se retrouve dans les différentes bases climatiques. Les données de vent simulées représentent la saisonnalité attendue, avec une ressource éolienne plus abondante en hiver qu'en été. Cette saisonnalité se traduira dans les données d'entrée des études d'équilibre offre-demande par des productions éoliennes en moyenne plus fortes en hiver, ce qui est favorable en moyenne pour le système électrique puisque la consommation électrique est également plus importante à cette période.

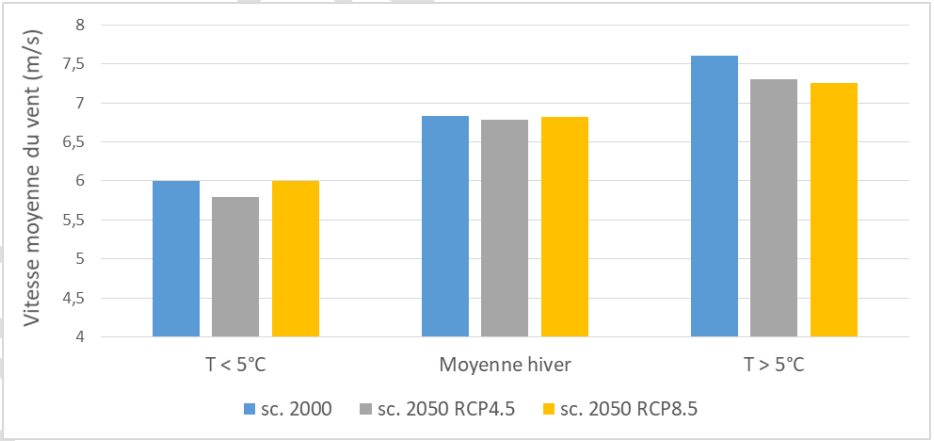
La ressource en vent simulée sur le territoire français représente la saisonnalité attendue, qui sera maintenue quelle que soit l'ampleur du changement climatique.

Figure 25 : Vitesses de vent mensuelles moyennes sur la France



Une autre caractéristique statistique de la ressource en vent est sa corrélation défavorable avec la température : les jours les plus froids, associés à une consommation électrique forte sont en moyenne moins ventés que les jours plus doux. Cette corrélation sera également traduite dans la conversion des scénarios climatiques en chroniques de consommation et de production éolienne. Elle se retrouve bien dans les différentes bases climatiques, comme l'illustre le graphique ci-dessous.

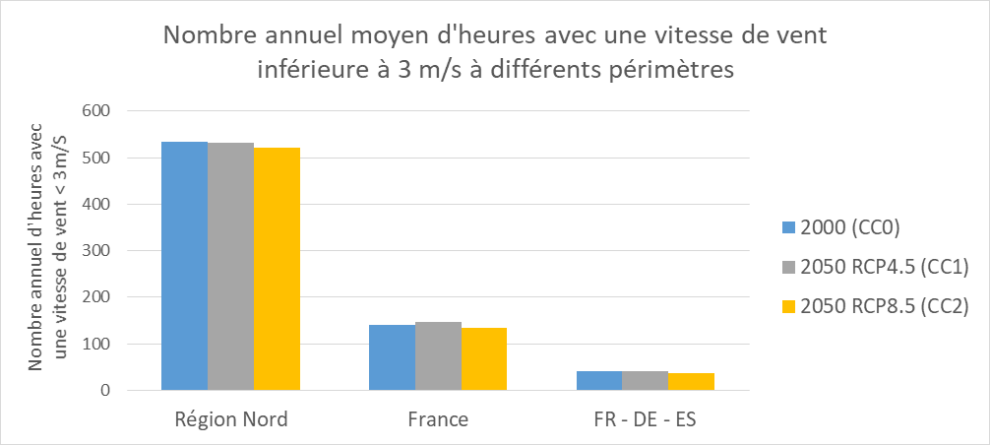
Figure 26 : Répartition des valeurs prises par la vitesse du vent en fonction de la température pendant les jours d'hiver



Une dernière caractéristique de la ressource en vent est son foisonnement à l'échelle géographique. Des épisodes de vent faible peuvent apparaître en pratique, ce qui pourra à terme se traduire par des situations tendues pour la sécurité d'approvisionnement du système électrique. En s'intéressant au vent moyen sur un département français, on trouve ainsi un nombre important de pas de temps avec une vitesse de vent inférieure à 3 m/s (plus de 500 heures par an sur le Nord). Avec le foisonnement, ces situations sont moins fréquentes en moyennant à l'échelle nationale (environ 140 heures), et encore moins fréquentes au périmètre de l'Europe de l'Ouest. Les scénarios à climat constant présentent néanmoins quelques situations de vent faible sur une large part de l'Europe de l'Ouest : au

périmètre France, Allemagne et Espagne, il y a environ 45 heures par an où la vitesse de vent moyenne est inférieure à 3 m/s.

Figure 27 : Le foisonnement de la ressource éolienne limite le nombre d'heures où le vent est faible sur plusieurs pays à la fois, sans empêcher des situations de vent faible sur un périmètre large



6.4 D'autres variables à prendre en compte dans la modélisation de l'offre et de la demande

6.4.1 Le rayonnement

Des données de rayonnement sont également utilisées pour la modélisation du productible photovoltaïque. Les caractéristiques statistiques de ces séries de données présentent peu d'évolutions par rapport à l'historique. On note également que les évolutions entre les scénarios à climat 2000 et ceux à climat 2050 sont mineures. Les séries de rayonnement présentent des disparités régionales, une saisonnalité et une importante variabilité, qui seront retranscrites dans les productions photovoltaïques modélisées.

Figure 28 : moyennes au printemps du rayonnement sur l'historique (à gauche), et sur les simulations à climat constant 2000 (à droite)

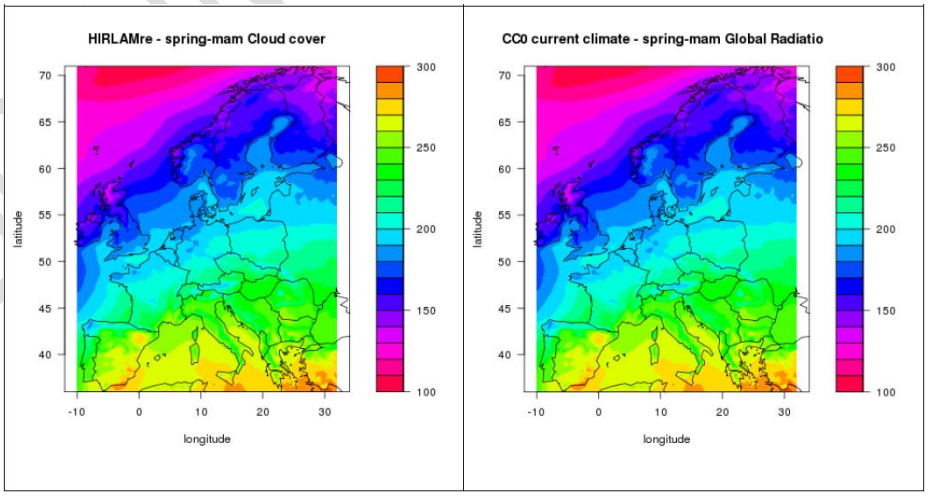


Figure 29 : Saisonnalité de la ressource en rayonnement solaire dans les différents scénarios climatiques

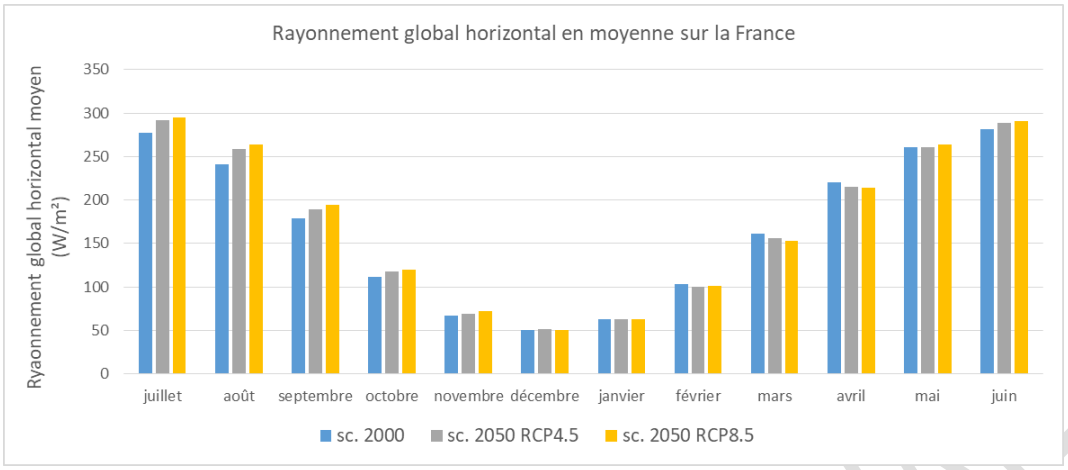
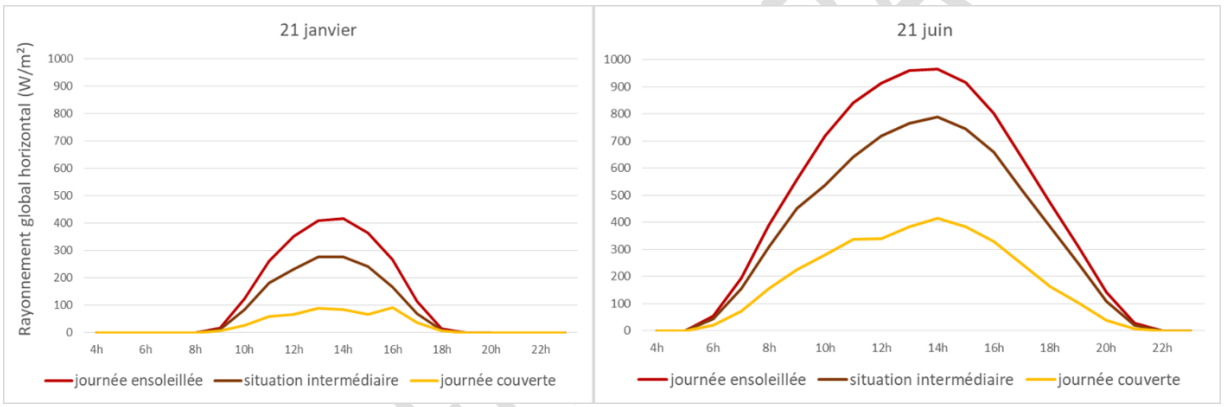


Figure 30 : Rayonnement solaire horaire à l'échelle nationale dans différentes configurations climatiques des scénarios à climat constant 2000



Les données de rayonnement sont corrélées aux séries temporelles des autres variables météorologiques, de sorte que la modélisation photovoltaïque sera effectuée en cohérence spatio-temporelle avec les autres productions et consommations obtenues à partir de la base climatique.

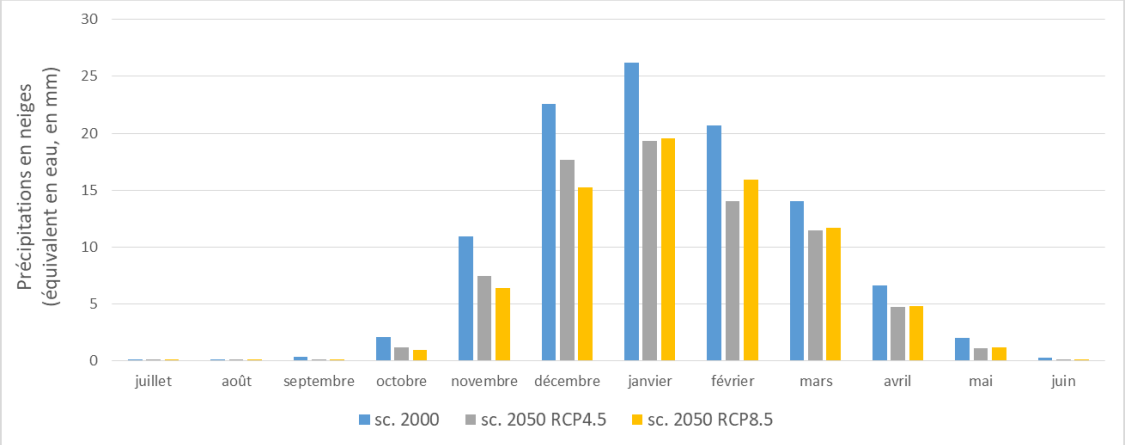
6.4.2 Les précipitations et les débits des rivières

Les précipitations et débits des rivières permettent de prendre en compte la variabilité de la ressource hydraulique et sa corrélation avec les autres paramètres météorologiques. Les scénarios à climat constant présentent une évolution importante de ces variables avec le changement climatique.

D'une part, il existe un effet important sur les précipitations, avec des chutes de neiges plus rares dans les deux scénarios à horizon 2050.

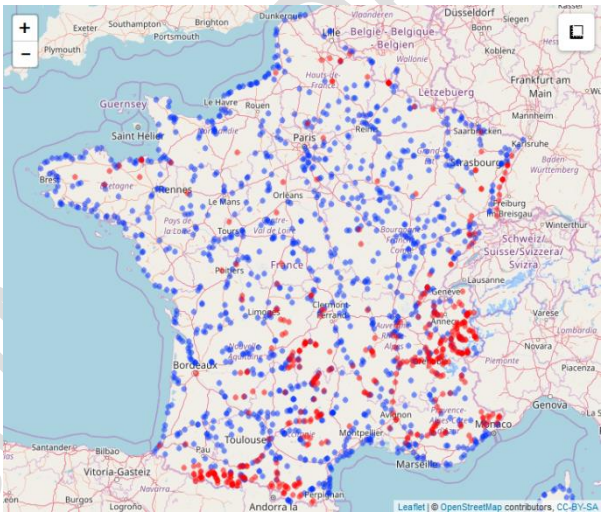
D'autre part, l'augmentation des températures influe sur les dates des périodes de fonte des neiges.

Figure 31 : Saisonnalité des précipitations en neige sur la région Auvergne-Rhône-Alpes



Chaque scénario à climat constant comporte également 200 chroniques simulées de débits des rivières au pas journalier, obtenues par une modélisation physique basée sur les paramètres de sorties des modèles atmosphériques (température, précipitations, vents…). Ces données sont limitées à la France, et réparties sur le territoire sur plus de 1 000 points correspondants à des stations de mesure des débits.

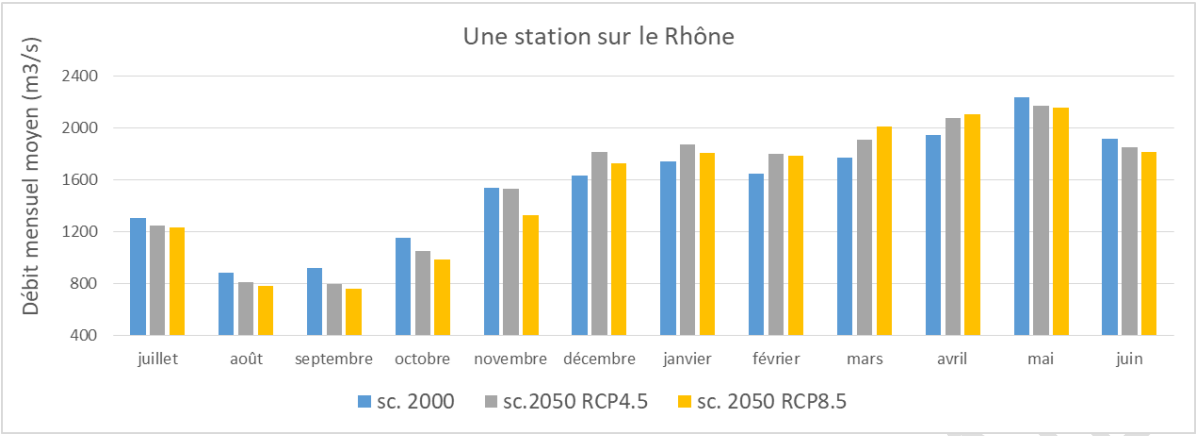
Figure 32 : Localisation des entités de productions hydrauliques (en rouge) et des points de mesure où les données de débits journaliers sont disponibles (en bleu)

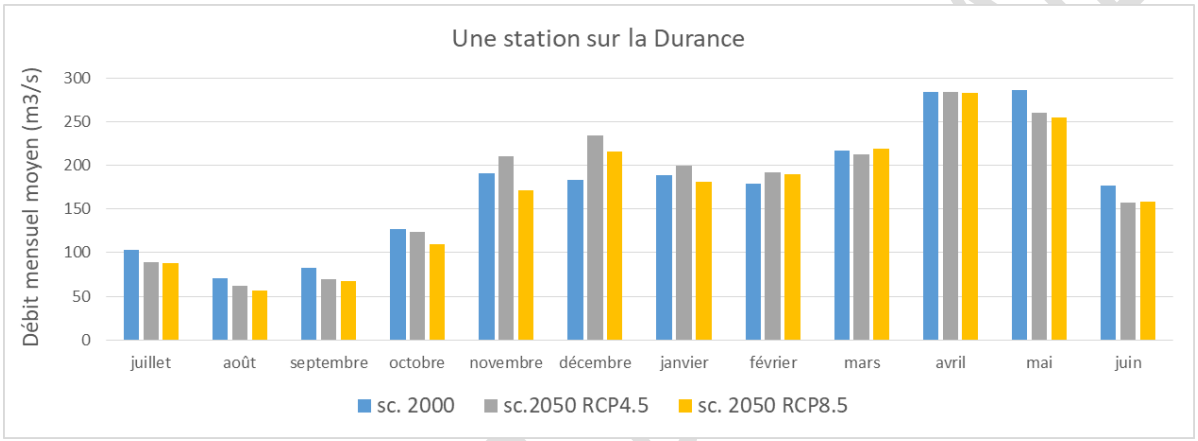


Dans les scénarios à climat 2050, les débits annuels sont plutôt orientés à la baisse, bien qu'il existe des disparités selon les bassins versants. L'augmentation des températures conduit à une fonte des neiges en moyenne plus tôt dans l'année, avec des conséquences sur la saisonnalité des débits. Ceux-ci sont plutôt plus faibles en été et plus importants en hiver que dans les scénarios à climat 2000, avec néanmoins des disparités géographiques selon les bassins versants. On trouve par ailleurs une importante dispersion interannuelle, de sorte que des années exceptionnellement sèches seront inclues dans l'analyse.

DOCUMENT DE TRAVAIL

Figure 33 : Saisonnalité annuelle des débits à un point de mesure sur le Rhône et un sur la Durance





Des travaux sont en cours pour estimer l'effet **de ces évolutions sur la production hydraulique (fil de l'eau et lac)**. Des études seront également menées pour **prendre en compte l'effet des épisodes de débits faibles et de fortes chaleurs sur les indisponibilités des centrales nucléaires sur fleuve**. Des chroniques de température des fleuves seraient également utiles pour estimer l'évolution des fréquences de dépassement des seuils réglementaires de température de rejet. A ce stade, elles ne sont pas disponibles dans la base climatique du Bilan prévisionnel.

6.5 Les autres données météorologiques utilisées dans les analyses du Bilan prévisionnel

En plus de l'analyse probabiliste menée sur la base des scénarios climatiques précédemment décrits, le Bilan prévisionnel pourra illustrer le fonctionnement des mix électriques étudiés à partir d'épisodes météorologiques passés.

Des situations climatiques artificiellement dégradées (températures extrêmes, vents et rayonnements faibles) pourront également être envisagées pour étudier les limites de la résilience du système aux événements extrêmes.

RTE reste par ailleurs attentif au développement de nouvelles bases de données et services climatiques pouvant enrichir les analyses des Bilans prévisionnels. Compte-tenu du volume de données considérées et de la complexité des modèles sous-jacents, les évolutions s'étaleront toutefois sur le temps long.

DOCUMENT

7. Prolongements

Le document présent porte essentiellement sur les variables climatiques qui seront utilisées dans les simulations du Bilan prévisionnel pour la construction des scénarios à horizon 2050.

Il constitue un document de travail évolutif, qui pourra être complété en fonction de l'avancée des travaux et des échanges menés avec les parties prenantes au sein du groupe de travail sur la base climatique.

La suite des travaux du groupe de travail sera orientée sur la modélisation des fonctions de transfert permettant de calculer des données énergétiques (consommation et production d'électricité) à partir de ces différentes variables climatiques. Deux autres réunions seront ainsi organisées au 2e semestre 2019 et porteront sur ces fonctions de transfert :

- Une réunion sur la modélisation des appels de puissance et de leur sensibilité aux variables climatiques, qui sera organisée en lien avec le groupe de travail sur la consommation d'électricité ;
- Une réunion sur la modélisation de la production, notamment production d'origine renouvelable, en fonction des données climatiques et de l'évolution des technologies.

DOCUMENT DE TRAVAIL