



GT1 Climat

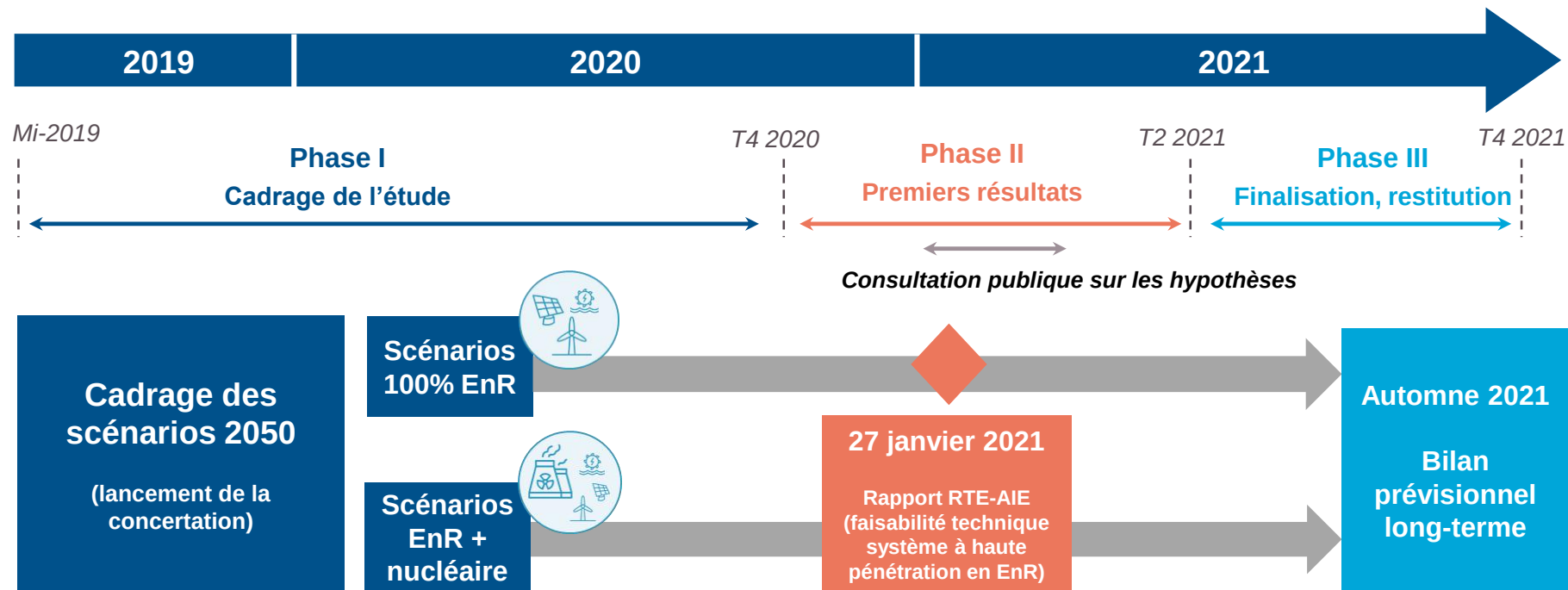
**Réunion n°4 : effets du climat sur la production
électrique d'origine nucléaire et thermique**

10 mars 2021



Rappel du cadrage et des précédentes réunions du groupe de travail

Rappel du calendrier de l'étude prospective à l'horizon 2050



Rappel des éléments de cadrage sur les scénarios 2050

- Cadrage général des prochains scénarios de long terme :
 - ① articulé autour de l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 et des trajectoires de la SNBC
 - ② avec des trajectoires (pas uniquement le point d'arrivée)
 - ③ en intégrant les conséquences du changement climatique
 - ④ avec une modélisation complète du système à l'échelle européenne, et avec une représentation des couplages entre l'électricité et les autres vecteurs (gaz, chaleur...)
- Une description des scénarios selon 4 axes principaux :
 -  Description technique du système
 -  Description des enjeux environnementaux
 -  Description économique
 -  Description des enjeux sociétaux (implication sur les modes de vie)

Rappel du dispositif de concertation renforcé

Lancement d'une large concertation sur la scénarisation et les hypothèses des scénarios

pour cibler les points d'intérêt du débat public, renforcer la pertinence et la légitimité des scénarios, et accroître la transparence sur les hypothèses

La CPSR

Instance de cadrage stratégique des travaux et d'arbitrage des orientations

Des groupes de travail

Instances de partage des hypothèses et résultats au niveau technique

Une consultation publique

Appel à contribution qui viendra enrichir les échanges initiés en groupes de travail



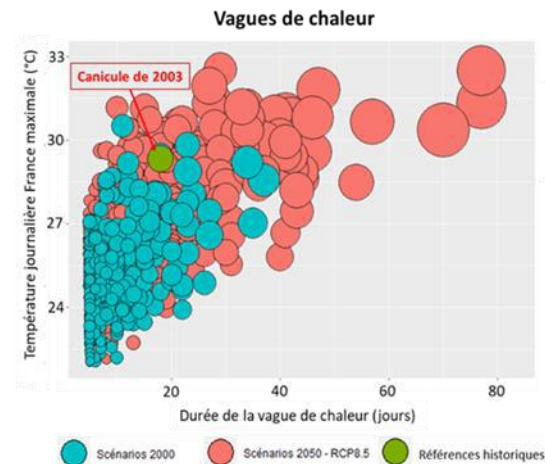
Exemples :

- **GT1 « référentiel climatique »**
- GT2 « consommation »
- GT3 « cadrage et scénarisation »
- GT4 « interfaces électricité et autres vecteurs »
- GT5 « dynamiques sociétales »
- GT6 « environnement »
- GT7 « flexibilités »
- GT8 « fonctionnement du système électrique »
- GT9 « coûts »

4^e réunion aujourd'hui

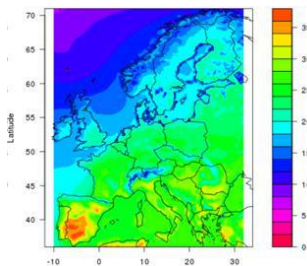
Le GT1 porte sur la prise en compte de l'évolution du climat dans le fonctionnement du système électrique, à l'horizon 2050

- **Les situations extrêmes jouent un rôle clé dans le dimensionnement du système électrique** : les études de dimensionnement du système électrique doivent pouvoir intégrer la palette des conditions climatiques et leur fréquence, y compris des événements rares (vagues de froid, vagues de chaleur, sécheresses, situations de vent très faible, indisponibilités simultanées de nombreux moyens de production...)
- **Les évolutions du système électrique ont tendance à accroître sa dépendance aux conditions météorologiques** : essor des EnR et des interconnexions (conduisant à accroître les effets du foisonnement et des interdépendances européennes)
- **À horizon 2050, les effets du changement climatique auront une influence notable sur certains paramètres du mix électrique** qu'il convient de prendre en compte : vague de froid, canicule, productible hydraulique et éolien...



① Référentiel climatique

- Présentation de la démarche d'ensemble et de la construction **des référentiels climatiques à l'horizon 2050 (RCP4.5 et RCP8.5)**, réalisée par Météo France
- Principe des « stress-tests climatiques »



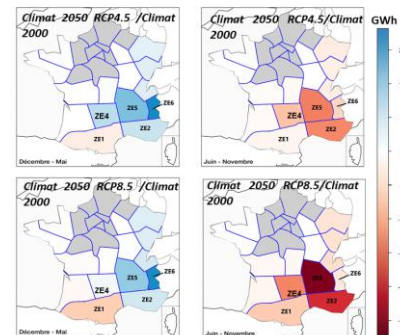
② Production éolienne et photovoltaïque

- Présentation de la **modélisation de la production éolienne et solaire** (fonction de transferts depuis les variables climatiques, calage statistique...)
- Illustration sur les occurrences de vent faible



③ Production hydraulique

- Présentation de la **modélisation du productible hydraulique**
- En première analyse, peu d'impacts du réchauffement sur le productible hydraulique annuel mais des modifications du profil saisonnier d'apports



Enjeux de la 4^e réunion: effets du climat sur la production nucléaire

- **Les installations nucléaires ont et auront besoin d'une source d'eau froide nécessaire au processus de refroidissement** (bord de mer ou de fleuve)
- Les caractéristiques de la source froide (température de l'eau, débit) peuvent affecter la disponibilité et la puissance délivrée par les centrales nucléaires (en particulier pour les centrales en bord de fleuve, plus sensible aux aléas climatiques)
- **Le changement climatique et notamment l'augmentation de la fréquence des canicules** interrogent quant aux effets sur la disponibilité des centrales nucléaires à long terme
 - **Un point d'attention spécifique sur la prise en compte des effets du climat sur la production nucléaire dans la modélisation du système électrique à long terme**

Ordre du jour

- RTE : analyse du parc nucléaire actuel et types d'indisponibilités d'origine climatique
- Présentation EDF: Nucléaire et changement climatique
- RTE : modélisation des effets du climat sur la disponibilité du nucléaire à l'horizon 2050



2

Les indisponibilités nucléaires d'origine climatique

Rte Le parc nucléaire en France et son refroidissement

- Une place importante dans le mix électrique actuel :
 - 56 réacteurs en service, capacité installée totale de **~61,4 GW**,
 - autour de **70% de la production électrique** totale en France
- Trois paliers techniques (2^e génération) standardisés + un réacteur de 3^e génération en construction (EPR) :

Palier
« 900 MW »

Palier
« 1300 MW »

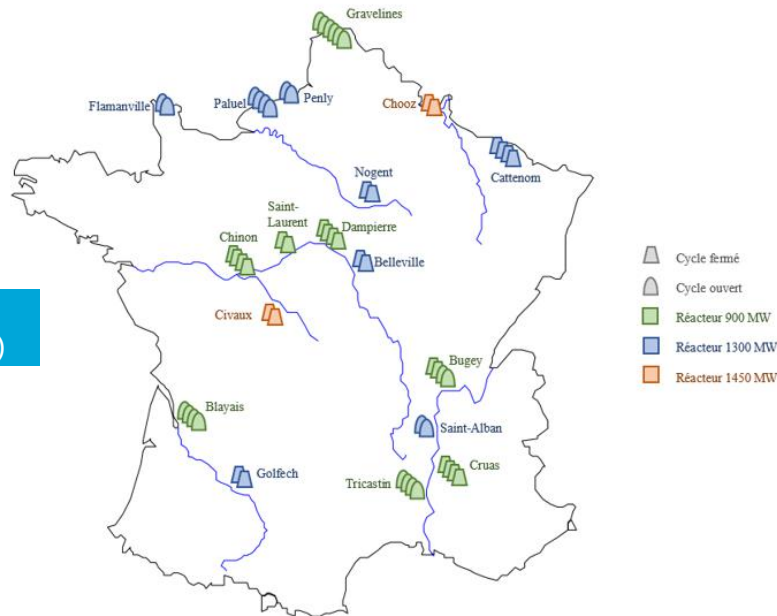
Palier
« 1450 MW »

EPR
(1650 MW)

- Au-delà des paliers de puissance, les réacteurs se distinguent par leur installation de refroidissement:

Cycle ouvert

Cycle fermé



Deux types d'impacts du climat sur la disponibilité des centrales :

- 1) **Enjeu technique : le rendement est influencé par la température de la source froide** (eau de mer, de fleuve ou de rivière ou air ambiant via un dispositif aéroréfrigérant → conduit à des légères variations de puissance maximale)
- 2) **Limites réglementaires encadrant le refroidissement des centrales et l'impact sur les milieux aquatiques**, notamment pour les centrales en bord de fleuve ou rivière, pouvant conduire jusqu'à l'arrêt de réacteurs sur certaines périodes

Rte Les limites réglementaires susceptibles d'engendrer des indisponibilités climatiques.

- Trois types de limites réglementaires :

- 1 Une température maximale** du fleuve en aval de la centrale : *exemple 28°C pour Golfech*
- 2 Un seuil maximal d'échauffement** du milieu en aval de la centrale : *exemple +3°C en été à Saint Alban.*
- 3 Un seuil réglementaire de prélèvement maximal** éventuellement complété par **des seuils de débits minimums** : *exemple 20 ou 22 m³/s pour Chooz*

- La première limite est susceptible d'apparaître essentiellement lors des **périodes de canicule**
- Les deux autres sont susceptibles d'apparaître en cas de **sécheresse, pendant des périodes d'étiage** du cours d'eau

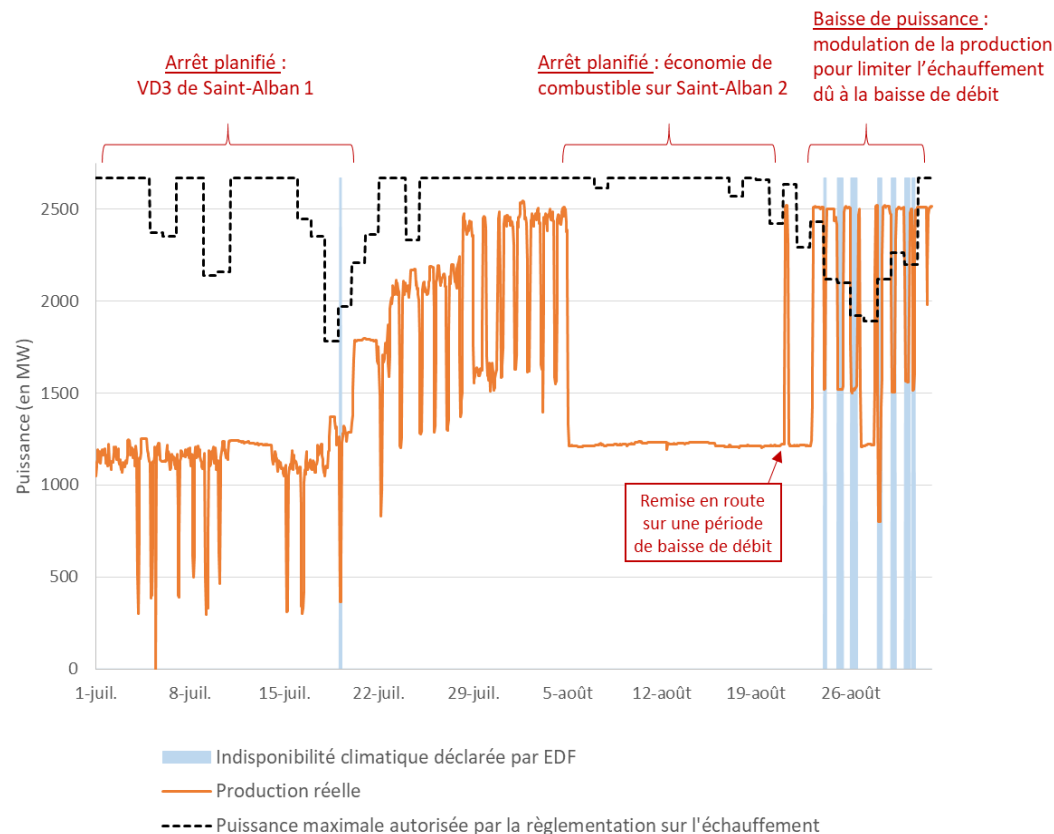
Ces 3 exemples d'atteintes des seuils sont détaillés dans le document de cadrage

Centrale	Limites de rejets thermiques	Limites de prélèvement et de débit
Golfech	$T_{\text{aval}} \leq 28^{\circ}\text{C}$ du 1/10 au 31/5 : $\Delta T \leq 2^{\circ}\text{C}$ Du 1/6 au 30/9 : $\Delta T \leq 1.5^{\circ}\text{C}$	Prélèvement $\leq 9.8\text{m}^3/\text{s}$ Evaporation $\leq 2.4\text{m}^3/\text{s}$ Compensation du 1/7 au 31/10 si $D_{\text{aval}} \leq 85\text{m}^3/\text{s}$ Restriction possible si $D \leq 49\text{m}^3/\text{s}$
St Alban	Du 1/10 au 15/5 : $\Delta T \leq 4^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{aval}} \leq 26^{\circ}\text{C}$ Du 16/5 au 30/9 : $\Delta T \leq 3^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{aval}} \leq 28^{\circ}\text{C}$	Prélèvement (puis restitution) $\leq 140\text{m}^3/\text{s}$
Chooz-B	Si $T_{\text{amont}} \leq 26^{\circ}\text{C}$: $\Delta T \leq 3^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{aval}} \leq 28^{\circ}\text{C}$ Si $T_{\text{amont}} > 26^{\circ}\text{C}$: $\Delta T \leq 2^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{aval}} \leq 30^{\circ}\text{C}$	Prélèvement $\leq 7\text{ m}^3/\text{s}$ Evaporation $\leq 2.1\text{m}^3/\text{s}$ Si le débit aval est compris entre 20 et 22m³/s en moyenne sur 12 jours : évaporation $\leq 5\%$ du débit Si le débit aval est inférieur à 20m³/s en moyenne sur 12 jours ou à 14m³/s en moyenne journalière : évaporation = 0

Un exemple d'indisponibilité liée aux seuils d'échauffement en cas de débit trop faible : la situation de St Alban en juillet/août 2017

Le **débit du Rhône est faible** autour de mi-juillet, mi-août et fin août (au minimum 285 m³/s, en moyenne 445 m³/s)

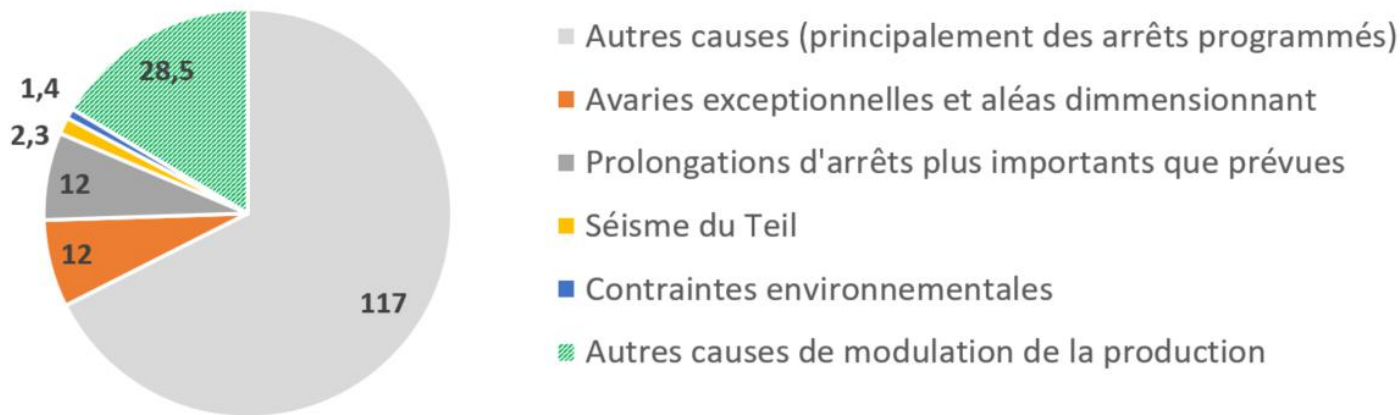
- Mi-juillet et mi août, la baisse de débit n'est **pas contraignante** du point de vue réglementaire (**1 réacteur est déjà à l'arrêt** pour une autre cause)
- Fin août, lors de la **remise en route du 2ième réacteur**, le fonctionnement à pleine puissance de la centrale est supérieure à la limite autorisée par le débit → **Indisponibilités climatiques**.
- L'échauffement réglementaire de la centrale **s'évalue sur 24 heures**, ce qui permet à l'exploitant de respecter la valeur limite en **modulant la production dans la journée**



Les indisponibilités climatiques représentent globalement un faible volume d'énergie « perdue »

Sur l'historique « transparence » (2015 à 2020), les indisponibilités pour raisons climatiques :

- s'élèvent en **moyenne à 1,4 TWh/an** (inférieurs à 0,4 % de la production nucléaire annuelle),
- atteignent **jusqu'à 3 TWh en 2020**,
- **restent faibles** au regard des autres causes d'indisponibilités ou de modulation.

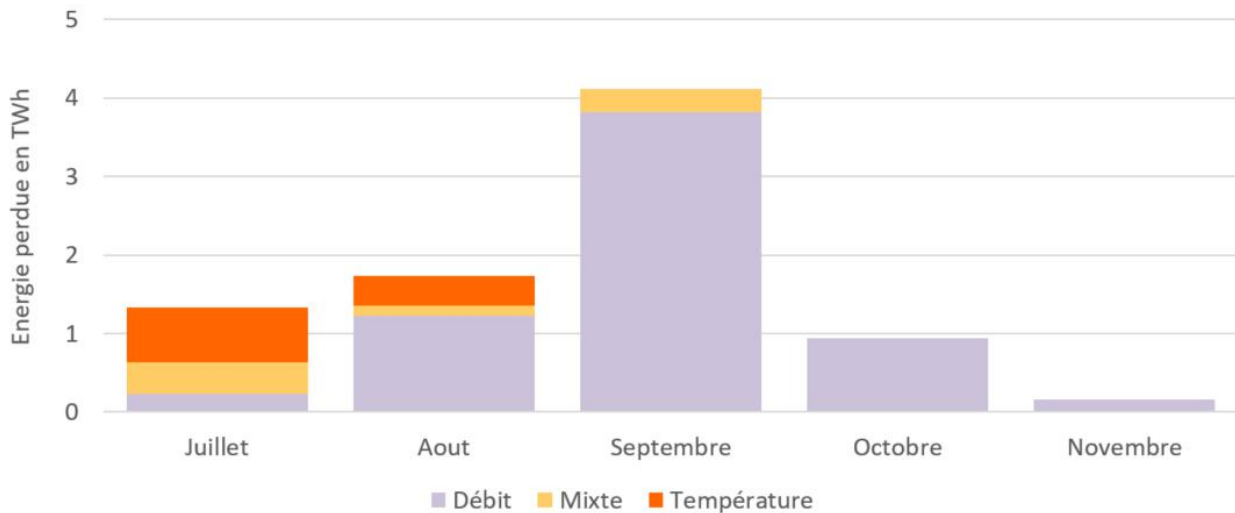


Répartition des indisponibilités et modulations du parc nucléaire par cause en 2019, en TWh

Ces indisponibilités climatiques apparaissent en été et automne, surtout pour des débits faibles,

Les énergies perdues sont :

- plus **importantes en septembre** (50%) puis en **août** (21%) et en **juillet** (16%)
- et plus souvent **liées au débit** (71%) puis à la température (16%) et aux deux (13%).

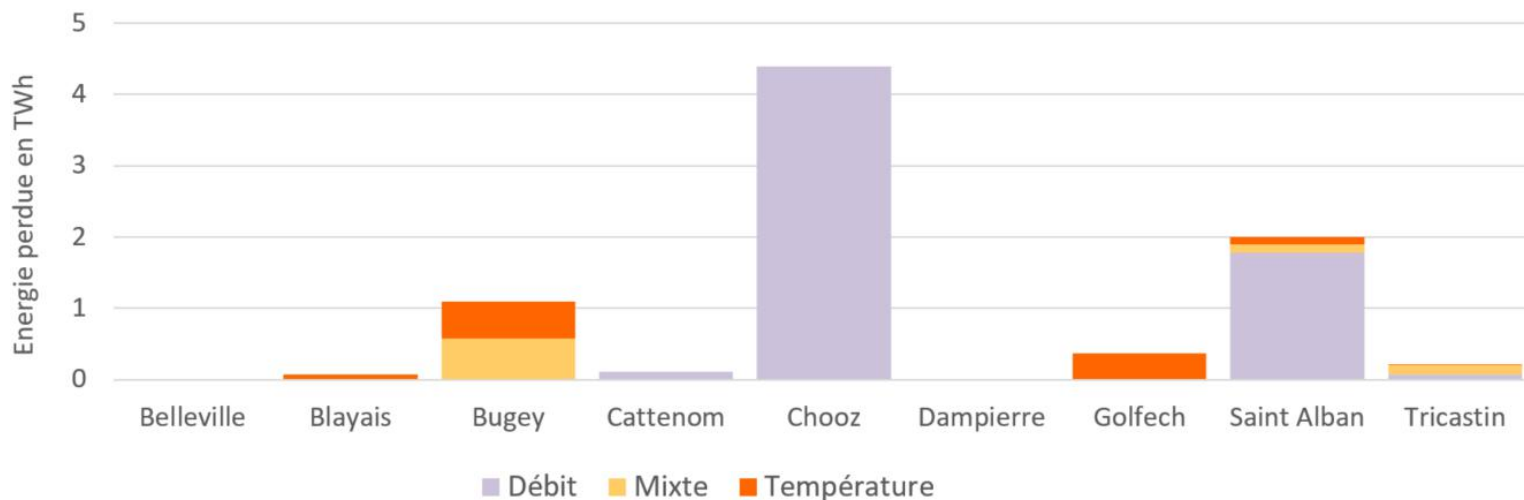


Energie perdue par mois et par cause la plus probable (de 2015 à 2020)

...elles se concentrent sur quelques centrales,

9 des 14 centrales fluviales ont connu des indisponibilités climatiques entre 2015 et 2020, notamment :

- **Chooz** (4,4 TWh, 62 jours en moyenne par réacteur) pour cause de débit,
- **St Alban** (2 TWh, 44 jours en moyenne par réacteur) surtout pour cause d'échauffement,
- **Bugey2&3** (1,1 TWh, 34 jours en moyenne par réacteur), surtout pour cause de température.

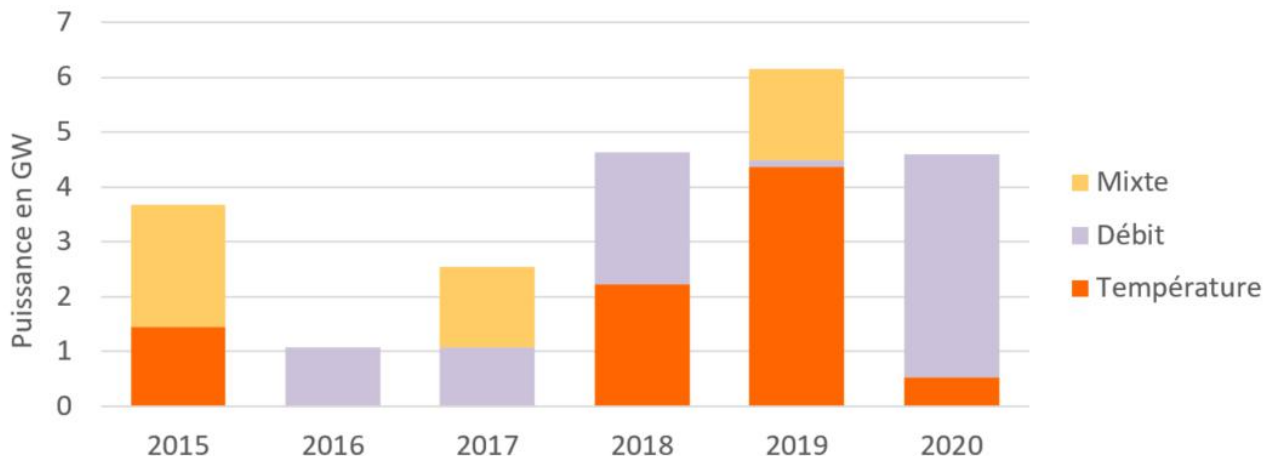


Energie perdue par cause de 2015 à 2020 en fonction des centrales

... mais peuvent représenter plusieurs GW perdus simultanément

De 2015 à 2020, les pics de puissance simultanément indisponibles :

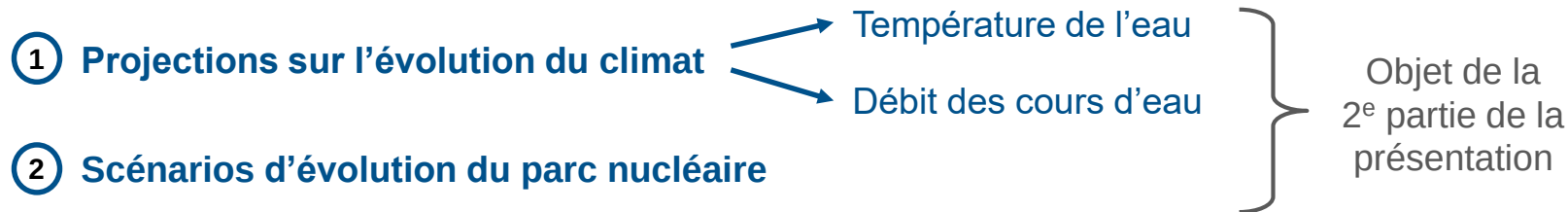
- **s'élèvent entre 1 et 6 GW**, soit jusqu'à **10 % de la puissance nucléaire installée** et également près de **10% du pic de consommation estival** (cf. canicule de juillet 2019),
- sont induits aussi bien par des **températures élevée** que par des **débits faibles**.



Maxima annuels de puissance indisponible simultanément en fonction des causes

Des analyses à prendre en compte dans les projections à 2050 et dans la simulation des scénarios

- A l'heure actuelle, les indisponibilités climatiques du parc nucléaire ne posent généralement pas de difficultés majeures pour l'équilibre offre-demande, les pointes estivales étant beaucoup moins contraignantes que les pointes hivernales (cf. BP et études saisonnières)
- A long terme, la transformation du mix électrique et du climat peut induire de nouveaux enjeux qu'il convient de représenter dans la simulation des scénarios prospectifs :



- Enfin, il s'agira de modéliser l'ensemble des paramètres de l'équilibre offre-demande afin de mesurer quelles sont les périodes et configurations réellement dimensionnantes pour le système électrique à long terme



Présentation EDF



Questions / Réponses

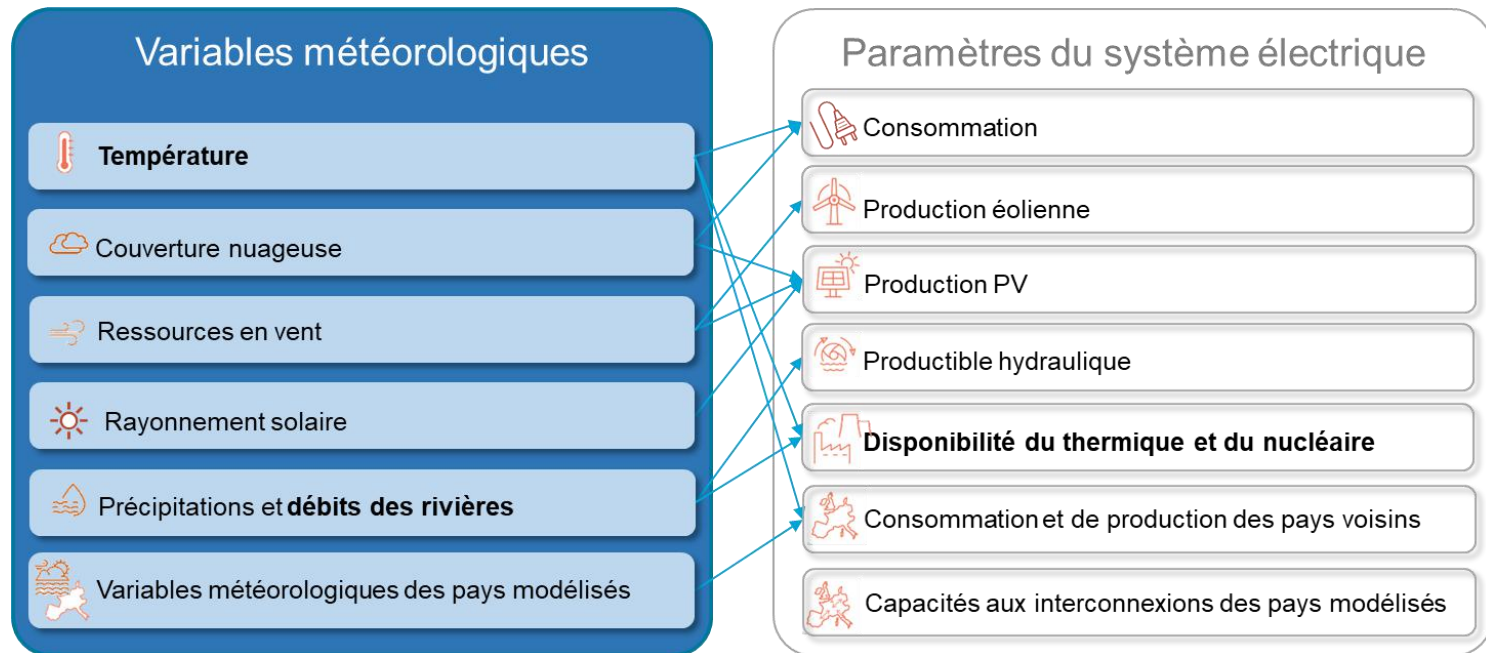


3

La modélisation des indisponibilités climatiques du nucléaire

Des données issues des référentiels climatiques pour modéliser le fonctionnement du système à long terme

- **Trois principaux référentiels climatiques utilisés** : 2000, 2050-RCP4.5, 2050-RCP8.5
- Plusieurs types de variables climatiques issues du modèle de Météo France :



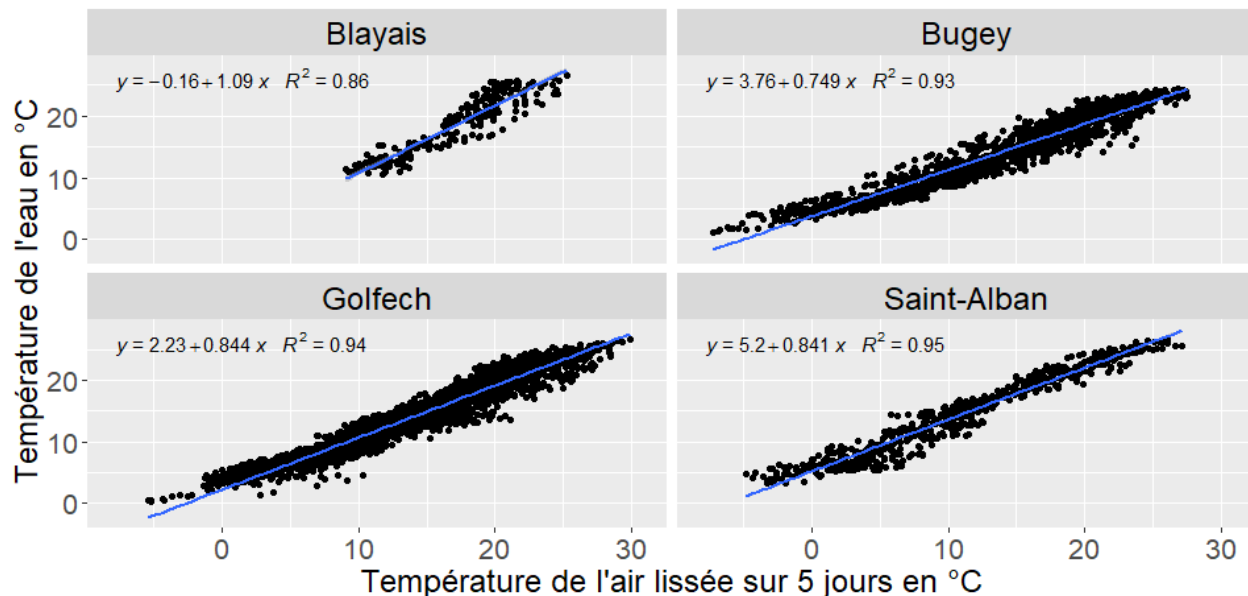
Plusieurs défis pour la modélisation des effets du climat sur la disponibilité du nucléaire

1. Les bases climatiques utilisées ne contiennent que les températures d'air, pas les températures d'eau des fleuves et rivières
 2. Les débits modélisés sont des débits naturels (non influencés), qui ne tiennent pas compte de l'utilisation de l'eau des fleuves par les différentes activités humaines
- **Besoin d'utiliser des modèles approchés pour construire / recalculer les données projetées de température de l'eau et de débits**
- ❖ Une difficulté supplémentaire vient du fait que les données historiques disponibles (température d'eau et débit, utiles pour caler les modélisations) sont assez limitées

Température de l'eau : relation entre la température des sources froides et celle de l'air

Analyse des températures des fleuves au niveau des centrales nucléaires sur la période 2000-2019

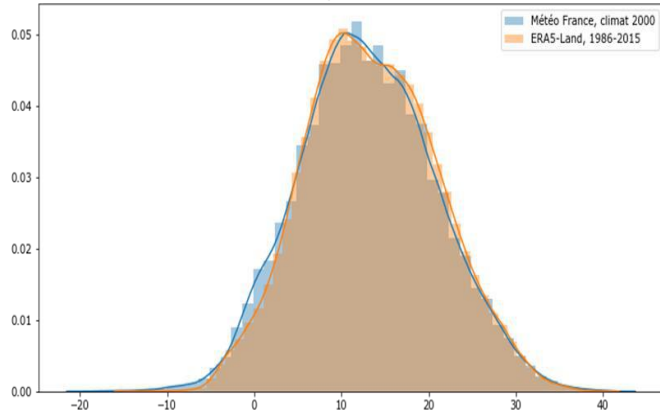
- Les bases climatiques utilisées comportent les températures de l'air (localisées) mais pas celles des sources froides
- Pour y remédier, utilisation d'un modèle simplifié : la moyenne de la température de l'air sur 5 jours apparaît bien corrélée avec la température de l'eau de la source froide



Température de l'eau : relation entre la température des sources froides et celle de l'air

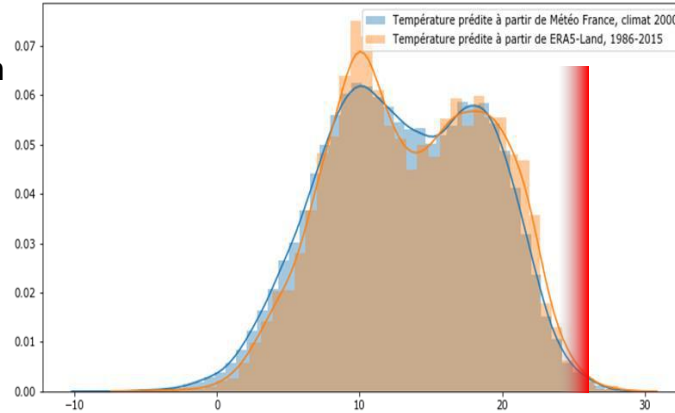
Application des modèles issus des températures mesurées à des ré-analyses et aux bases climatiques.

- En déclinant ces modèles à des **ré-analyses et aux bases climatiques de Météo-France**, qui comportent des distributions plus riches, les distributions de températures élevées convergent bien



Distribution de la température (°C) de l'air

Golfech



Distribution de la température (°C) de l'eau en amont

Le seuil réglementaire de température max (28°C en aval) induirait une température seuil en amont légèrement inférieure

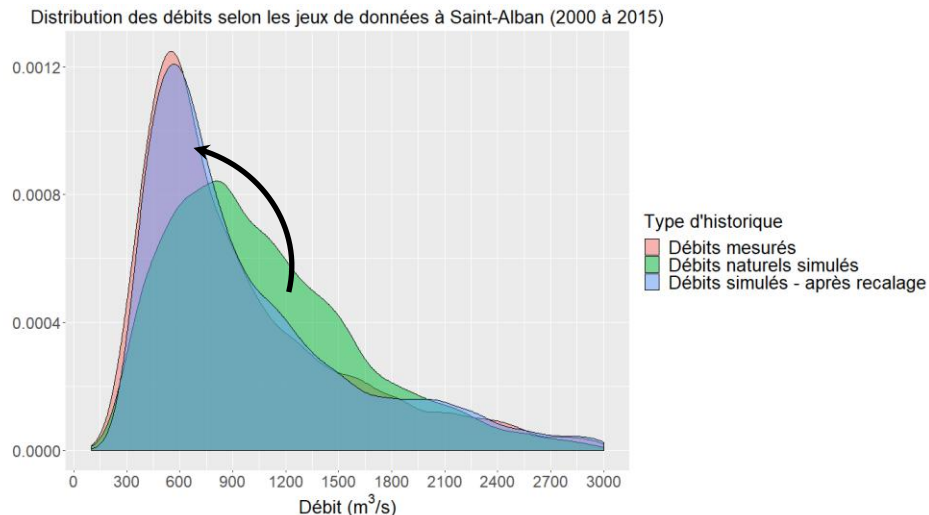
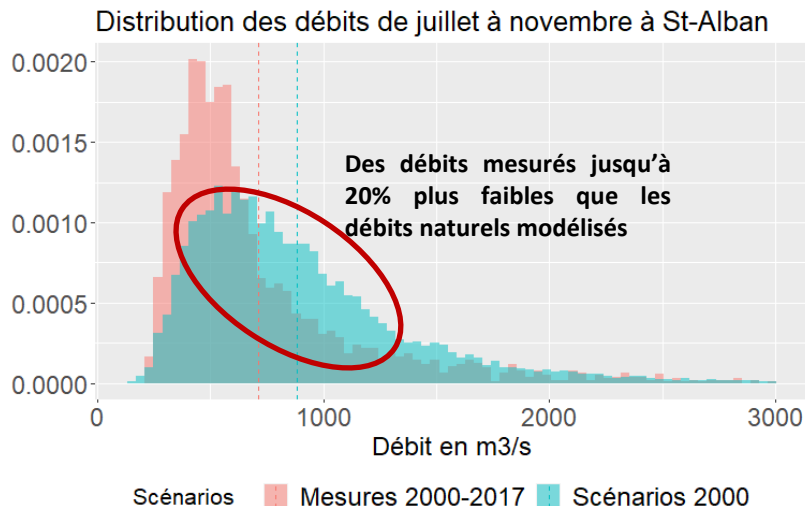
- Modèle **préliminaire**, besoin de mieux le caler sur les températures hautes et de prendre en compte le réchauffement par la centrale
- Une **difficulté** est de disposer de **suffisamment de données** (t°air et t°eau idéalement pendant et autour d'épisodes d'indisponibilités climatiques pour cause de température trop élevée)

Débits : relation entre débits naturels et débits mesurés

- Nos **bases climatiques** comportent des **débits naturels** dont la distribution diffère généralement de celle des **débits mesurés**
- Les causes probables sont des **prélèvements** ou encore l'influence d'ouvrages de **régulation hydraulique**

- Face à des phénomènes **trop complexes à modéliser explicitement**, RTE propose de recourir à une méthode de **correction statistique** de débit « CDFTt » :

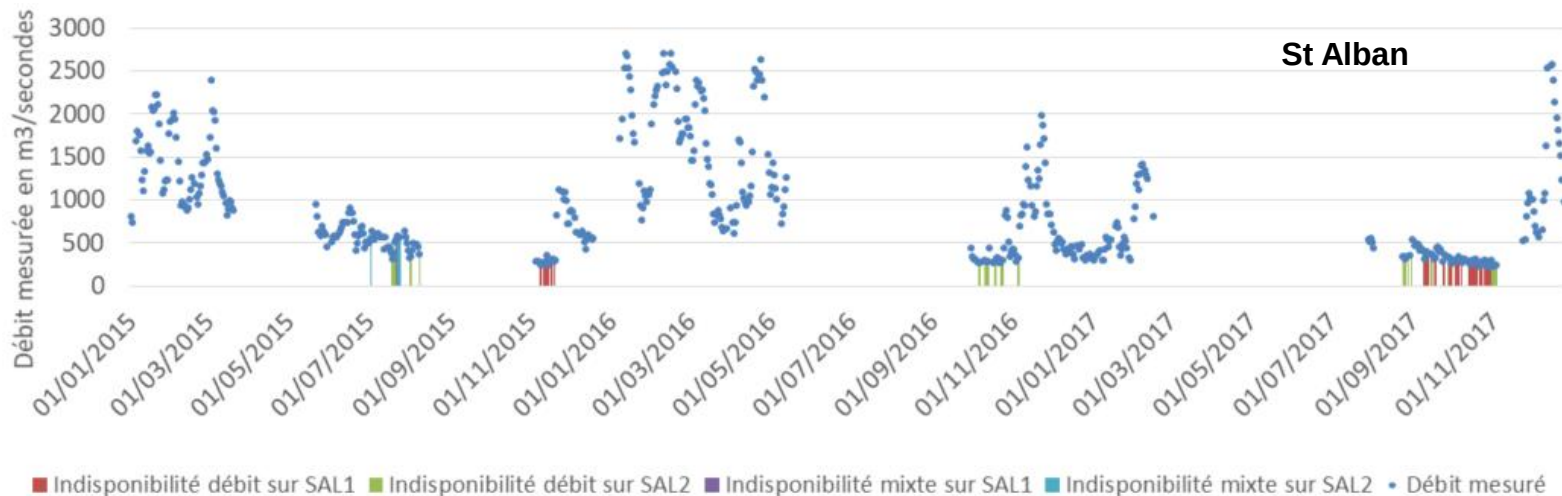
- Entraînée sur des ré-analyses et des débits mesurés
- Appliquée ensuite sur les débits modélisés



Débits : relation entre contraintes d'échauffement et débits faibles

Evènements constatés à Saint-Alban de 2015 à 2017

- Parmi les jours où aucun réacteur n'était initialement en maintenance, ceux où les débits étaient faibles sont souvent affectés par des indisponibilités climatiques,
- Ces périodes surviennent en été/automne, en cohérence avec le débit théorique calculé en fonction de l'échauffement

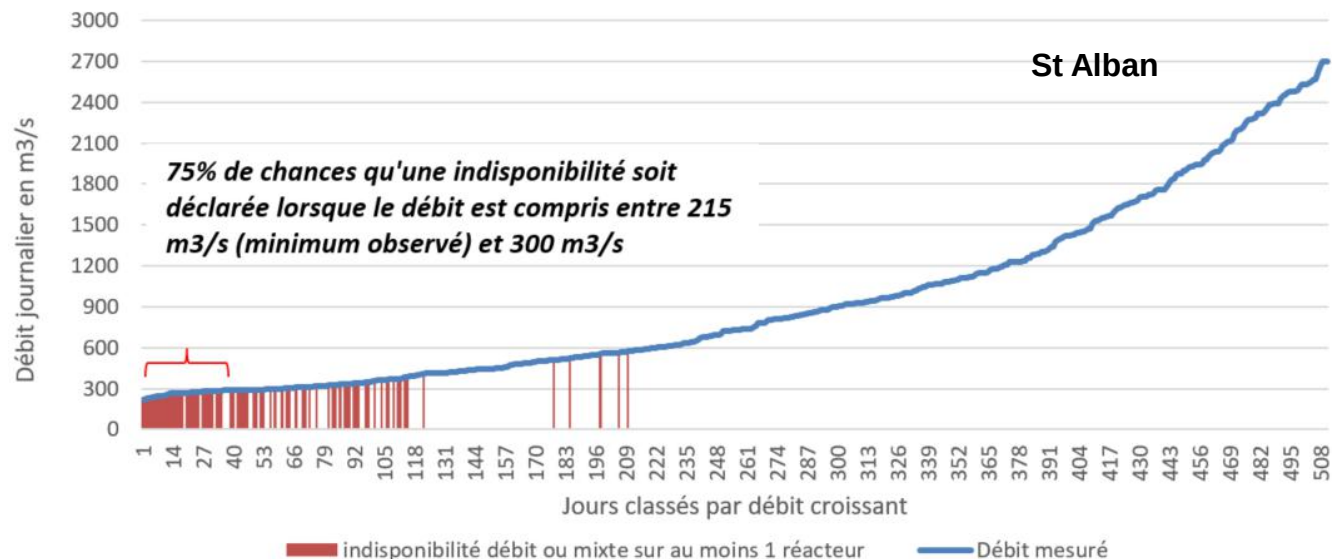


Indisponibilités climatiques déclarées sur la centrale de Saint-Alban et débits mesurés durant les périodes où aucun réacteur n'était initialement en maintenance de 2015 à 2017

Débits : relation entre contraintes d'échauffement et débits faibles

Evènements constatés à Saint-Alban de 2015 à 2017

- En classant ces jours par débits croissants, des probabilités d'indisponibilité peuvent être établies,
- En dessous de 250 m³/s, une indisponibilité a systématiquement été déclarée sur au moins une tranche



Indisponibilités climatiques déclarées sur la centrale de Saint-Alban et monotone de débits mesurés durant les périodes où aucun réacteur n'était initialement en maintenance de 2015 à 2017



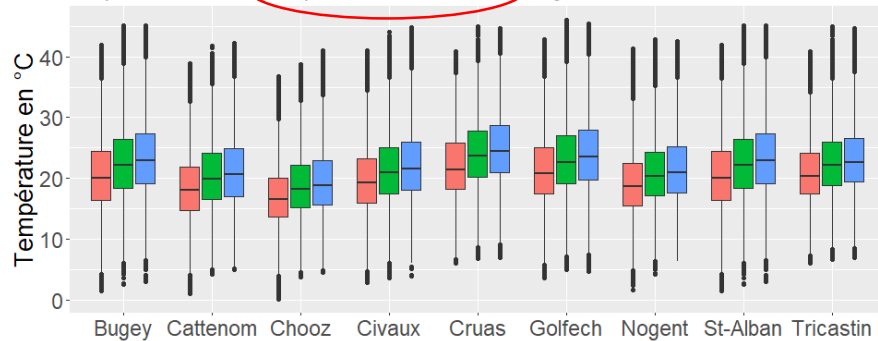
4

Evolution des indisponibilités climatiques du nucléaire en climat futur

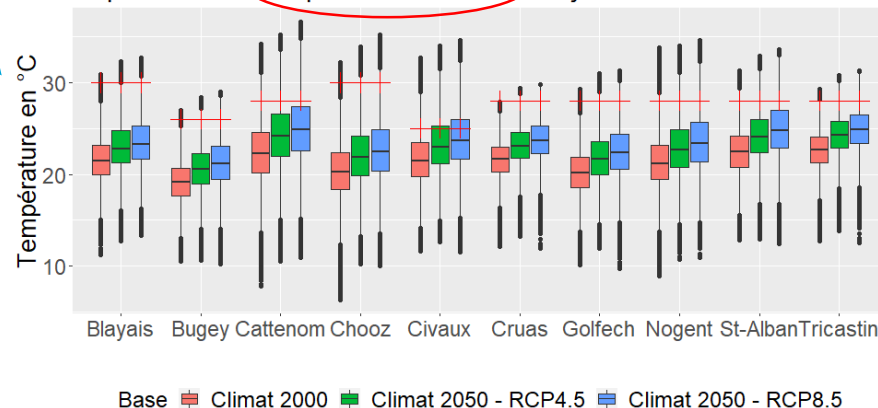
Les températures de l'air augmentent d'aujourd'hui à 2050 ce qui entraîne une hausse des températures de l'eau...

- Risque d'indisponibilité climatique liée à la température concentré sur **juillet et août**
- La hausse des températures de l'air entraîne une hausse des températures de l'eau des sources froides de l'ordre de
 - **+1,7 °C** pour le climat 2050 – RCP4.5
 - **+2,3 °C** pour le climat 2050 – RCP8.5

Répartition des températures de l'air sur juillet et août

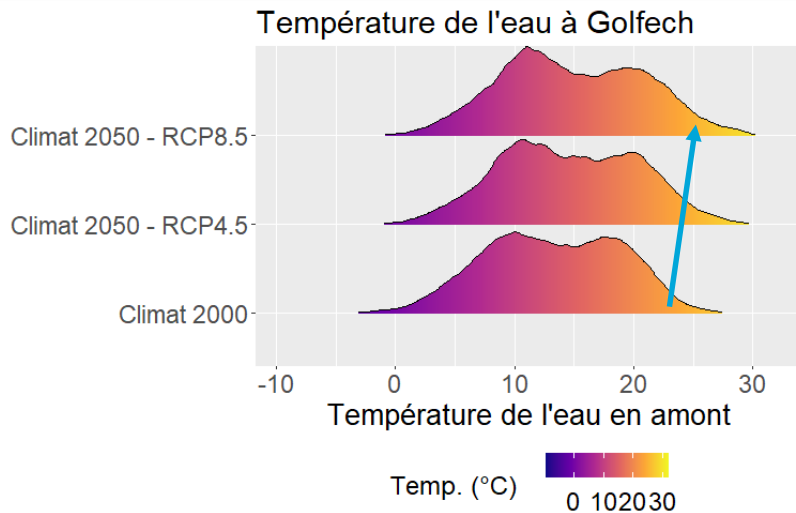


Répartition des températures de l'eau sur juillet et août



Les hausses de températures de l'eau pourraient alors se traduire en indisponibilités plus fréquentes

- Le risque d'indisponibilité lié à la température devrait donc augmenter progressivement d'ici 2050 (ex : env. x2 pour Golfech d'après les calculs préliminaires), dans l'hypothèse d'un parc inchangé
- Des incertitudes de modélisation subsistent sur :
 - le calage précis des températures de l'eau en amont,
 - l'effet de l'échauffement de la centrale,
 - le niveau des seuils limites à horizon 2050,
 - et plus généralement la structure du parc.
- Par ailleurs, d'autres évolutions techniques (sur les systèmes de refroidissement) ou organisationnelles (placement des arrêts programmés) pourraient modérer cette augmentation d'indisponibilités.



Evolution des températures de l'eau modélisée à partir de la température de l'air (avant calage fin) au niveau de la centrale de Golfech en fonction des référentiels climatiques

Des débits modélisés qui tendent diminuer d'ici 2050

Évolution à long terme des débits des deux centrales les plus affectées sur la période 2015-2020

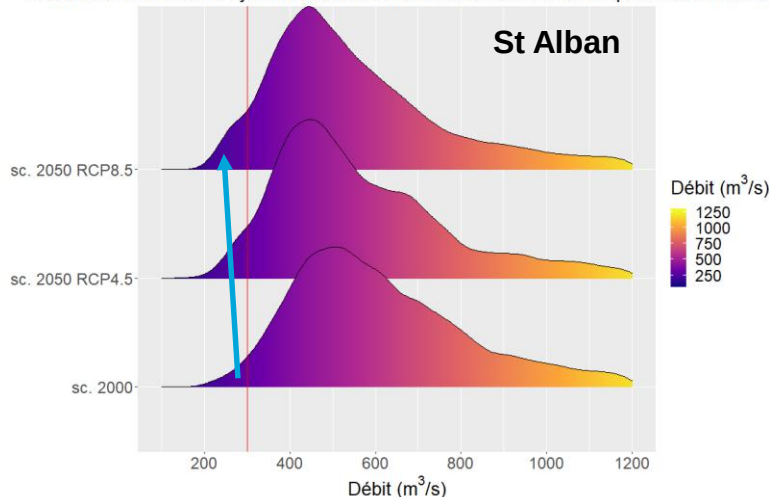
St Alban (2 TWh perdus sur 2015-2020 sur 2015-2020) :

- Cycle ouvert (comme 4 réacteurs à Blayais, 4 à Tricastin, et 2 des 4 de Bugey)
- Débit minimal principalement contraint par des seuils d'échauffement.
- Serait affectée dans le climat 2050 RCP 8.5 par des débits faibles plus fréquents, **par exemple x1,7 pour la fréquence de débits < 425 m³/s**

Chooz (4,4 TWh perdus sur 2015-2020 sur 2015-2020) :

- Cycle fermé (comme 4 réacteurs à Cattenom, 2 à Nogent, 4 à Chinon, 2 à Saint-Laurent, 4 à Dampierre, 2 à Belleville, ...)
- Débit minimal principalement contraint par des seuils réglementaires
- **La fréquence des débits faibles, inférieurs à 22 m³/s augmenterait d'un facteur d'environ 2** dans le climat 2050-RCP 8.5

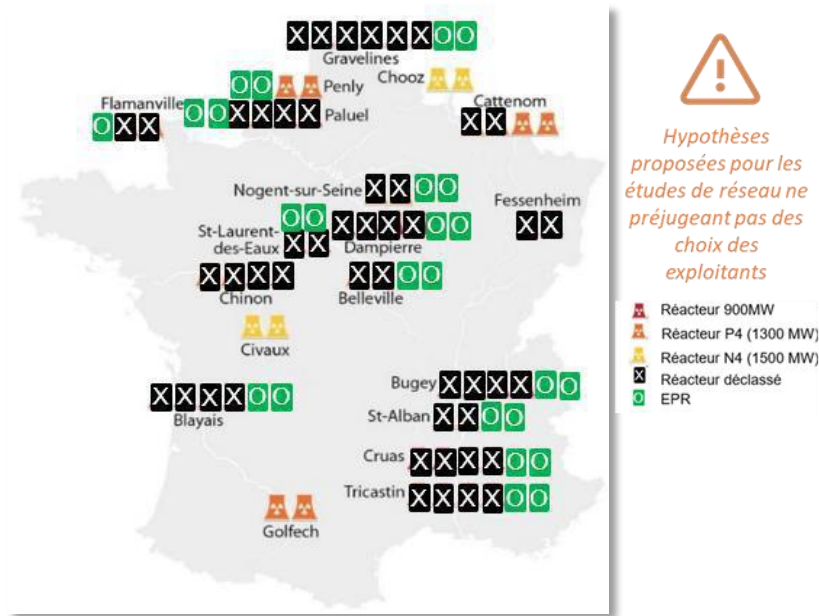
Distribution des débits de juillet à octobre en fonction des bases climatiques à Saint-Alban



Des évolutions du parc nucléaire à prendre en compte

Localisation & technologie de refroidissement

- L'évolution du parc nucléaire modifie la puissance thermique à évacuer vers le cours d'eau :
 - **évolution de la puissance installée sur chaque site** (déclassement, nouveaux EPR éventuels)
 - évolutions techno : installation d'EPR nécessairement en **cycles fermés**, là où certains réacteurs existants sont en cycle ouvert (ex : Tricastin, Bugey)
- Des évolutions possibles contrastées selon les scénarios et les sites concernés :
 - **à la baisse** (en cas de réduction de la puissance nominale du site et/ou passage du refroidissement en cycle fermé), par exemple à Tricastin
 - **ou à la hausse** (en cas d'augmentation de la puissance nominale d'un site déjà équipé d'aéroréfrigérants), par exemple à Saint Laurent des eaux



Hypothèses proposées pour la localisation du nucléaire dans le scénario N3, en vue des études de réseau



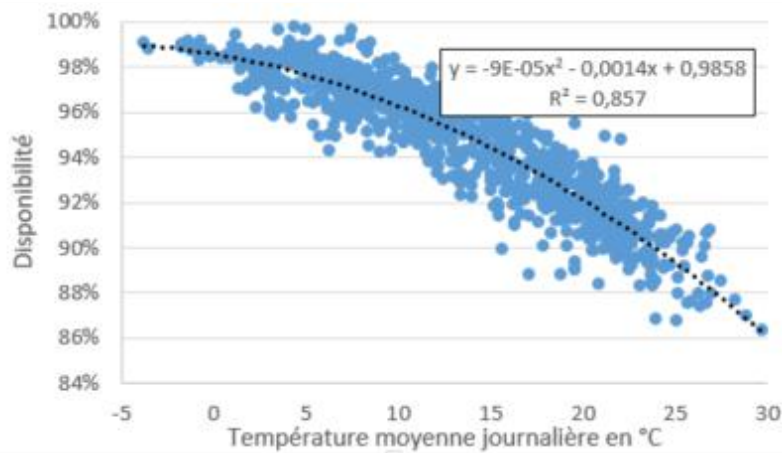
5

Modélisation des effets du climat sur le rendement du thermique

Une thermosensibilité des centrales thermiques à considérer

- La thermosensibilité actuelle observée sur les groupes gaz des principaux pays **réduit la disponibilité en été** de l'ordre de 8% à 13 % par rapport celle constatée en hiver.

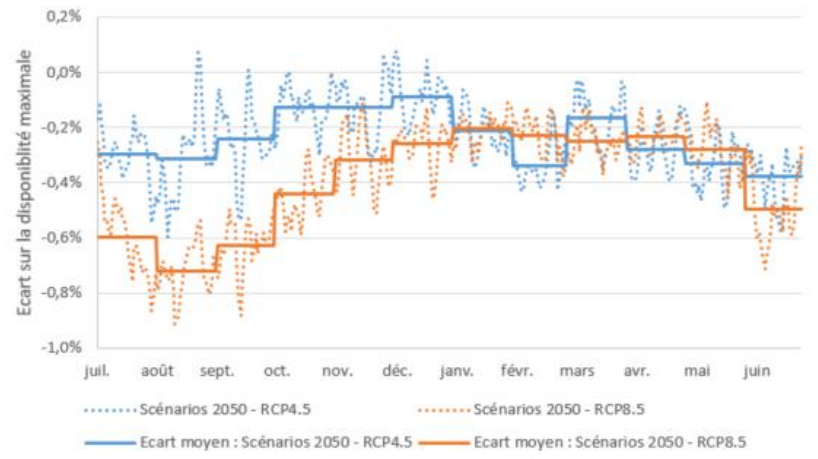
Disponibilité du parc de CCG en France en fonction de la température moyenne de l'air



- L'évolution de la disponibilité des groupes thermiques peut être modélisée en prenant en compte :

- Les augmentations de températures à horizon 2050 (moyenne + 2 °C en août pour RCP 8.5 en France),
- La thermosensibilité des rendements.

Ecart des disponibilités moyennes journalières des scénarios 2050 par rapport aux scénarios 2000 en France



En pratique, les variations de rendements dépendront également des conditions de conversion et/ou de décarbonation de ces moyens thermiques.



6

Synthèse et suite des travaux

- Des effets du climat sur la production nucléaire, observés dès aujourd'hui :
 - Enjeu technique : effets sur le rendement et la puissance max disponible
 - Seuils réglementaires, plus contraignants, pouvant conduire à l'arrêt temporaire de réacteurs : température de l'eau en aval, échauffement de l'eau, prélèvement maximal, voire débits minimums
- Des analyses sur l'historique qui mettent en évidence des « indisponibilités climatiques » du nucléaire :
 - Apparition de contraintes sur tous les étés (mois de juillet-août-septembre principalement), sur divers réacteurs...
 - ... pour des volumes d'énergie qui restent faibles rapportés à la production annuelle...
 - ... mais avec des baisses de production simultanées qui peuvent atteindre plusieurs gigawatts
- Des projections à 2050 qui posent des questions méthodologiques :
 - Modélisation de la température de l'eau et des débits des cours d'eau à partir des données disponibles
- Des premières analyses qui mettent en évidence un effet réel de l'évolution du climat sur le parc nucléaire existant, toutes choses étant égales par ailleurs, et sans leviers techniques ou organisationnels pour l'adaptation des centrales :
 - Multiplication de la fréquence d'indisponibilité climatique par 2 ou 3 dans les premières estimations réalisées
- Des analyses à prolonger en intégrant l'ensemble des évolutions sur la production et la consommation pour identifier les situations réellement contraignantes pour le système électrique : objet de futures présentations

Suite des travaux et prochaines étapes

- Une analyse des situations climatiques contraignantes dans les scénarios 2050 qui fera l'objet de futures présentations en GT
- L'ensemble des supports (présentation et document de cadrage) seront mis à disposition sur le site de la concertation:
<https://www.concerte.fr/content/actualite-de-la-commission-perspectives-systeme-et-reseau>
- Les retours sur les éléments présentés sont les bienvenus
Points de contact : Olivier HOUVENAGEL, Laurent DUBUS
ou via l'adresse mail rte-concerte-bp@rte-france.com



concerte.fr
LE SITE DE CONCERTATION DES CLIENTS DE RTE

- **Calendrier des prochaines réunions pour les autres GT**



Vendredi 19/03 matin (9h-11h) - GT2/3 Consommation de l'industrie et scénarios de réindustrialisation