Groupe de travail « référentiel climatique / effets du climat sur le système électrique »

Réunion du 4 décembre 2019

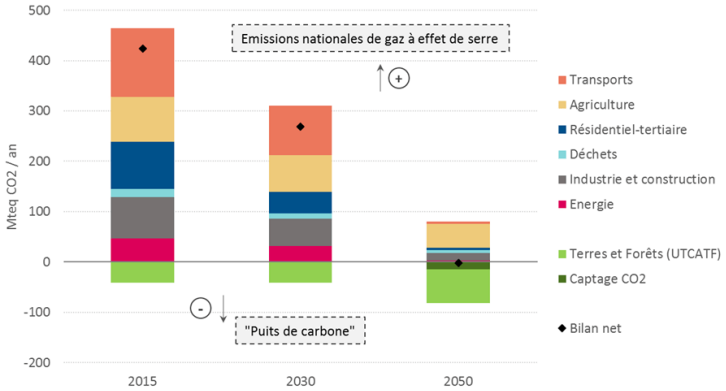
1

Rappel des éléments présentés à la première réunion et premiers retours

Rappel : les prochains scénarios de long terme du Bilan prévisionnel couvriront l'horizon 2050

- Cadrage général des prochains scénarios de long terme :
  - articulé autour de l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 et des trajectoires de la SNBC
  - avec des trajectoires (pas uniquement le point d'arrivée)
  - dans un contexte de changement climatique
- Deux « familles » de scénarios étudiées :
  - avec l'option « nouveau nucléaire » ouverte
  - sans « nouveau nucléaire »
- 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 sociétaux (implication sur les modes de vie)
  - Description des enjeux environnementaux
  - Description économique

Trajectoire d'émissions de gaz à effet de serre (SNBC)



Rappel : une démarche de construction des scénarios de long terme qui s'appuie sur une concertation renforcée

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

Sur les différents éléments de cadrage et hypothèses (prévue au T1 2020)

Groupes de travail lancés ou programmés :

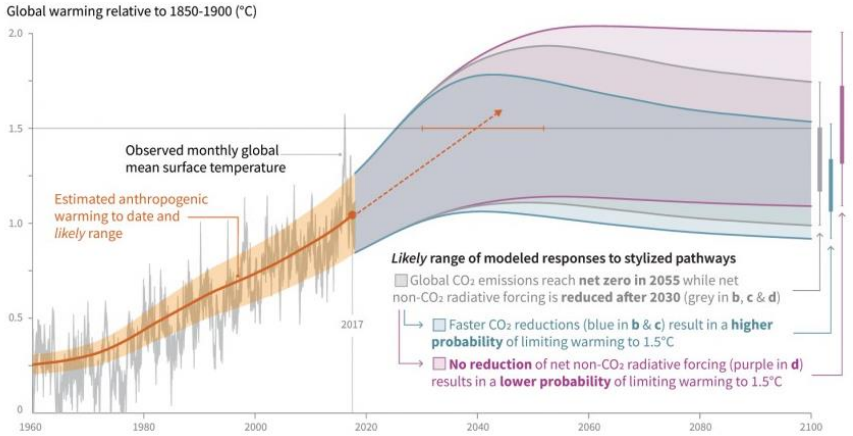
- **GT 1 « référentiel climatique »**
- GT 2 « consommation »
- GT 3 « cadrage et scénarisation »
- GT 4 « interfaces électricité et autres vecteurs »
- GT 5 « représentation des attentes de la société »
- GT 6 « environnement »
- GT 7 « flexibilités »
- GT 8 « fonctionnement du système électrique »
- GT 9 « technologies et coûts »

Un élément de cadrage majeur : la prise en compte des effets du changement climatique sur le fonctionnement du système

- Les travaux du Bilan prévisionnel s'appuient sur une base de 200 chroniques météorologiques, permettent une description détaillée des grandeurs physiques pertinentes pour le fonctionnement du système électrique (température, hydraulicité, vent, etc.) et une prise en compte de leur corrélation.

- **À horizon 2050, les effets du changement climatique auront une influence notable sur certains paramètres du mix électrique** : vague de froid, canicule, productible hydraulique et éolien…

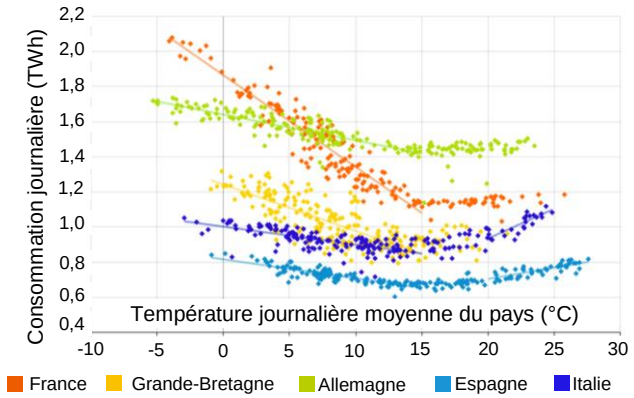
- Afin d'intégrer ces enjeux, les futurs scénarios de long terme utiliseront **une nouvelle base climatique**, issue de 3 ans de travail avec Météo-France et intégrant l'effet du changement climatique.



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 évènements rares (vagues de froid, vagues de chaleur, sécheresses, situations de vent très faible, indisponibilités simultanées de nombreux moyens de production…)

Consommation journalière en fonction de la température (jours ouvrés juil. 2016-juin 2017)



- Dès aujourd'hui, le dimensionnement du parc de production est basé sur un critère statistique, fixé dans la réglementation à une espérance de trois heures de défaillance par an en espérance

  ⇒ RTE a mis en place une approche probabiliste pour évaluer le risque sur la sécurité d'approvisionnement

- 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)

Différentes sources de données climatiques à disposition pour les études d'équilibre offre-demande

Historiques d'observations en stations météorologiques → Les premiers Bilans prévisionnels étaient fondés sur des historiques d'observations météorologiques

Réanalyses climatiques = modélisations atmosphériques guidées par les historiques → La plupart des études de long terme du système électrique se fondent sur des réanalyses climatiques (ADEME, EDF, ENTSO-E, IDDRI-Agora, …)

Simulations issues de modèles climatiques → **La base climatique utilisée pour les Bilans prévisionnels** s'est enrichie au fur et à mesure des éditions, des demandes de RTE et des travaux de Météo-France

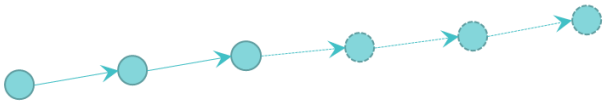
Les scénarios à climat constant : nature des données simulées

2000 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050

Projections climatiques

Une trajectoire d'évolution des variables climatiques pour une trajectoire de forçage radiatif donnée

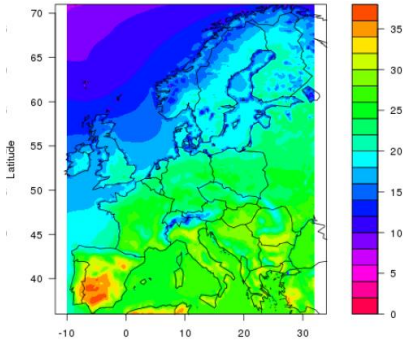
→ Simulations à climat évolutif



Simulations à climat constant

Simulation d'un grand nombre de situations météorologiques possibles sous un même « climat »

Les données des simulations sont disponibles sur plus de 37 000 points couvrant l'Europe



- Les simulations à climat constant permettent de représenter la grande variabilité interne du climat pour les études du Bilan prévisionnel

La première réunion de travail a permis de faire émerger des points d'attention de la part des participants

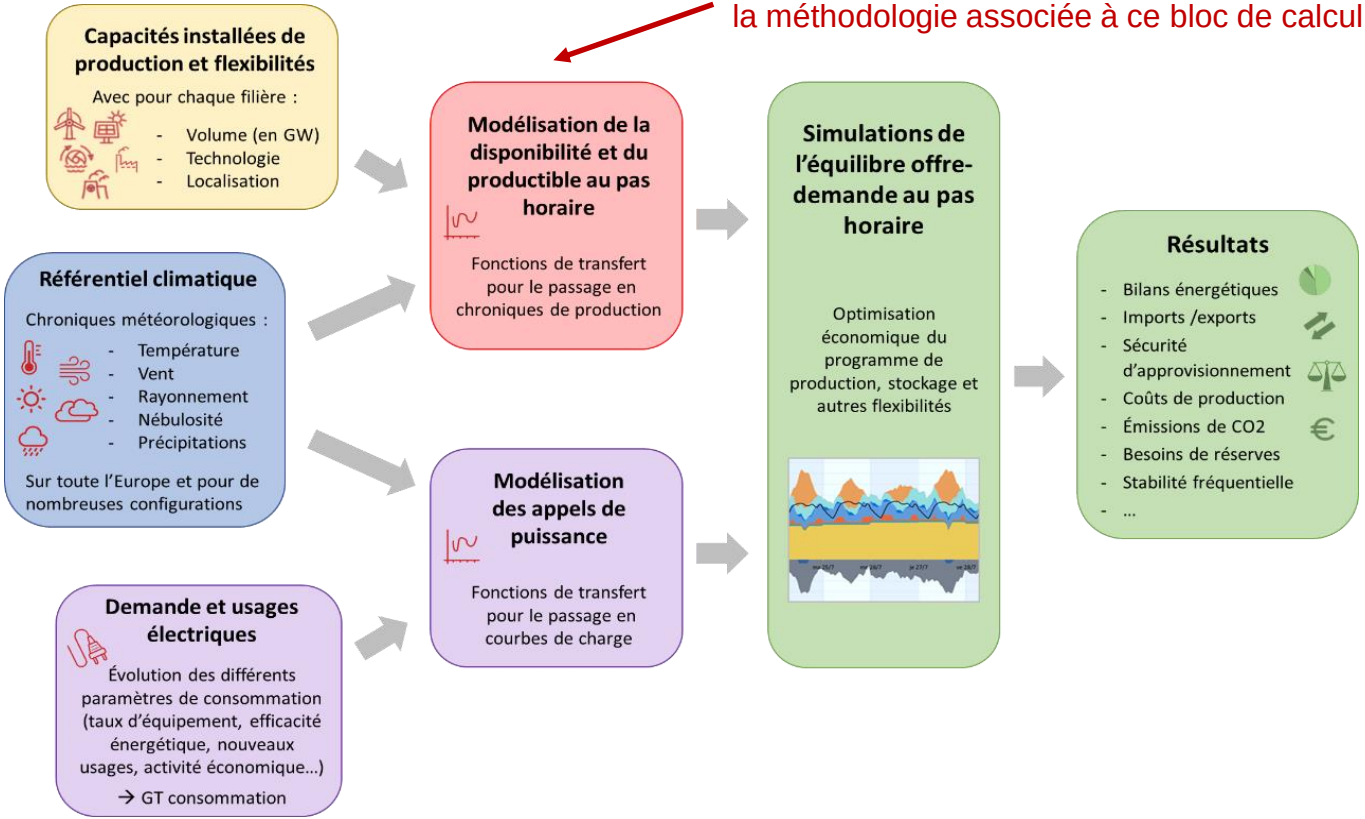
Compatibilité des trajectoires climatiques retenues pour l'analyse avec les ambitions de **l'accord de Paris**	L'analyse pourra être menée sur des climats « moins réchauffés » (scénarios 2025) et s'attachera à évaluer les effets liés spécifiquement à la trajectoire de changement climatique
Évaluation et prise en compte des **incertitudes inter-modèles**	Lancement d'une **analyse approfondie** d'autres référentiels climatiques, en collaboration avec l'IPSL
Traitement des **événements très extrêmes** (vagues de froid et de chaleur s'écartant des autres événements extrêmes)	Des analyses spécifiques seront menées sur les événements « très extrêmes » afin d'isoler l'impact de la prise en compte de ces événements sur le dimensionnement et le fonctionnement du mix
Résilience du système électrique **au-delà des cycles annuels**	Des **simulations seront menées sur plusieurs années climatiques consécutives** afin d'évaluer les enjeux de résilience inter-annuelle

2

Cadre général de l’approche utilisée pour la modélisation de la production éolienne et solaire

La modélisation probabiliste de l'équilibre offre-demande est découpée en plusieurs étapes de calcul

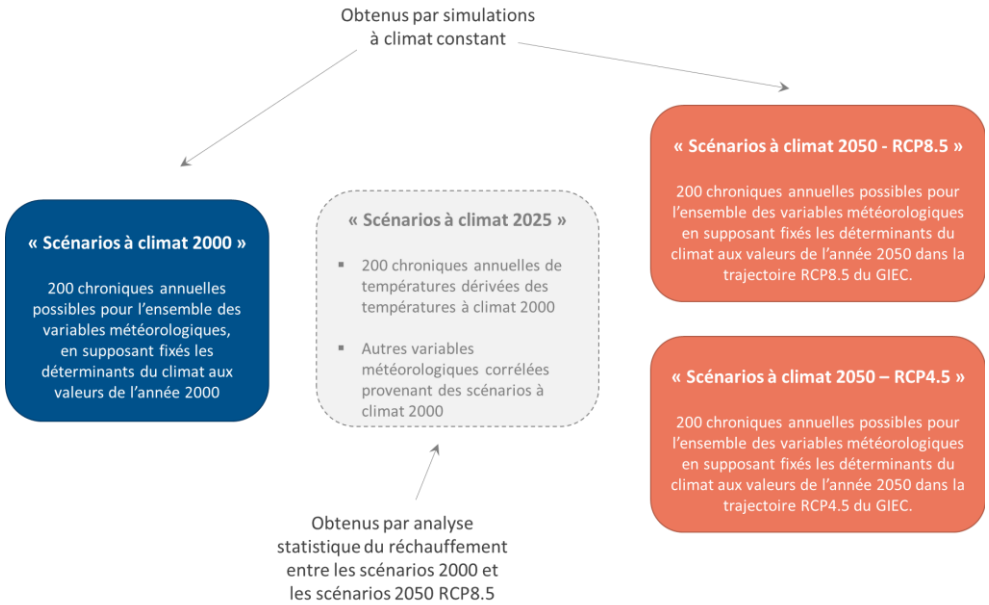
La réunion de ce jour porte essentiellement sur la méthodologie associée à ce bloc de calcul



1 - Référentiel climatique : construit avec Météo France (voir GT précédent), il comprend une large variétés de climats possibles

- Le référentiel climatique, développé sur la base de modélisation physique par Météo France. Il comprend des scénarios à « climat » 2000, 2025 et 2050, avec deux hypothèses d'évolution du climat pour ce dernier horizon.

- Les simulations contiennent 200 chroniques annuelles, permettant de représenter une large palette de situations météorologiques, ainsi que leur fréquence.
- Les données sont au pas horaire, avec une bonne représentation des corrélations géographiques et des corrélations entre variables.
- Le grand nombre de chroniques permet de prendre en compte des événements extrêmes, y compris certains sans équivalent dans le passé.



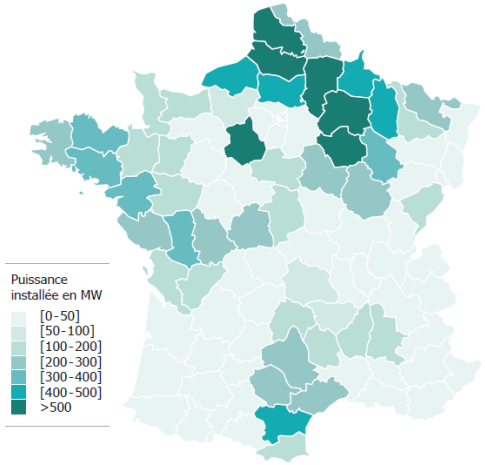
2 - Scénarios de capacités installées : la définition des scénarios nécessitent de spécifier la localisation des installations …

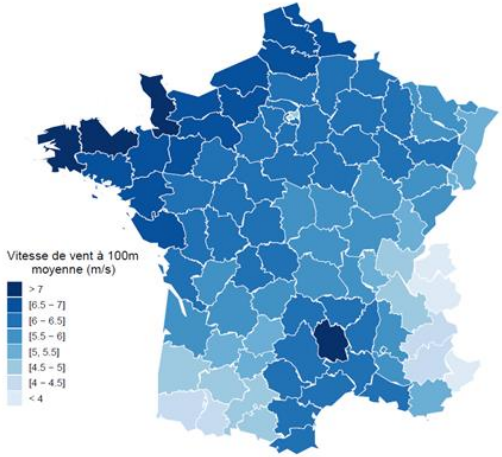
- Les installations de production éolienne et solaire sont réparties de manière inégale sur l'ensemble du territoire français. Les différentes régions sont par ailleurs marquées par des gisements de productible différent.

- Le facteur de charge national (pour l'éolien ou le photovoltaïque) observé est adhérent à cette localisation géographique. Il pourra être amené à évoluer en fonction de la localisation des futurs parcs éoliens et solaires.

- Dans la suite, les résultats sont présentés par rapport à la répartition géographique actuelle

Répartition départementale de la capacité installée d'éolien terrestre et de la vitesse du vent moyenne





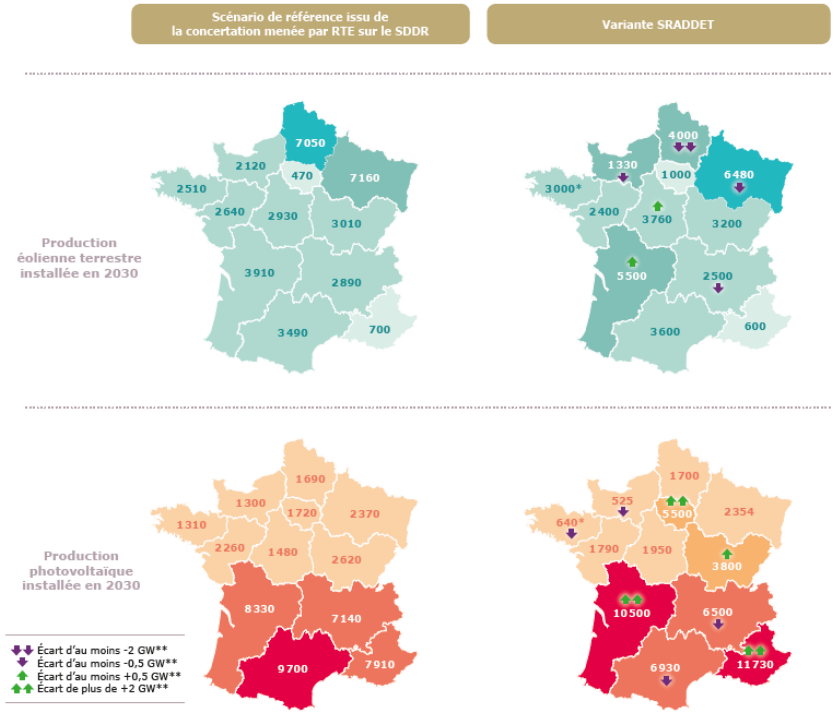
2 - Scénarios de capacités installées : la définition des scénarios nécessitent de spécifier la localisation des installations …

- La méthodologie de projection de la localisation géographique pourra s'appuyer sur les travaux réalisés par exemple dans le cadre du SDDR

- Plusieurs pistes sont ainsi envisageables et pourront être explorées (voire être combinées) :
  - Une projection de la localisation des nouveaux parcs s'appuyant sur la répartition géographique historique ;
  - Une projection basée sur les données qui seront remontées par les différents participants à la concertation ;
  - Une projection basée sur des critères de foncier accessible ou de productible le plus favorable…

- La méthodologie de répartition des capacités installées devra également intégrer les enjeux du renouvellement (ou repowering) des parcs existants.

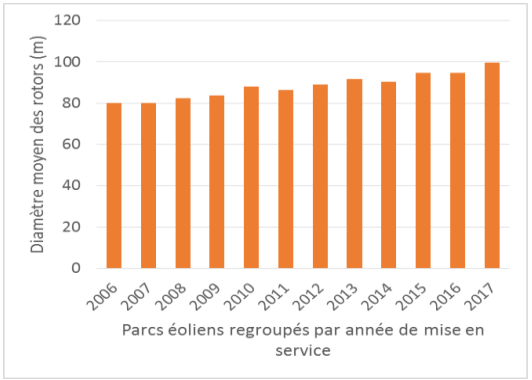
Illustration de deux variantes sur la localisation des énergies renouvelables pour le schéma de réseau

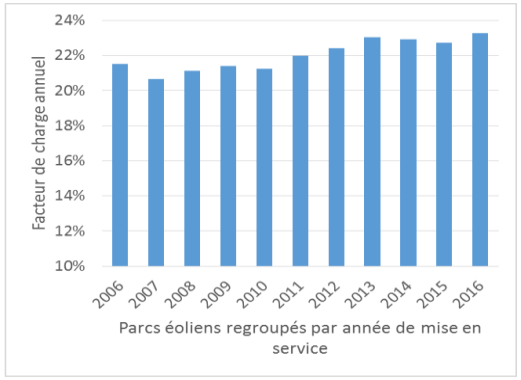


… ainsi que les technologies correspondantes

- Sur l'éolien :
  - Technologie standard mais une taille des installations qui évolue.
  - On observe globalement une augmentation de la taille des mâts et des rotors et une baisse de la puissance spécifique qui conduit à une hausse du facteur de charge.
  - Cet effet est néanmoins partiellement contrebalancé par des implantations sur des sites moins ventés

Évolution de la puissance spécifique moyenne des turbines (à gauche) et facteur de charge moyen sur l'année 2017 (à droite) en fonction de l'année de mise en service des éoliennes en France



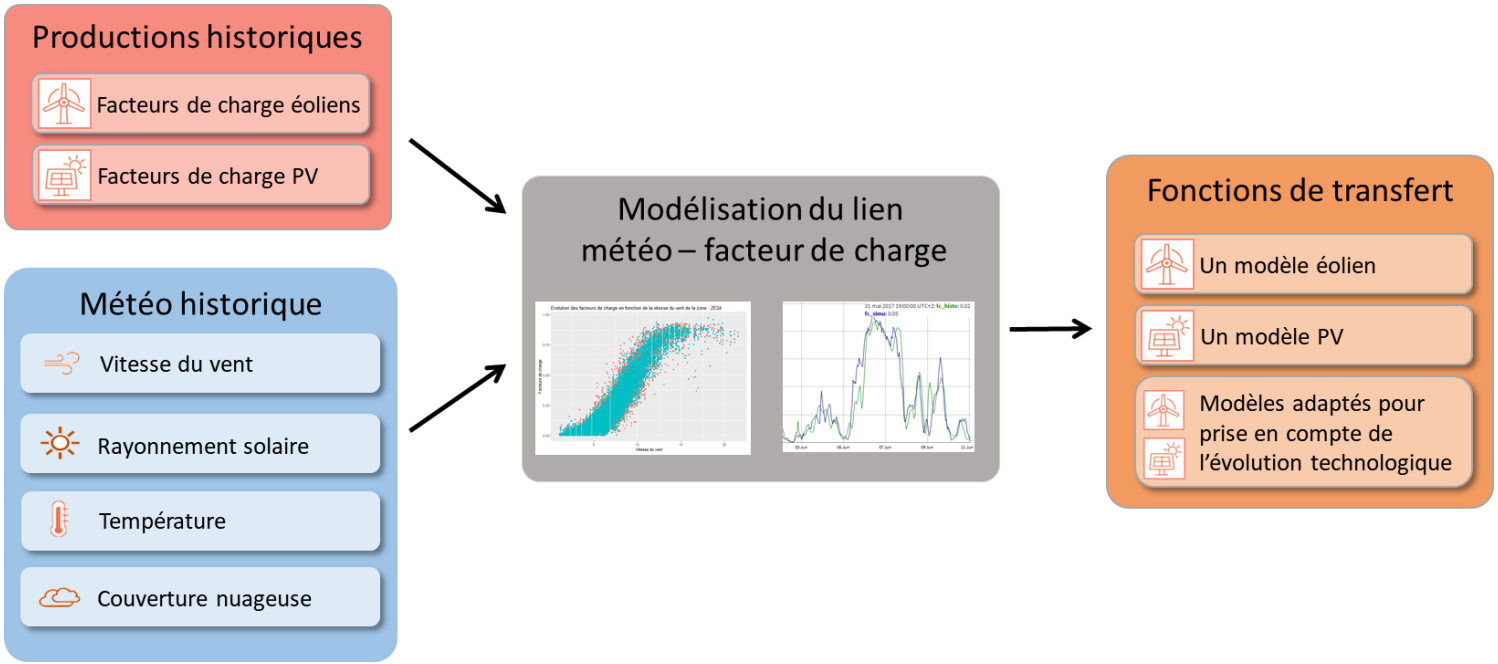


- Sur le solaire, de nombreuses technologies existent : photovoltaïque à silicium cristallin, photovoltaïque à couches minces, au sol ou sur toiture, avec ou sans tracker, panneaux photovoltaïques à concentration, panneaux solaires bifaciaux, solaire thermodynamique…

⇒ Pour construire les projections à l'horizon 2050, la méthodologie pourra intégrer une extrapolation des performances des installations en s'appuyant sur l'analyse de l'historique et sur les données qui seront remontées par les participants à la concertation.

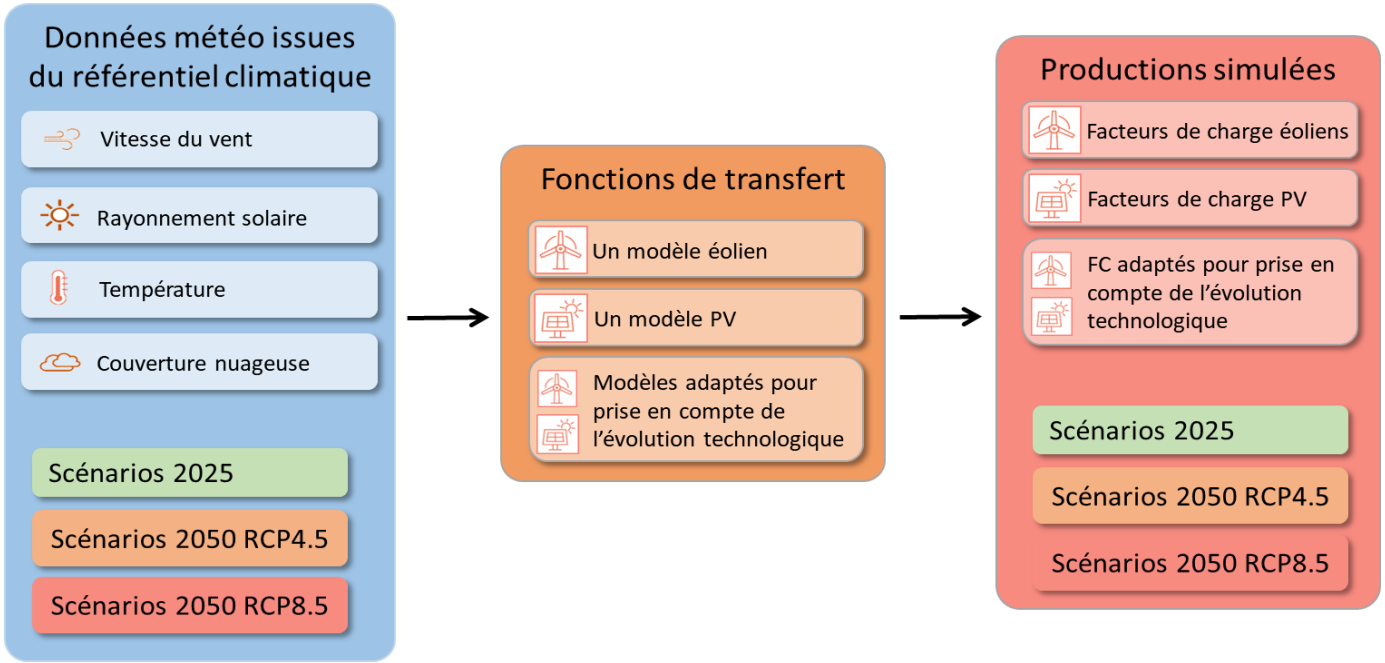
3 - La modélisation de la production renouvelable s'appuie sur des méthodes d'apprentissage statistique à partir des données historiques

Étape 1 : calibration et validation de fonctions de transfert en s'appuyant sur les données historiques



3 - La modélisation de la production renouvelable s'appuie sur des méthodes d'apprentissage statistique à partir des données historiques

Étape 2 : application des fonctions de transfert aux données du référentiel climatique de Météo France

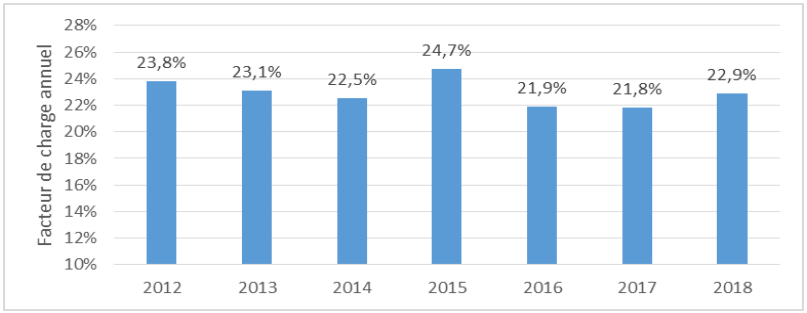


3

La modélisation de la production éolienne

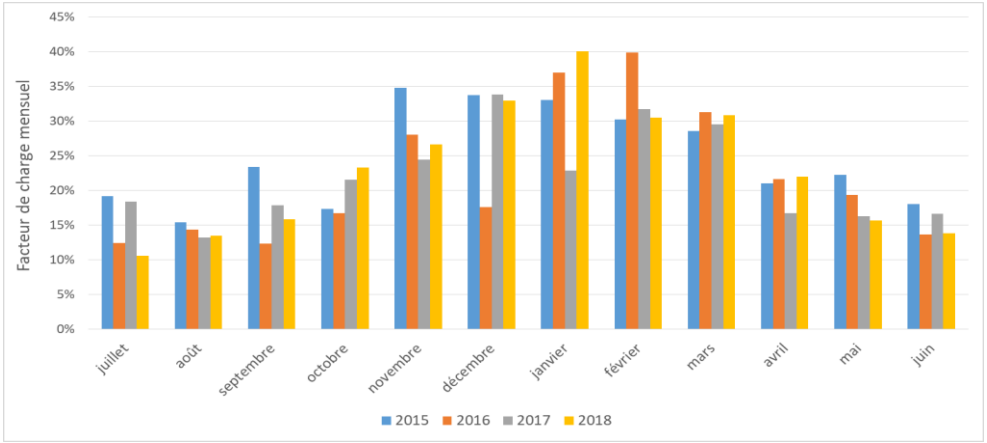
Caractéristiques de la production éolienne historique (1/3)

Facteur de charge éolien annuel en France



- Le facteur de charge éolien se situe autour de 23% en France.
- La production éolienne est fortement variable d'une année à l'autre.

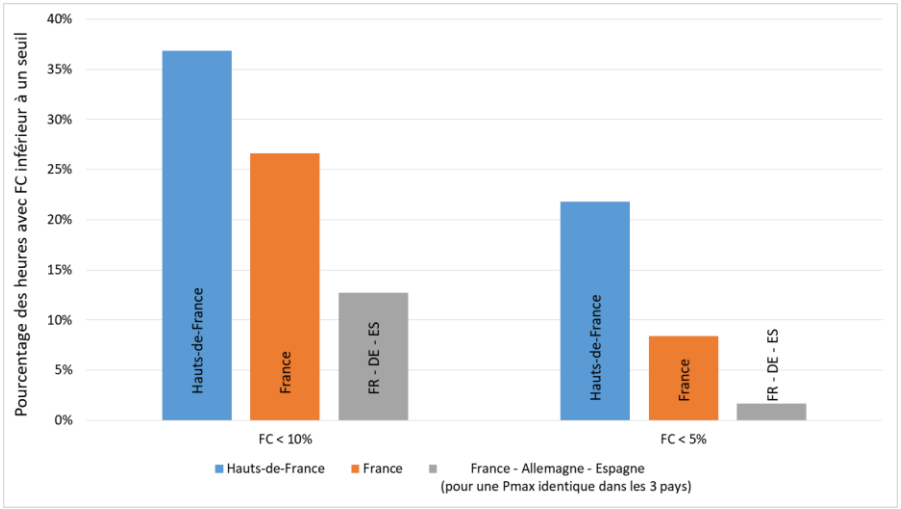
Historiques de facteurs de charge nationaux mensuels (2015-2018)



- La production éolienne est plus importante en hiver qu'en été.
- Variabilité importante d'une année à l'autre sur un même mois

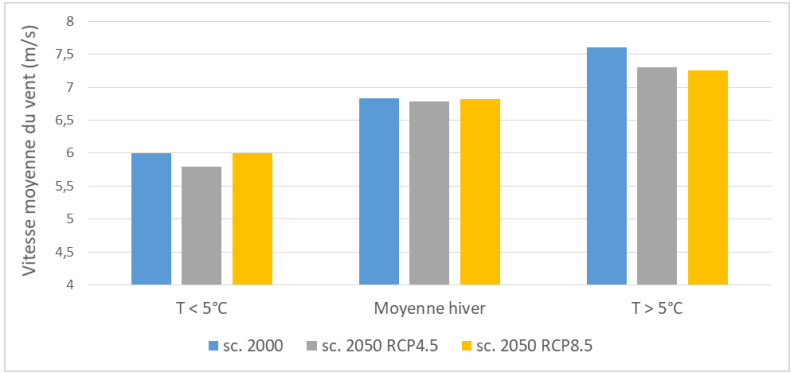
Caractéristiques de la production éolienne historique (2/3)

Pourcentage des heures avec FC faible (inférieur à 10%, 5%) à différents périmètres géographiques



- Le foisonnement géographique réduit significativement la fréquence des périodes de faible production sur un large périmètre, sans exclure l'éventualité de telles situations sur une large partie de l'Europe.

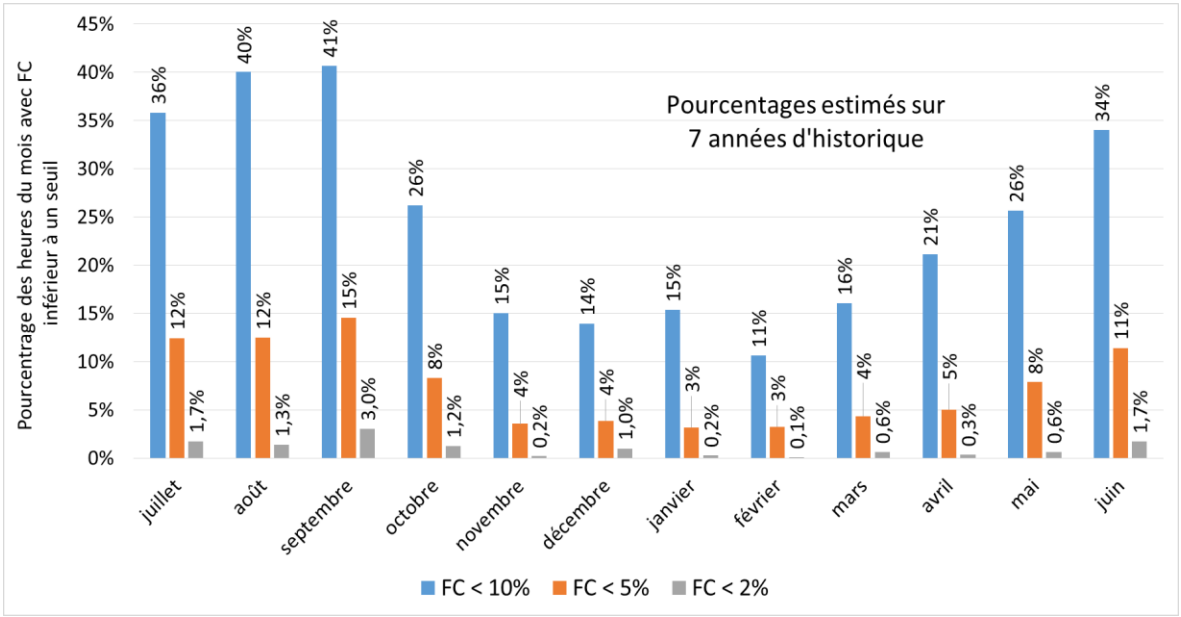
Vitesse moyenne du vent selon la valeur de température journalière en hiver



- La production éolienne est généralement moins importante que les moyennes de saison pendant les périodes de vagues de froid et de canicule.

Caractéristiques de la production éolienne historique (3/3)

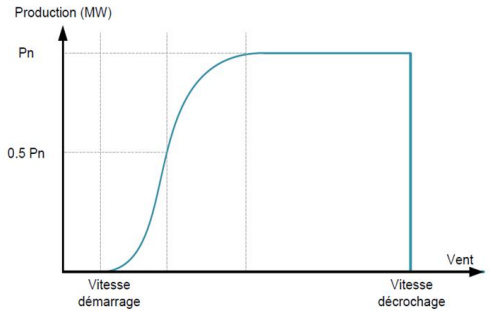
Probabilité d'occurrence de facteurs de charge faibles (inférieurs à 10%, 5%, 2%) aux différents mois de l'année



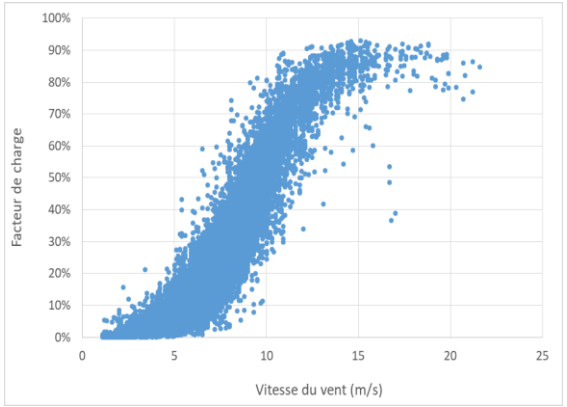
- Des occurrences relativement fréquentes de faible production éolienne.
- Des cas de très faibles production (FC < 2%)
- Ces situations sont plus fréquentes en été, sans être exclues en hiver

Conversion des données climatiques en chroniques de production éolienne (1/4)

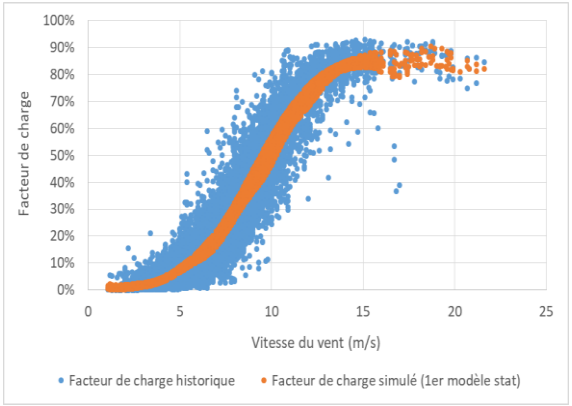
Illustration de courbe de puissance éolienne



Facteur de charge historique en fonction de la vitesse du vent (zone du Nord de la France)



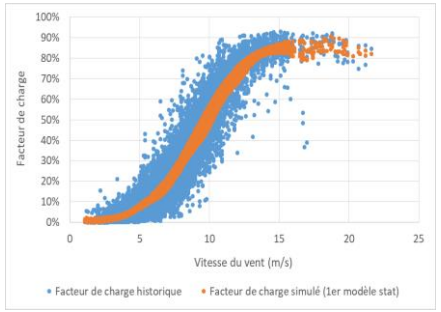
FC historique (en bleu) et simulés (en orange) par utilisation d'un premier modèle statistique



- La relation théorique entre production éolienne et vitesse de vent ne peut pas s'appliquer à une maille géographique large.
- Les approches statistiques simples tendent à sous-estimer la variabilité et les cas de faible production observés dans l'historique.

Conversion des données climatiques en chroniques de production éolienne (2/4)

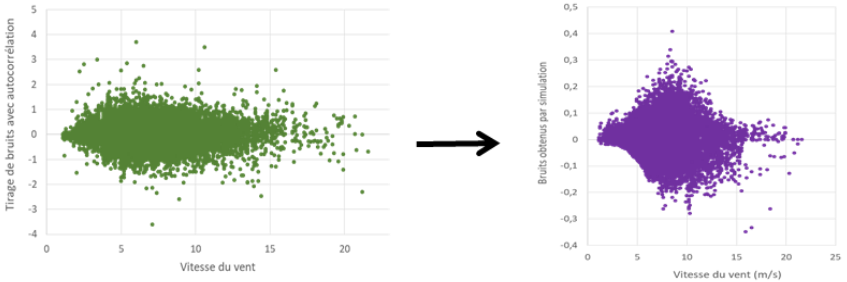
FC historique (en bleu) et simulés (en orange) par utilisation d'un modèle statistique



Résidus du modèle statistique

- Méthodologie pour ajouter un bruit à la simulation initiale.
- Les résidus du modèle statistique ont des propriétés spécifiques (autocorrélation, absence de symétrie, amplitude variable).

Illustration de la méthodologie de tirage de bruits



- L'approche mise en place permet de réaliser des tirages aléatoires en conservant ces propriétés.

Conversion des données climatiques en chroniques de production éolienne (3/4)

Résumé de l'étape 1 : calibration et validation des fonctions de transfert

Étapes de calibration du modèle, pour chaque zone du découpage géographique

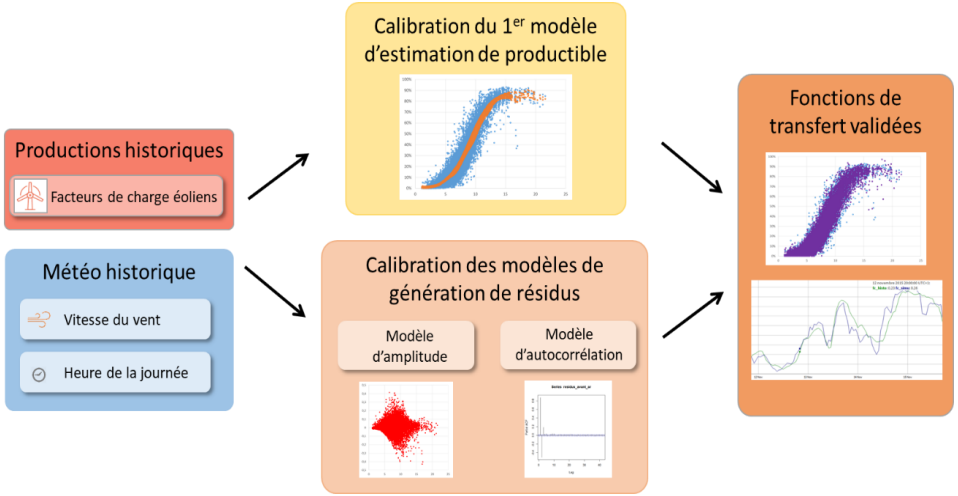
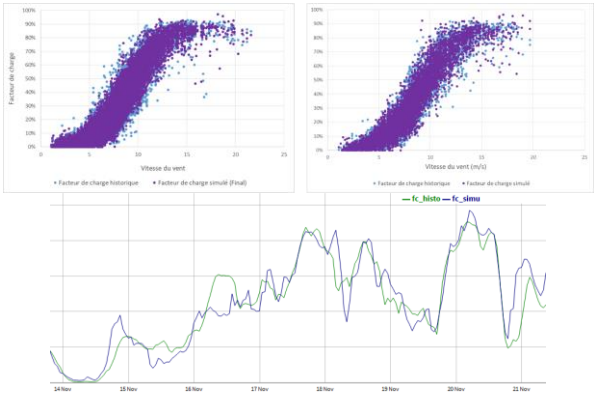


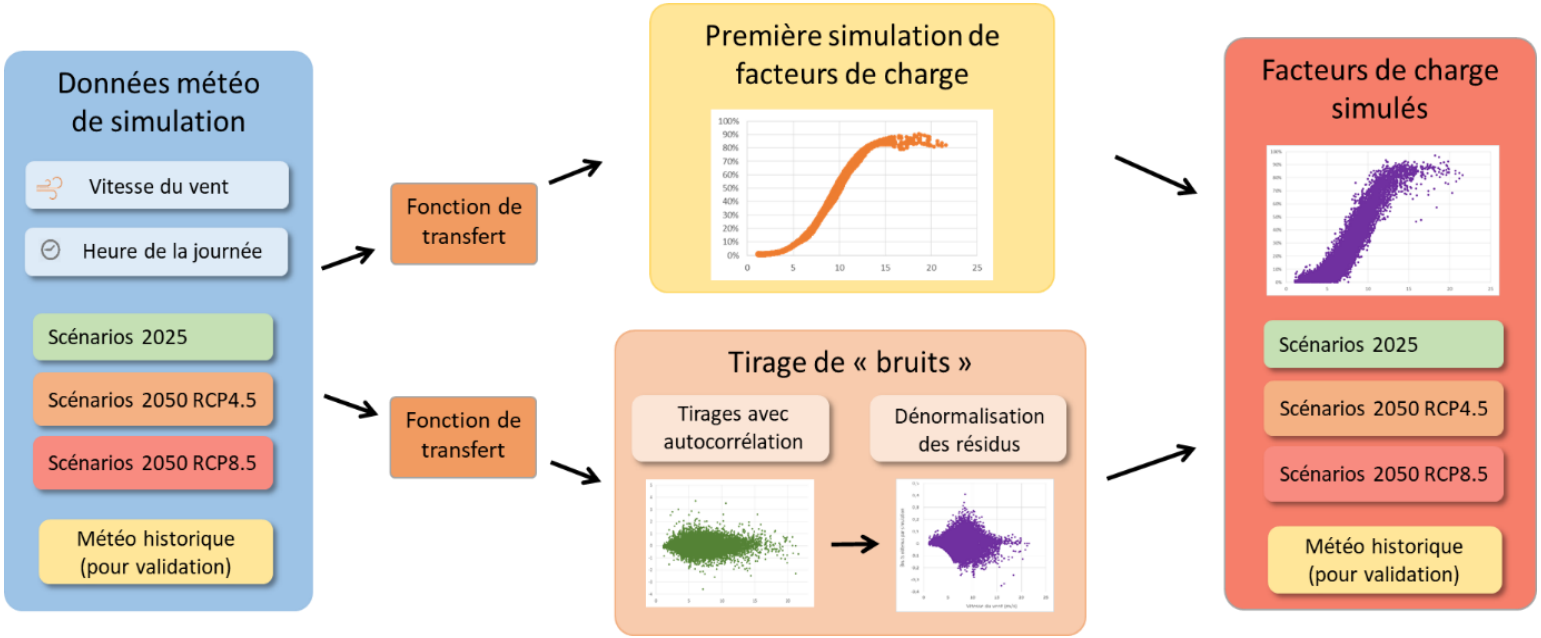
Illustration du processus de validation des fonctions de transfert



Conversion des données climatiques en chroniques de production éolienne (4/4)

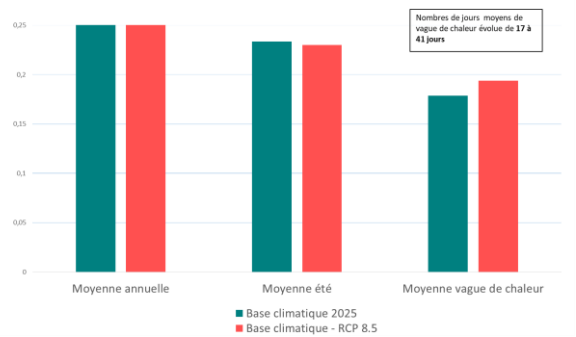
Résumé de l'étape 2 : application des fonctions de transfert aux données climatiques

Etapes de simulation des facteurs de charge sur la base de nouvelles données météorologiques et des fonctions de transfert établies lors de la phase de calibration

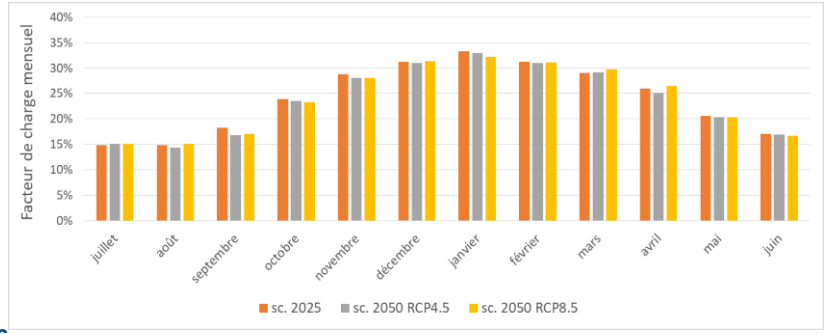


Premiers résultats de la modélisation de l'éolien appliquée aux simulations climatiques (1/2)

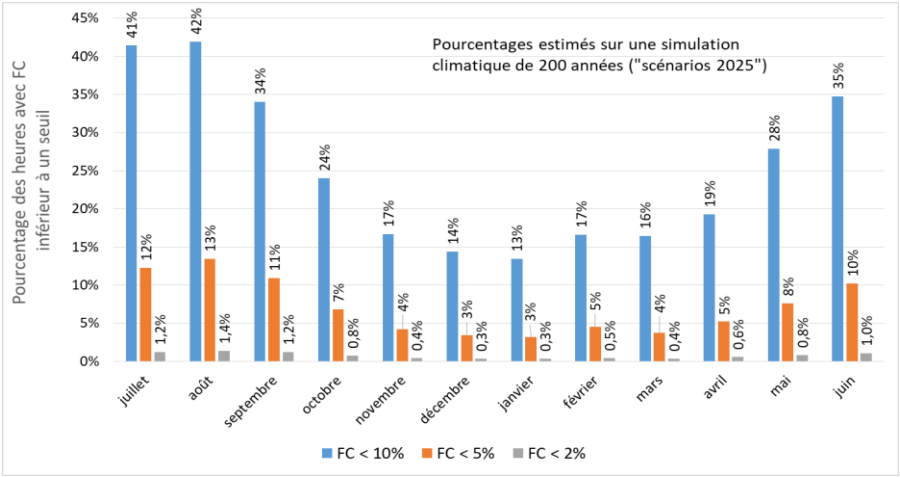
Facteurs de charge éolien lors des périodes de vagues de chaleur pour deux hypothèses de climat



Facteurs de charge mensuels moyens simulés



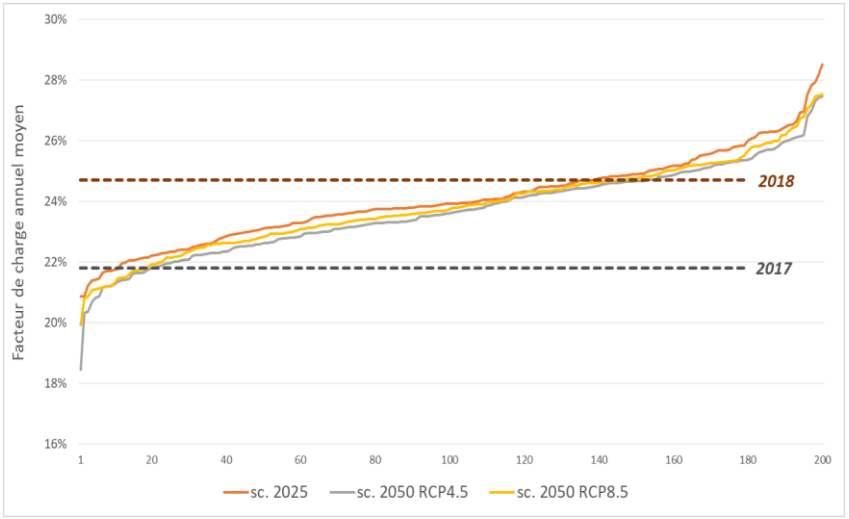
Probabilités d'occurrence de facteurs de charge inférieurs à un seuil (10%, 5%, 2%, « scénarios 2025 »)



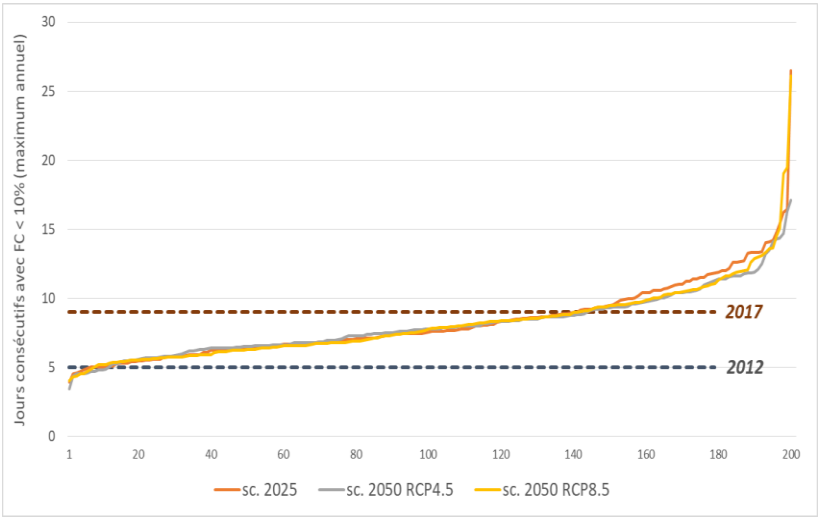
- La simulation conserve les principales caractéristiques observées dans l'historique.
- La production éolienne apparaît en légère diminution dans les simulations intégrant la trajectoire de changement climatique.

Premiers résultats de la modélisation de l'éolien appliquée aux simulations climatiques (2/2)

Monotone de facteur de charge annuel moyen pour chaque simulation de 200 années à climat constant



Monotone de durée maximale de « faible production » pour chaque simulation de 200 années à climat constant.



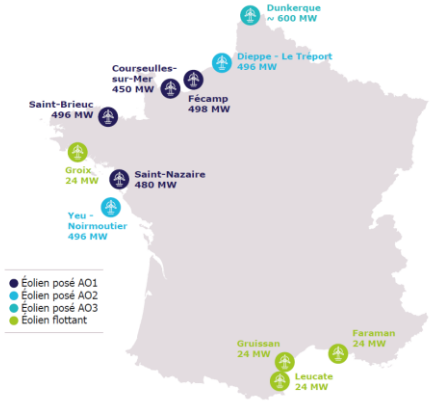
- La simulation sur un grand nombre d'années permet de prendre en compte des événements plus contraignants, jamais rencontrés dans l'historique (par exemple des périodes de plus de 10 jours consécutifs de faible vent).
- Les simulations climatiques incluent des périodes de faibles production de plus de deux semaines consécutives.

Cas particulier de l'éolien en mer

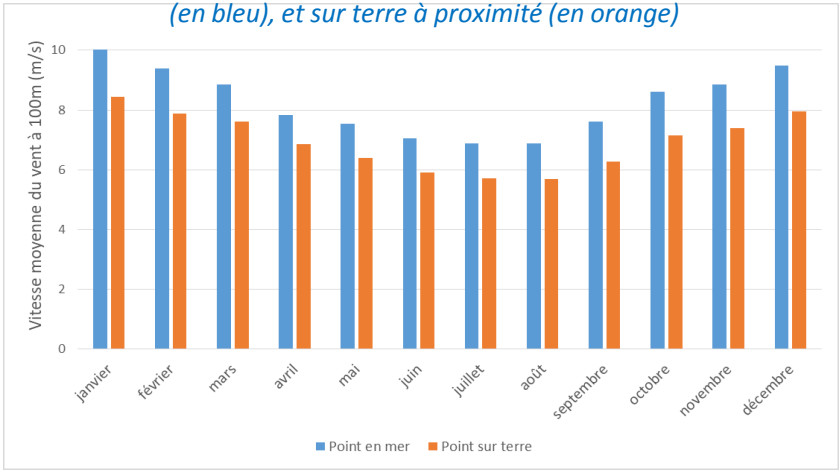
- Constats :
  - Il n'existe actuellement pas de parc éolien en mer installé en France et donc pas d'historique de production permettant de calibrer des fonctions de transfert.
  - L'éolien en mer présente des caractéristiques spécifiques (taille des parcs, modèles de turbines, ressource en vent).

- Méthodologie proposée :
  - Des fonctions de transfert spécifiques seront établies sur la base des historiques de production de parcs en mer à l'étrangers.
  - Celles-ci sont ensuite appliquées aux données de vent au large des côtes, (données disponibles dans le référentiel climatique Météo France), en prenant la localisation exacte des parcs

Projets de parcs éoliens en mer en France



Vitesses de vent en mer au large de Dunkerque (en bleu), et sur terre à proximité (en orange)



4

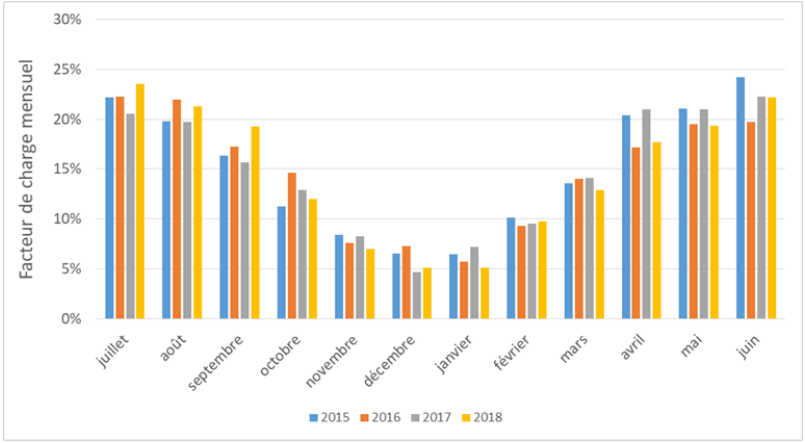
La modélisation de la production photovoltaïque

Caractéristiques de la production solaire historique (1/2)

Evolution du facteur de charge solaire annuel en France

- Le facteur de charge solaire annuel est de l'ordre 14%.
- Il est variable d'une année à l'autre, en lien avec les conditions météorologiques et l'évolution de la nature du parc installé (localisation, répartition sol/toiture, …)

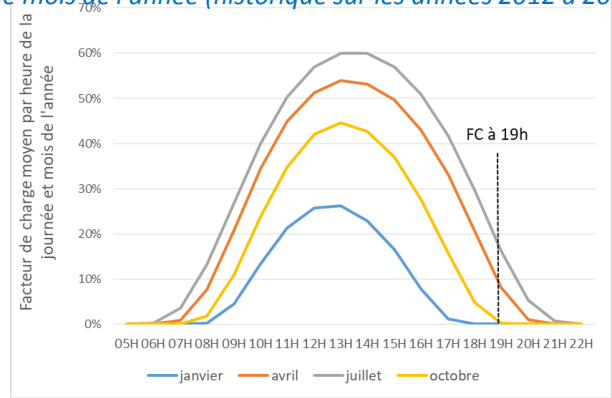
Facteurs de charge solaires mensuels en France (historique 2015 - 2018)



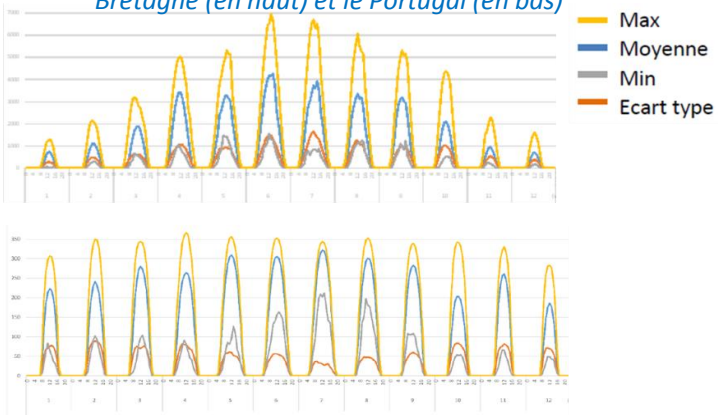
- La production solaire est nettement plus forte en été :
  - ~20% de facteur de charge en été ;
  - autour de 5% de facteur de charge sur certains mois d'hiver.

Caractéristiques de la production solaire historique (2/2)

Facteur de charge solaire moyen selon l'heure de la journée et le mois de l'année (historique sur les années 2012 à 2018)



Profils journaliers moyens par mois pour la Grande-Bretagne (en haut) et le Portugal (en bas)

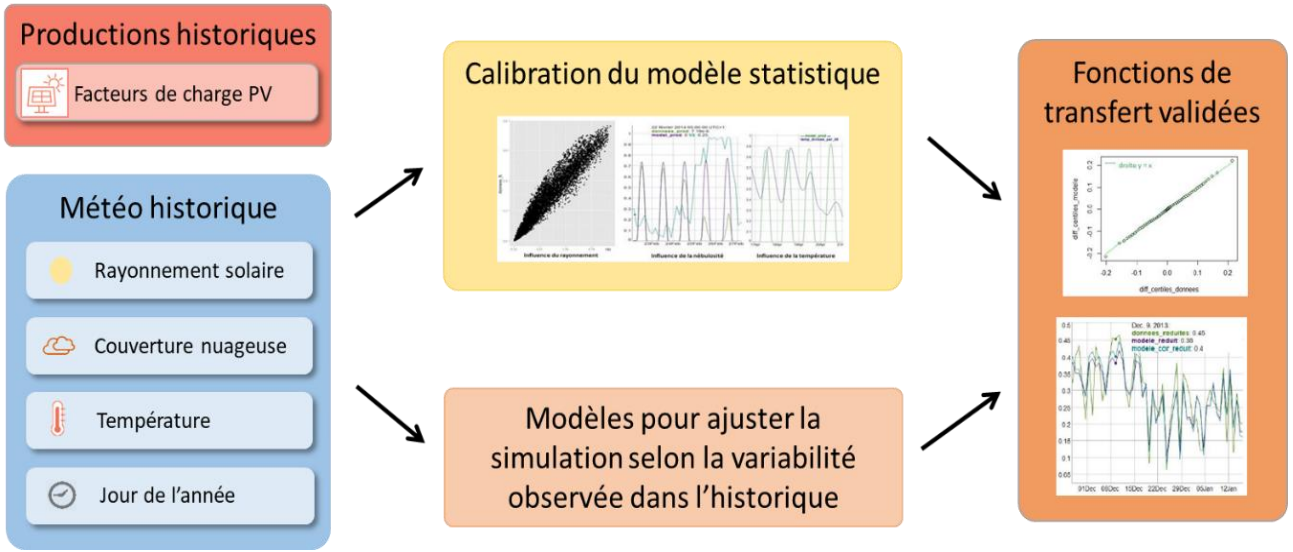


- La production solaire présente un profil journalier caractéristique, dont l'amplitude (en puissance et en durée) dépend de la saison.

- Quelques autres caractéristiques notables :
  - des décalages d'heures de production entre pays (Est-Ouest) ;
  - des différences de profil annuel selon la latitude ;
  - un comportement particulier au cours des vagues de chaleur, lié à une meilleure ressource en rayonnement mais aussi une baisse de rendement des panneaux.

Conversion des données climatiques en chroniques de production solaire (1/2)

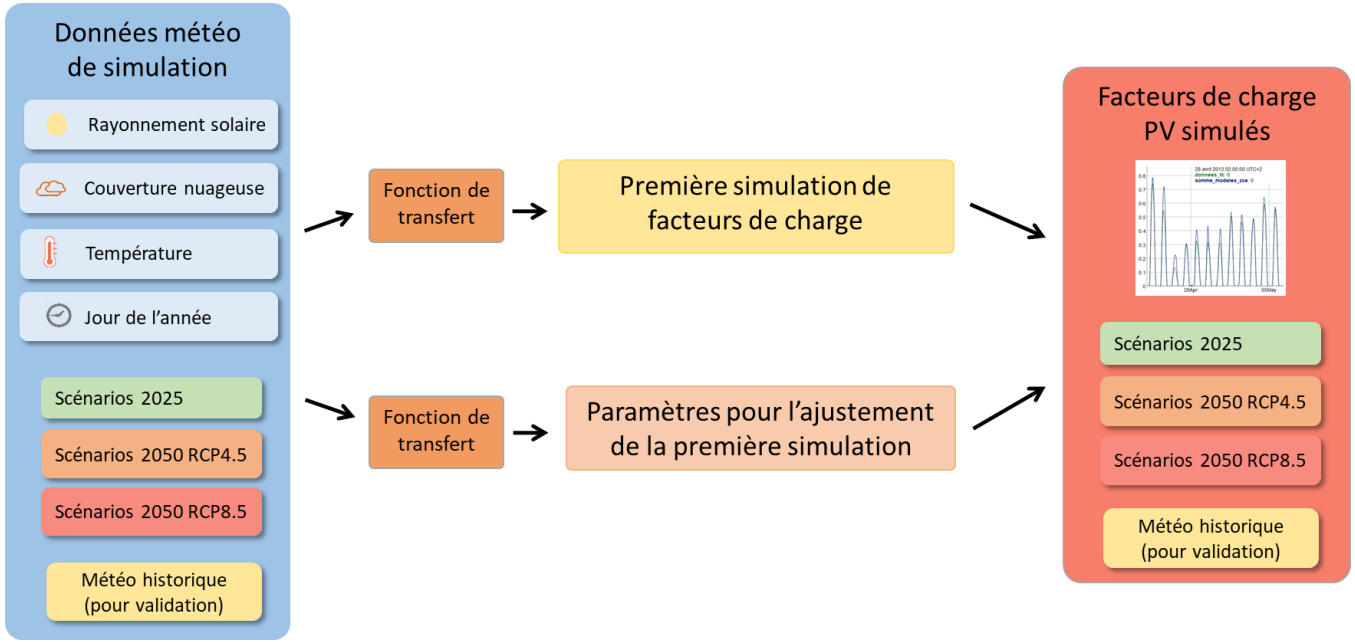
Etapes de calibration du modèle photovoltaïque, appliquées pour chaque zone du découpage géographique



- Une construction des fonctions de transfert à partir des données historiques, basée sur une approche similaire à celle développée pour l'éolien (construction d'un premier modèle statistique puis ajustement de la variance des distributions de production solaire simulée)

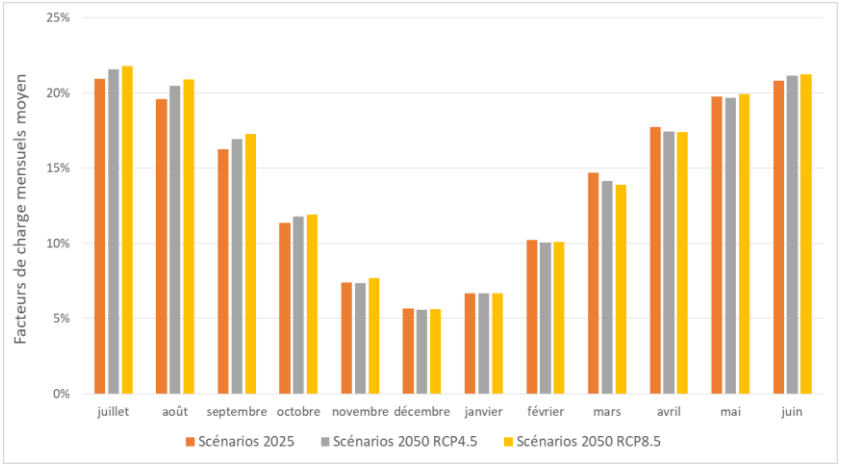
Conversion des données climatiques en chroniques de production solaire (2/2)

Etapes de simulation des facteurs de charge photovoltaïques sur la base de nouvelles données météorologiques et des fonctions de transfert établies lors de la phase de calibration



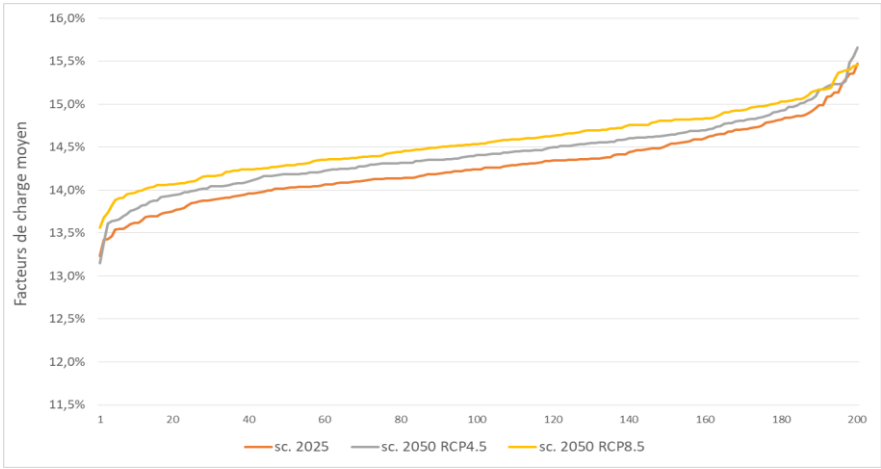
Premiers résultats de la modélisation du solaire appliquée aux simulations climatiques

Facteurs de charge solaires mensuels moyens dans chacune des trois simulations de 200 années



- Les simulations conduisent à une saisonnalité semblable à celle observée dans l'historique.

Monotone de facteurs de charge solaires (moyennes annuelles) pour chacune des trois simulations de 200 années

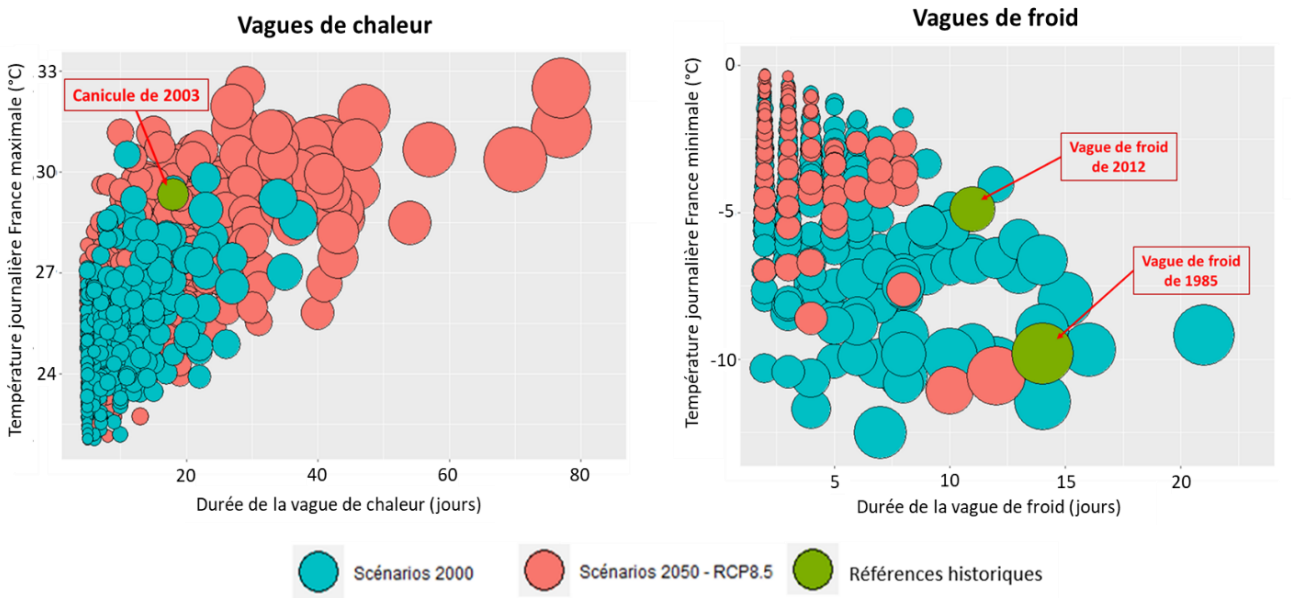


- Les facteurs de charge solaires sont en légère hausse dans les simulations 2050 RCP4.5 et RCP8.5, notamment sur les mois d'été.
- L'effet est d'autant plus marqué que le réchauffement est important.

5

Premiers éléments d’analyse sur les effets du changement climatique

Les vagues de froid et de chaleur, des situations structurantes en forte évolution avec le changement climatique



- Plus d'une année sur deux présente une vague de chaleur plus intense que la canicule de 2003 dans les scénarios 2050 RCP8.5. Dans ce scénario, des épisodes sont jusque 3 fois plus longs que celui de 2003.
- Ces changements ont une influence sur toutes les composantes du système électrique. L'analyse des effets du changement climatique nécessite une analyse croisée de l'ensemble de ces évolutions.

Illustration sur le scénario *Ampère* (horizon 2035)

Illustration d'une analyse croisée des effets du changement climatique sur la pointe hivernale, sur la base des simulations sur le scénario Ampère à l'horizon 2035

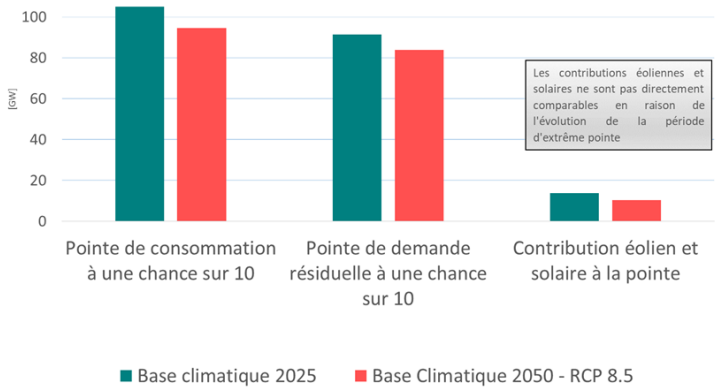
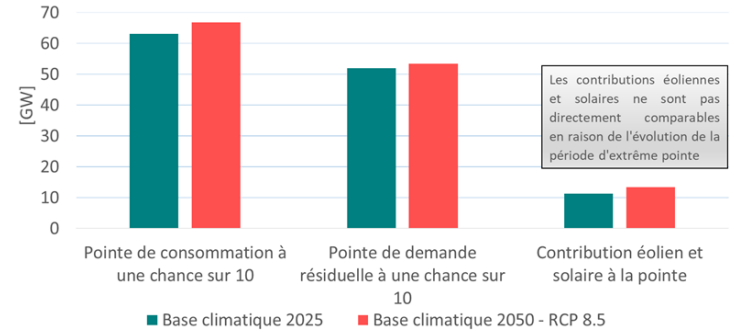


Illustration d'une analyse croisée des effets du changement climatique sur la pointe estivale, sur la base des simulations sur le scénario Ampère à l'horizon 2035

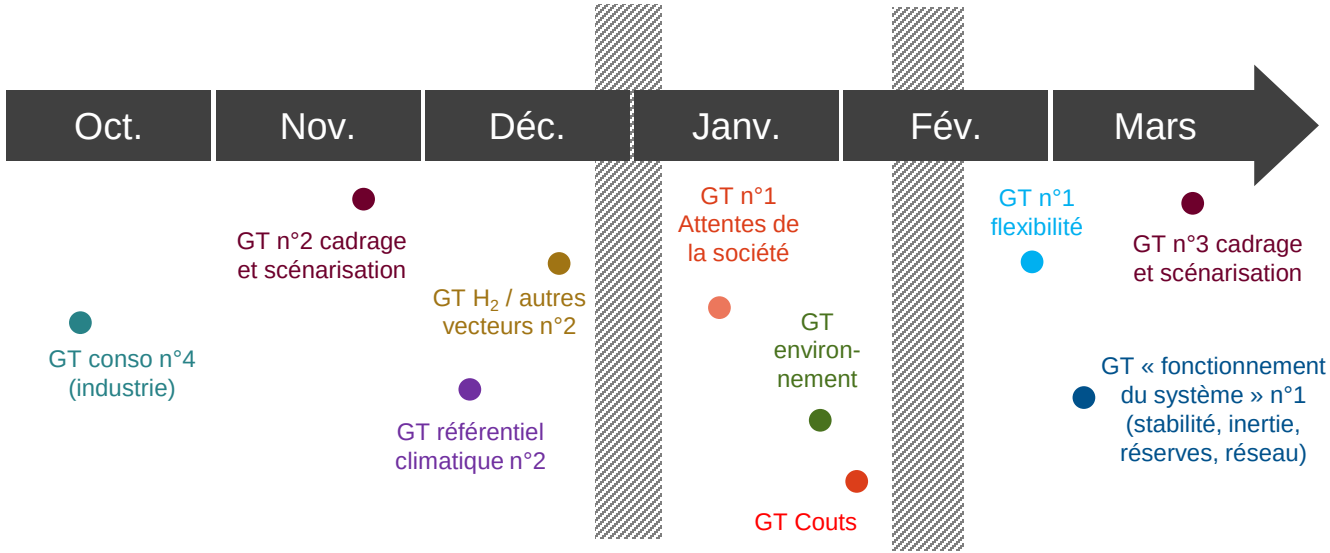


- Base climatique 2025 et 2050 RCP8.5
- Le parc de production est celui du scénario *Ampère*
- Les pointes de consommation à 1 chance sur 10 sont en baisse en hiver en raison de la baisse de consommation de chauffage.
- Les pointes de consommation à 1 chance sur 10 sont en hausse en été en raison de la hausse de consommation de climatisation .
- Les périodes de fortes sollicitations du système évoluent dans le calendrier annuel modifiant la contribution du solaire et de l'éolien à la pointe.

Les prochains GT analyseront les effets du changement climatique sur **la vision de la consommation, production hydraulique et sur la production nucléaire. Ceci permettra in fine de réaliser l'analyse croisée des effets sur l'ensemble des composantes de l'équilibre offre-demande.**

5

Suite des travaux

Suites des travaux

- Les prochaines réunions du groupe de travail porteront sur la représentation des effets du climat sur la production hydraulique et la production nucléaire, ainsi que sur la consommation (appels de puissance lors des événements extrêmes)
- Plusieurs autres groupes de travail thématiques sont par ailleurs programmés pour fin 2019 et début 2020