



**E4C**

ENERGY4CLIMATE  
INTERDISCIPLINARY CENTER



# CHANGEMENT CLIMATIQUE ET RESILIENCE DU SYSTEME ELECTRIQUE FRANCAIS

Philippe DROBINSKI

avec les contributions de: Laure BARATGIN, Freddy BOUCHET, Sandra CLAUDEL, Bastien COZIAN, Sylvain CROS, Johan DELORT-YLLA, Laurent DUBUS, Hajar FILAHI, Louis-Gaëtan GIRAUDET, Johann MEULEMANS, André MOUNIER, Boutheina OUESLATI, Jan POLCHER, Philippe QUIRION, Florian RAYMOND, Nicolas ROCHE, Qiqi TAO

TRAnsformer la modélisation du Climat pour  
les services ClimatiqueS - 27 juin 2025



# Enjeux

A l'échelle mondiale, **l'énergie c'est 75% des émissions** de gaz à effet de serre, **la production énergétique c'est 35%**



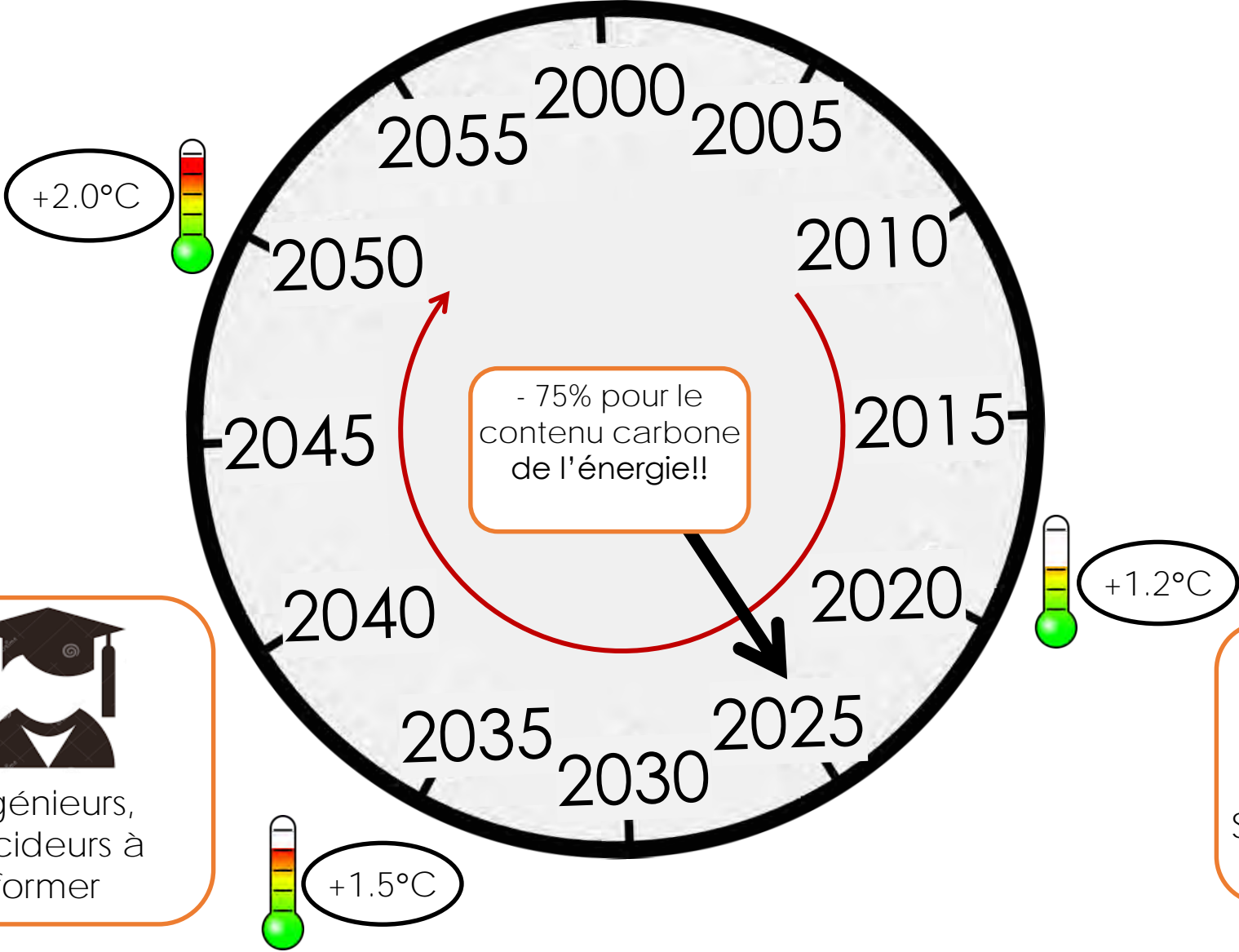
Solutions innovantes à déployer rapidement



Ingénieurs, décideurs à former



Solution globale à trouver



# Enjeux

A l'échelle mondiale, **l'énergie c'est 75% des émissions** de gaz à effet de serre, **la production énergétique c'est 35%**



Solutions innovantes à déployer rapidement

Partenariats avec entreprises et agences publiques, incubation d'innovations

Programme graduée « énergie » (master, doctorat) et formation professionnelle

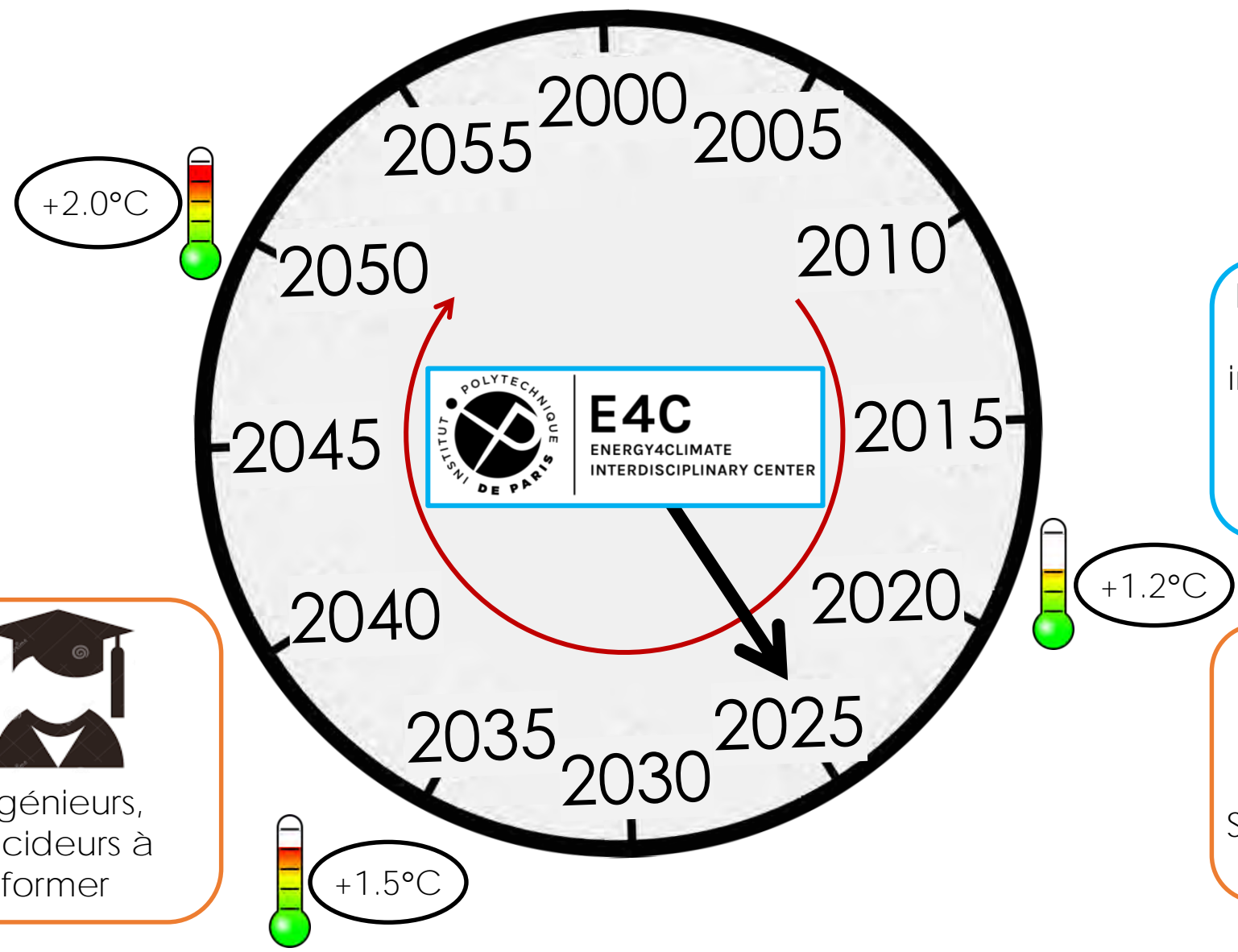


Ingénieurs, décideurs à former

Programme de recherche interdisciplinaire dans une fédération de 26 labos



Solution globale à trouver



# Enjeux

Production électrique



Résilience aux conditions météorologiques extrêmes



Planification des investissements



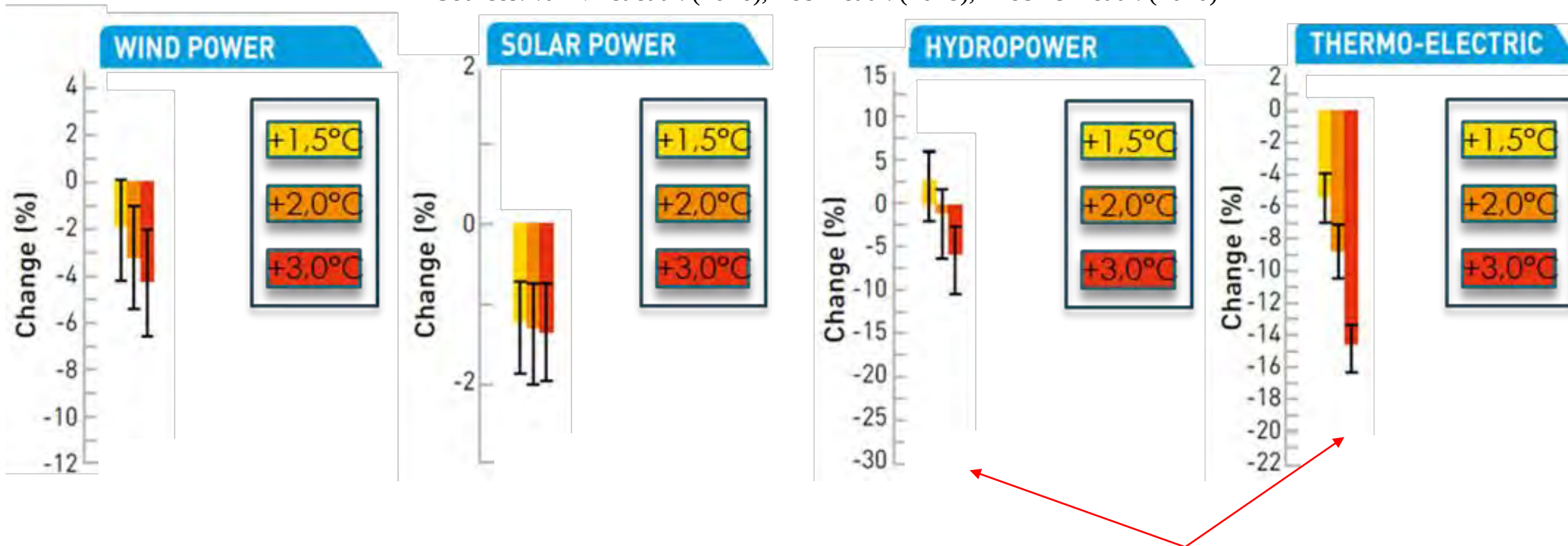
Consommation électrique



# Changement climatique et production électrique

## Production électrique

Sources: van Vliet et al. (2016), Tobin et al. (2018), Drobinski et al. (2020)



**Forte dépendance de l'électricité à l'eau**

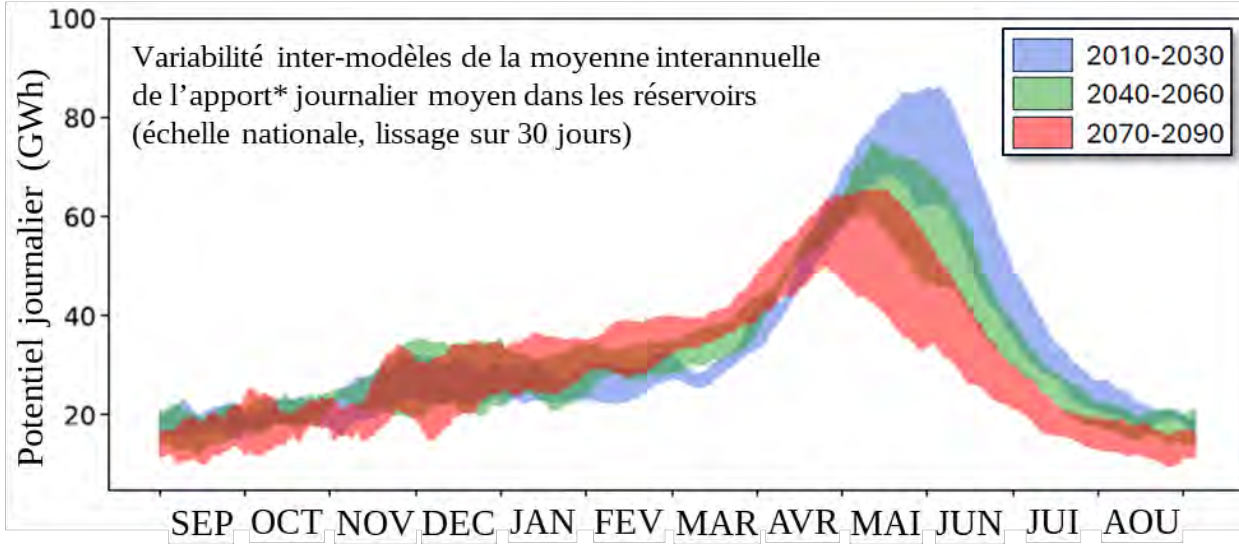
En France, le changement climatique devrait avoir un **effet néfaste sur l'hydroélectricité et les centrales thermoélectriques** et un **impact inégal sur les ressources énergétiques renouvelables à technologies constantes**.

L'impact est fortement dépendant du niveau de réchauffement climatique.

# Changement climatique et production électrique

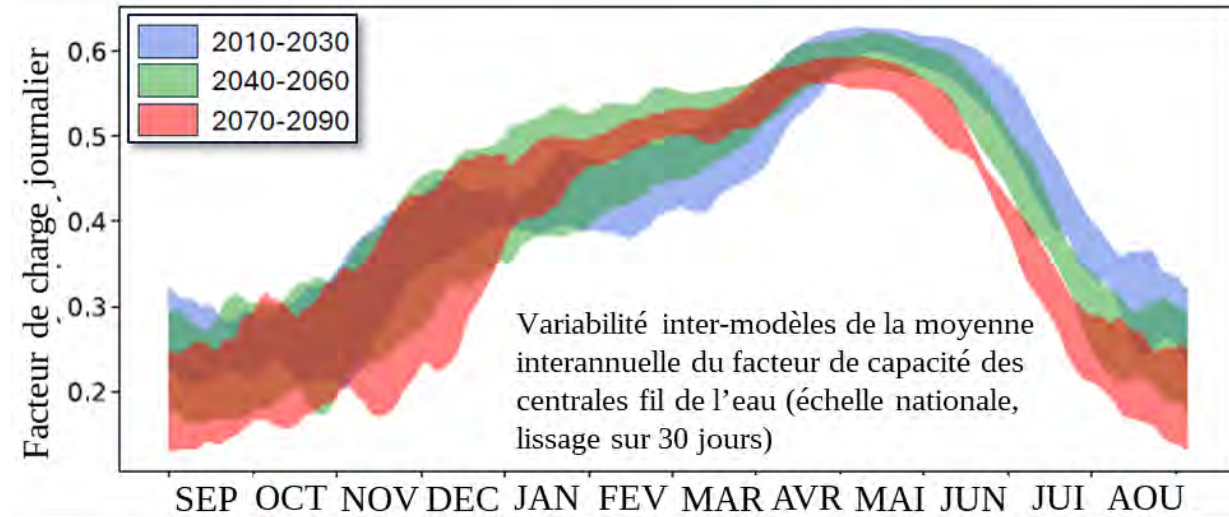
## *Production hydroélectrique*

Réservoir



**Augmentation de la production hivernale et diminution de la production printanière** avec le changement climatique (précipitation liquide plutôt que solide en hiver, augmentation des précipitations hivernales et fonte plus précoce de la neige)

Fil de l'eau



**Evolution de la production annuelle incertaine**

**Changements saisonniers sont plus robustes:** diminution d'avril à octobre et une évolution plus variable en hiver

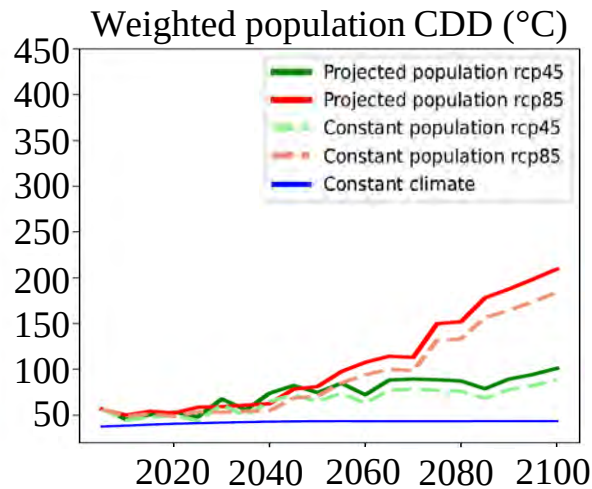
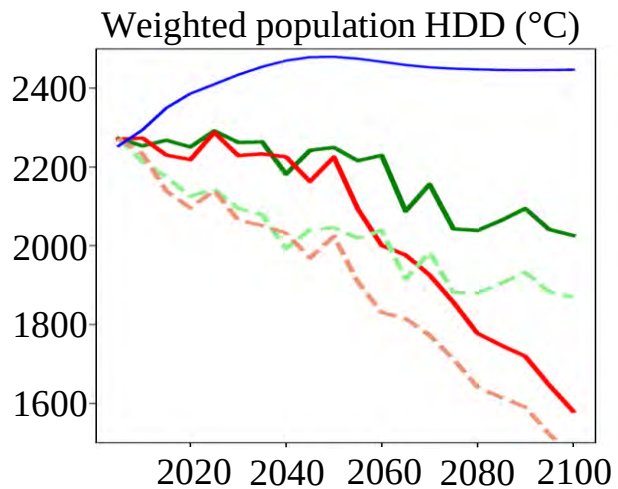
Sources: Baratgin et al. (2024; en préparation)

# Changement climatique et consommation électrique

## Evolution des besoins de chauffage et climatisation

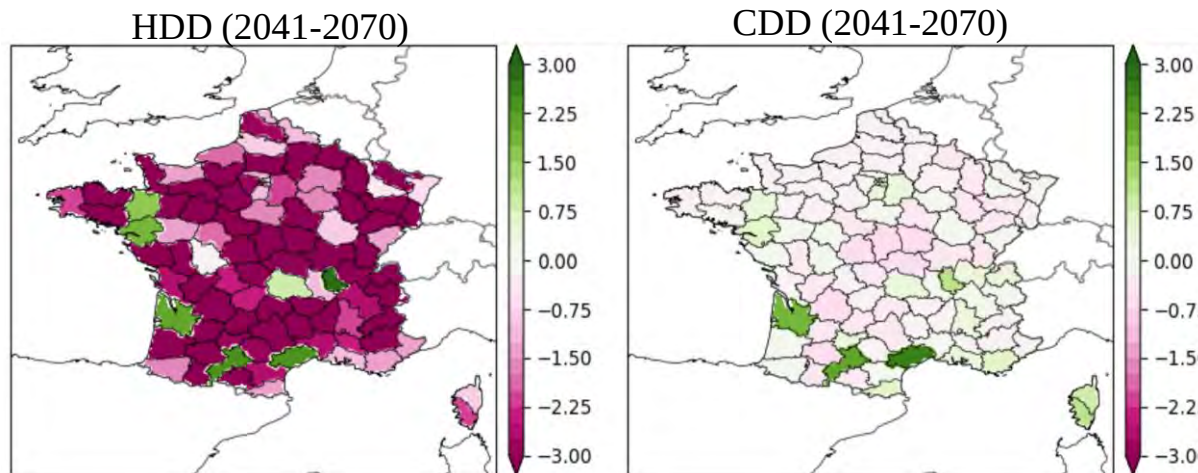
L'impact du changement climatique sur la **diminution** du **besoin en chauffage** est **modéré** par l'augmentation de la population.

Les périodes de **besoin en chauffage** deviennent plus **fragmentées et courtes**.



L'impact du changement climatique sur l'**augmentation** du **besoin en climatisation** est **accentué** par l'augmentation de la population

**Impact CC très dominant pour HDD** sauf dans les départements à forte augmentation de population



$D > 0 \Rightarrow$  impact dominant de l'évolution de la population  
 $D < 0 \Rightarrow$  impact dominant du changement climatique

**Impacts population et CC équivalents pour CDD**, sauf départements à forte augmentation de population

Scénario population INED :  
Augmentation de population dans les plus grandes villes  
Scénario climat : RCP85

# Changement climatique et consommation électrique

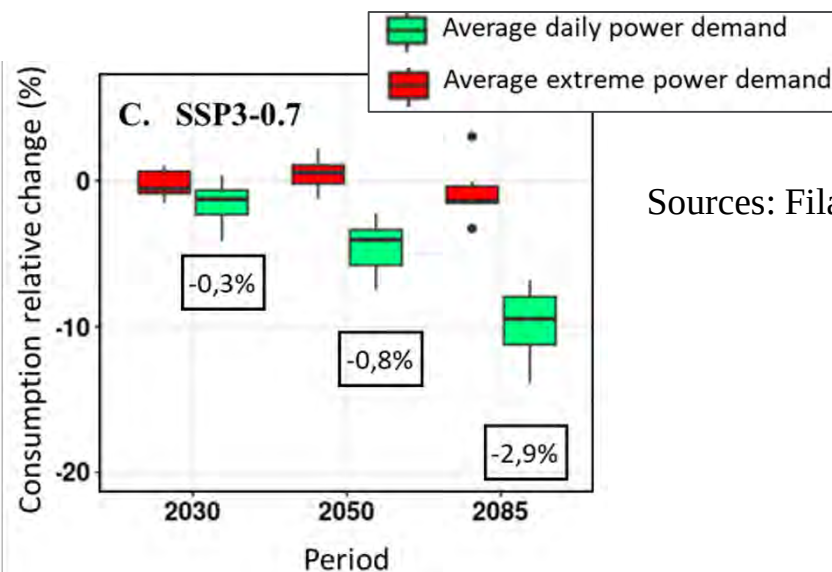
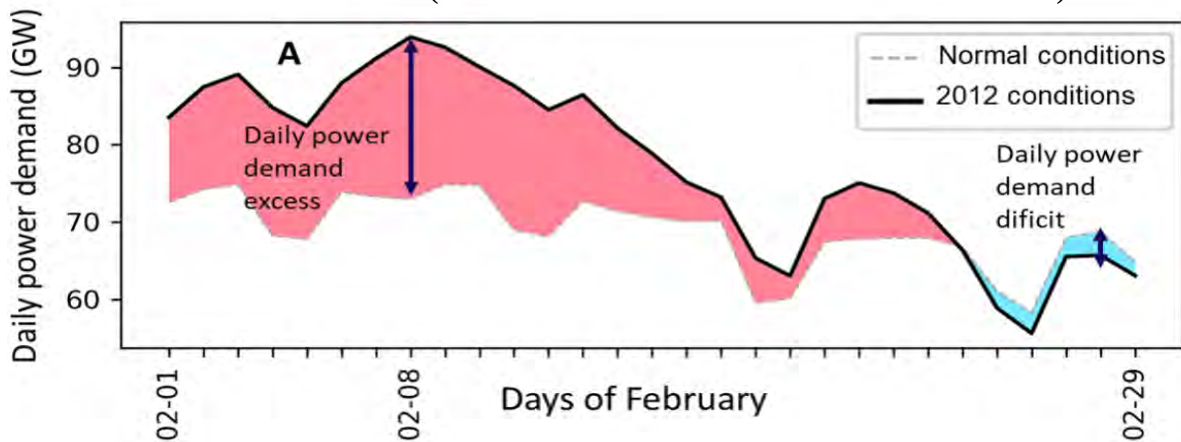
## Consommation extrême de chauffage

Baisse significative de la consommation électrique moyenne en 2050 par rapport au présent: -4% [-6%;-3%] (SSP3-7.0)

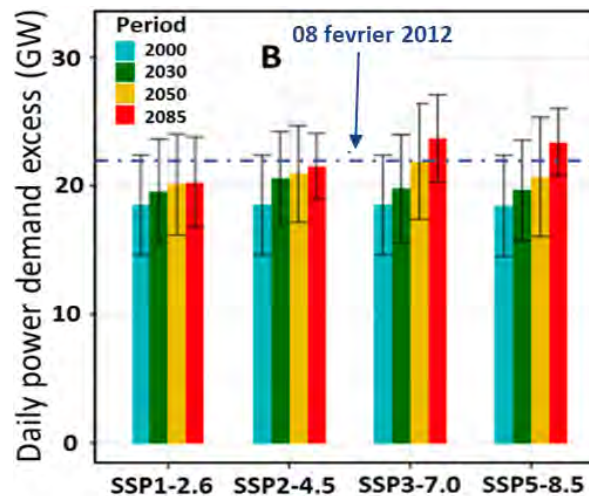
Baisse marginale de la consommation électrique lors de vagues de froid

 **IMPORTANT** Usage énergétiques, dispositifs technologiques actuels

Appel de charge supplémentaire pour faire face aux vagues de froid – exemple de février 2012 (réseau fortement sous tension – RTE bilan 2012)



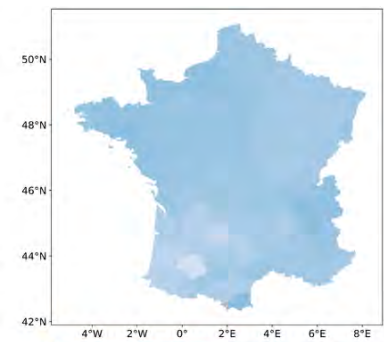
Sources: Filahi et al. (2025)



**Appel de charge supplémentaire lors de vagues de froid par rapport à la normale augmente par rapport au présent dans les 4 scénarios → contraintes potentiellement fortes pour le réseau électrique → leviers de flexibilité (production, demande, stockage)**

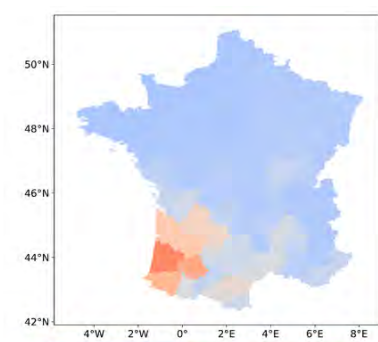
# Changement climatique et consommation électrique

## Scénario de climatisation et impact sur la consommation énergétique



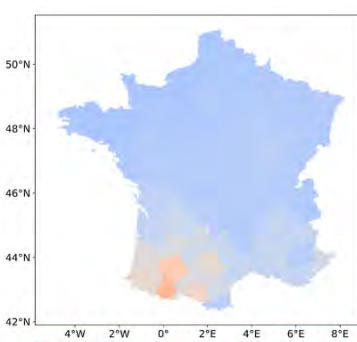
Evolution of temperature-sensitive REC (%)

(a) CC2040-AC18-NOGS.



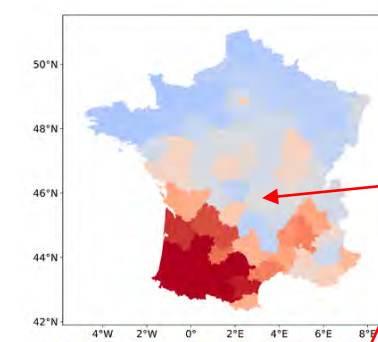
Evolution of temperature-sensitive REC (%)

(b) CC2040-ACall-NOGS.



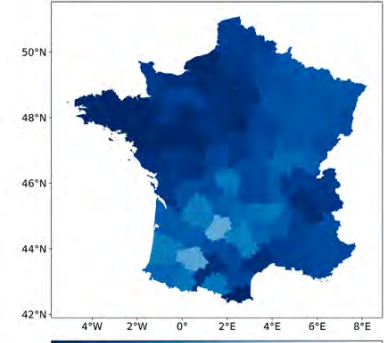
Evolution of temperature-sensitive REC (%)

(c) CC2040-AC18-GS.



Evolution of temperature-sensitive REC (%)

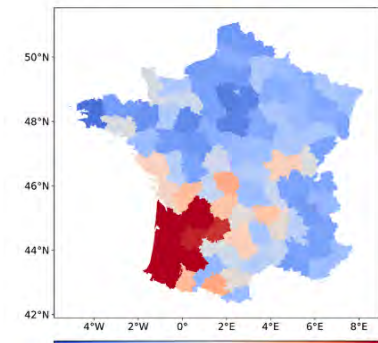
(d) CC2040-ACall-GS.



Evolution of temperature-sensitive REC (%)

(e) CC2085-AC18-NOGS.

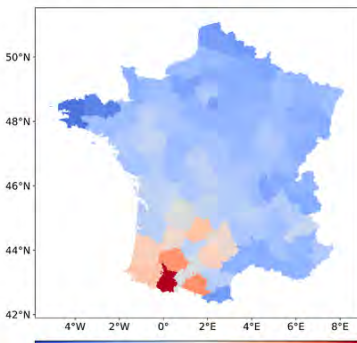
Climatiseurs installés en 2018



Evolution of temperature-sensitive REC (%)

(f) CC2085-ACall-NOGS.

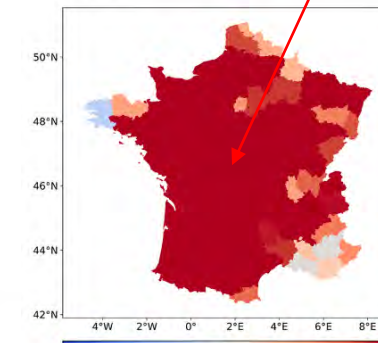
Tous les ménages sont équipés de climatisation là où il y en avait en 2018



Evolution of temperature-sensitive REC (%)

(g) CC2085-AC18-GS.

Climatiseurs installés en 2018 avec une progression géographique de proche en proche (je fais comme mon voisin)



Evolution of temperature-sensitive REC (%)

(h) CC2085-ACall-GS.

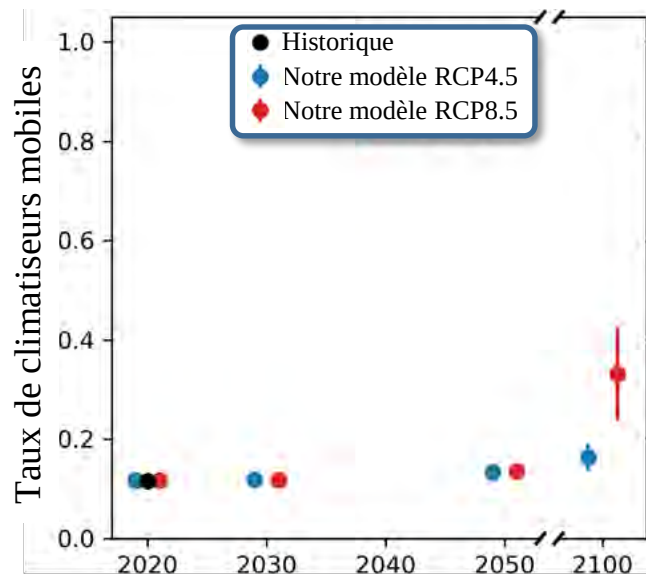
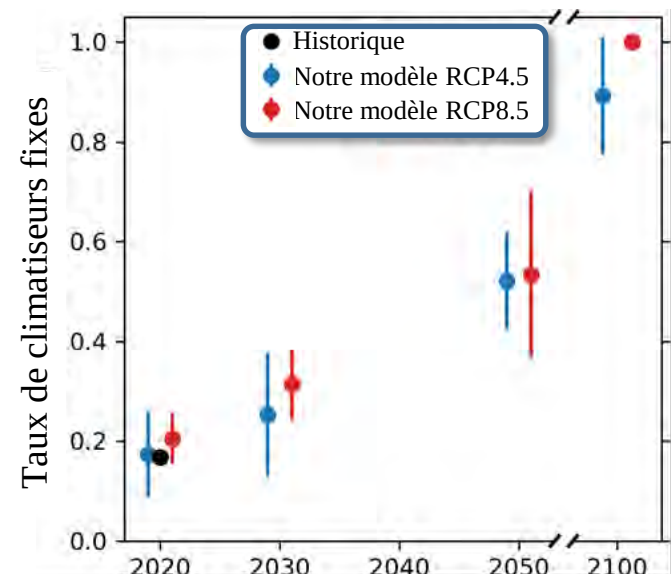
Tous les ménages sont équipés de climatisation avec progression géographique de proche en proche (je fais comme mon voisin)

**Consommation modulée par l'évolution du déploiement de systèmes de climatisation** → possibilité d'une compensation totale de la diminution de la consommation énergétique (localement jusqu'à globalement suivant le scénario)

**Augmentation compensée totalement en augmentant la température de consigne pour la climatisation à 26-27°C dans le scénario de climatisation le plus extrême.**

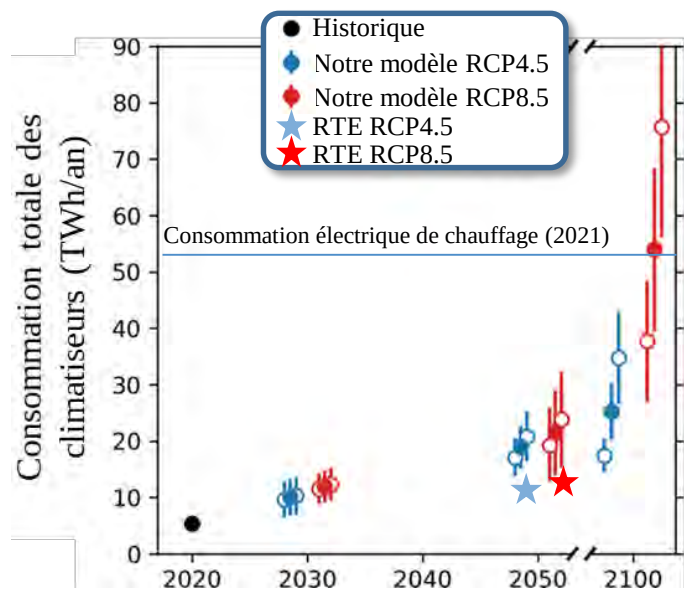
# Changement climatique et consommation électrique

## Scénario de climatisation et impact sur la consommation énergétique



**Dynamiques distinctes de l'évolution du taux d'équipement en climatiseurs fixes et mobiles** alors que les climatiseurs fixes sont 2 fois plus efficaces énergétiquement que ceux mobiles.

Le taux de climatiseurs mobiles projeté reste bas à l'horizon 2050 par rapport aux climatiseurs fixes.



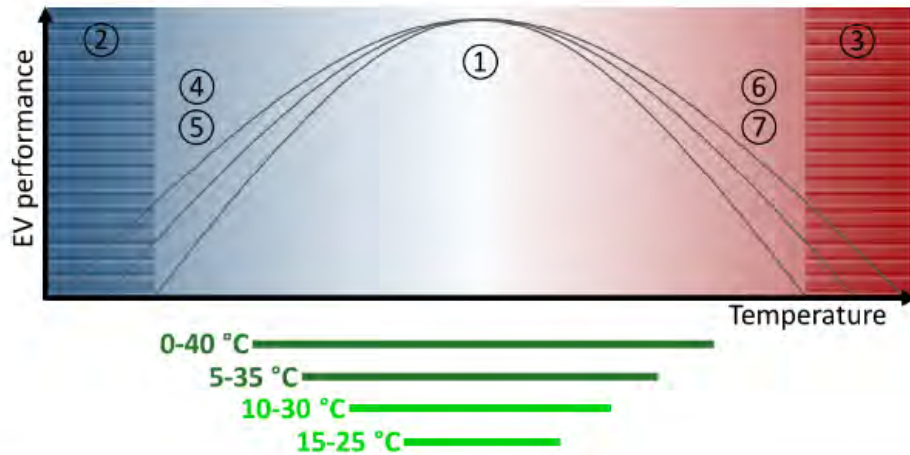
**Estimation supérieure à RTE** dans les « Futurs énergétiques 2050 » (11,9 TWh/an et 13,7 TWh/an pour les RCP4.5 et 8.5)

A mettre en parallèle aux 54,9 TWh/an de consommation électrique de chauffage (hors eau chaude sanitaire) en 2021

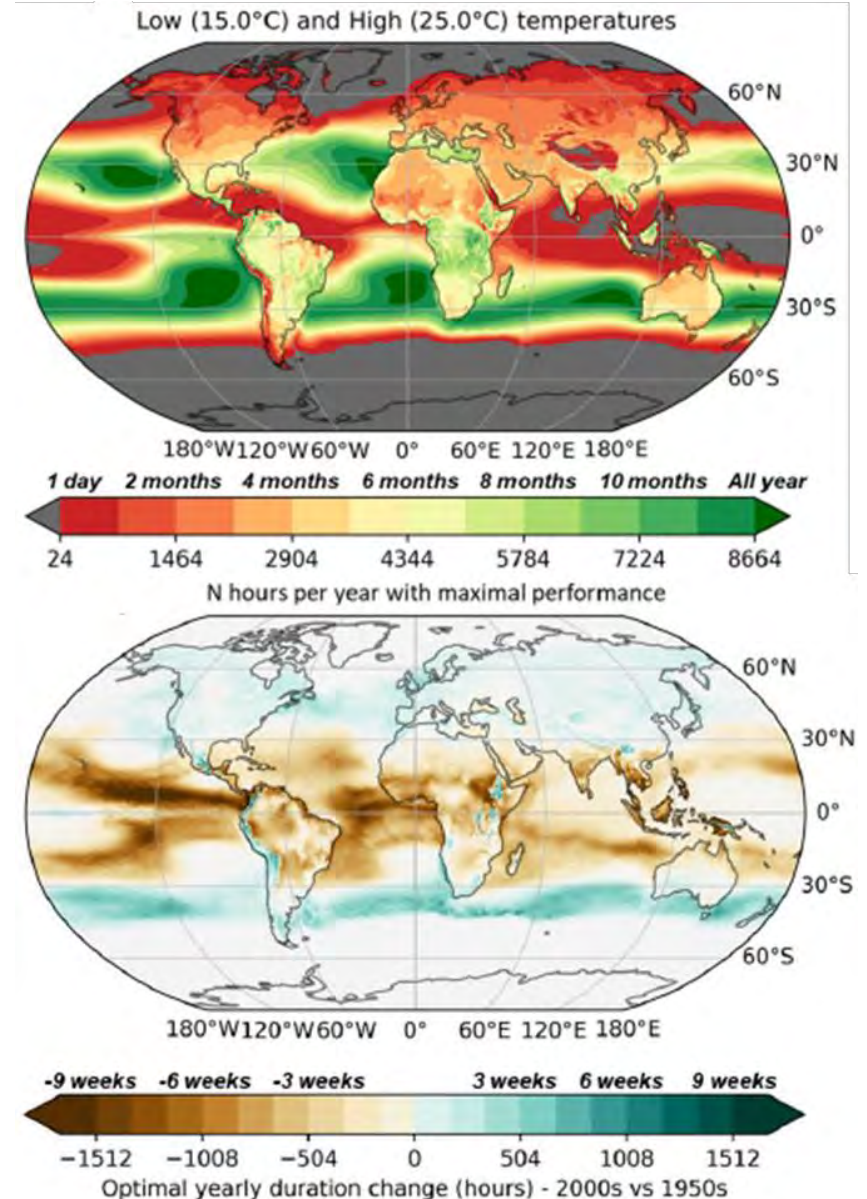
**Consommation principalement due aux climatisations fixes en 2050 (75 %)**

# Changement climatique et consommation électrique

## Vers l'électrification de nombreux usages thermosensibles... mobilité, numérique



Sources: Deroubaix et al. (soumis)



### Optimal operating temperature

- ① Optimal temperature for battery charge capacity<sup>41</sup> and for the discharge during vehicle use, usually expressed as maximum driving range or minimum energy consumption per km<sup>23-31</sup>

### Physical limitations of Li-ion batteries

- ② Low temperature limits: irreversible capacity loss and reduced lifetime due to lithium plating<sup>17,32</sup>  
 ③ High temperature limits: thermal runaway<sup>17,33,34</sup>

### Causes of performance loss at low temperatures

- ④ *For the battery charge capacity*  
 - Reduced available energy due to higher charge-transfer resistance, decrease in electrolyte conductivity and ion mobility<sup>32,34</sup>  
 - Increased energy consumption by battery thermal management system to avoid negative impacts of low temperatures<sup>35-38</sup>
- ⑤ *For the discharge during vehicle use*  
 - Increased energy consumption for cabin heating<sup>19,27,39,40</sup>  
 - Decreased recovered energy from regenerative braking<sup>19,27,40</sup>

### Causes of performance loss at high temperatures

- ⑥ *For the battery charge capacity*  
 - Decreasing battery capacity due to accelerated calendar aging and cycle aging<sup>41,42</sup>  
 - Increased energy consumption by battery thermal management system to avoid negative impacts of high temperatures<sup>35-38</sup>
- ⑦ *For the discharge during vehicle use*  
 - Increased energy consumption for cabin cooling<sup>19,27,39,40</sup>

# Changement climatique et système électrique

## Résilience des infrastructures

Sources: Vautard et al (2014), Drobinski et al. (2020a, 2021), Varéla et al. (2019), Spinoni et al. (2020), Aboukrat et Lepousez (2021), Raymond et al. (2023)

	<b>Chaleurs extrêmes</b> <b>Froids extrêmes</b> <b>Amplitude thermique</b>	<b>Précipitations neigeuses</b> <b>Crues, inondations</b>	<b>Vents violents</b> <b>Tempêtes</b>	<b>Feux de forêts</b>
Lignes électriques	Surchauffe contraction (givre) des câbles	Dommages sur les pylônes et câbles	Dommages sur les pylônes et câbles	La chaleur, la fumée et les cendres peuvent couper les lignes de transmission
Transformateurs	Réduction de la capacité, vieillissement accéléré et rupture	Court-circuit (infiltration d'eau) et explosion	Court-circuit (chute d'objets) et explosion	Destruction (équipements généralement peu exposés)
Postes électriques (disjoncteurs, sectionneurs, ..)	Rupture, vieillissement accéléré	Panne, fragilisation et rigidification des isolants	Court-circuit (chute d'objets)	Destruction (équipements généralement peu exposés)
Equipements électroniques et télécoms	Surchauffe ou gel	Dommages liés à l'humidité ou l'infiltration d'eau	Dommages (chute d'objets)	Destruction (équipements généralement peu exposés)

● Sensibilité faible    
 ● Sensibilité moyenne    
 ● Sensibilité forte

	Vagues de chaleur froid	Neige collante	Crues	
Nord	▲ ▼	◆ ◆	◆	Pas évalué
Sud	▲ ▼	◆ ◆	◆	▲

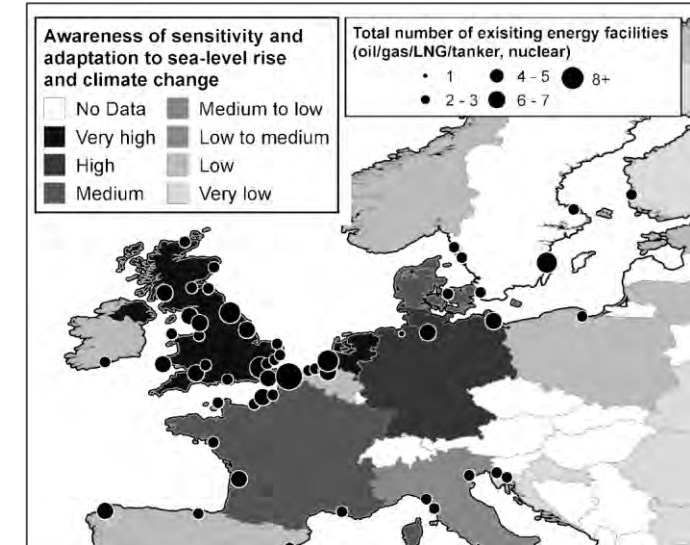
▲ Augmentation significative  
 ▼ Diminution significative  
 ◆ Changement pas significatif

**Canicules et sécheresses : aléas présentant un risque majeur** pour le réseau électrique

Crucial d'anticiper les changements environnementaux et climatiques dans la conception, la surveillance future et la maintenance des installations énergétiques, du fait de leur longue durée de vie.

**Vigilance:** événements extrêmes sous-échantillonnés → à modéliser (Cozian et al., 2022, 2024)

Sources: Brown et al (2014)

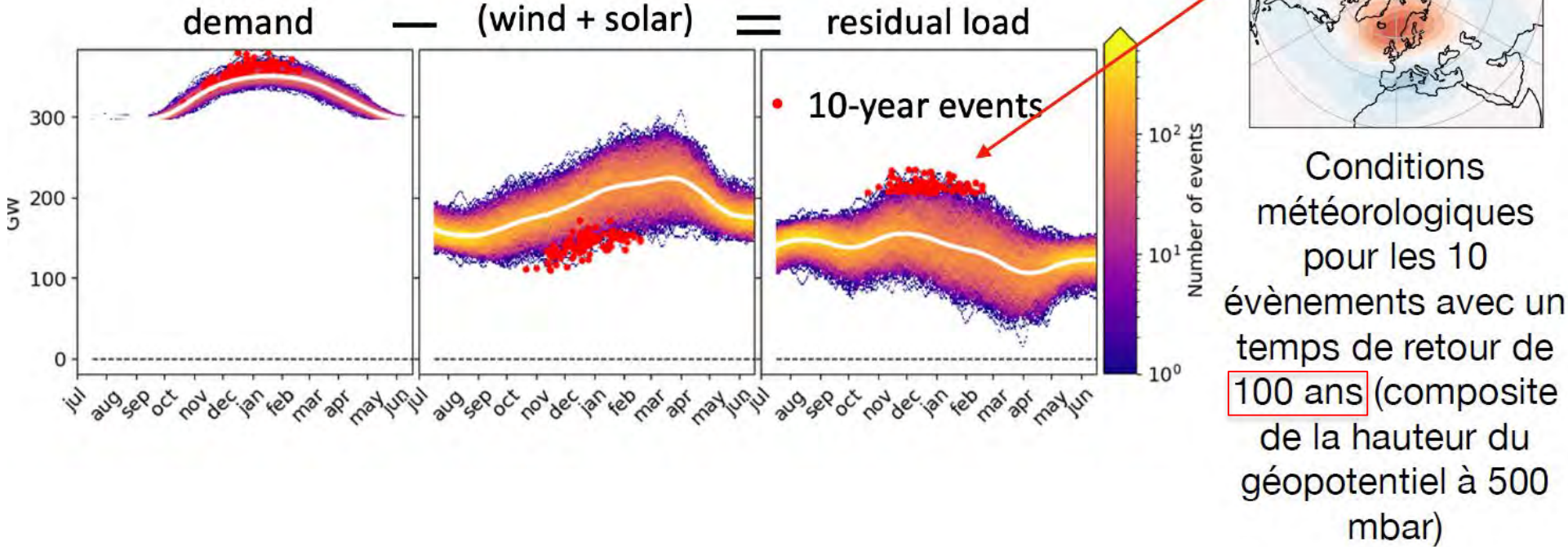


**Impact de l'élévation du niveau de la mer et des événements extrêmes sur les infrastructures énergétiques côtières** (perturbations de l'approvisionnement, du transport et du stockage de l'énergie)

# Changement climatique et système électrique

## Situations à fort impact et faible probabilité

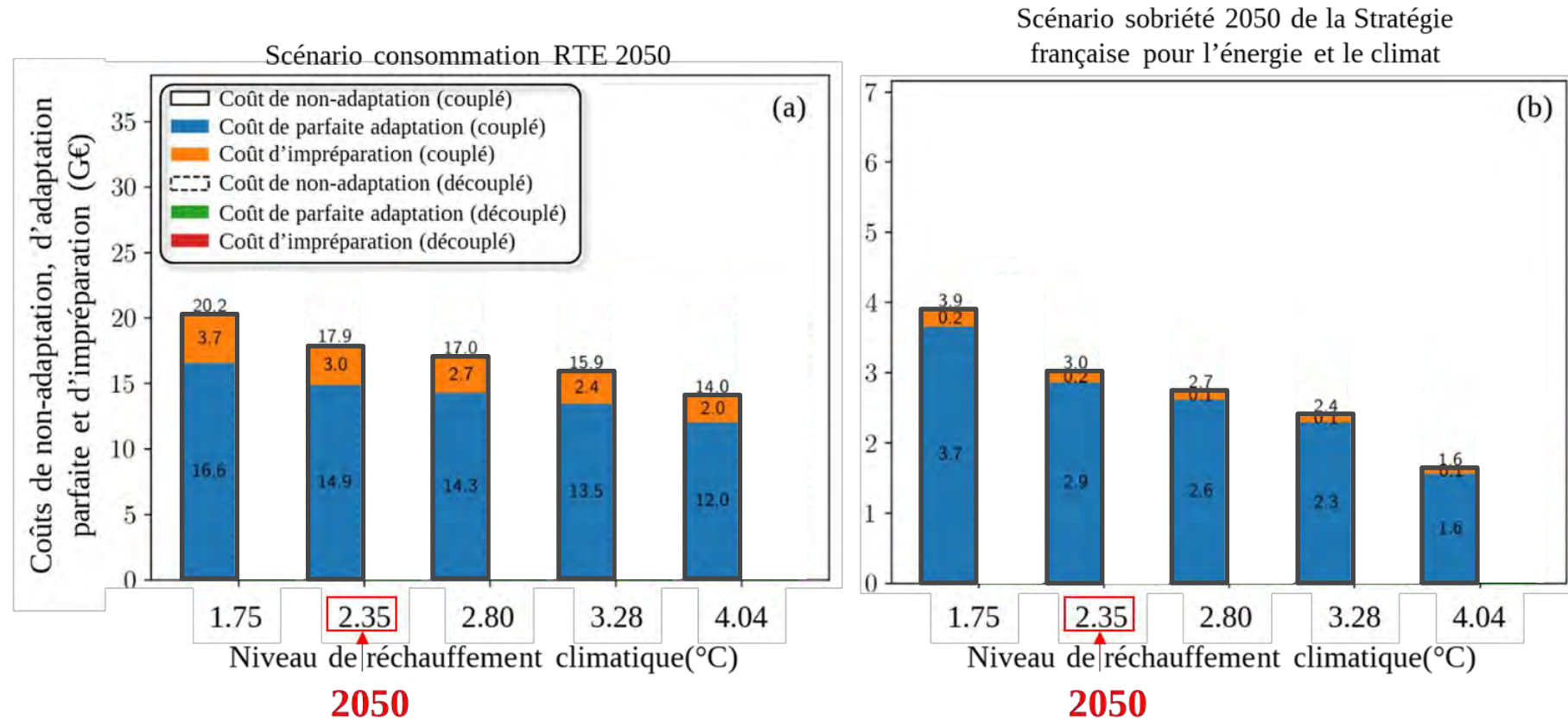
Importance de travailler sur l'évaluation des risques extrêmes à très faible probabilité d'occurrence pour pouvoir mieux prévoir et anticiper la résilience du réseau en termes de sécurité des infrastructures et de la gestion de l'équilibre offre-demande.



# Changement climatique et système électrique

## Coût de l'impréparation

**Pas d'impact négatif du changement climatique (-30 à -60%) mais impact très fort du scénario de demande énergétique sur le coût de l'impréparation du système (facteur 5 entre le scénario de consommation modéré de RTE 2050 et sobre de la SFEC)**



Sources: Delort-Ylla et al. (2025; en préparation)

**Importance de coupler les effets du changement climatique et de la demande énergétique pour la modélisation prospective**

# 3 messages à emporter

**Importance d'adapter** le système énergétique pour répondre à la demande croissante en électricité

- **amélioration de l'efficacité des systèmes énergétiques ou remplacement du type de système de refroidissement et de source de carburant pour réduire la vulnérabilité des centrales** aux contraintes hydriques
- **contribution des technologies de production d'électricité non dépendantes de l'eau** (énergie éolienne, photovoltaïque et marine) moins affectées par le changement climatique

**Importance d'évaluer l'impact du changement climatique sur l'opération du système électrique** en particulier aux pics de demande **et la structure de coût de production**, en intégrant d'autres secteurs de consommation thermosensible (mobilité électrique, data centers,...).

**Importance de travailler sur l'évaluation des risques extrêmes à très faible probabilité d'occurrence** pour pouvoir mieux prévoir et anticiper la résilience du réseau en termes de sécurité des infrastructures et de la gestion de l'équilibre offre-demande.

Merci pour votre attention



**INTRODUCTION**  
UNE INTRODUCTION À  
**LA MÉTÉO... ENNEMIE OU AMIE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ?**  
Philippe Drobinski  
Préface de Jean Jouzel  
edpsciences

Your paragraph text

**La météo...ennemie ou amie de la transition énergétique ?**  
Disponible sur [laboutique.edpsciences.fr](http://laboutique.edpsciences.fr)  
188 pages  
978-2-7598-3570-6

