



# Simulations à climat constant : conception et utilisations

---

[martine.veysseire@meteo.fr](mailto:martine.veysseire@meteo.fr) [serge.farges@meteo.fr](mailto:serge.farges@meteo.fr)

# Simulations à climat constant : les objectifs

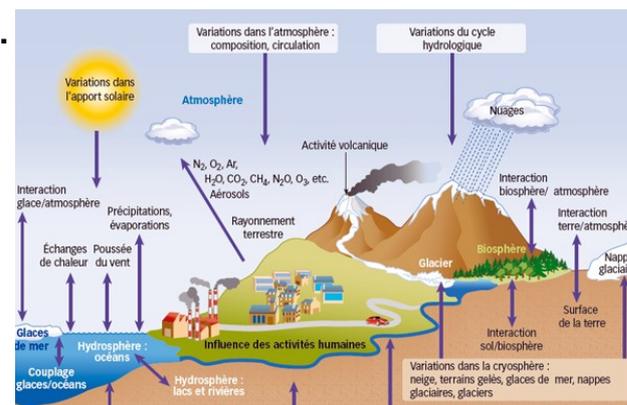
---

- Dès 2008, pour répondre aux besoins des secteurs de l'Énergie et de l'Assurance en longues séries de données, Météo-France a proposé une démarche innovante : réalisation par un modèle climatique de simulations à climat stationnaire, dites "simulations à climat constant".
- L'objectif de la production de longues séries de données simulées à climat constant est de disposer d'un vaste échantillon de situations météorologiques potentielles pour évaluer
  - le climat et sa variabilité interne à un moment fixé de son évolution,
  - l'impact du climat au niveau économique sur les activités des entreprises et en terme de risques.
- Les simulations à climat constant doivent être interprétés comme des ensembles de réalisations possibles de 200 ou 400 années sous un même **climat non évolutif**. Ce ne sont ni des ré-analyses de situations passées ni des prévisions.

# Simuler le système climatique terrestre

Cinq composantes principales aux interactions multiples.

- Atmosphère
- Océans
- Neiges et glaces (cryosphère)
- Cycle de l'eau (hydrosphère)
- Biosphère



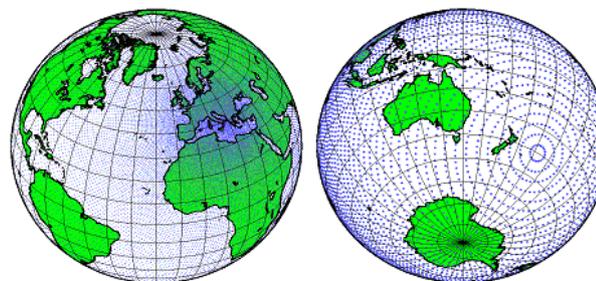
Phénomènes physiques extérieurs : forçages externes

- Origine naturelle : activité volcanique, variations de l'activité solaire, de l'orbite terrestre, ...
- Origine anthropique (activités humaines) : émissions de gaz à effet de serre, d'aérosols sulfatés, ...

Modèle numérique climatique de Météo-France : ARPEGE-Climat

- Modèle atmosphérique sur le globe incluant un module d'échange terre-atmosphère
- Associé à un modèle d'océan et de glace de mer (options non utilisées dans notre cas)
- Avec une capacité de zoom > études régionales du climat

ARPEGE-Climat continue à évoluer

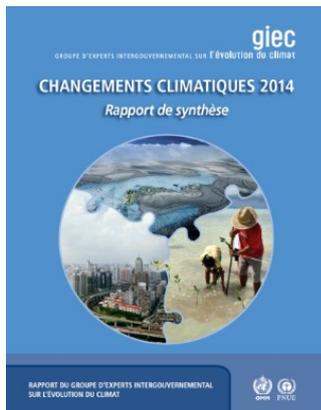
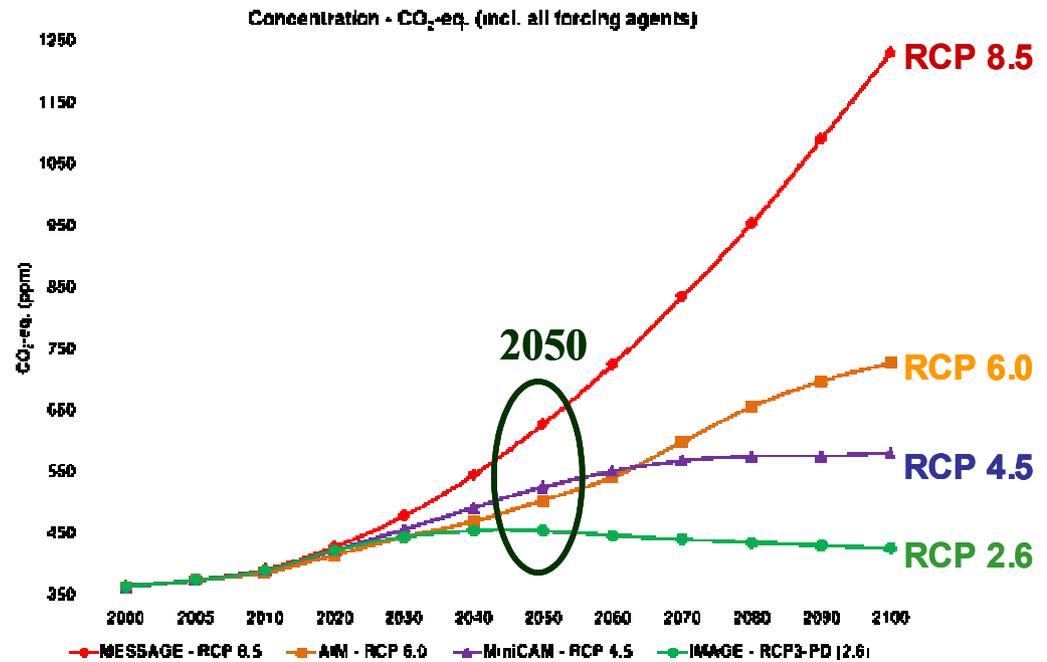


# Les hypothèses pour le climat futur

RCP Representative Concentration Pathway : hypothèses de changement climatique basées sur différentes évolutions des forçages radiatifs.

Références adoptées par le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat (= IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change) pour son 5ème rapport.

Rapports du GIEC : travaux de milliers de chercheurs analysant les tendances et prévisions mondiales en matière de changements climatiques. ([https://www.ipcc.ch/home\\_languages\\_main\\_french.shtml](https://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml))

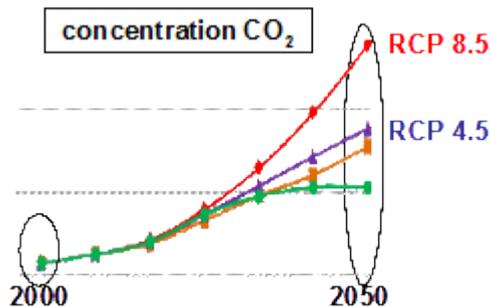


Désignation	Forçage radiatif <sup>1</sup>	Concentration <sup>2</sup>	Forme du profil
RCP8.5	>8,5 W/m <sup>2</sup> en 2100	>>~1 370 équiv.-CO <sub>2</sub> en 2100	Hausse
RCP6	~6 W/m <sup>2</sup> au niveau de stabilisation après 2100	~850 équiv.-CO <sub>2</sub> (au niveau de stabilisation après 2100)	Stabilisation sans dépassement
RCP4.5	~4,5 W/m <sup>2</sup> au niveau de stabilisation après 2100	~650 équiv.-CO <sub>2</sub> (au niveau de stabilisation après 2100)	Stabilisation sans dépassement
RCP3-PD <sup>3</sup>	Pic à ~3 W/m <sup>2</sup> avant 2100 puis déclin	Pic à ~490 équiv.-CO <sub>2</sub> avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

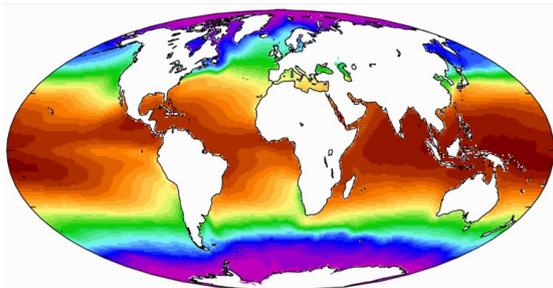
# La production : la modélisation

## 3 scénarios de 400 ans à climat constant

- Climat 2000
- Climat 2050 hypothèse RCP4.5
- Climat 2050 hypothèse RCP8.5



Séries de 400 ans de températures de surface de la mer à climat constant adaptées aux hypothèses de concentrations en gaz à effet de serre (sur la base de travaux du GIEC)

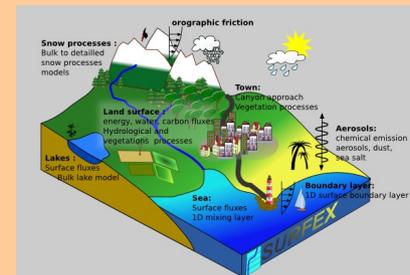
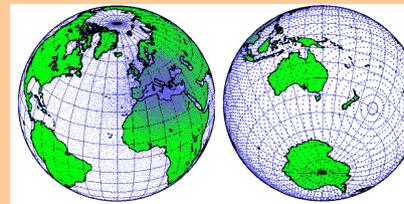


Forçage à climat constant

Simulations par pas de temps de 10 mn



## Modèle climatique sur le globe



ARPEGE-Climat, modèle développé à Météo-France, incluant le module de surface SURFEX

31 niveaux verticaux  
181724 points de grille  
3.400 kh de calcul

ARCHIVAGE  
horaire

82 paramètres  
Volume :160 To

# Les données archivées

<b>Nomenclature</b>	CC0 climat 2000
	CC1 climat 2050 RCP4.5
	CC2 climat 2050 RCP8.5

Paramètres horaires archivés en sortie de modèle (données brutes)

Domaines Europe et Afrique

- **Nébulosités**, eau précipitable
- **Température à 2 m**
- **Vent moyen et rafales à 10 m**
- **Précipitations, humidité à 2 m**
- Pression à la surface et ramenées au de la niveau mer
- Flux à la surface du sol : **rayonnements solaire** et thermique, flux de chaleur
- **Températures minimale et maximale tri-horaires**
- Paramètres tri-horaires en 9 niveaux plus élevés dans l'atmosphère
- Vent, température, humidité spécifique et géopotential (altitude) aux deux niveaux du modèle les plus proches du sol
- Paramètres sol : contenus en eau ou glace, température de surface et en profondeur, équivalent en eau de la neige accumulée ...

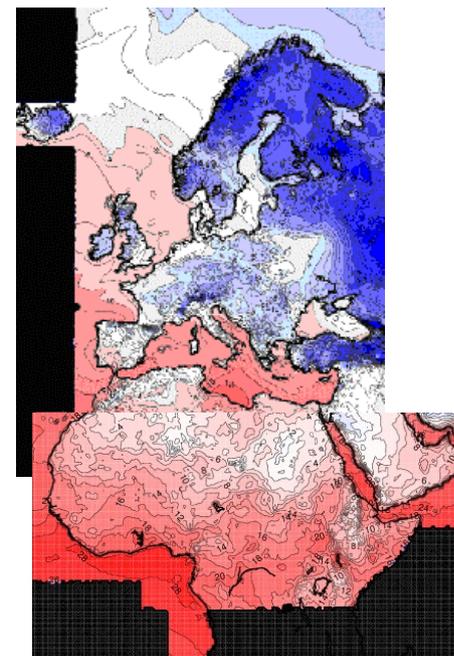
Domaine Atlantique

- Vent à 10 m, température de surface de la mer, pression mer

Domaine Madagascar

- Température et humidité à 2 m, rayonnement, vent à 10 m, précipitations

**Les simulations, tout en restant très stables à climat constant, peuvent présenter des décalages par rapport à des séries de données observées. Il convient d'effacer les biais dus à la modélisation par la mise en cohérence avec une référence climatologique connue.**



# Limites et avantages

---

## Limites

- Le forçage par les SST : le modèle n'est pas couplé à un modèle d'océan. L'introduction d'un tel couplage imposerait que le modèle soit à l'équilibre (activation sur plusieurs centaines d'années). Or, le climat qu'on veut simuler n'est pas à l'équilibre.
- La résolution spatiale un peu lâche pour certaines études locales
- Les méthodes de recalage
- Les valeurs extrêmes (à considérer avec prudence)
- L'utilisation d'un seul modèle => évaluation de l'incertitude ?

## Avantages

- Stabilité du climat représenté
- Long échantillon
- Évènements potentiels hors de l'historique connu
- Séries climat futur

# Applications

---

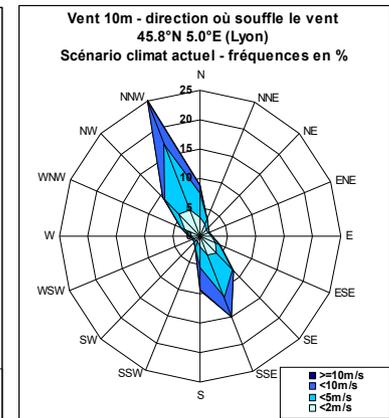
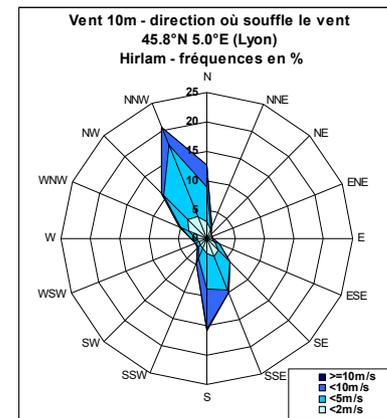
Les données sont fournies sur des zones géographiques d'intérêt pour le client ou sur des listes de points (villes, stations, ...), le format étant défini en concertation avec le client.

Parmi les applications possibles, en fourniture de données à façon et en études, on note principalement :

- Calcul de statistiques (par exemple cycles horaires quotidiens moyens par mois, par saison ou par an et variabilité autour de la moyenne)
- Calcul d'indices (météo-sensibilité, impacts, ...)
- Alimentation des modèles de consommation ou d'impact
- Production de cartes, roses des vents, visualisation de profils verticaux, ...
- Évaluation en fréquence, intensité et impact des situations de crise potentielle
- Études comparatives climat 2000 – climat 2050 RCP4.5 – climat 2050 RCP8.5, et impact sur les activités des clients.
- Aide à la décision pour localisation, extension et adaptation d'équipements.
- Détermination de types de temps avec classification sur la base d'un ensemble de paramètres pertinents suivant la sensibilité des applications de l'utilisateur,
- Études de corrélations multi-paramètres (ex : vent-température sur l'Europe)
- Activation de modèles spécifiques régionaux (hydraulique, agriculture, ...), par exemple la chaîne SIM2 pour l'évaluation des sécheresses ou des inondations.

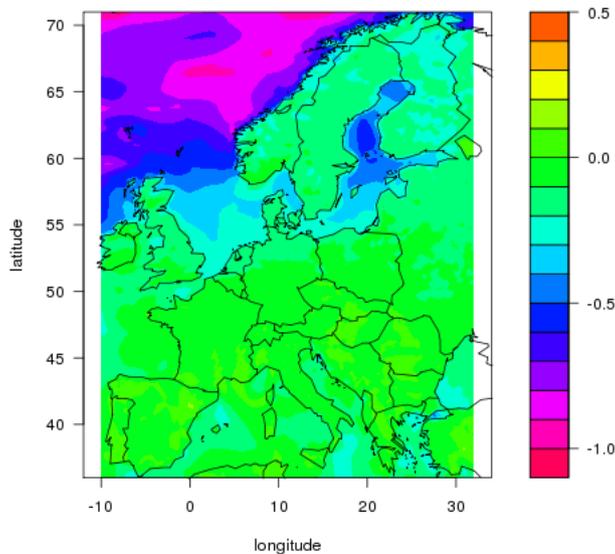
# Le vent à 10 m et 100 m

- Roses de vents des simulations cohérentes avec la référence climatologique.
- Moyennes du vent à 10 m et à 100 m pour les simulations à climat futur très légèrement inférieures à celles de la simulation à climat actuel.
- Fréquence, trajectoires et force des tempêtes de la simulation à climat actuel en accord avec les événements historiques observés.



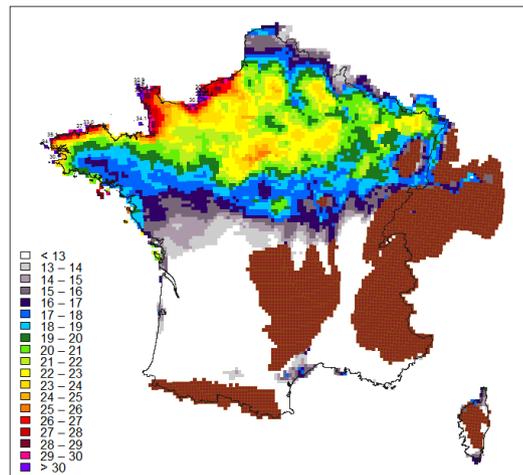
Evolution de la force moyenne du vent 10m  
entre climat 2000 et climat 2050 RCP4.5  
au printemps

liff2050RCP4.5-current climate - spring-mam 10 m Winc

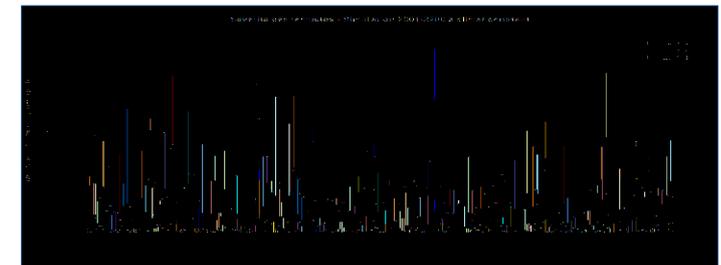


Exemple de tempête simulée  
climat 2000

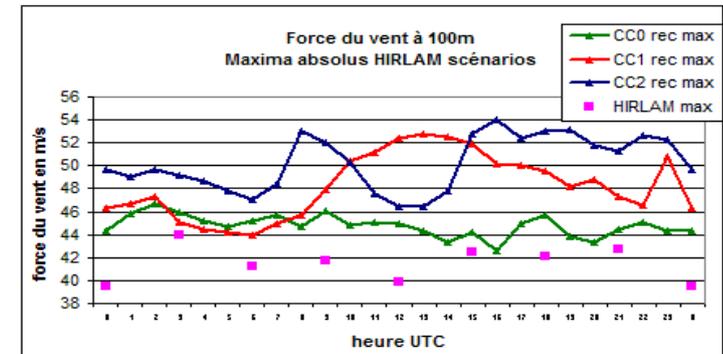
tempête du 16/02/2009 07H au 16/02/2009 16H (durée : 10 heures)



13 m/s < fffMax < 37.1 m/s pour 69% des points de plaine



Indice de sévérité des tempêtes sur 200 ans



Records absolus de force du  
vent à 100 m sur l'Europe

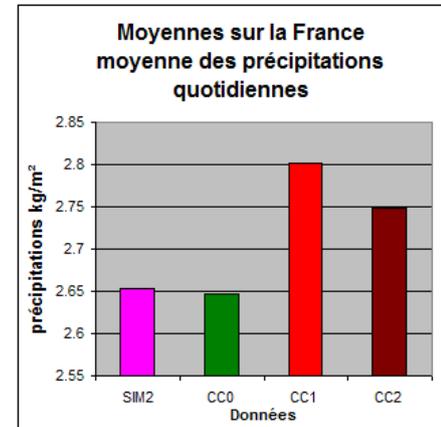


# Les précipitations

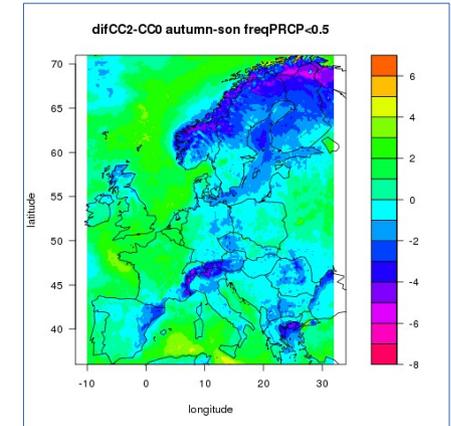
- Sur la France, pluviométrie moyenne de la simulation 2050 RCP4.5 > pluviométrie moyenne de la simulation 2050 RCP8.5 > pluviométrie moyenne de la simulation à climat actuel. Mais disparités géographiques importantes.
- Études en cours ou à envisager : analyse des fréquences, des quantiles, des évolutions selon la zone géographique ou les mois de l'année, calculs de cumuls...
- Le modèle ne peut pas restituer de manière fine les précipitations intenses liées aux phénomènes cévenols. Un modèle régional représentant la convection serait nécessaire.

France	Moyenne de précipitations quotidiennes en kg/m <sup>2</sup>	Record de précipitations quotidiennes en kg/m <sup>2</sup>
Référence	2.65	529.09
Climat actuel	2.65	387.51
2050 RCP4.5	2.80	502.66
2050 RCP8.5	2.75	360.78

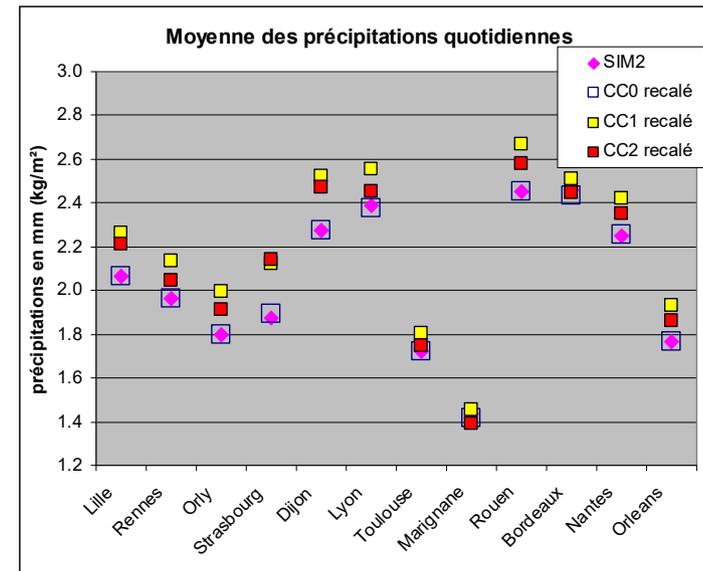
*Les valeurs record sont sur des points de grille situés en Corse ou dans les Cévennes*



*Evolution des fréquences de précipitations nulles ou <0,5mm entre climat 2000 et climat 2050 RCP8.5*



*Moyenne des précipitations quotidiennes à climat 2000 et climat 2050 pour 12 villes françaises*

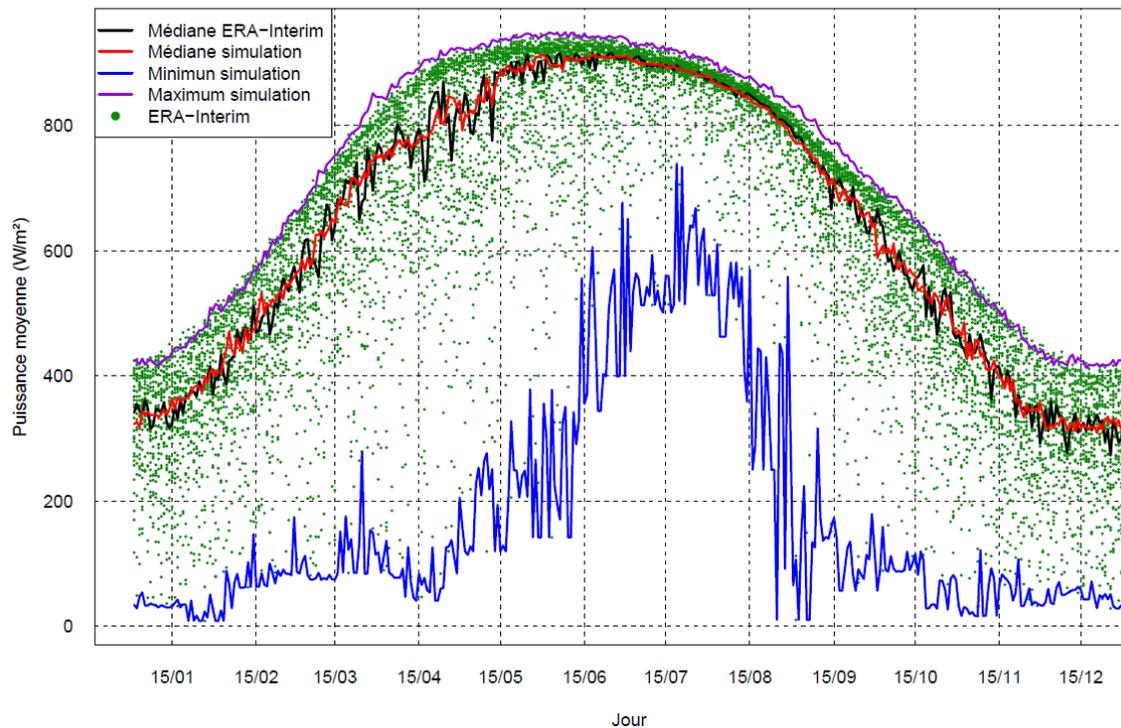


# Le rayonnement

- Données de rayonnement global, direct et diffus disponibles au pas de temps horaire ( $\text{W/m}^2$ )
- Peu de différences entre les simulations, mais certaines zones sont plus touchées
- Interpolation temporelle de la climatologie de référence => perte en variabilité temporelle

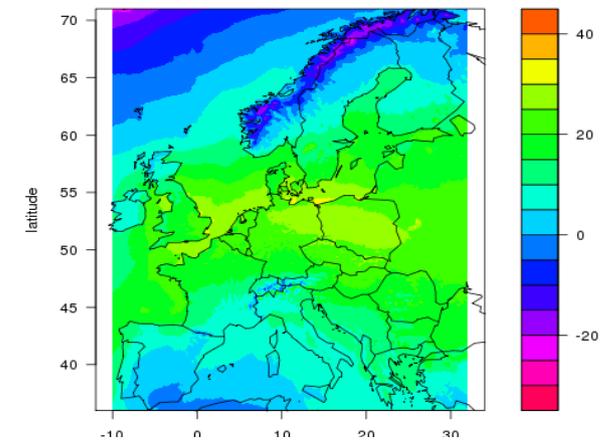
*Exemple de travail de recalage du rayonnement global sur la référence climatologique ERA-Interim*

Rayonnements tri-horaires pour le points de grille 5394 à 12h – Simulation recalée

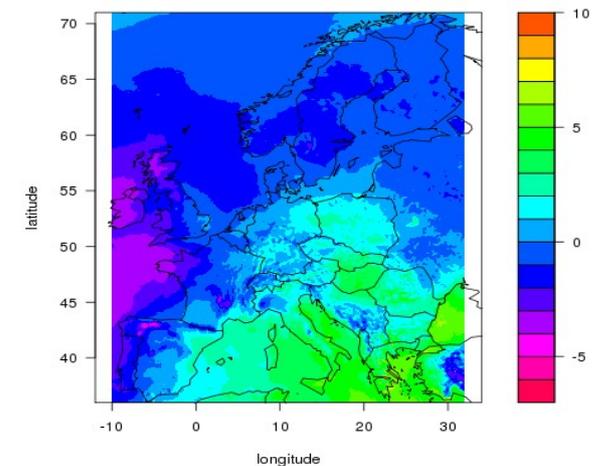


*Evolution du rayonnement global en 2050*

*Climat 2050 RCP4.5 – climat 2000 été*  
diff2050RCP4.5-current climate - summer-jja Global Rad

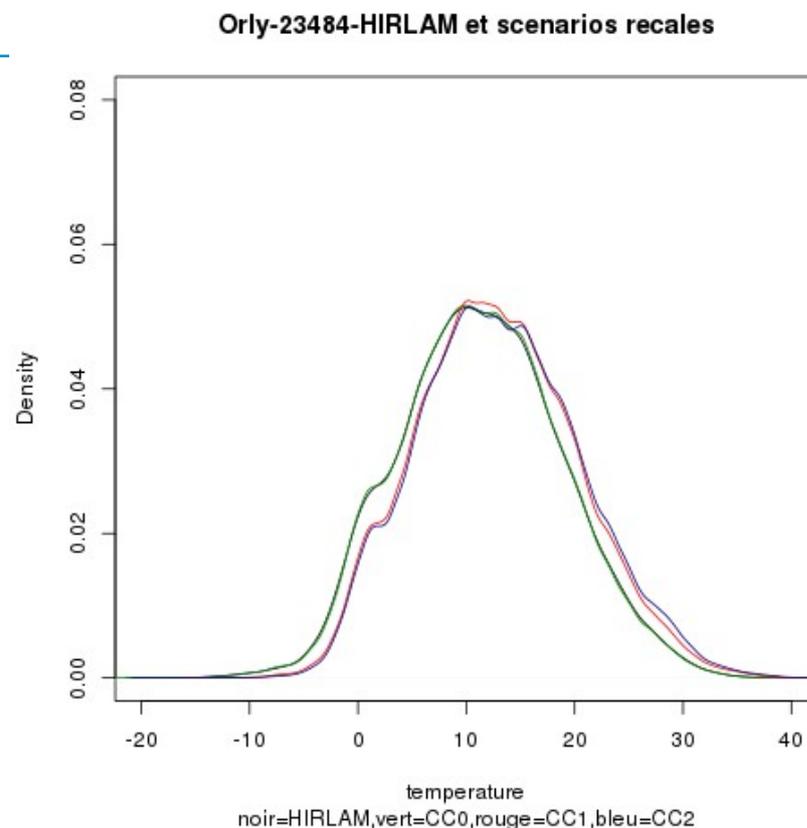
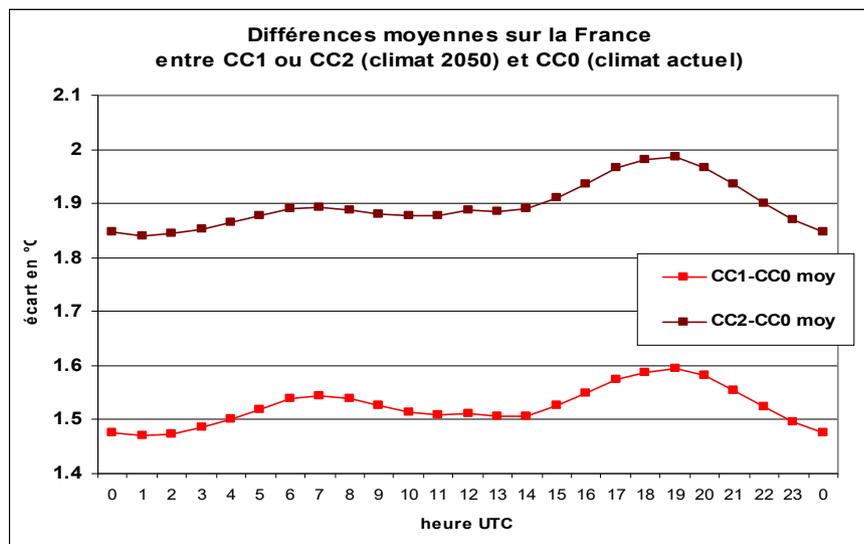


*Climat 2050 RCP8.5 – climat 2000 hiver*  
diff2050RCP8.5-current climate - winter-djf Global Rad



# La température à 2 m

- Réchauffement moyen sur la France d'environ 1,5°C pour la simulation climat 2050 RCP4.5 et de 1,9°C pour la simulation climat 2050 RCP8.5 par rapport au climat actuel.
- La distribution des valeurs se décale vers des températures plus élevées pour les scénarios à climat 2050.



*Décalage de la courbe de densité vers des valeurs plus élevées pour les scénarios à climat futur (rouge et bleu) par rapport au climat actuel (noir et vert)*

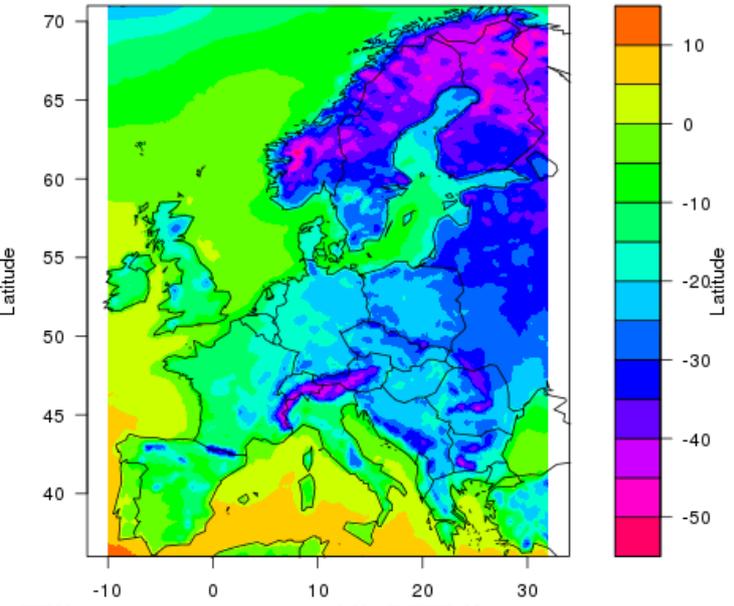
- Le **traitement des extrêmes** à climat actuel et futur a nécessité d'importants travaux de recherche et développement.

# Comparaisons entre simulations

## T2m min décembre 00 UTC

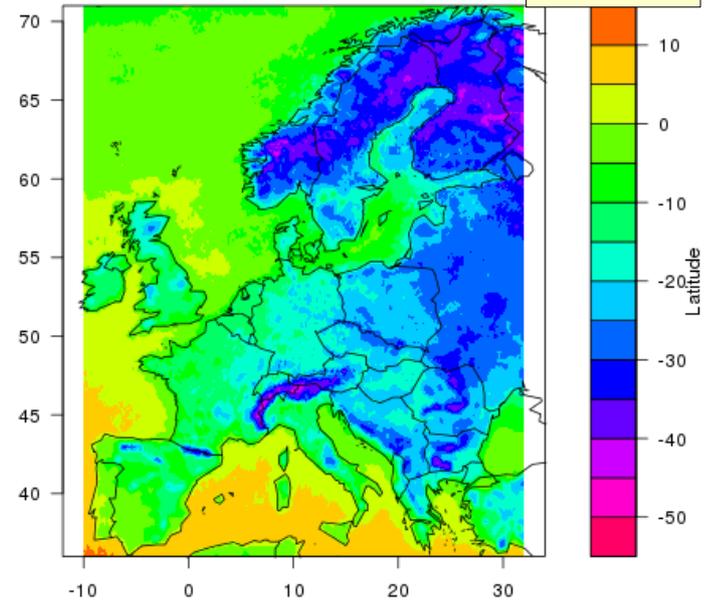
Min de la t2m en décembre à 00h  
pour la simulation CC0 recalée par REG

**Actuel**



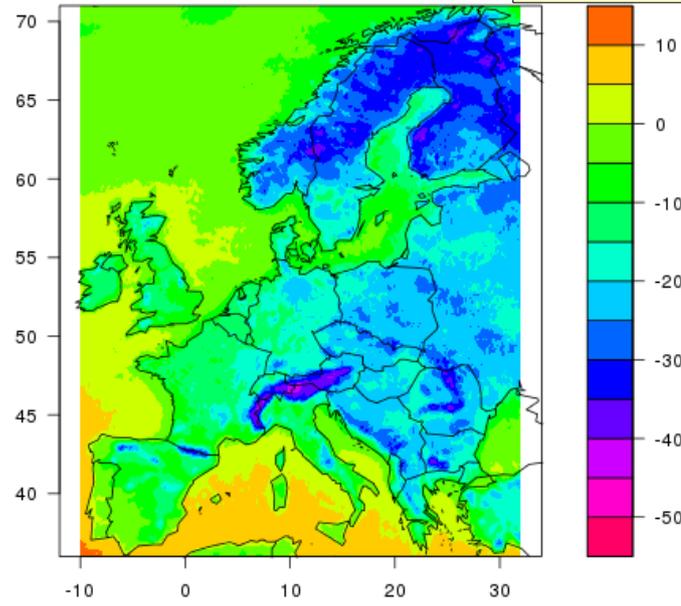
Min de la t2m en décembre à 00h  
pour la simulation CC1 recalée par REG

**2050  
RCP4.5**



Min de la t2m en décembre à 00h  
pour la simulation CC2 recalée par REG

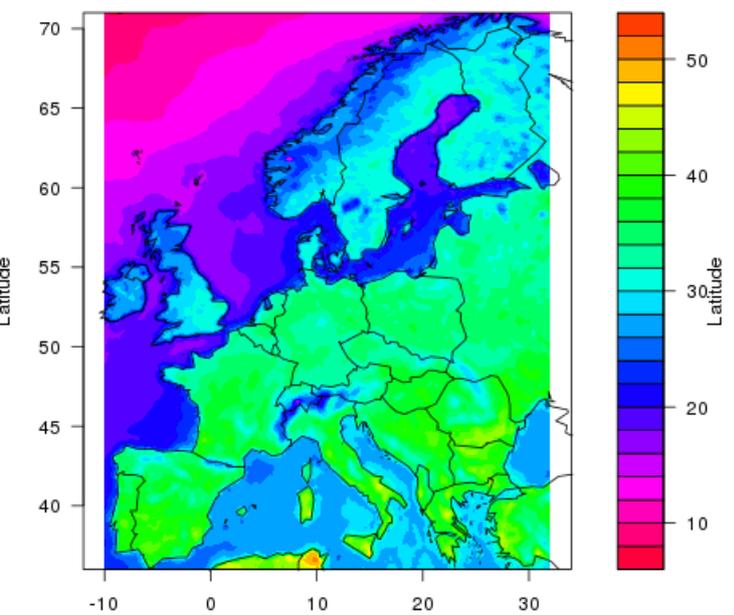
**2050  
RCP8.5**



## T2m max juin 12 UTC

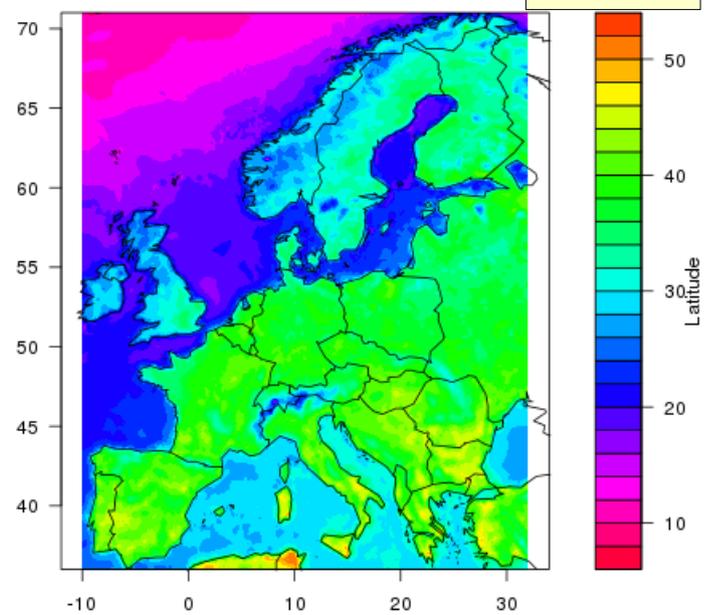
Max de la t2m en juin à 12h  
pour la simulation CC0 recalée par REG

**Actuel**



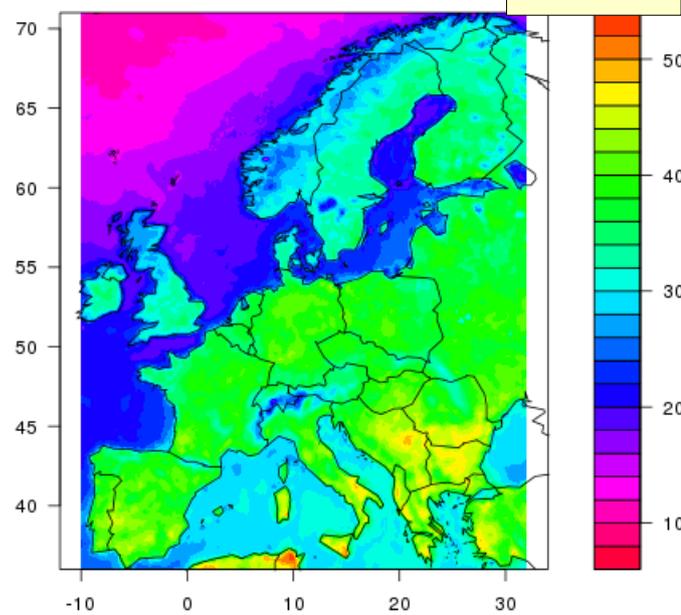
Max de la t2m en juin à 12h  
pour la simulation CC1 recalée par REG

**2050  
RCP4.5**



Max de la t2m en juin à 12h  
pour la simulation CC2 recalée par REG

**2050  
RCP8.5**

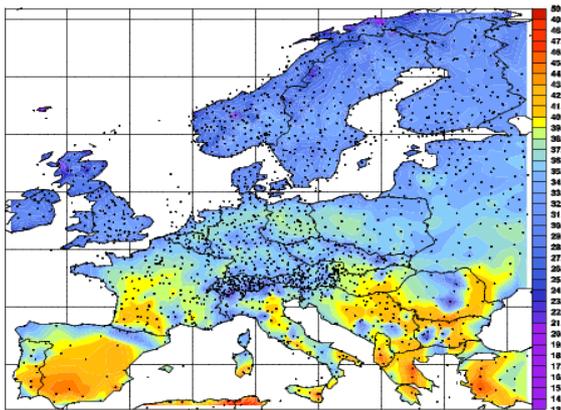


# Séries de températures sur des stations

Production de séries horaires pour 2265 villes sur l'Europe et 1296 villes en France

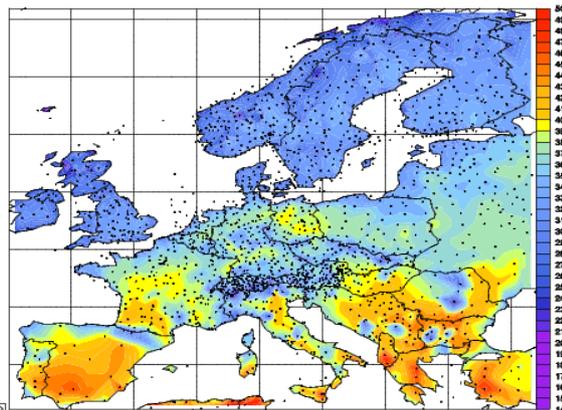
2000

TEMPERATURE MAXIMALES SUR LES 200 ANS DU SCENARIO CC0  
MOIS DE JUIN



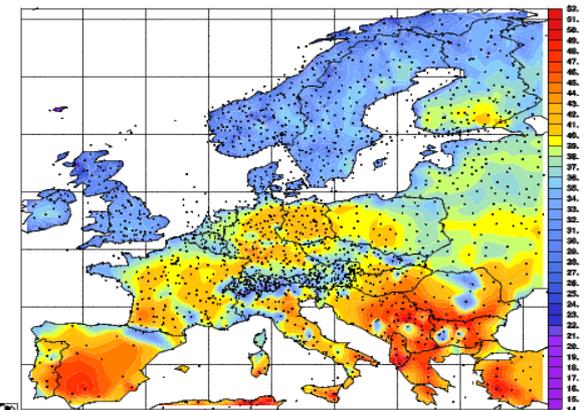
2025 interpolé

TEMPERATURE MAXIMALES SUR LES 200 ANS DU SCENARIO CC2025  
MOIS DE JUIN

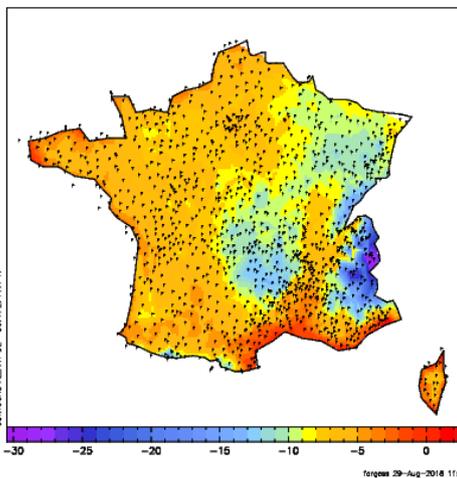


2050

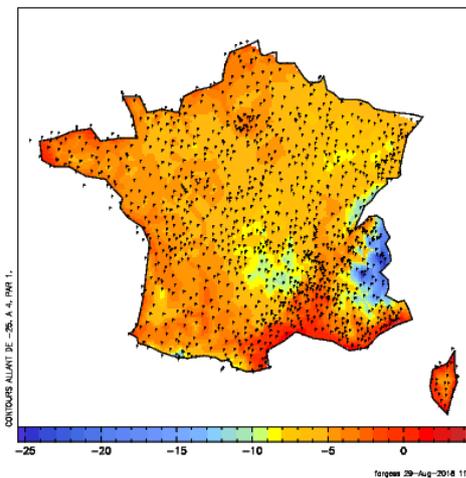
TEMPERATURE MAXIMALES SUR LES 200 ANS DU SCENARIO CC2  
MOIS DE JUIN



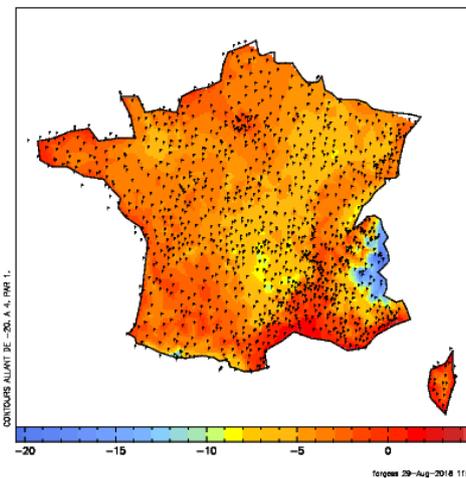
TEMPERATURE MINIMALES SUR LES 200 ANS DU SCENARIO CC0  
MOIS DE AVRIL



TEMPERATURE MINIMALES SUR LES 200 ANS DU SCENARIO CC2025  
MOIS DE AVRIL



TEMPERATURE MINIMALES SUR LES 200 ANS DU SCENARIO CC2  
MOIS DE AVRIL



# Vagues de chaleur et de froid sur la France

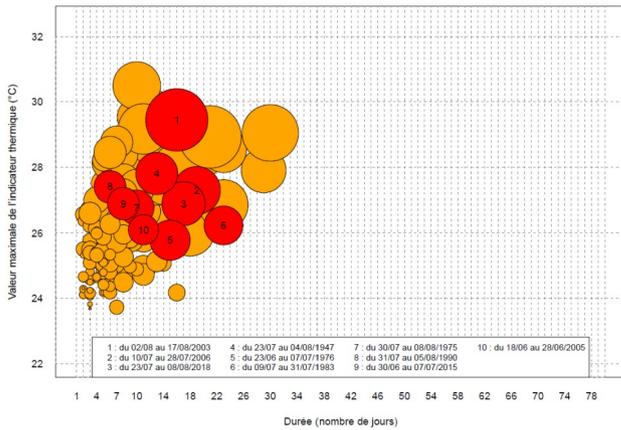
## Évaluation des vagues de chaleur ou de froid

2000

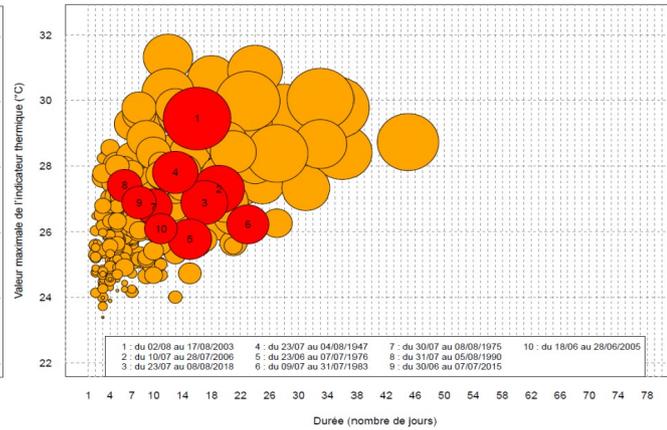
2025 interpolé

2050 RCP8.5

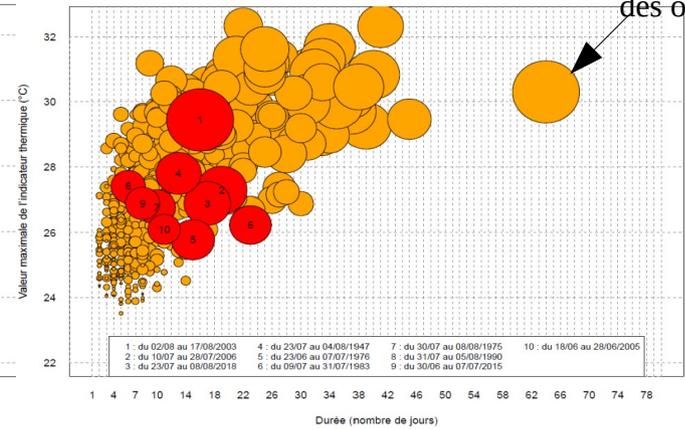
Vagues de chaleur pour le scénario CC0 – Moyenne pondérée France  
Scénario en orange – Observations en rouge



Vagues de chaleur pour le scénario CC2025/CC2 – Moyenne pondérée France  
Scénario en orange – Observations en rouge

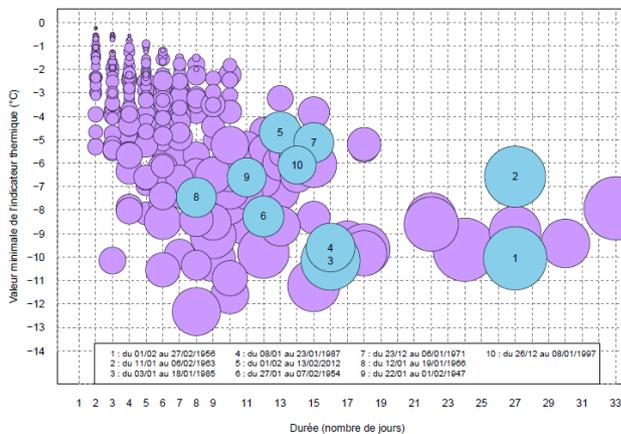


Vagues de chaleur pour le scénario CC2 – Moyenne pondérée France  
Scénario en orange – Observations en rouge

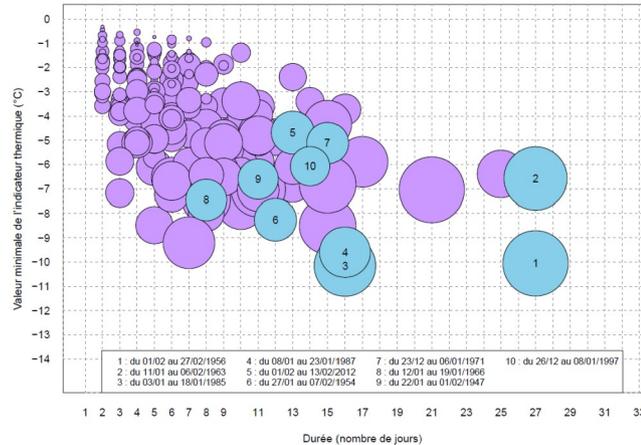


Réalisme ?  
Modélisation  
des orages ?

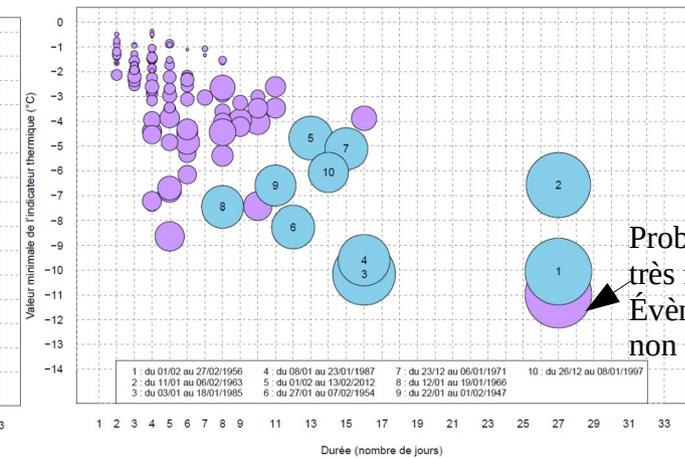
Vagues de froid pour le scénario CC0 – Moyenne pondérée France  
Scénario en violet – Observations en bleu



Vagues de froid pour le scénario CC2025/CC2 – Moyenne pondérée France  
Scénario en violet – Observations en bleu



Vagues de froid pour le scénario CC2 – Moyenne pondérée France  
Scénario en violet – Observations en bleu



Probabilité  
très faible,  
Évènement  
non écarté

# Éléments de comparaison avec des scénarios du GIEC

Comparaison des températures maximales et minimales observées (1985 - 2015), simulées avec les simulations du GIEC Eurocordex (2035-2065) et simulées à climat constant 2050 (200 ans).

Boîte à Moustache Scénario RCP4.5 pour TOURS

## Moyennes mensuelles des températures maximales

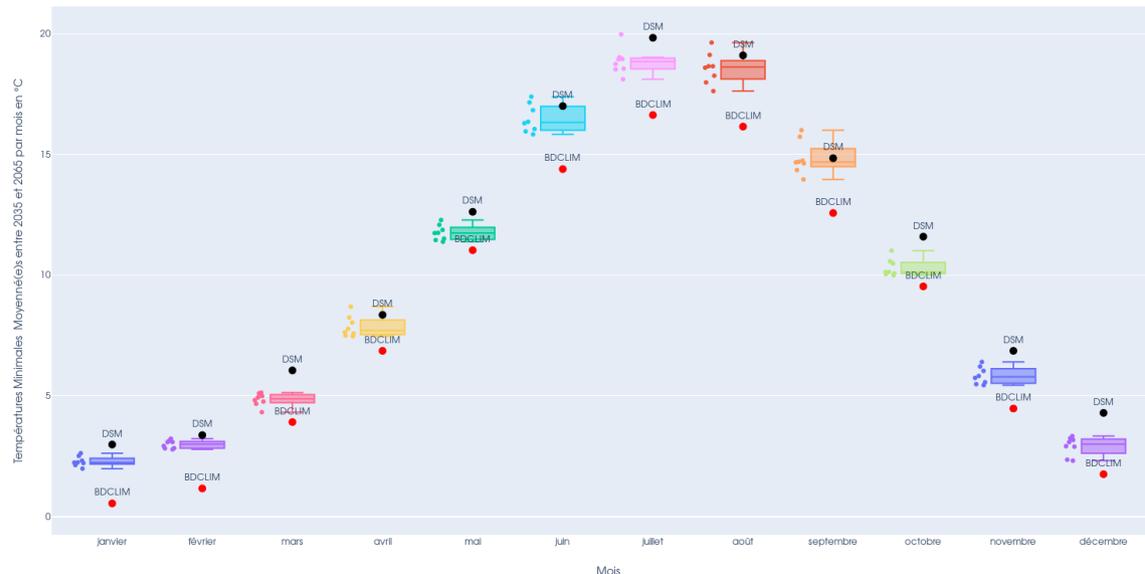
**Tours 2050 RCP 4.5**  
rouge : observations  
noir : climat constant  
boîtes : Eurocordex



Boîte à Moustache Scénario RCP8.5 pour LYON-BRON

## Moyennes mensuelles des températures minimales

**Lyon 2050 RCP 8.5**  
rouge : observations  
noir : climat constant  
boîtes : Eurocordex



# Éléments de comparaison avec des scénarios du GIEC

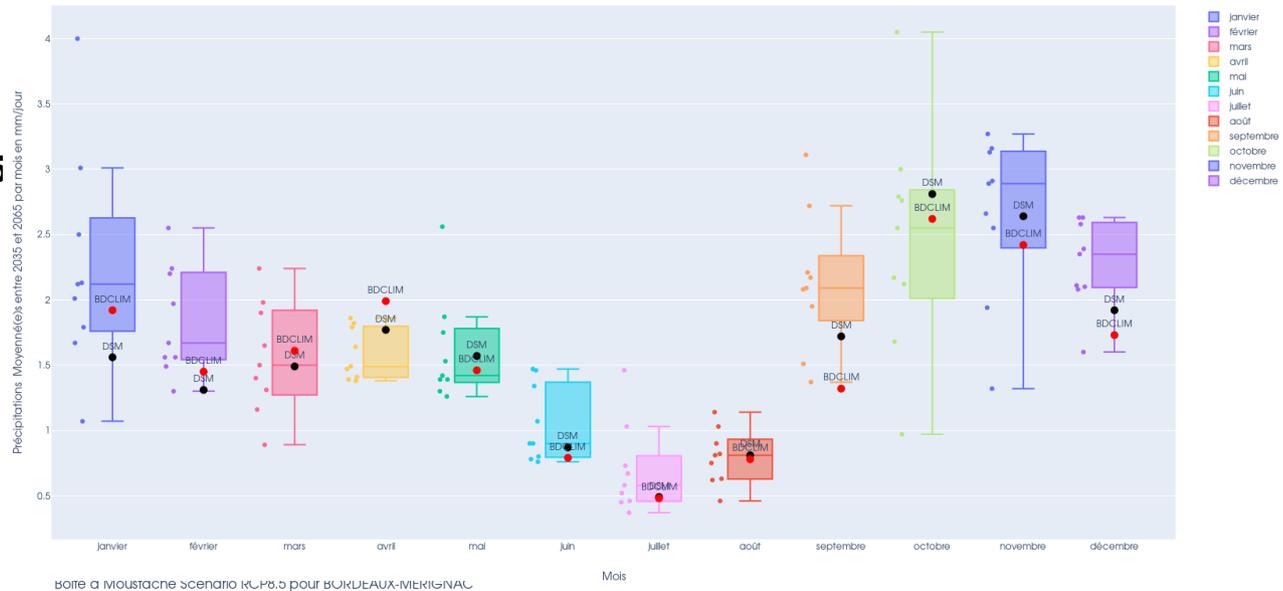
Comparaison des précipitations moyennes observées (1985 - 2015), simulées avec les simulations du GIEC Eurocordex (2035-2065) et simulées à climat constant 2050 (200 ans).

Boîte à Moustache Scénario RCP4.5 pour PERPIGNAN

## Moyennes mensuelles des précipitations

### Perpignan 2050 RCP 4.5

rouge : observations  
noir : climat constant  
boîtes : Eurocordex

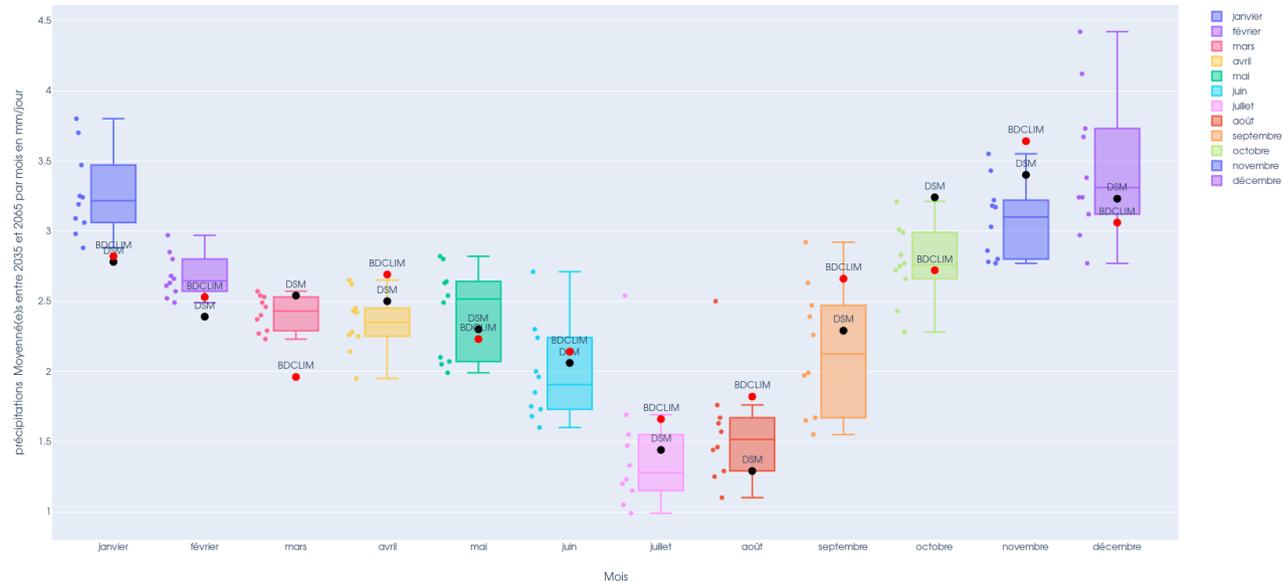


Boîte à Moustache Scénario RCP8.5 pour BORDEAUX-MERIGNAC

## Moyennes mensuelles des précipitations

### Bordeaux 2050 RCP 8.5

rouge : observations  
noir : climat constant  
boîtes : Eurocordex



# Perspectives

---

- Extension des travaux aux 200 années simulées supplémentaires.
- Travail sur l'évaluation des durées de retour, en considérant ou non les auto-corrélations et la non stationnarité du paramètre température (travaux Serge Farges).
- Mise en œuvre du modèle TRIP de routage des ruissellements avec les données des simulations pour le calcul de débits des cours d'eau en Europe (en projet).
- Études des impacts sur l'agriculture, en exploitant les données produites par le modèle régional SIM2 sur la France à partir des données des simulations : contenus en eau des sols, températures du sol (plusieurs niveaux de profondeur), débits des cours d'eau (plus de 1000 sites en France), ETP...
- Comparaison des simulations à climat constant avec les différents scénarios à climat évolutif du GIEC, issus de différents modèles (en cours).
- Application d'un modèle de vagues pour estimer les submersions marines.

---

# ANNEXES

# Le recalage sur une référence climatologique

---

- Les méthodes de recalage reposent sur l'adaptation de la distribution des données simulées à la distribution des données de la référence climatologique.
- La principale difficulté réside dans la correction à porter aux valeurs extrêmes, la référence ne donnant que peu d'informations sur les queues de distribution.
- La méthode quantile-quantile qui modifie les données simulées quantile par quantile est efficace jusqu'au dernier quantile. Au delà, pour les valeurs extrêmes, on doit extrapoler les corrections.
- L'utilisation d'une anamorphose, sur le même principe que la méthode quantile-quantile, permet de ne pas choisir arbitrairement les quantiles, mais de les adapter à la forme de la distribution de la référence climatologique.
- Pour le climat futur, nous ne disposons pas de référence climatologique. On peut utiliser la correction quantile-quantile définie à climat actuel. Cependant, plus la distribution à climat futur s'éloigne de la distribution à climat actuel en moyenne et en écart-type, plus les risques d'introduction de biais sont élevés.
- Pour les paramètres déjà bornés comme la nébulosité et le rayonnement, des méthodes spécifiques sont mises en œuvre.

# Méthode d'estimation des bornes absolues de température

---

La démarche repose sur l'idée qu'à un climat donné, en un lieu donné, la température ne peut pas dépasser un seuil maximal et un seuil minimal. Il s'agit d'évaluer de manière réaliste ces seuils qu'on appellera bornes absolues.

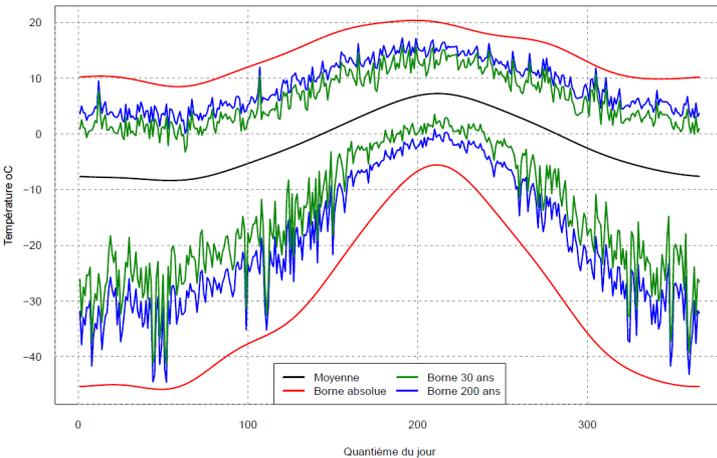
- Regroupement spatial de points de grille en tenant compte de leur corrélation (pour 00, 06, 12 et 18 UTC)
- Passage dans l'espace des probabilités et choix d'estimateurs de densité de probabilité (bornés et non paramétriques)
- Estimation des bornes mensuelles inférieures et supérieures pour chaque point de grille et chaque réseau (00, 06, 12 et 18 UTC)
- Estimation des bornes absolues quotidiennes grâce à une technique d'interpolation FFT sous contrainte

# Étude probabiliste des extrêmes de température

Évaluation des extrêmes de température sur la base d'une série de référence pour chaque point de grille

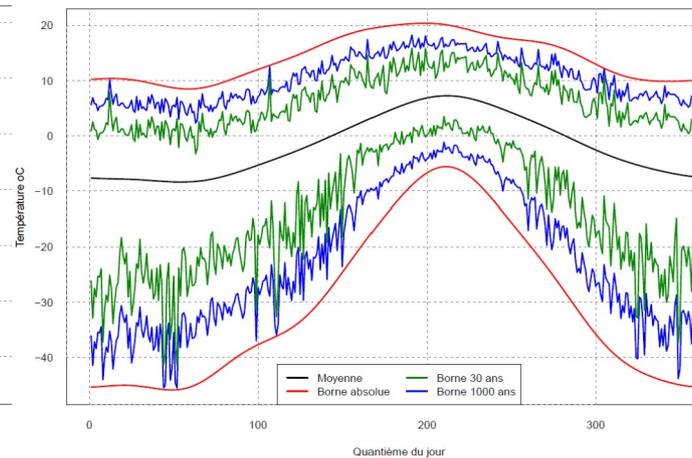
**200 ans**

Bornes des températures à 00h pour le point 09374  
Lon : 7.80 Lat : 62.20



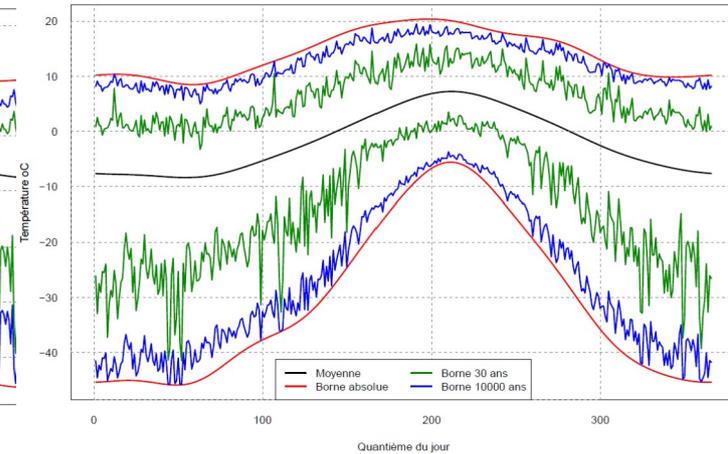
**1 000 ans**

Bornes des températures à 00h pour le point 09374  
Lon : 7.80 Lat : 62.20



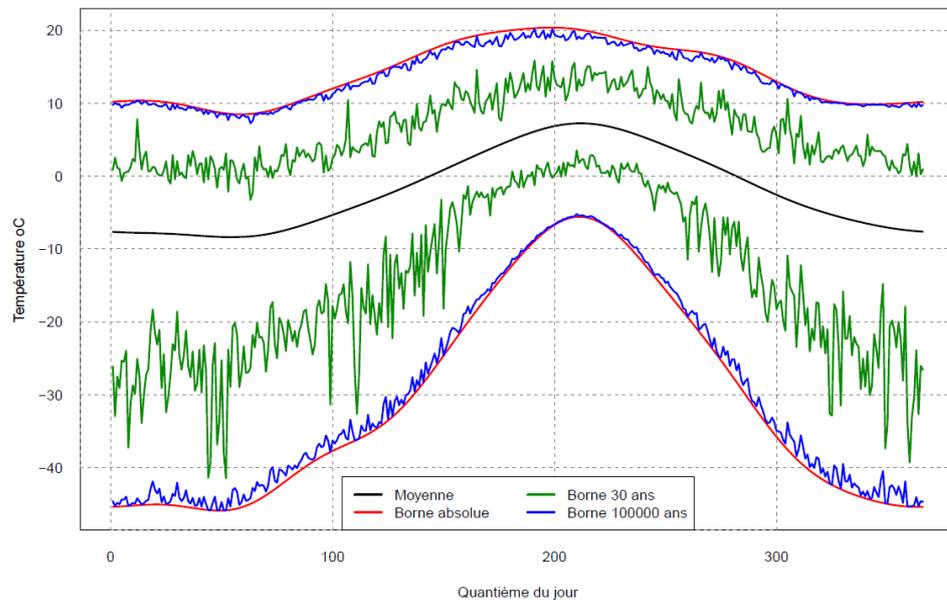
**10 000 ans**

Bornes des températures à 00h pour le point 09374  
Lon : 7.80 Lat : 62.20



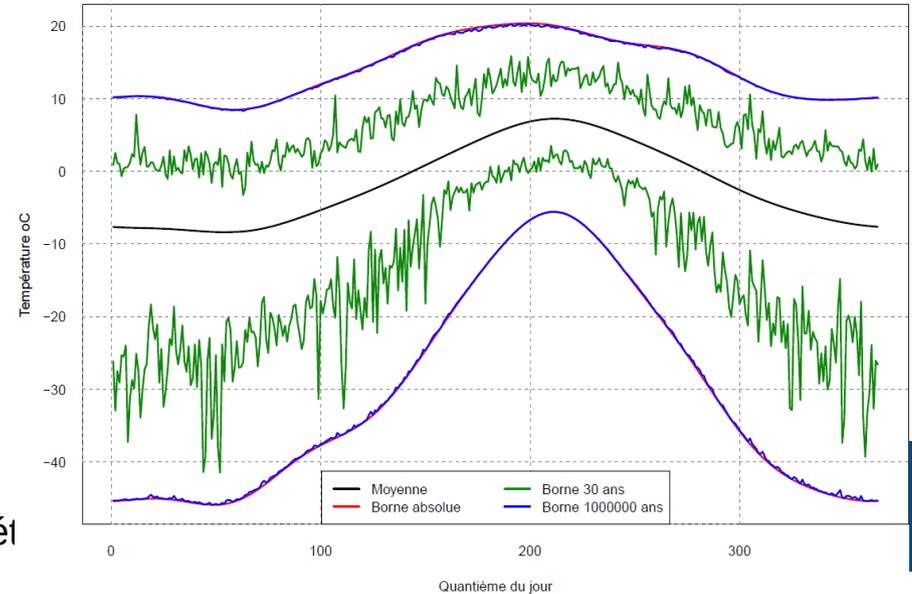
Bornes des températures à 00h pour le point 09374  
Lon : 7.80 Lat : 62.20

**100 000 ans**



Bornes des températures à 00h pour le point 09374  
Lon : 7.80 Lat : 62.20

**1 000 000 ans**



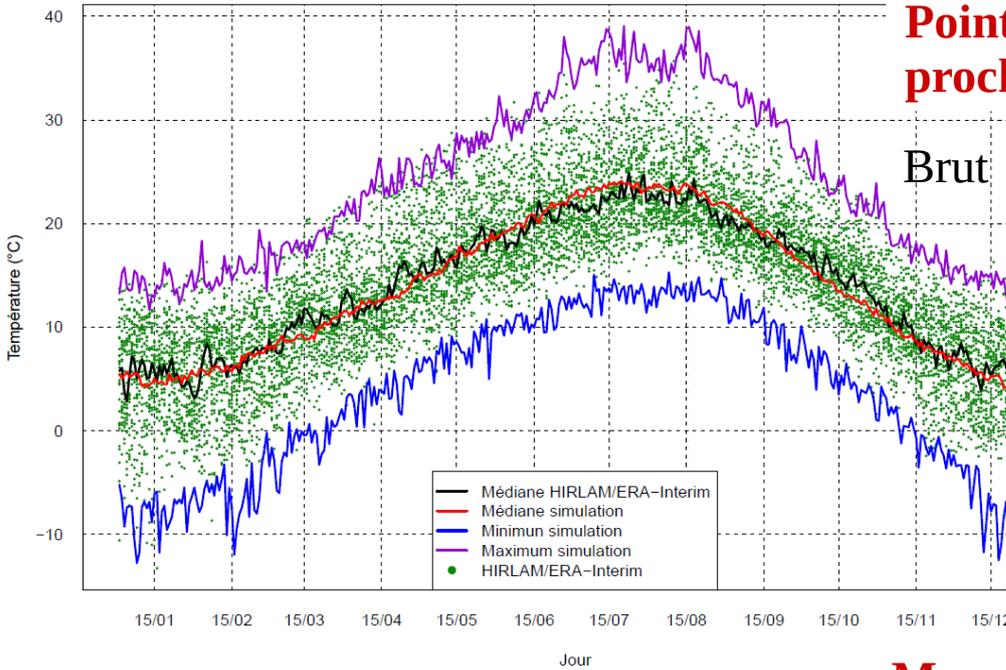
Mét

# Application aux simulations

Températures pour le point de grille 23484 à 12h – Simulation CC0 brute

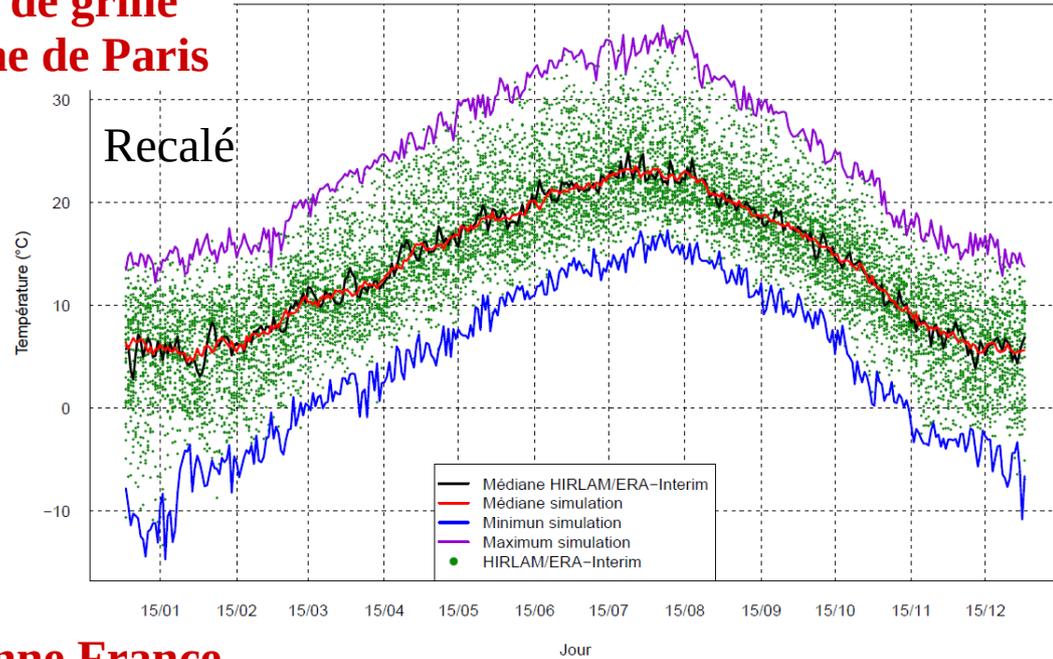
**Point de grille  
proche de Paris**

**Brut**



Températures pour le point de grille 23484 à 12h – Simulation CC0 recalée

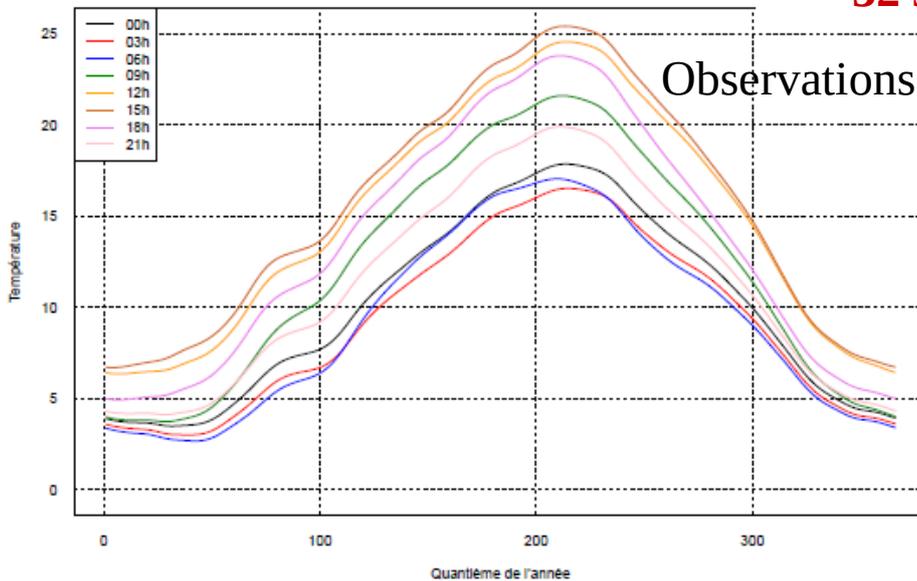
**Recalé**



Observations moyennées sur les 32 stations  
après lissage splines (nouveau scénario)

**Moyenne France  
32 stations**

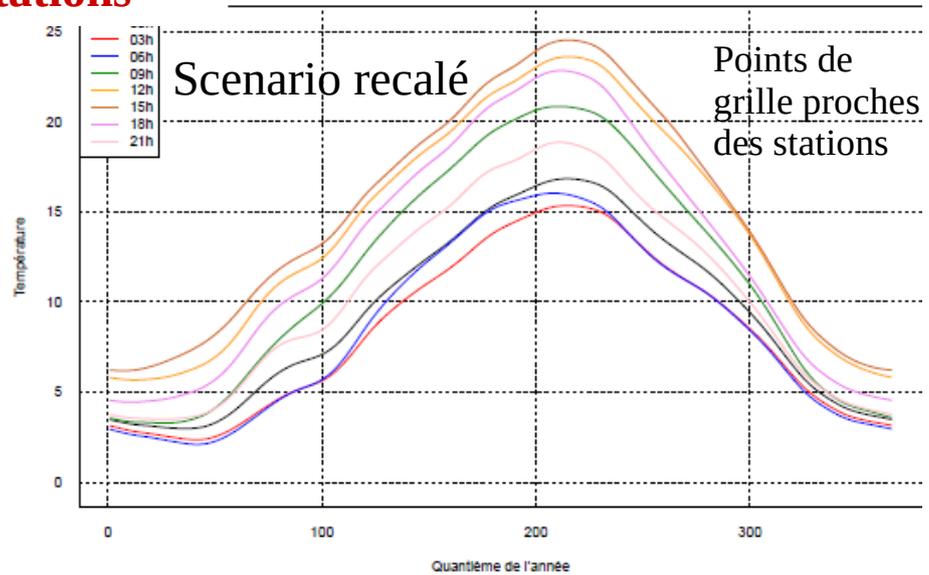
**Observations**



Simulations corrigées moyennées sur les 32 stations  
après lissage splines (nouveau scénario)

**Scenari recalé**

**Points de  
grille proches  
des stations**



# Recalage de la simulation à climat actuel

## T2m min février 00 UTC

Le recalage permet d'obtenir des extrêmes plus prononcés

Min de la t2m en février à 00h pour HIRLAM/ERA-Interim

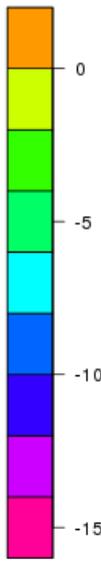
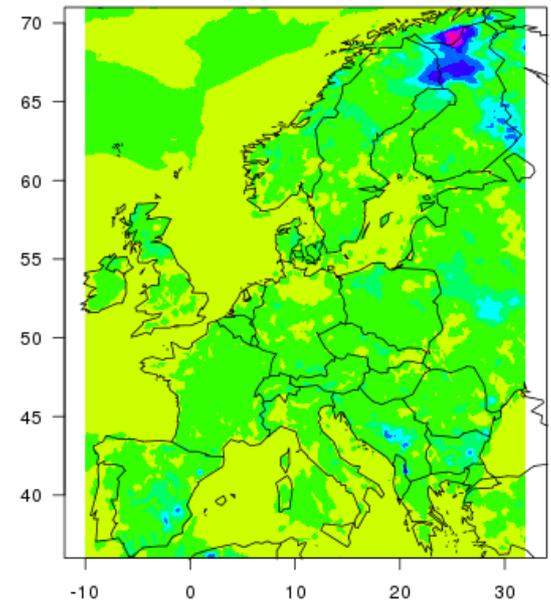
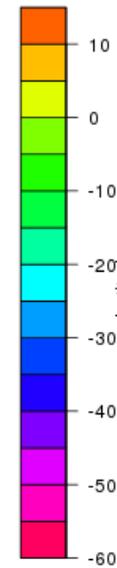
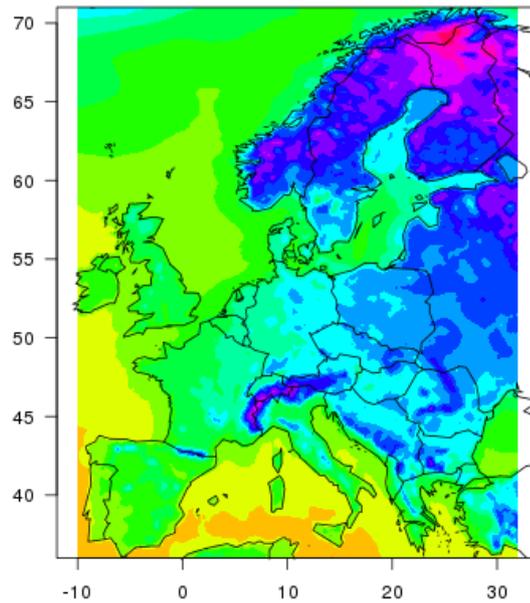
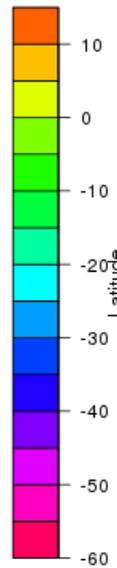
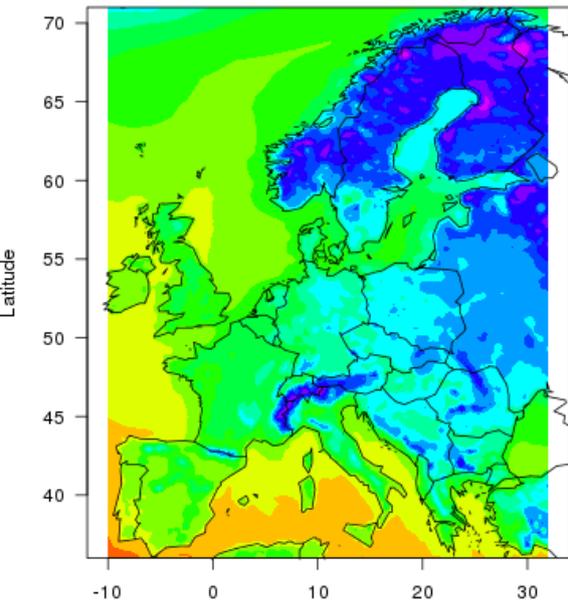
Référence

Min de la t2m en février à 00h pour la simulation CC0 recalée par AN

Recalé

Diff min de la t2m en février à 00h pour la simulation CC0 recalée par AN

Différence



## T2m écart-type février 00 UTC

Le recalage donne des écarts-types un peu plus élevés que la référence

Ecart-type de la t2m en février à 00 pour HIRLAM/ERA-Interim

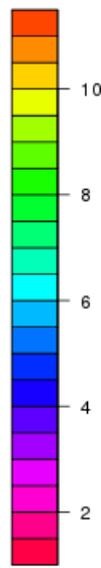
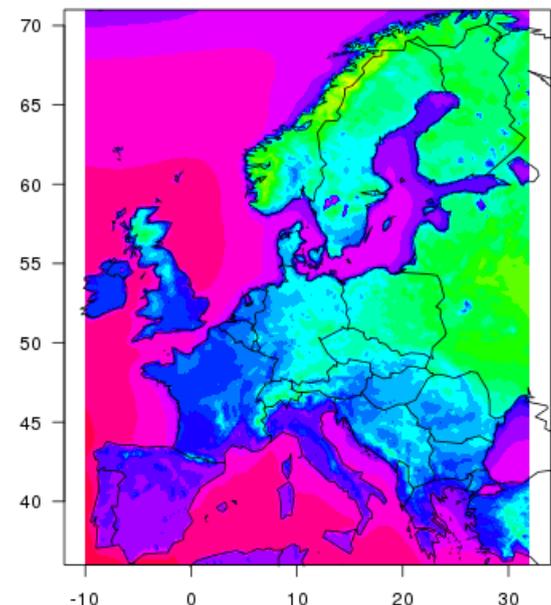
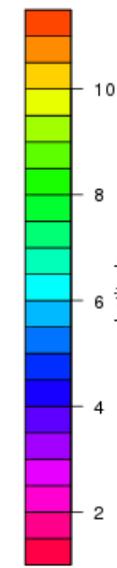
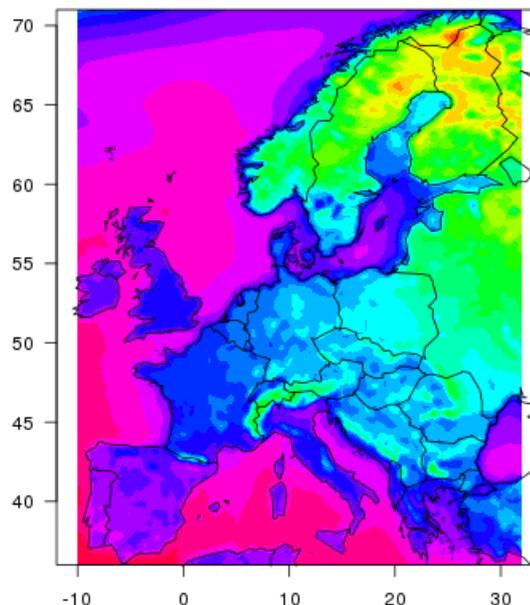
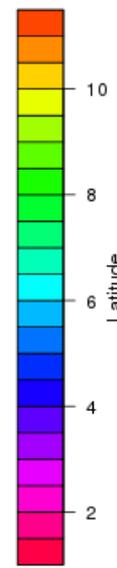
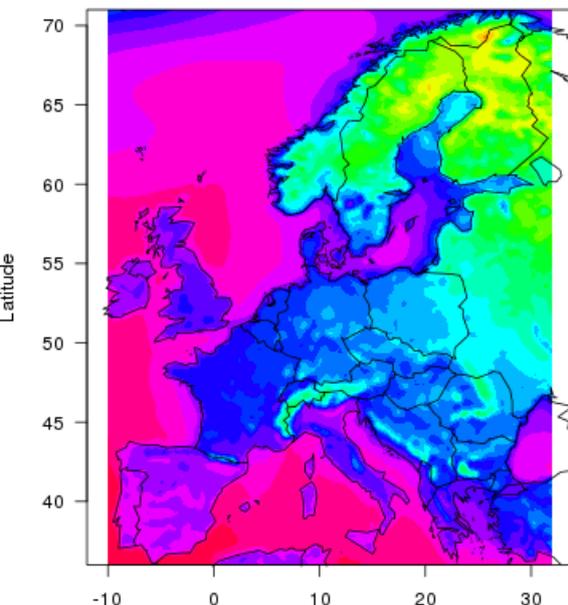
Référence

Ecart-type de la t2m en février à 00h pour la simulation CC0 recalée par ANA

Recalé

Ecart-type de la t2m en février à 00h pour la simulation CC0 brute

Brut

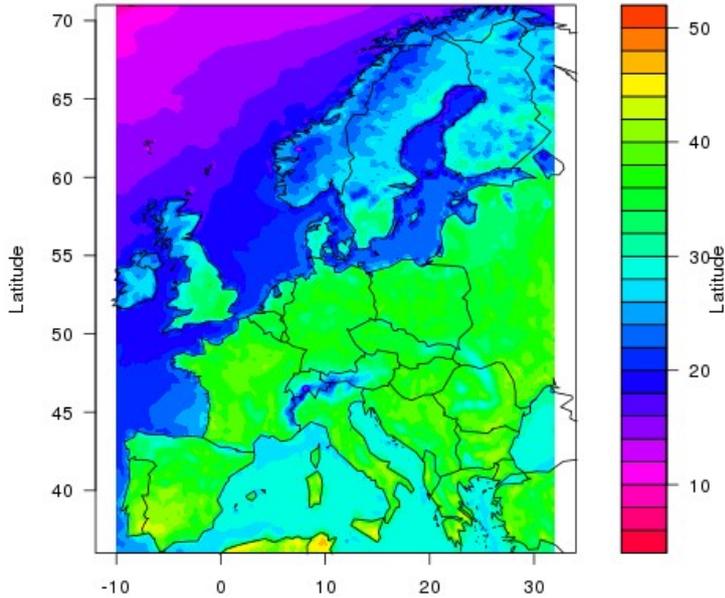


# Recalage de la simulation à climat actuel

## T2m max août 12 UTC

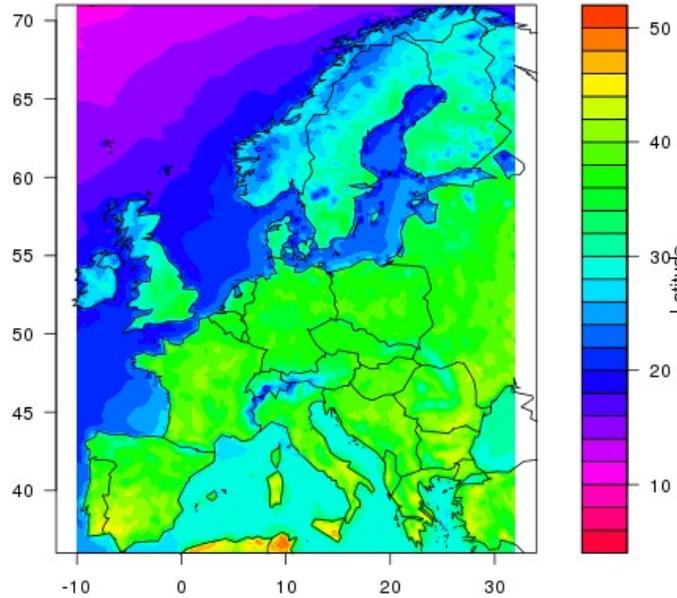
Max de la t2m en août à 12h pour HIRLAM/ERA-Interim

Référence



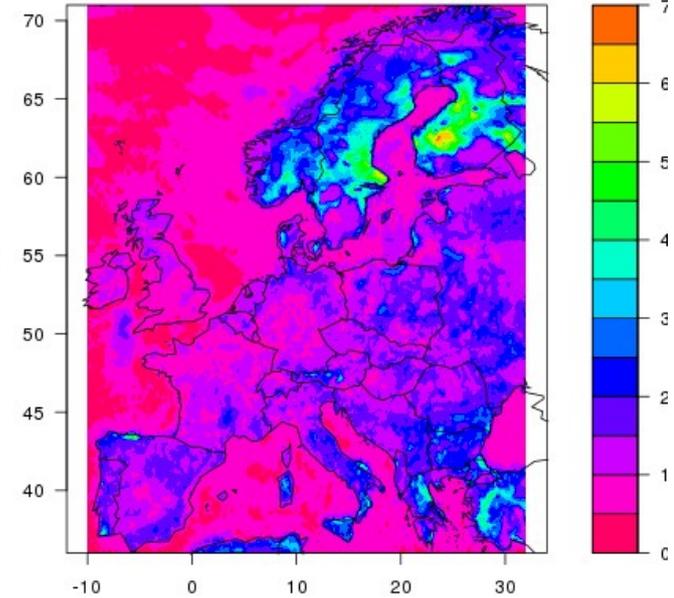
Max de la t2m en août à 12h pour la simulation CC0 recalée par ANA

Recalé



Diff max de la t2m en août à 12h pour la simulation CC0 recalée par ANA

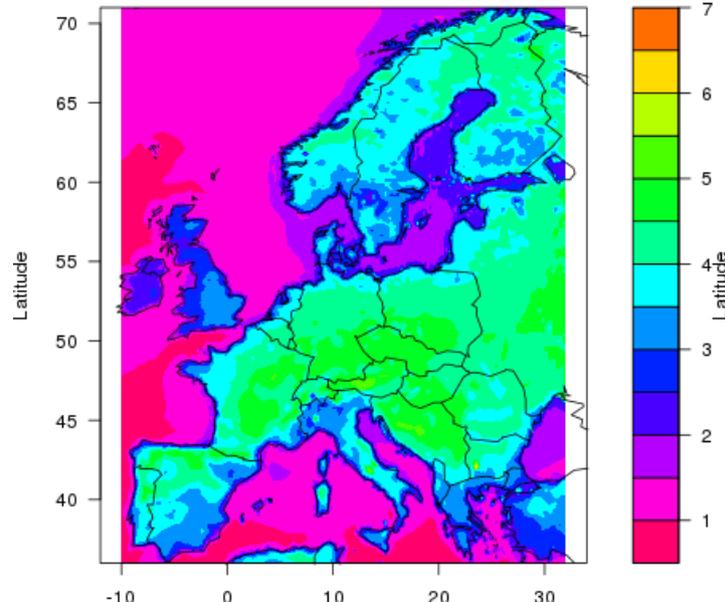
Différence



## T2m écart-type août 12 UTC

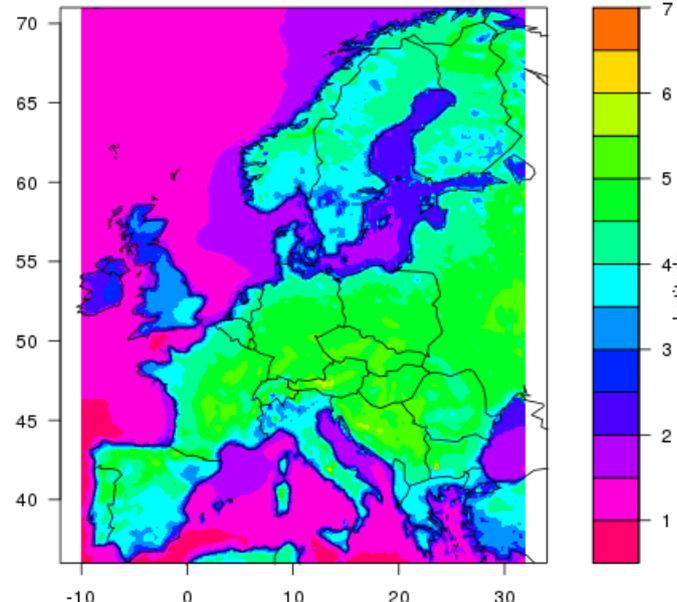
Ecart-type de la t2m en août à 12h pour HIRLAM/ERA-Interim

Référence



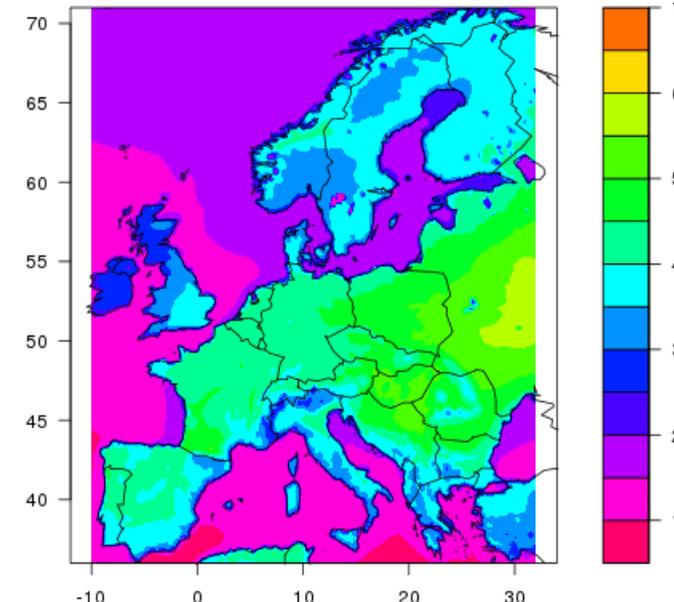
Ecart-type de la t2m en août à 12h pour la simulation CC0 recalée par ANA

Recalé



Ecart-type de la t2m en août à 12h pour la simulation CC0 brute

Brut



# Recalage des températures à climat futur

---

Pour le recalage des séries à climat futur, on adopte la démarche suivante :

- Régression multiple sur la série recalée à climat 2000 avec comme prédicteurs les séries brutes à climat 2000 des 16 points de grille voisins
- Correction des erreurs de cet estimateur connaissant les erreurs sur l'apprentissage
- Application de l'estimateur aux données brutes à climat futur

# Recalage des températures pour des villes

---

Pour le recalage des séries sur des stations disposant de données d'observation, on adopte la démarche suivante :

- Adaptation statistique (modèle de régression robuste et parcimonieux) entre les observations et la climatologie de référence en points de grille (16 points voisins) sur une période commune, pour 00, 06, 12 et 18 UTC.
- Application du modèle d'adaptation statistique aux données recalées à climat 2000 et 2050, pour tous les points voisins.
- Passage au pas de temps horaire en testant les points de grille voisins pour déterminer le plus pertinent (corrélation avec les observations) sur les 4 réseaux ensemble (00, 06, 12 et 18 UTC). Le point de grille d'intérêt est alors défini. Puis on interpole au pas de temps horaire avec une spline cubique d'ajustement.