



**METEO  
FRANCE**

# Données de simulations climatiques à climat constant

Séries de température à 2 m

Validation

Version 1.1 du 08/02/2021

<b>Client</b>	✉ Adresse postale @ ☎ +33 X XX XX XX XX	
---------------	---	--

<b>Correspondant commercial</b> Christophe Périard	@ <a href="mailto:christophe.periard@meteo.fr">christophe.periard@meteo.fr</a> ☎ +33 X XX XX XX XX	
<b>Correspondant technique</b> Martine Veysseire	@ <a href="mailto:martine.veysseire@meteo.fr">martine.veysseire@meteo.fr</a> ☎ +33 5 61 07 81 14	

- page laissée intentionnellement vide -

## Évolutions successives

Référence	Date	Version	Évolution
DSM-CS-DC- ENR_ScenClim2014_T2m	11/01/2021	1-0	Mise à jour sur la base d'un document précédent
DSM-CS-DC- ENR_ScenClim2014_T2m	08/02/2021	1-1	Complément climatologie de référence

## Signatures

	Nom	Service	Signature
Rédacteur(s)	VEYSSEIRE Martine	MF/DSM/CS/DC	MV
Relecteur(s)			
Approbateur(s)			

## Table des matières

1	Contexte.....	8
2	Climatologie de référence.....	8
3	Recalage des données de température.....	9
3.1	Estimation des extrêmes sur 200 ans.....	9
3.2	Recalage des données à climat actuel au pas de temps 6 h.....	10
3.3	Recalage des données à climat futur au pas de temps 6h.....	12
3.4	Extension aux données horaires.....	12
4	Résultats et validation.....	15
4.1	Estimation des bornes de température.....	15
4.2	Températures à climat actuel.....	16
4.3	Températures à climat 2050.....	18
4.4	Cycles moyens indice France.....	21
4.5	Cartes sur l'Europe.....	26
4.5.1	Moyennes.....	26
4.5.2	Écarts-types.....	27
4.5.3	Températures minimales.....	28
4.5.4	Températures maximales.....	31
4.5.5	Points particuliers.....	33
5	Comparaison entre les deux méthodes de recalage.....	35
5.1	Moyennes mensuelles.....	35
5.2	Records de température minimale.....	37
5.3	Records de température maximale.....	39
6	Conclusion.....	41
7	Recommandations.....	42
7.1	Signification des séries simulées.....	42
7.2	Résolution horizontale.....	42

## Liste des illustrations

Figure 1: Estimation des bornes de température à 00UTC sur 200 ans à partir d'un échantillon de 30 ans.....	16
Figure 2: Estimation des bornes de température à 00UTC sur 100 000 ans.....	16
Figure 3: Estimation des bornes de température à 12 UTC pour le point de grille le plus proche de Paris.....	16
Figure 4: Données de référence et de la simulation brute à climat actuel à 12 UTC sur le point le plus proche de Paris.....	17
Figure 5: Données de référence et données des simulations à climat actuel à 12 UTC, recalées, pour le point le plus proche de Paris.....	17
Figure 6: Données de référence et de la simulation brute CC1 à climat 2050 RCP4.5 à 12 UTC sur le point le plus proche de Paris.....	19
Figure 7: Données de référence et de la simulation recalée CC1 à climat 2050 RCP4.5 à 12 UTC sur le point le plus proche de Paris.....	19
Figure 8: Données de référence et de la simulation brute CC2 à climat 2050 RCP8.5 à 12 UTC sur le point le plus proche de Paris.....	20
Figure 9: Données de référence et de la simulation brute CC2 à climat 2050 RCP8.5 à 12 UTC sur le point le plus proche de Paris.....	20
Figure 10: cycles annuels des températures observées pour l'indice France (moyenne pondérée sur 32 stations).....	21
Figure 11: cycles annuels des températures simulées CC0 pour l'indice France (moyenne pondérée sur les points de grille proches des 32 stations).....	21
Figure 12: Cycle quotidien moyen indice France au 1er janvier avec ERA-Interim, scénario 2012.....	22
Figure 13: Cycle quotidien moyen indice France au 1er janvier avec HIRLAM, scénario CC0 climat actuel.....	23
Figure 14: Cycle moyen quotidien indice France au 15 mars avec HIRLAM, scénario CC0 climat actuel.....	23
Figure 15: Cycle quotidien moyen indice France au 28 mai avec HIRLAM, scénario CC0 climat actuel.....	24
Figure 16: Cycle moyen quotidien indice France au 10 août avec HIRLAM, scénario CC0 climat actuel.....	24
Figure 17: Cycle quotidien moyen indice France au 23 octobre avec HIRLAM, scénario CC0 climat actuel.....	25
Figure 18: Cycle moyen quotidien indice France au 29 novembre avec HIRLAM, scénario CC0 climat actuel.....	25
Figure 19: Température moyenne à 2 m en janvier à 00UTC, pour HIRLAM, CC0 recalé, CC0 brut.....	26
Figure 20: Température moyenne à 2m en octobre à 18UTC, pour HIRLAN, CC0 recalé,CC0 brut.....	26
Figure 21: Températures moyennes à 2 m en janvier à 06UTC pour CC0, CC1 et CC2.....	27
Figure 22: Températures moyennes à 2 m en juillet à 18UTC pour CC0, CC1 et CC2.....	27
Figure 23 : Écarts-types de la température à 2 m en avril à 00UTC pour HIRLAM, CC0 recalé et CC0 brut.....	28
Figure 24 : records de température minimale en janvier à 00UTC pour la référence HIRLAM et pour CC0 à climat actuel, et différence entre les deux.....	28
Figure 25 : records de températures minimales en décembre à 00UTC pour les scénarios CC0 à climat actuel et CC1 et CC2 à climat 2050.....	29
Figure 26: Vagues de froid sur la France en haut pour le scénario à climat 2000 CC0, en bas pour	

les scénarios à climat 2050, à gauche CC1 RCP4.5 et à droite CC2 RCP8.5.....30

Figure 27 : Records de température maximale à 2 m en juin à 12 UTC pour la référence HIRLAM et le scénario CC0 à climat actuel et différence entre les deux (CC0 et HIRLAM).....31

Figure 28 : records de températures maximales en juillet à 12UTC pour les scénarios CC0 à climat actuel et CC1 et CC2 à climat 2050.....31

Figure 29: Vagues de chaud sur la France en haut pour le scénario à climat 2000 CC0, en bas pour les scénarios à climat 2050, à gauche CC1 RCP4.5 et à droite CC2 RCP8.5.....32

Figure 30: Différence entre les valeurs maximales recalées par quantile-quantile climat 2050 CC2 RCP8.5 et climat CC0 2000.....33

Figure 31: fonctions de densité HIRLAM et scénarios bruts sur un point du lac Ladoga.....34

Figure 32: fonctions de densité HIRLAM et scénarios bruts sur un point particulier en Biéloussie 35

Figure 33: Moyennes de la température à 2 m en janvier à 00 UTC, pour la référence HIRLAM, pour la simulation à climat actuel, recalée par quantile-quantile et recalée par la nouvelle méthode. ....36

Figure 34 : Moyennes de la température à 2 m en juillet à 00 UTC, pour la simulation CC1 à climat 2050 RCP4.5, recalée par quantile-quantile, recalée par la nouvelle méthode, et non recalée.....36

Figure 35: Moyennes de la température à 2 m en juillet à 00 UTC, pour la simulation CC2 à climat 2050 RCP8.5, recalée par quantile-quantile, recalée par la nouvelle méthode, et non recalée.....37

Figure 36: Records de minimum de température à 2 m en janvier à 00 UTC, pour la référence HIRLAM et pour la simulation à climat actuel, recalée par quantile-quantile et recalée par la nouvelle méthode..... 37

Figure 37 : Différences entre les records de température minimale à climat actuel et les records de la référence, suivant la méthode de recalage employée.....38

Figure 38: Records de minimum de température à 2 m en janvier à 00 UTC, pour la simulation CC1 à climat 2050 RCP4.5, recalée par quantile-quantile, recalée par la nouvelle méthode, et non recalée..... 39

Figure 39 : Records de minimum de température à 2 m en janvier à 00 UTC, pour la simulation CC2 à climat 2050 RCP8.5, recalée par quantile-quantile, recalée par la nouvelle méthode, et non recalée..... 39

Figure 40: Records de maximum de température à 2 m en juin à 12 UTC, pour la référence HIRLAM et pour la simulation à climat actuel, recalée par quantile-quantile et recalée par la nouvelle méthode.....40

Figure 41 : Différences entre les records de température maximale à climat actuel et les records de la référence, suivant la méthode de recalage employée.....40

Figure 42: Records de maximum de température à 2 m en juin à 12 UTC, pour la simulation CC1 à climat 2050 RCP4.5, recalée par quantile-quantile, recalée par la nouvelle méthode, et non recalée.....41

Figure 43 : Records de maximum de température à 2 m en juin à 12 UTC, pour la simulation CC2 à climat 2050 RCP8.5, recalée par quantile-quantile, recalée par la nouvelle méthode, et non recalée.....41

## Liste des tableaux

## Glossaire

Abréviation	Signification
CC0	Simulations à climat actuel
CC1	Simulation à climat constant 2050 hypothèse RCP 4.5
CC2	Simulation à climat constant 2050 hypothèse RCP 8.5

## 1 Contexte

Des simulations climatiques à climat constant 2000 et 2050 ont été réalisées par le modèle climatique ARPEGE de Météo-France en réponse aux demandes du secteur de l'Énergie et des Assurances. Il s'agit de la simulation CC0 à climat 2000 et des simulations CC1 et CC2 à climat 2050, respectivement selon les hypothèses d'évolution des concentrations en gaz à effet de serre RCP4.5 et RCP8.5.

Les données de simulations climatiques sont souvent recalées sur une climatologie de référence par une méthode quantile-quantile prolongée par une extrapolation sur les extrêmes. Cette méthode a été mise en œuvre dans un premier temps. Puis une méthode plus fine s'appuyant sur une estimation des bornes des extrêmes a été développée, mise en œuvre et contrôlée par Serge Farges (Météo-France, Pôle Energie).

## 2 Climatologie de référence

La climatologie de référence choisie est la climatologie de la ré-analyse HIRLAM forcée par ERA-Interim sur la période 1984-2013, centrée autour de l'année 2000.

La ré-analyse HIRLAM a été réalisée par le SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute). La base climatologique ne s'étend pas au-delà du milieu de l'année 2014. Il s'agit d'une ré-analyse à la résolution de 0,2° sur une aire limitée couvrant l'Europe, et forcée aux limites du domaine par ERA-Interim au pas de temps 6 h, Des séries de données observées sont également assimilées en entrée du modèle.

Une description rapide de cette ré-analyse se trouve sous le lien [http://www.euro4m.eu/downloads/Factsheets/EURO4M\\_Factsheet\\_D2.03\\_SMHI\\_HIRLAM\\_3DVAR\\_V2.pdf](http://www.euro4m.eu/downloads/Factsheets/EURO4M_Factsheet_D2.03_SMHI_HIRLAM_3DVAR_V2.pdf). Dans notre cas, la référence climatologique porte sur 30 années complètes, de 1984 à 2013.

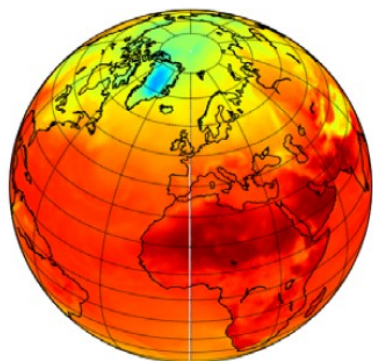


Figure 1: ERA-Interim analysis of the 2m-temperature.

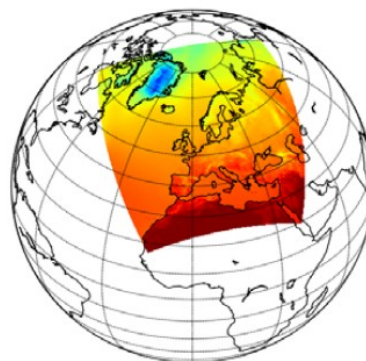


Figure 2: HIRLAM 2m-temperature using ERA-Interim analysis on the borders and as a large scale constraint.

Un article évaluant les performances de HIRLAM peut être obtenu sous le lien <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.2807/full>



Un article sur les comparaisons entre les réanalyses régionales peut être téléchargé sous le lien [http://www.euro4m.eu/downloads/D2.9\\_Comparison%20of%20the%20regional%20reanalyses%20products%20with%20newly%20developed%20and%20existing%20state-of-the-art%20systems.pdf](http://www.euro4m.eu/downloads/D2.9_Comparison%20of%20the%20regional%20reanalyses%20products%20with%20newly%20developed%20and%20existing%20state-of-the-art%20systems.pdf). Il comprend en chapitre 3 une comparaison entre la ré-analyse HIRLAM et ERA-Interim.

### 3 Recalage des données de température

La production des fichiers de données simulées recalées sur la climatologie de référence issue de la ré-analyse HIRLAM 0.2° se fait en plusieurs temps :

- Extraction des valeurs de la référence climatologique au pas de temps 6 h sur la période 1984-2013
- Extraction des valeurs horaires sur les 3 × 200 ans de données simulées brutes, au climat présent et au climat futur 2050.
- Pour chaque point de grille, création de la série chronologique de la climatologie de référence, et des 3 séries chronologiques simulées brutes.
- Estimation des bornes (extrêmes) sur 200 ans pour chaque point de grille pour chaque quantième de l'année, et pour 00, 06, 12 et 18 UTC, sur la base de la référence climatologique.
- Recalage des séries à climat actuel au pas de temps 6 h sur la référence HIRLAM
- Recalage des séries à climat 2050 au pas de temps 6 h
- Report des corrections au pas de temps horaire, par l'application d'une spline d'ordre 3
- Mise au format hdf5 pour un fichier par scénario.

#### 3.1 Estimation des extrêmes sur 200 ans

Pour recalculer le scénario à climat actuel sur 200 ans, nous avons besoin d'élargir les records des températures de l'analyse (référence climatologique sur 30 ans) pour chaque point de grille, pour chaque heure principale (00, 06, 12 et 18 UTC). En effet, des records sur 200 ans ne peuvent être égaux à des records sur 30 ans. Il a donc été nécessaire de trouver une méthode statistique permettant d'élargir les distributions des analyses pour atteindre des extrêmes plus lointains.

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.

Nous avons donc commencé par estimer les bornes absolues des températures à chaque heure (00, 06, 12 et 18 UTC) et pour chaque point de grille. La technique habituellement utilisée dans ce cas de figure (théorie GEV) ne peut pas être appliquée compte-tenu de la forme des distributions de température (les queues sont très aplaties) et de la période trop courte de l'analyse (30 ans de climatologie de référence, soit 30 valeurs mensuelles dans le cas d'une application de la méthode GEV par blocs annuels).

Pour déterminer les bornes absolues, nous avons par conséquent regroupé les points de grille spatialement (en tenant compte de leur corrélation, les corrélations étant préalablement calculées entre tous les points de grille) et nous sommes partis du principe qu'en 30 ans il était fort possible qu'un point de grille soit proche d'une de ses bornes inférieure ou supérieure. En passant dans l'espace des probabilités, pour s'affranchir des différences climatologiques des points, et en utilisant des estimateurs de densité de probabilité judicieux (bornés et non paramétriques, n'ayant pas recours aux estimateurs à noyaux qui posent des problèmes pour les valeurs extrêmes), on a pu estimer les bornes inférieures et supérieures des températures pour chaque point de grille et pour chaque réseau (00, 06, 12 et 18 UTC) de l'analyse. Ces estimations ont été obtenues mois par mois puis jour par jour grâce à une technique d'interpolation FFT sous contrainte (en s'appuyant sur les anomalies quotidiennes plutôt que sur les températures directement).

Après estimation des distributions des anomalies de température normalisées par les bornes des anomalies quotidiennes, nous avons pu estimer par simulation numérique les distributions des records des anomalies normalisées sur 30 ans et sur 200 ans. Cette simulation nous a donné des estimations bien plus précises que ce que l'on aurait pu obtenir par les lois GEV (qui sont des lois asymptotiques). En faisant l'hypothèse que les records sur 200 ans ont la même occurrence de se produire que les records observés sur 30 ans, nous avons pu estimer les records des anomalies normalisées sur 200 ans, ce qui nous a donné au final les records de température sur 200 ans. Par construction, ces records ne peuvent aller qu'au-delà de ceux sur 30 ans.

## **3.2 Recalage des données à climat actuel au pas de temps 6 h**

Avant d'appliquer le processus de recalage par anamorphose, on étire les distributions empiriques des analyses (référence HIRLAM aux heures 00, 06, 12 et 18 UTC) déterminées sur des fenêtres glissantes de 15 jours de sorte que les bornes puissent aller vers celles estimées sur 200 ans. Cette transformation veille à ce que les espérances des distributions soient conservées. Par construction, les nouveaux écarts-types restent proches des écarts-types initiaux.

Le recalage par anamorphose est proche de la méthode quantile-quantile, comprenant moins d'interpolations, et s'ajustant aux valeurs extrêmes sans extrapolation brutale des queues de distribution. L'anamorphose est ici une transformation réversible d'une fonction de répartition vers une autre.

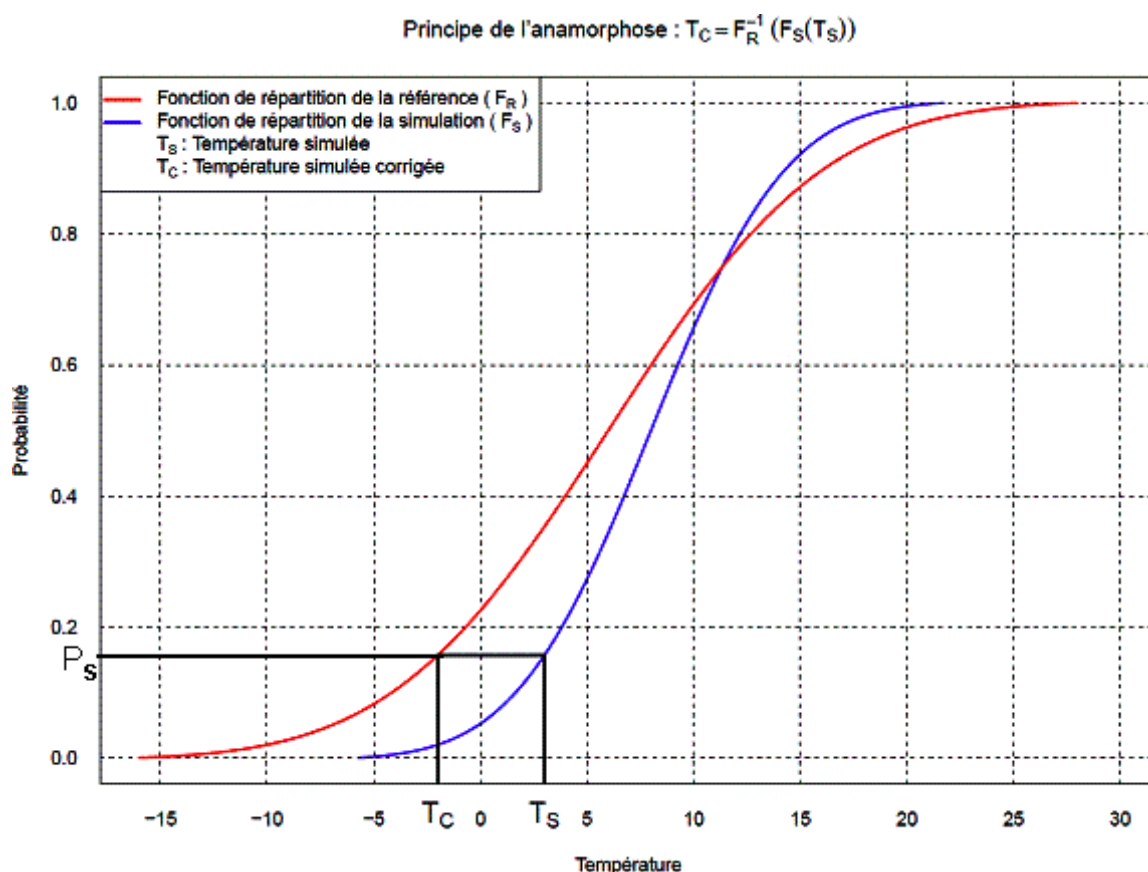


Figure 6 : présentation de la méthode par anamorphose

Les fonctions de répartition empiriques des données de la référence climatologique et des données simulées sont calculées.

À partir de la température simulée  $T_S$ , on obtient directement la probabilité  $P_S$  associée en utilisant la fonction de répartition de la simulation (en bleu). À ce niveau, il n'y a pas d'interpolation.

À la probabilité  $P_S$  correspond la température corrigée  $T_C$  donnée par l'inverse de la fonction de répartition des données de référence (en rouge). L'inverse de la fonction de répartition des données de la climatologie de référence est obtenu ici en estimant empiriquement cette fonction de répartition par une succession de petits segments les plus proches possible de la courbe. Les points correspondant aux extrémités de ces segments sont les "quantiles naturels" de la fonction de répartition des données climatologiques de référence. Ils sont définis par la forme de la courbe. On obtient alors facilement la température  $T_C$ .

Un des avantages de l'anamorphose est qu'il n'y a qu'une approximation pour le calcul de la température corrigée (au moment de l'approche empirique de la fonction de répartition des données de la climatologie de référence par une succession de segments). Les inconvénients de cette approximation sont toutefois minimisés par le fait que les quantiles naturels sont déterminés par la fonction de répartition elle-même.

La méthode par anamorphose a été appliquée avec succès sur une fenêtre glissante de 15 jours.

### 3.3 Recalage des données à climat futur au pas de temps 6h

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

- Pour chaque point de grille, on effectue une régression multiple sur la série recalée à climat actuel avec comme prédicteurs les séries brutes à climat actuel sur les 16 points de grille l'entourant.
- On corrige les erreurs de cet estimateur connaissant donc les erreurs sur l'apprentissage.
- L'estimateur est maintenant appliqué sur les données brutes à climat futur CC1 et CC2 pour obtenir les données recalées de ces simulations.

### 3.4 Extension aux données horaires

Pour corriger les échéances intermédiaires, il est nécessaire de disposer des températures corrigées aux échéances principales. Météo-France utilise ici des splines cubiques d'ajustement.

#### *Méthode utilisant des splines cubiques d'ajustement*

On dispose des séries des températures simulées non corrigées et des températures corrigées toutes les 6 heures, aux heures principales.

En premier lieu, on effectue une interpolation temporelle linéaire sur les échéances intermédiaires des écarts entre les températures corrigées et les températures non corrigées aux échéances principales.

Pour  $h$  une heure intermédiaire strictement comprise entre les heures principales  $i$  et  $i+6$ ,  $T_B$  les températures brutes non corrigées,  $T_{cor}$  les températures corrigées aux heures principales, on calcule une première valeur corrigée grossièrement  $T_1$  :

$$\begin{aligned} C(i) &= T_{cor}(i) - T_B(i) \\ C(i+6) &= T_{cor}(i+6) - T_B(i+6) \\ C(h) &= C(i) + (C(i+6) - C(i)) \frac{h-i}{6} \\ T_1(h) &= T_B(h) + C(h) \end{aligned}$$

On pose pour les heures principales  $i$  :  $T_1(i) = T_{cor}(i)$

On applique une spline cubique d'ajustement sur la série  $T_1$  pour rétablir une forme réaliste des cycles diurnes, sachant -par expérience à Météo-France-, que les splines cubiques sont bien adaptées au paramètre température.

Un exemple graphique de spline cubique d'ajustement est donné ci-dessous (sur cet exemple, les températures sont créées par simulation numérique).

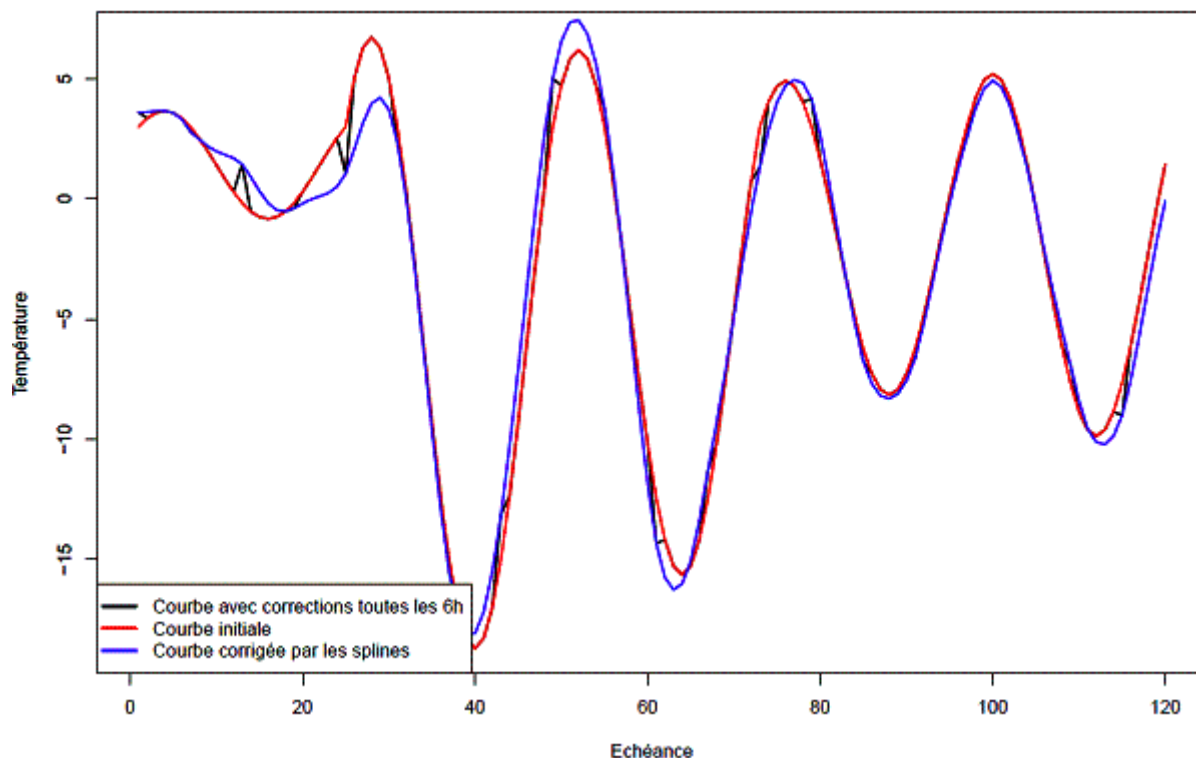


Figure 7 : Illustration d'une correction par spline cubique

Sur ce graphe, la courbe initiale (en rouge) est corrigée par la spline avec la contrainte de passer par les points corrigés toutes les 6h (échéances principales). Sur le graphe, les valeurs corrigées aux échéances principales peuvent être visualisées par les 'pointes' de la courbe noire appartenant à la courbe bleue (corrigée).

La fonction spline cubique d'ajustement  $f$  doit satisfaire les contraintes suivantes :

- Elle passe par les valeurs aux échéances principales (pas de temps 6h).
- Elle est dérivable deux fois.
- Sa dérivée seconde est continue.

On définit un critère à minimiser, imposant à la courbe d'osciller le moins possible, et de passer près des points des heures intermédiaires.

$$J(f) = \int_a^b (f''(x))^2 dx + \sum_{h=1}^n \frac{1}{\rho_h} (f(h) - T_1(h))^2$$

et  $f(i) = T_{cor}(i) = T_1(i)$  aux échéances 00, 06, 12 et 18 UTC

avec

- $f$  la fonction recherchée
- $a$  et  $b$  les bornes de l'intervalle de 100 ans
- $i$  les heures principales (00, 06, 12 et 18 UTC)

- $h$  les heures intermédiaires
- $T_1(i)$  les températures recalées sur la ré-analyse HIRLAM aux heures principales
- $T_1(h)$  les températures horaires intermédiaires
- $n$  le nombre d'heures intermédiaires  $h$  sur les 100 ans
- $\rho_h$  un coefficient de pondération et de lissage pour chaque échéance horaire intermédiaire

Dans notre cas, on ne souhaite pas privilégier certaines échéances horaires intermédiaires, on prend les coefficients  $\rho_h$  égaux à  $k^*(C(h))^2$ ,  $k$  étant fixé empiriquement.

Cette méthode de correction a pour avantage de ne pas modifier la température horaire intermédiaire si la correction est nulle à cette échéance : si  $C(h)=0$ , on prend  $f(h)=T_1(h)=T_B(h)$ . Donc si  $C(i)=C(i+6)=0$ , les températures aux heures comprises entre  $i$  et  $i+6$  seront également inchangées.

On détermine la spline d'ajustement en minimisant le critère  $J$ , c'est-à-dire qu'on recherche la fonction  $f$  pour laquelle  $J(f)$  est minimal. On montre que la solution existe, qu'elle est unique et est calculable. C'est une combinaison linéaire de polynômes d'ordre 3 (un polynôme par intervalle de 6h).

Le 1<sup>er</sup> terme de  $J(f)$  -avec l'intégrale- est minimisé quand la fonction oscille le moins possible (pas de grandes amplitudes entre deux échéances horaires consécutives).

Le 2<sup>nd</sup> terme de  $J(f)$  -avec la somme- quantifie la proximité aux valeurs des heures intermédiaires.

- Plus les  $\rho_h$  sont petits, plus les  $(f(h)-T_1(h))$  seront petits. A la limite, si tous les  $\rho_h$  tendent vers 0,  $f$  est la spline cubique d'interpolation passant par toutes les valeurs horaires simplement corrigées avec l'interpolation linéaire
- Plus les  $\rho_h$  sont grands, plus l'aspect général sera lisse, et à la limite si tous les  $\rho_h$  sont très grands, on obtient la spline cubique d'interpolation qui passe par les valeurs aux échéances principales sans prendre d'information aux heures intermédiaires.

Des tests successifs ont montré que la valeur  $k=3$  permet de restituer correctement le cycle quotidien des températures. La méthode est appliquée aux données à climat actuel 2000 et à climat futur 2050.

## 4 Résultats et validation

### 4.1 Estimation des bornes de température

Les graphes ci-après montrent les estimations de bornes de température sur un point de grille.

La courbe noire montre la moyenne des données de référence (échantillon de températures à 00 UTC sur 30 années). Les courbes vertes tracent les minima et maxima estimés sur 30 ans. Ils correspondent aux minima et maxima de référence. Les courbes bleues montrent les minima et maxima estimés sur une durée de 200 ans sur le premier graphique et sur 100 000 ans sur le second graphique, les valeurs sur 100 000 ans étant estimées avec la même méthode statistique que les valeurs sur 200 ans. Les courbes rouges montrent les minima et maxima absolus estimés, c'est-à-dire qui peuvent être atteints et non dépassés. On remarque qu'à mesure de l'extension de l'échantillon, les températures extrêmes (en bleu) convergent vers les bornes absolues (en rouge).

Le point de grille ici traité est situé au nord de l'Europe (Norvège). Les températures minimales offrent une grande variabilité selon les années, certains évènements pouvant occasionner des températures très basses : plus de 10° de chute par rapport aux minima « habituels ». Sur certains points très au nord, on a même des sauts possibles d'une trentaine de degrés. Les températures maximales ne présentent pas une variabilité aussi importante. Les records de températures minimales à 200 ans restent encore marqués ici par les valeurs rencontrées sur les données de référence. Dans le cas présenté ci-dessous, il serait préférable que les bornes estimées à 200 ans prennent également en compte l'éventualité de tels évènements extrêmes entre les quantiles (jours) 50 et 100, alors qu'il n'y a pas eu d'évènement froid exceptionnel dans la référence sur cet intervalle. Une évolution de la méthode dans ce sens a été préparée et testée.

Ici, la référence est la ré-analyse HIRLAM à 0,2° de résolution, sur la période 1984-2013. Le même travail est réalisable en prenant des séries observées sur des stations.

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

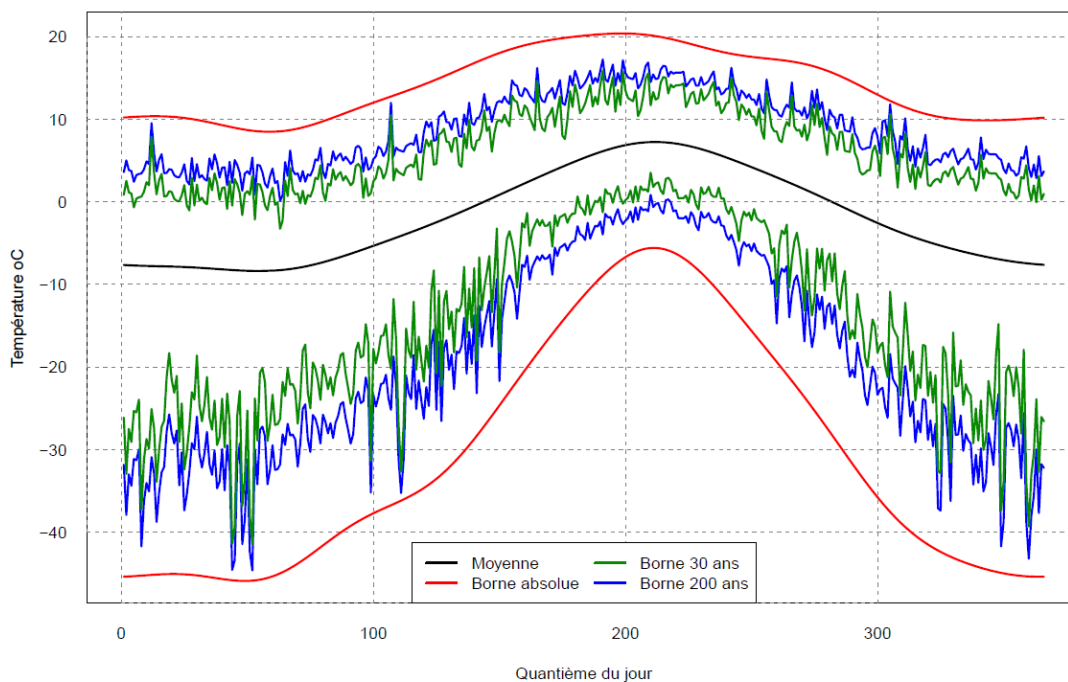


Figure 1: Estimation des bornes de température à 00UTC sur 200 ans à partir d'un échantillon de 30 ans

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

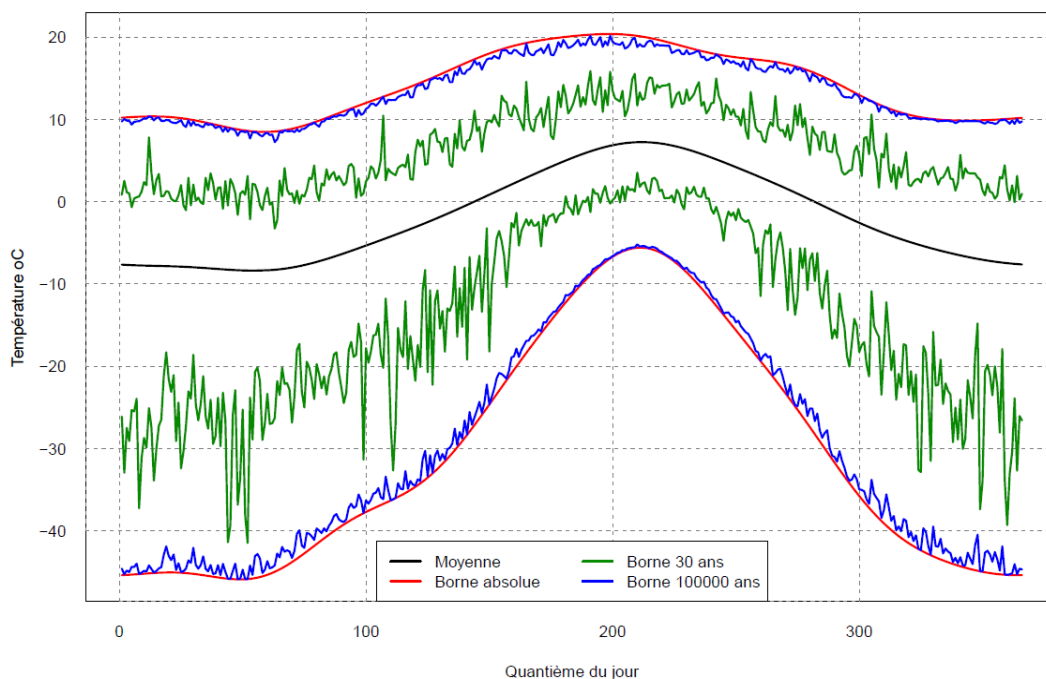


Figure 2: Estimation des bornes de température à 00UTC sur 100 000 ans



## 4.2 Températures à climat actuel

On donne ci-après l'exemple du point de grille le plus proche de Paris.

Les bornes calculées sur 200 ans à 12 UTC en fonction des jours de l'année se présentent comme suit :

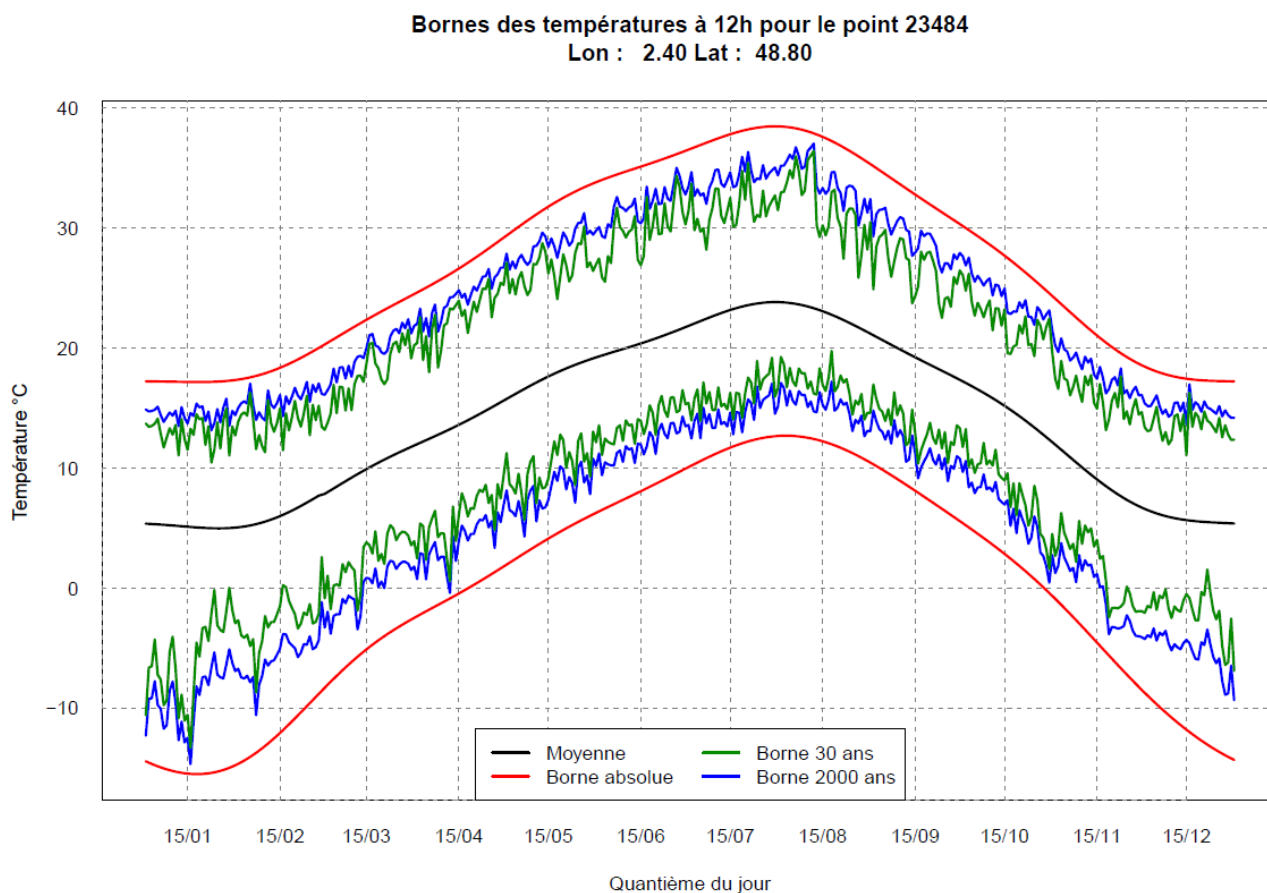


Figure 3: Estimation des bornes de température à 12 UTC pour le point de grille le plus proche de Paris

Sur le graphe suivant (Figure 4) concernant les simulations brutes, les données de référence sont pointées en vert ; la médiane des données de référence est la courbe noire. La médiane des données simulées brutes est en rouge et les valeurs extrêmes forment la courbe bleue pour les minima et la courbe violette pour les maxima. La médiane sur les 200 ans est plus lisse que la médiane sur les 30 ans, car moins dépendante de l'aléa du fait de la longueur de l'échantillon.

Les données simulées brutes correspondent bien aux données de référence. Le recalage modifiera peu l'ensemble.

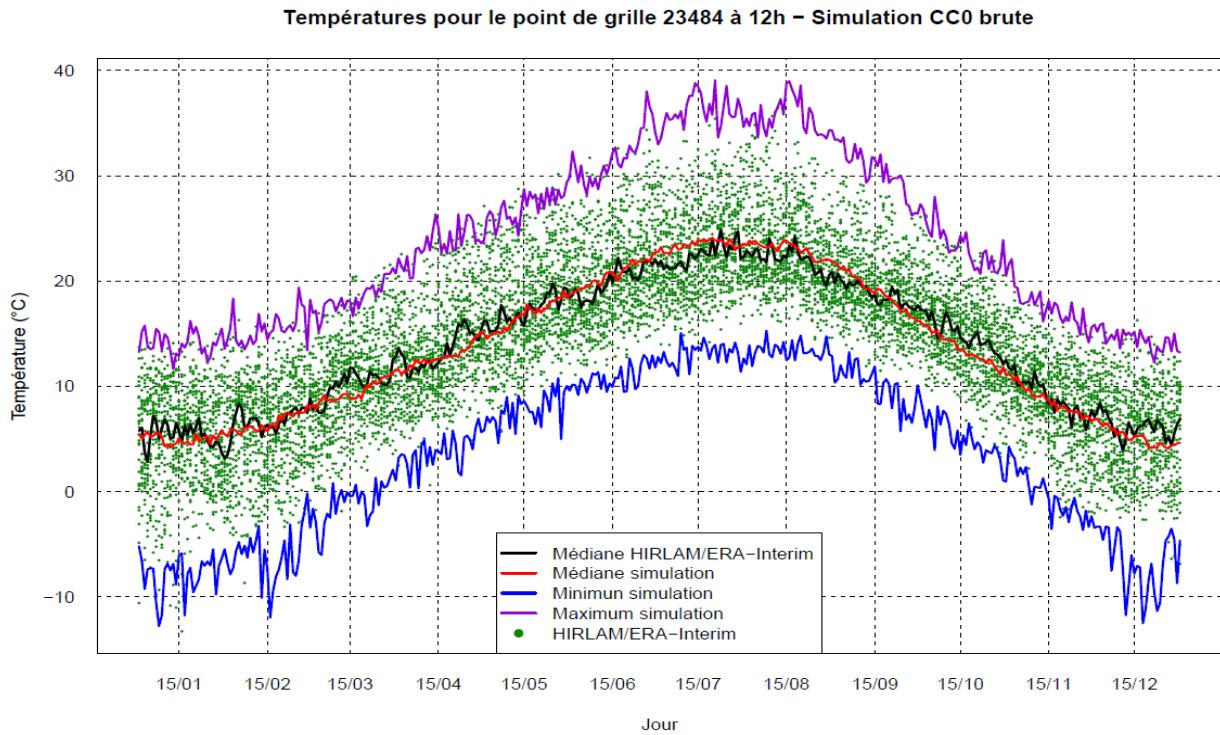


Figure 4: Données de référence et de la simulation brute à climat actuel à 12 UTC sur le point le plus proche de Paris

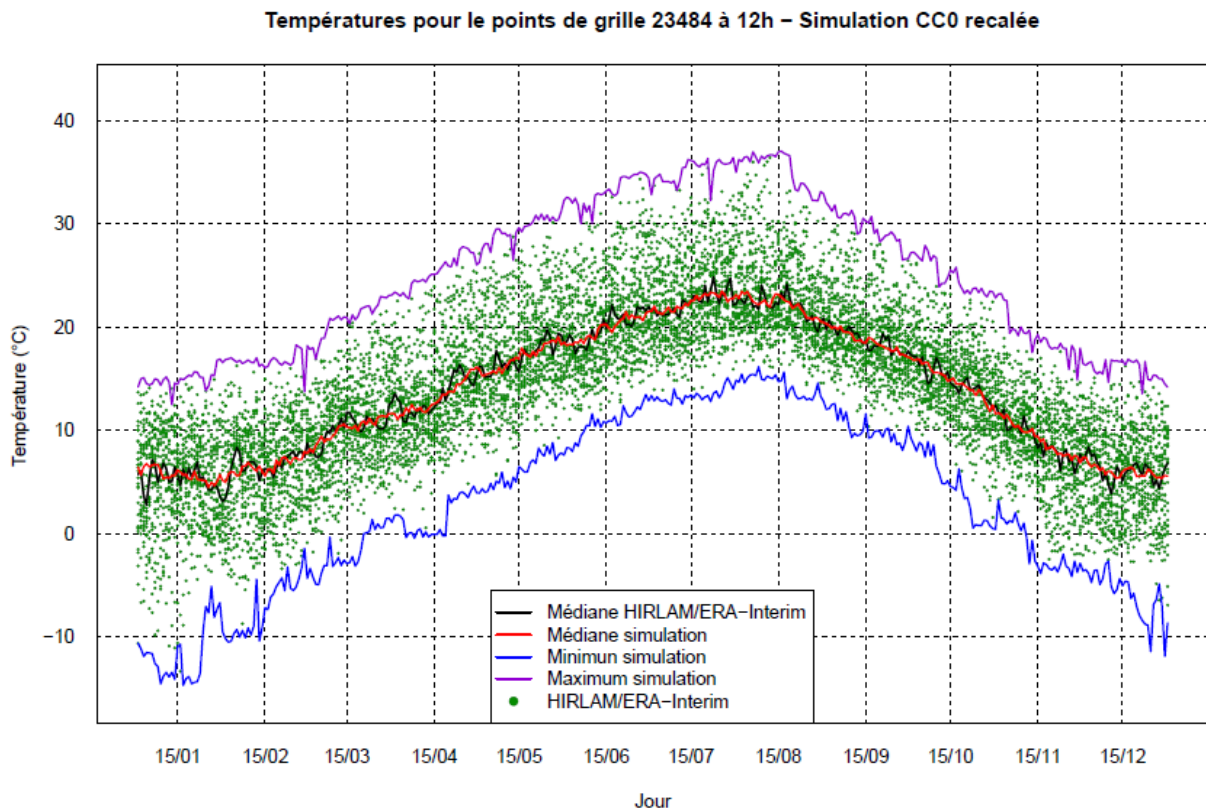


Figure 5: Données de référence et données des simulations à climat actuel à 12 UTC, recalées, pour le point le plus proche de Paris

Le graphe de ces données recalées sur la référence (Figure 5) montre un très bon ajustement de la médiane. Les extrêmes de la simulation suivent les extrêmes de la référence, avec une petite marge résultant de l'extension des bornes pour une série de 200 ans par rapport à une série de 30 ans. Compte tenu de l'aléa, il peut arriver très ponctuellement qu'un extrême de la série de 30 ans ne soit pas tout à fait atteint par la série de 200 ans recalée. Si l'on souhaite que tous les extrêmes de la référence soient couverts, il suffit d'étendre l'échantillon en prenant à la fois les séries de 30 ans et de 200 ans, celles-ci faisant partie de la même population d'une part du fait de la démarche suivie dans la réalisation des simulations à climat actuel et d'autre part du fait du recalage sur la référence.

Le modèle est un peu trop chaud pour les températures extrêmes chaudes l'été, et pas assez froid pour les températures extrêmes froides l'hiver. Le recalage ramène les sorties de modèle à des valeurs cohérentes avec la référence HIRLAM. Par ailleurs, le recalage lisse un peu les records par rapport à ceux de la série brute. Cet inconvénient mineur pourra être levé par une légère amélioration de la méthode, déjà préparée et testée.

### 4.3 Températures à climat 2050

Les imperfections du modèle sont corrigées sur la simulation CC0 à climat actuel 2000 en s'appuyant sur la climatologie de la ré-analyse HIRLAM. Pour le climat futur, on a développé un estimateur des corrections à apporter, à partir des corrections à climat actuel.

On reste sur l'exemple du point de grille le plus proche de Paris. On examine la médiane et les courbes des records avant et après recalage à 12 UTC.

Les graphes ci-après montrent les données de la référence HIRLAM (points verts), la médiane de la référence HIRLAM (courbe noire), la médiane des simulations en rouge, les températures records des simulations (courbe bleue pour les minima, violette pour les maxima).

Pour la simulation CC1 2050 RCP4.5, on remarque que :

- la médiane des valeurs de la simulation CC1 est plus lisse que celle de la référence car il y a plus de données. Elle suit bien la médiane de la référence, mais décalée vers les températures plus chaudes. Cela correspond à l'élévation moyenne de température de CC1 par rapport à CC0. Il y a peu de changement entre la médiane des valeurs brutes et la médiane des valeurs recalées.
- les extrêmes de températures froides des données brutes en hiver sont décalés par le recalage vers des valeurs plus froides. Par ailleurs, les extrêmes de températures chaudes en été sont légèrement abaissés par le recalage.

Pour la simulation CC2 2050 RCP 8.5, les mêmes remarques sont valables. Alors que CC1 atteignait juste 40°C en extrême absolu, cette valeur est dépassée pour CC2. On rappelle qu'il s'agit de températures à 12 UTC, et non du maximum de la journée.

Ces corrections sont cohérentes avec celles qui sont portées aux sorties de modèle à climat actuel 2000 (CC0), l'estimateur appliqué aux séries à climat 2050 remplit donc correctement son office.

Températures pour le points de grille 23484 à 12h – Simulation CC1 brute

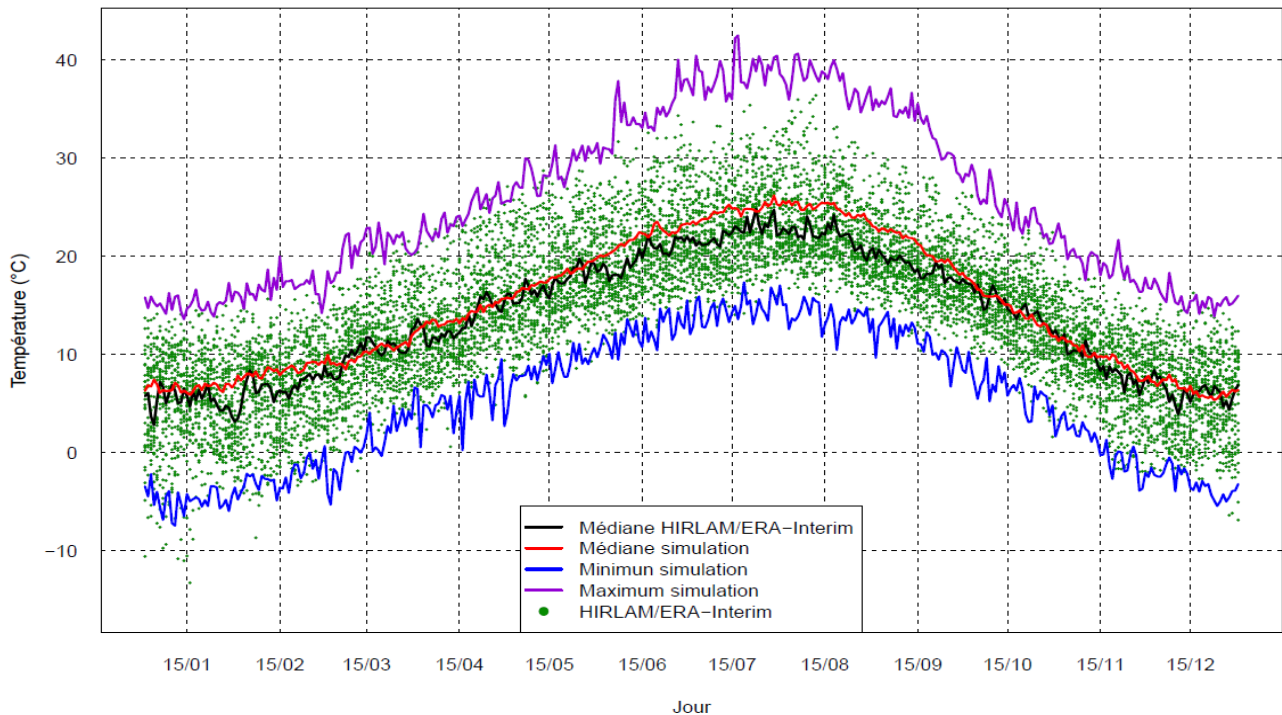


Figure 6: Données de référence et de la simulation brute CC1 à climat 2050 RCP4.5 à 12 UTC sur le point le plus proche de Paris

Températures pour le points de grille 23484 à 12h – Simulation CC1 recalée

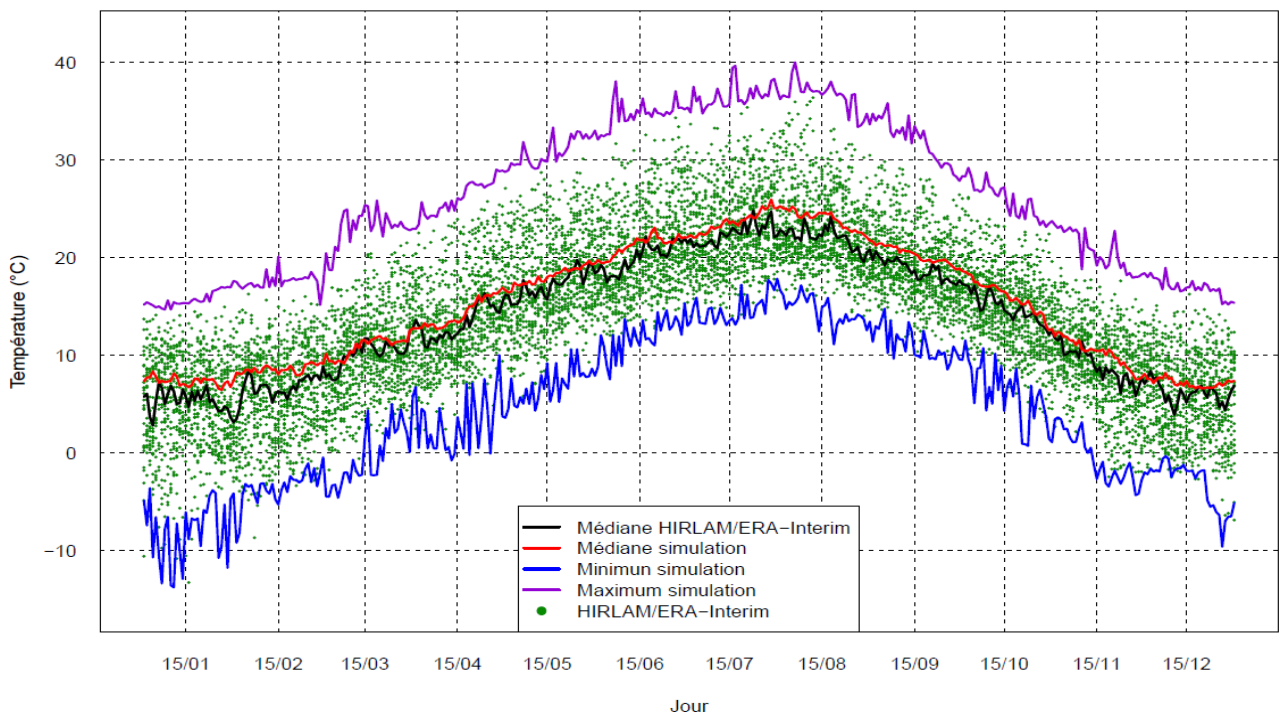


Figure 7: Données de référence et de la simulation recalée CC1 à climat 2050 RCP4.5 à 12 UTC sur le point le plus proche de Paris

Températures pour le points de grille 23484 à 12h – Simulation CC2 brute

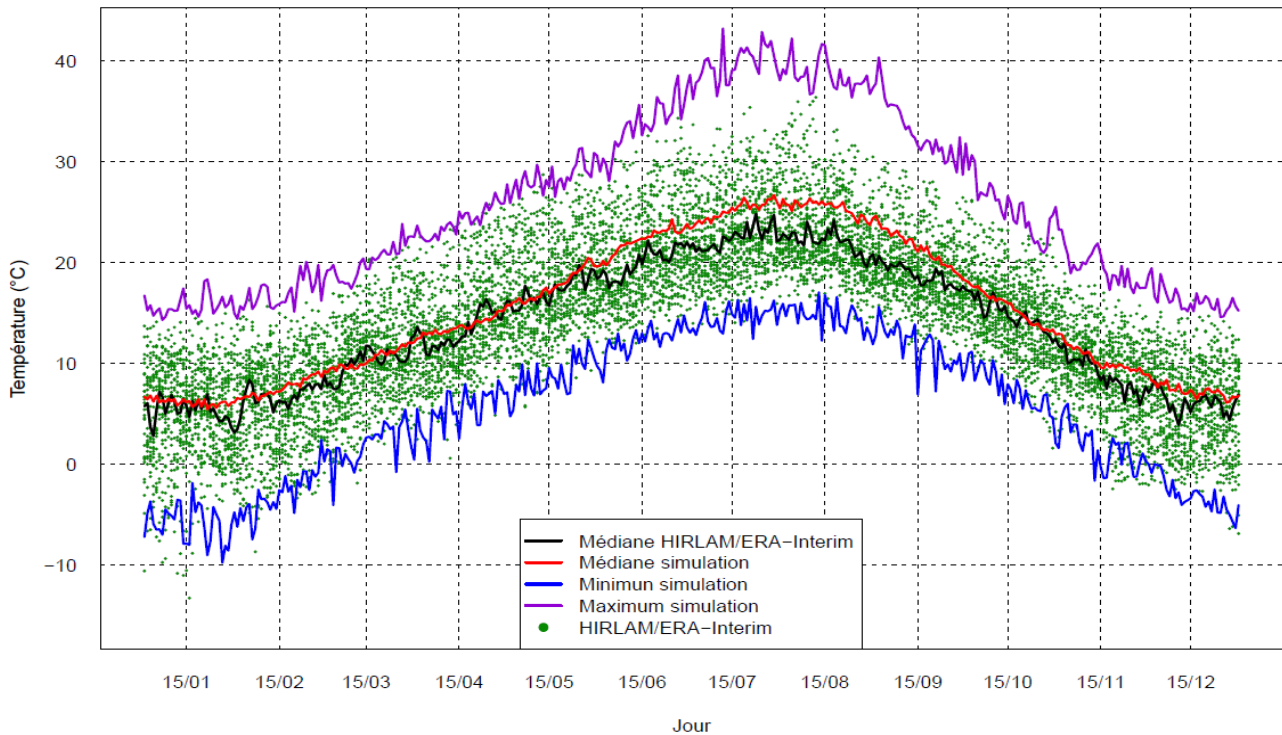


Figure 8: Données de référence et de la simulation brute CC2 à climat 2050 RCP8.5 à 12 UTC sur le point le plus proche de Paris

Températures pour le points de grille 23484 à 12h – Simulation CC2 recalée

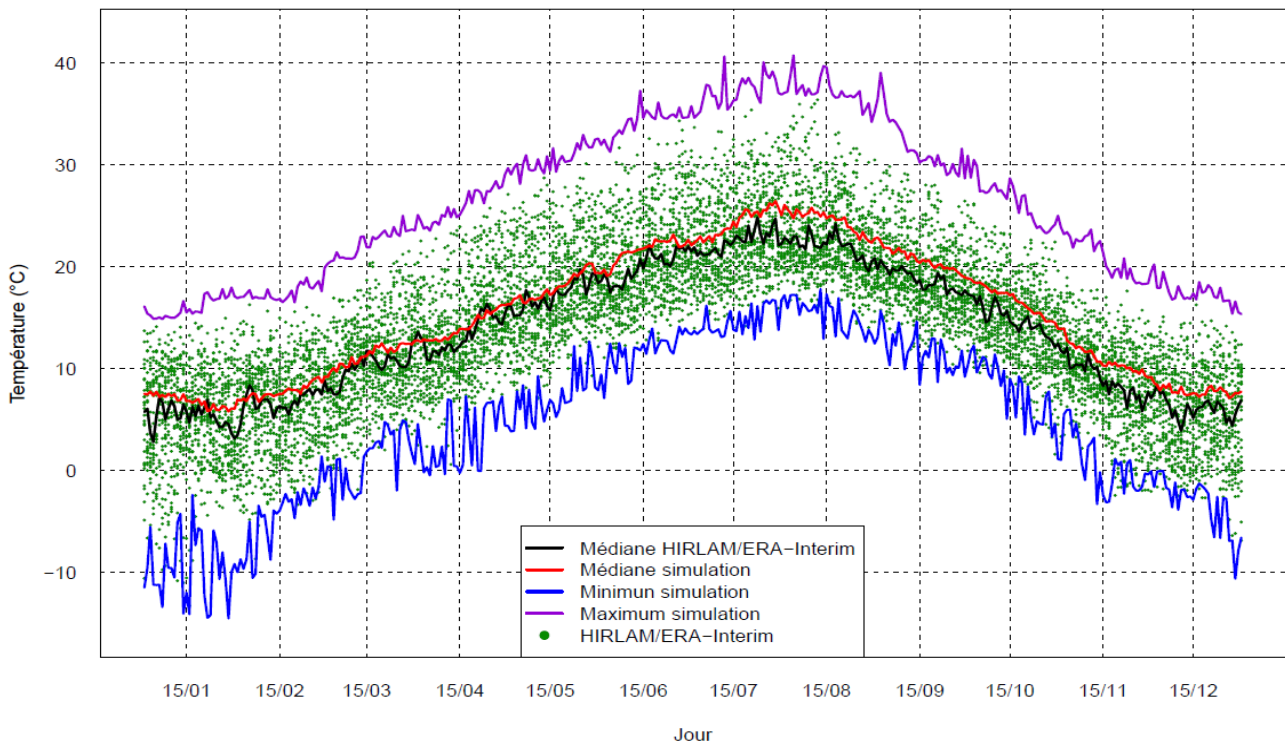


Figure 9: Données de référence et de la simulation brute CC2 à climat 2050 RCP8.5 à 12 UTC sur le point le plus proche de Paris

## 4.4 Cycles moyens indice France

L'indice France correspond à la moyenne pondérée des observations sur 32 stations françaises. On calcule un indice similaire pour la simulation à climat actuel CC0 en prenant les valeurs aux points de grille les plus proches des stations. On présente sur les 2 graphes suivants les cycles annuels moyens pour les heures 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, et 21 UTC.

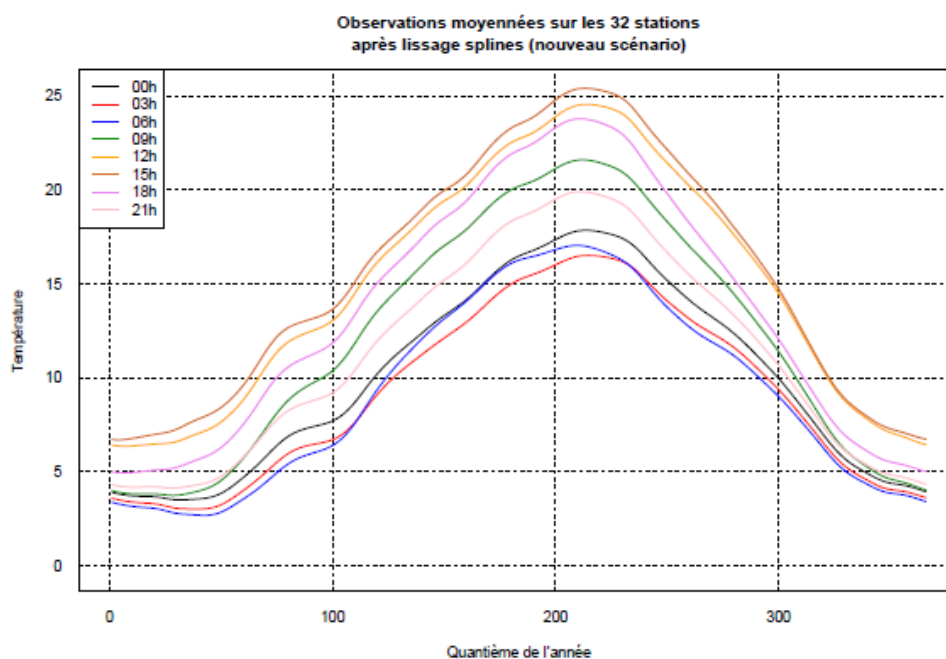


Figure 10: cycles annuels des températures observées pour l'indice France (moyenne pondérée sur 32 stations)

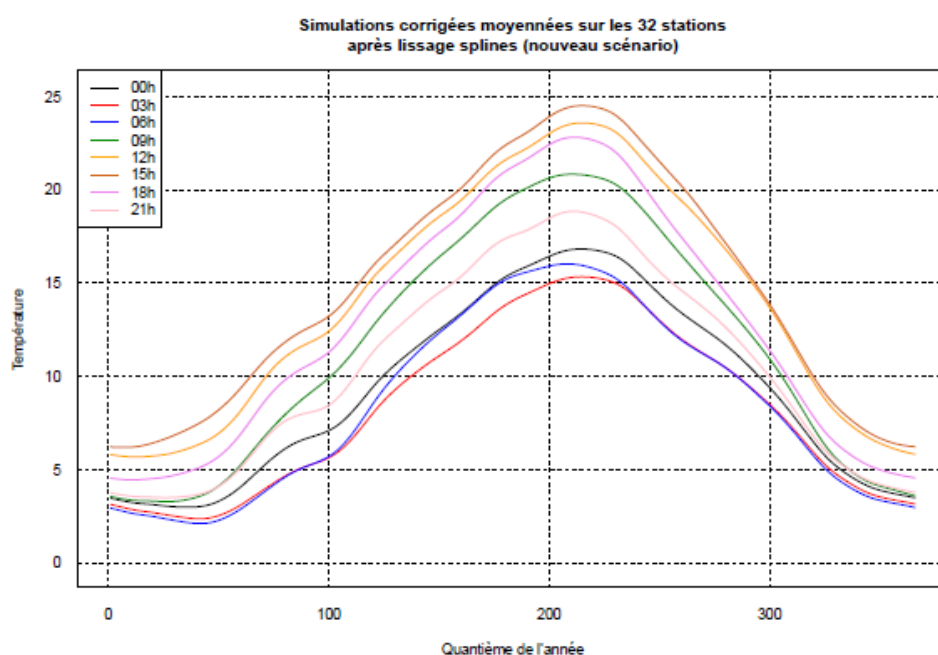


Figure 11: cycles annuels des températures simulées CC0 pour l'indice France (moyenne pondérée sur les points de grille proches des 32 stations)

On examine les cycles quotidiens moyens indice France calculés sur les données simulées à climat actuel CC0 et leur cohérence par rapport aux données HIRLAM et aux valeurs observées. Les observations au pas de temps 3h correspondent à la courbe noire, la climatologie de référence aux points verts, la simulation brute à la courbe rouge et la simulation recalée à la courbe bleue. Il faut comprendre ici que le recalage est effectué sur la référence au pas de temps 6 h et que les données aux heures intermédiaires sont produites par application d'une spline. L'objectif de ces graphes est de vérifier que les données simulées recalées aux heures intermédiaires sont en accord avec le tracé des observations.

Ce type de graphe avait été tracé avec les données du scénario de 2012 et la climatologie de référence ERA-Interim. Le premier graphe sur fond jaune pâle est donné ici à titre d'exemple pour comparer les données ERA-Interim et HIRLAM par rapport aux observations. Les données de référence climatologique ici au pas de temps 6h sont représentées par les points verts. Même si l'échelle est différente, on voit que les points verts HIRLAM sont plus proches des observations que ne l'était ERA-Interim qui a une résolution spatiale moins fine. L'utilisation de la climatologie de la ré-analyse HIRLAM permet une meilleure approche « locale ».

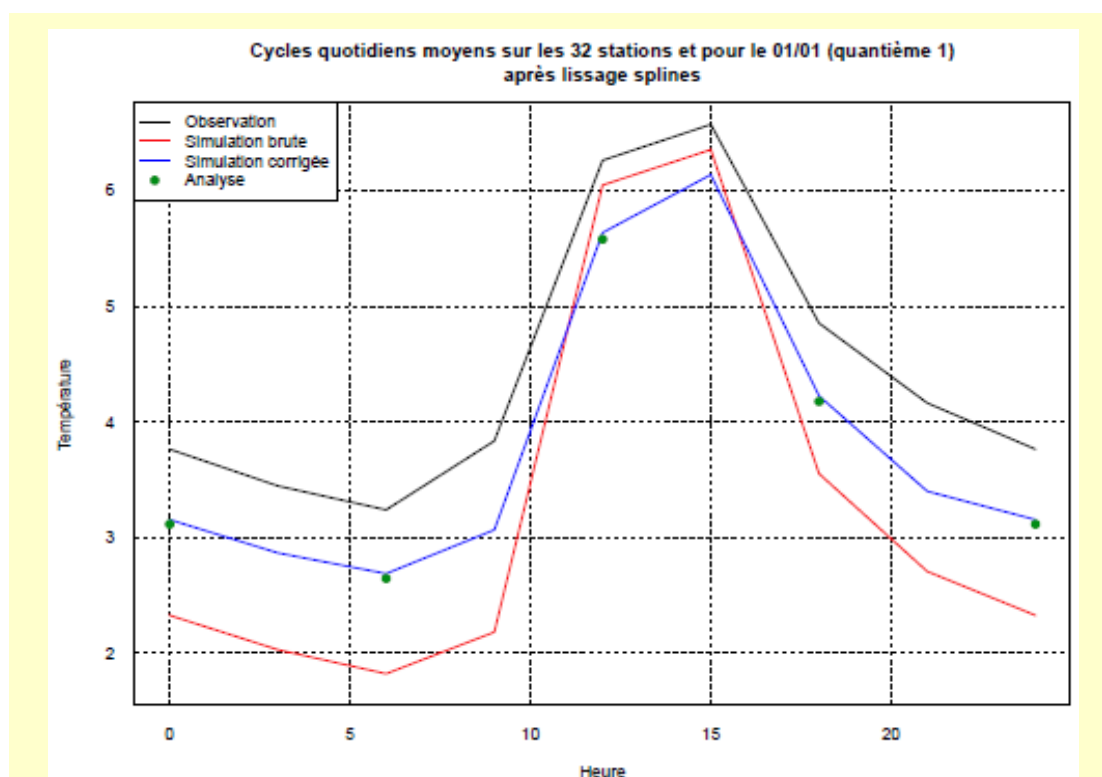


Figure 12: Cycle quotidien moyen indice France au 1er janvier avec ERA-Interim, scénario 2012

Sur les graphes suivants, on voit que le recalage force les cycles des simulations (en bleu) à passer par les valeurs moyennes de la ré-analyse HIRLAM (en vert) à 00, 06, 12 et 18 UTC. Les valeurs recalées aux heures intermédiaires 03, 09, 15 et 21 UTC donnent au cycle quotidien moyen du jour l'aspect du cycle moyen observé. L'application d'une spline pour le recalage aux heures intermédiaires (entre les heures principales 00, 06, 12 et 18 UTC) permet de restituer

correctement le cycle quotidien moyen des températures quel que soit le jour de l'année.

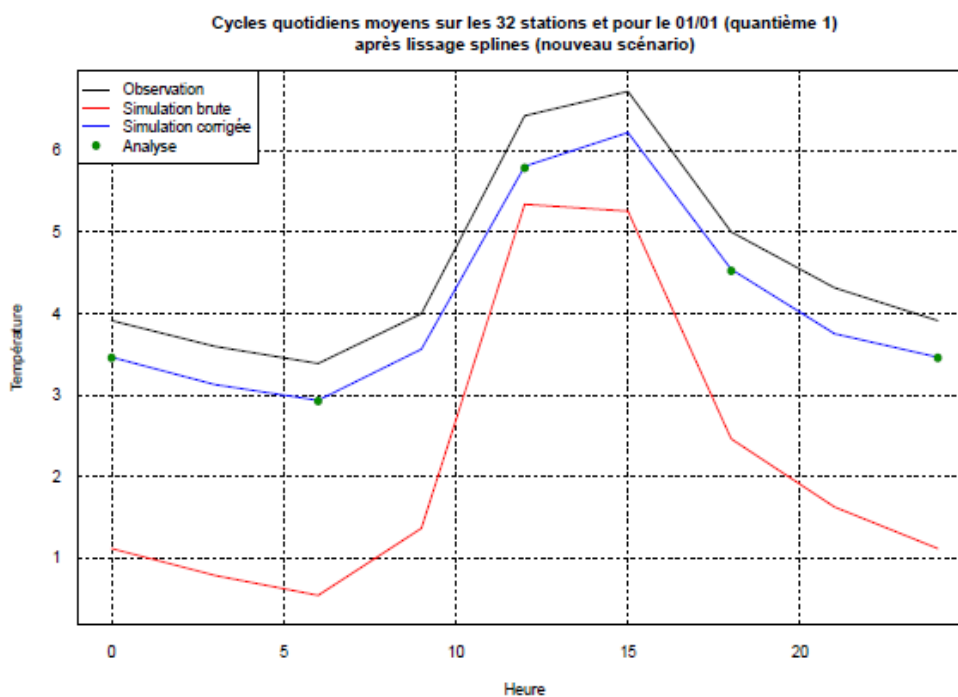


Figure 13: Cycle quotidien moyen indice France au 1er janvier avec HIRLAM, scénario CC0 climat actuel

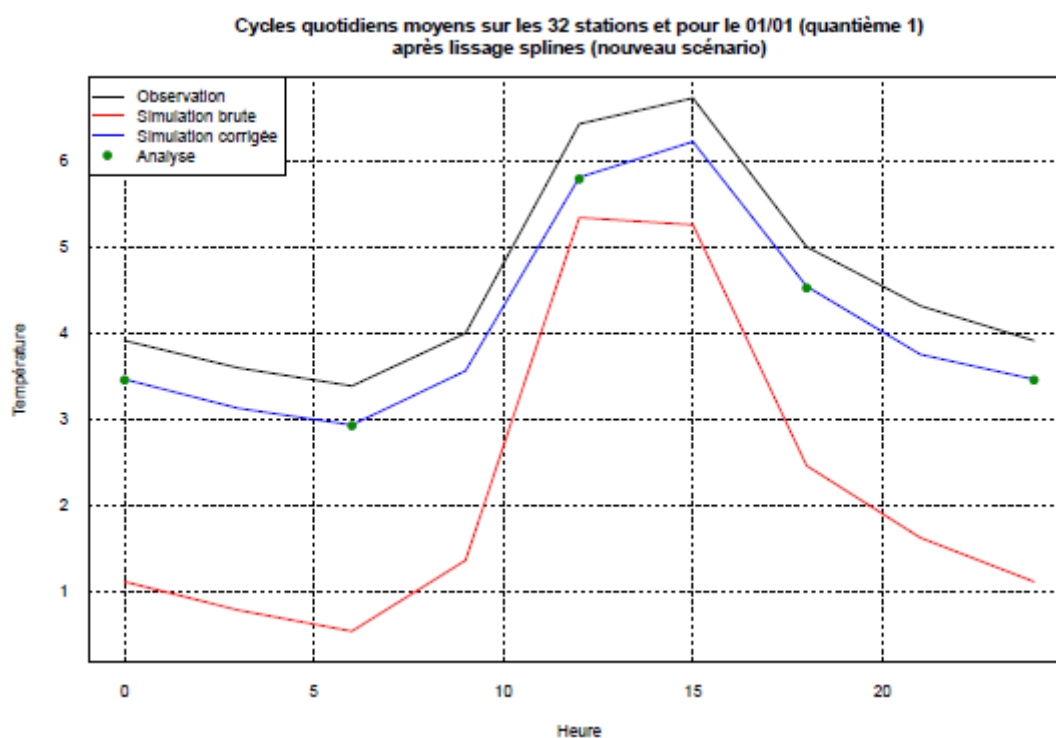


Figure 14: Cycle moyen quotidien indice France au 15 mars avec HIRLAM, scénario CC0 climat actuel



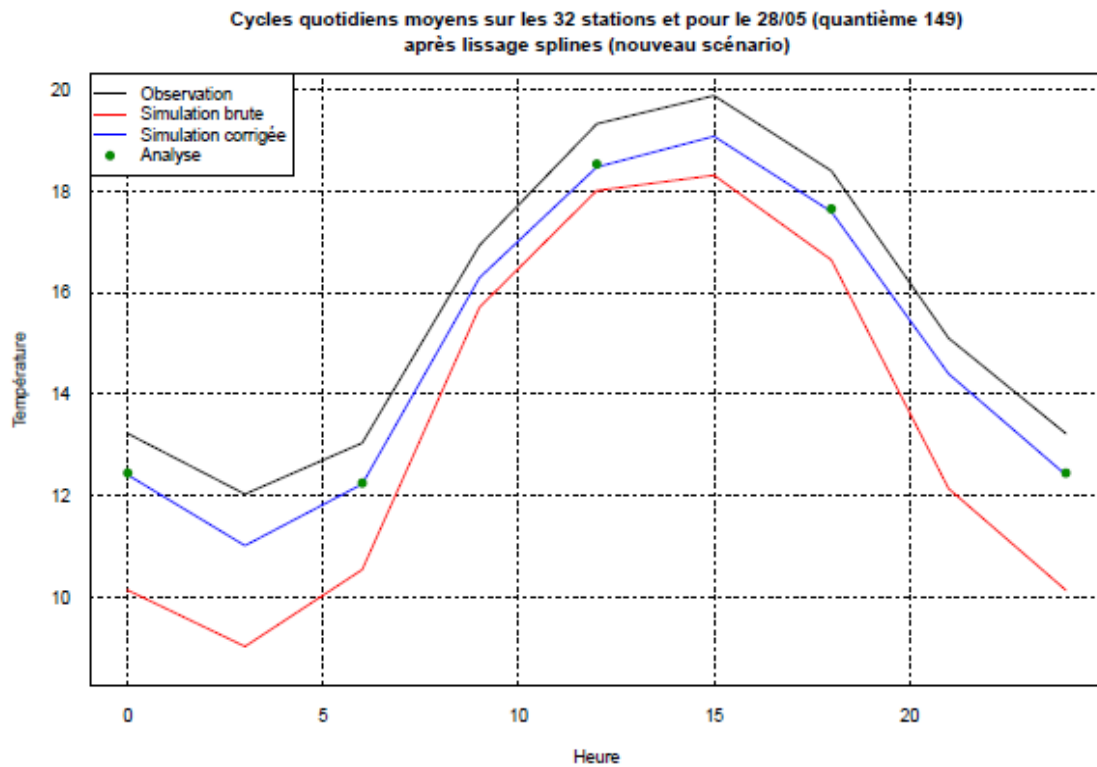


Figure 15: Cycle quotidien moyen indice France au 28 mai avec HIRLAM, scénario CC0 climat actuel

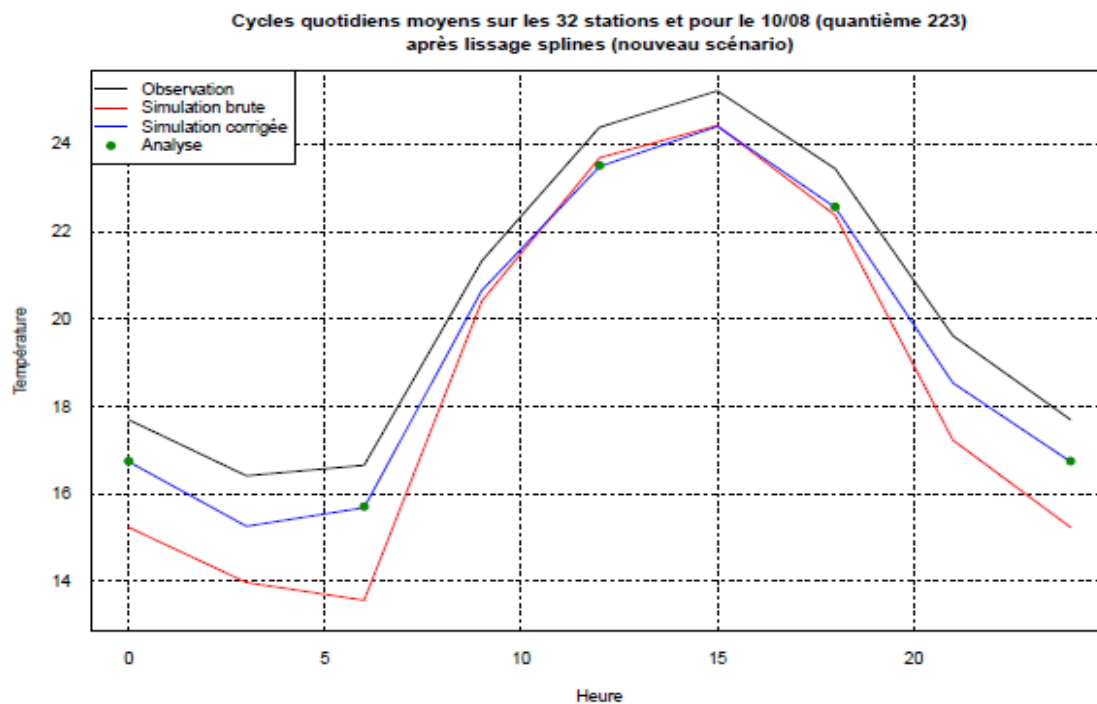


Figure 16: Cycle moyen quotidien indice France au 10 août avec HIRLAM, scénario CC0 climat actuel

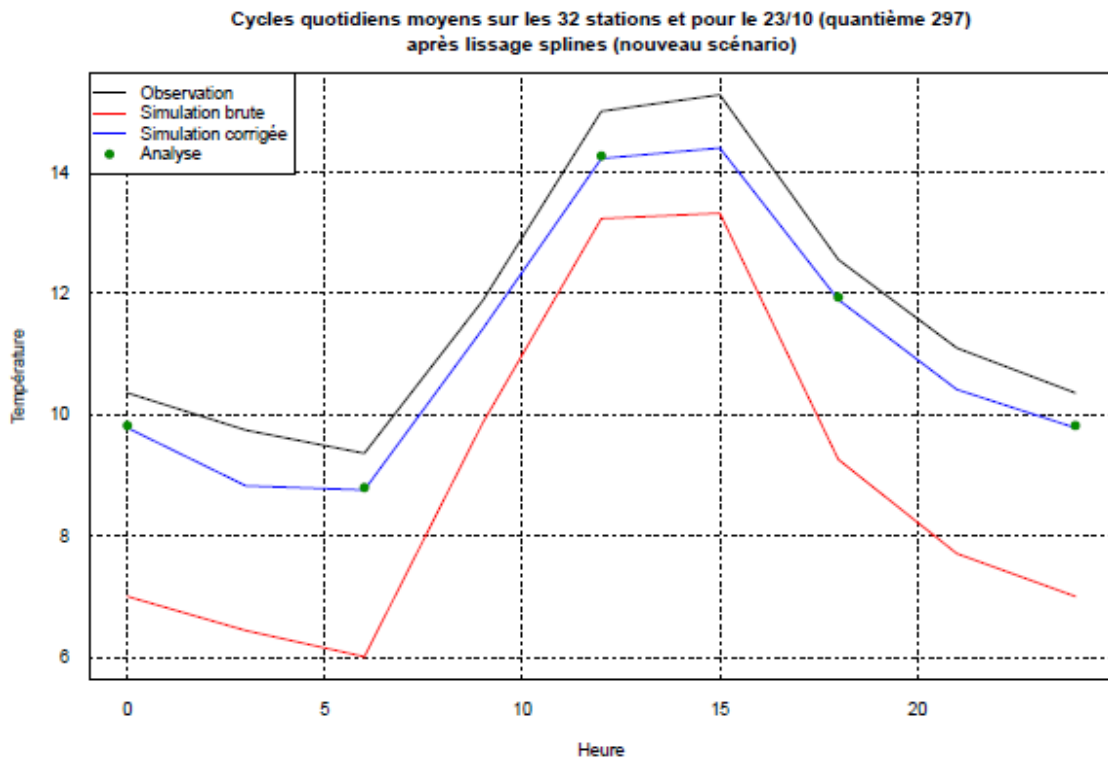


Figure 17: Cycle quotidien moyen indice France au 23 octobre avec HIRLAM, scénario CC0 climat actuel

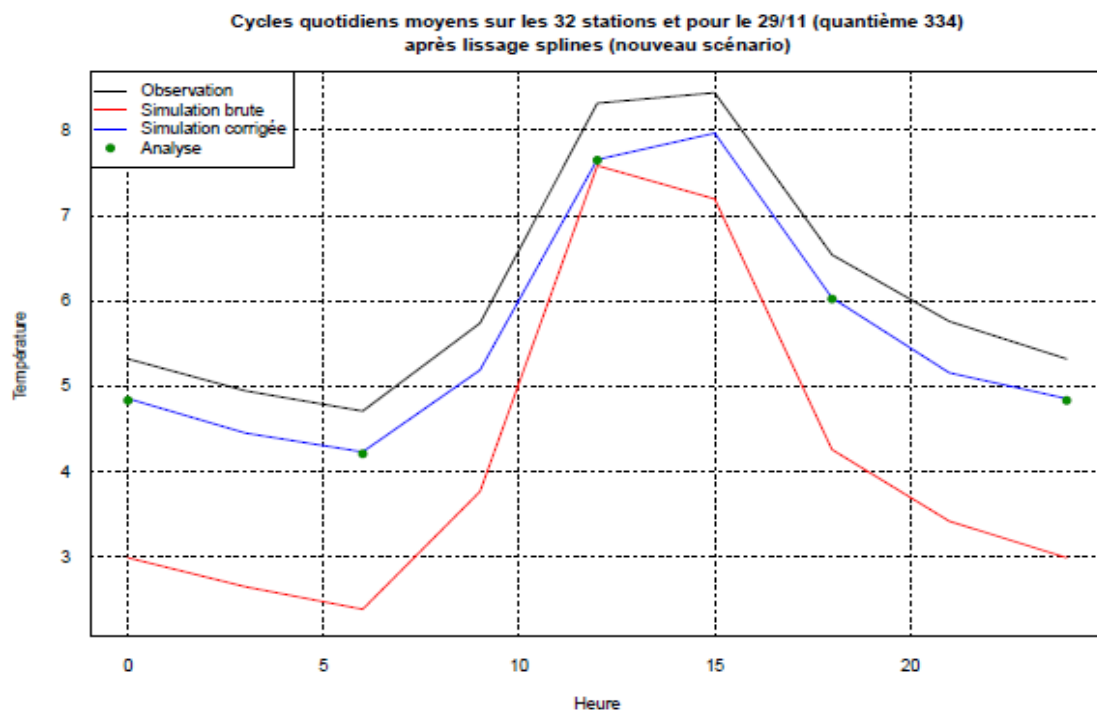


Figure 18: Cycle moyen quotidien indice France au 29 novembre avec HIRLAM, scénario CC0 climat actuel

## 4.5 Cartes sur l'Europe

### 4.5.1 Moyennes

Les moyennes mensuelles des simulations à climat actuel recalées sont très proches des moyennes de la référence HIRLAM. Pour l'illustrer, on présente ci-après deux exemples de cartes des moyennes de la référence HIRLAM (à gauche), des simulations à climat actuel CC0 recalées (au centre) et des simulations CC0 brutes (à droite) : en haut, la moyenne en janvier à 00 UTC, et au-dessous, la moyenne en octobre à 18 UTC. On remarque que les sorties de modèle sont trop froides sur l'est de l'Europe et sur les reliefs, en particulier sur la Scandinavie. Le recalage permet d'effacer ces biais.

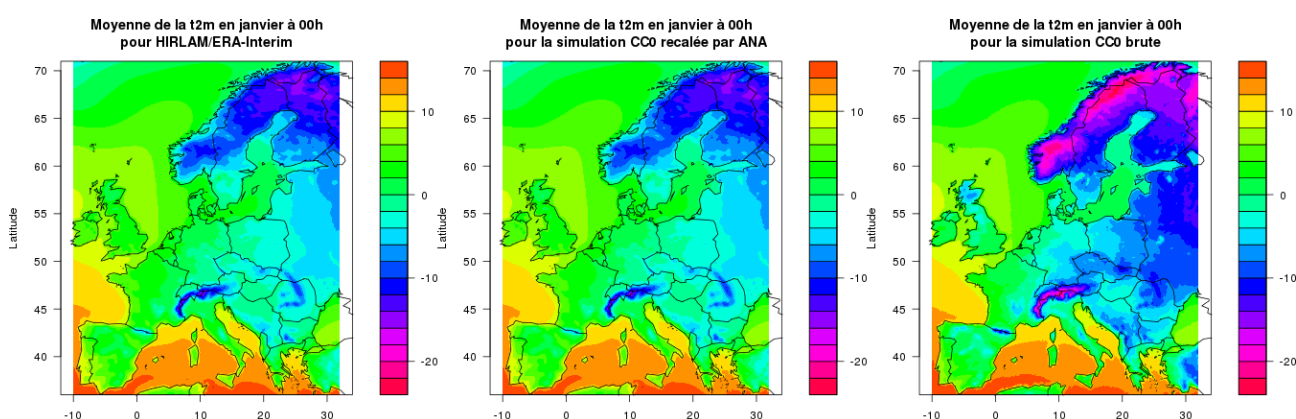


Figure 19: Température moyenne à 2 m en janvier à 00UTC, pour HIRLAM, CC0 recalé, CC0 brut

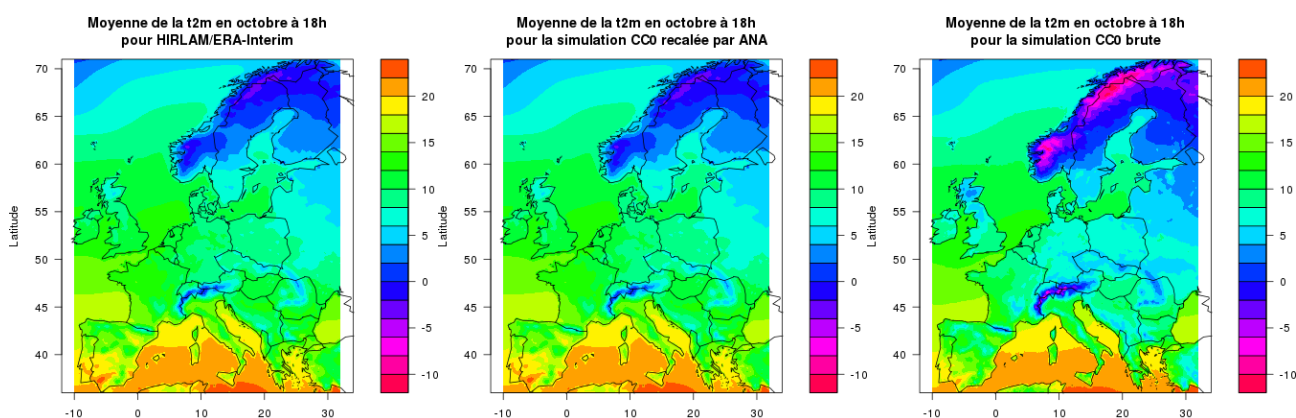


Figure 20: Température moyenne à 2m en octobre à 18UTC, pour HIRLAM, CC0 recalé, CC0 brut

On examine également les données des simulations à climat 2050 recalées.

Sur les deux graphes suivants, on visualise les différences de température moyenne entre les températures à climat actuel CC0 (à gauche), à climat 2050 RCP4.5 CC1 (au milieu) et à climat 2050 RCP8.5 (à droite). La différence entre le climat actuel et le climat 2050 est visible : la Scandinavie est très impactée par le réchauffement, ainsi que l'Espagne, les reliefs et l'Europe continentale. La température au-dessus de la Méditerranée monte.

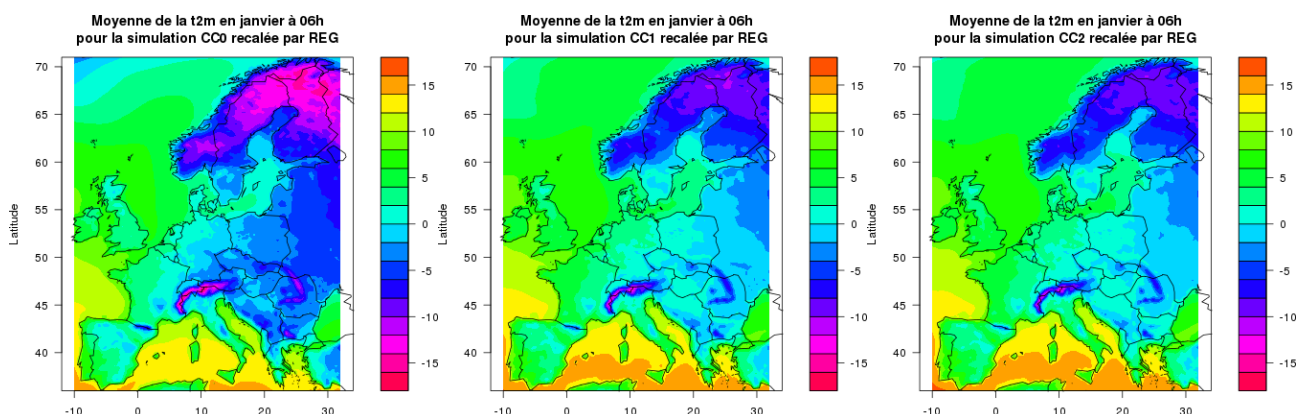


Figure 21: Températures moyennes à 2 m en janvier à 06UTC pour CC0, CC1 et CC2

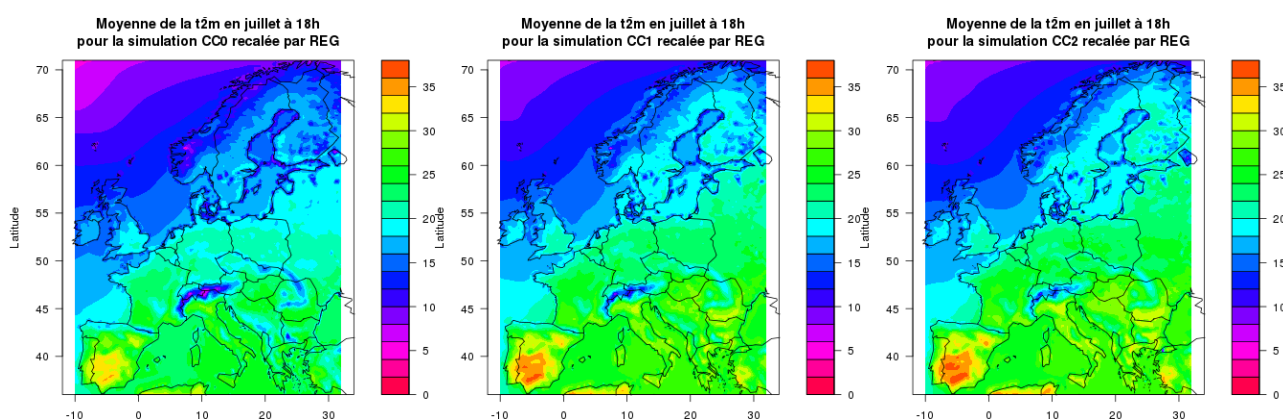


Figure 22: Températures moyennes à 2 m en juillet à 18UTC pour CC0, CC1 et CC2

## 4.5.2 Écarts-types

Sur les graphes suivants, on examine les écarts-types mensuels de la référence HIRLAM (à gauche), de la simulation à climat actuel CC0 recalée (au milieu) et de la simulation CC0 brute (à droite). Le comportement du modèle est satisfaisant. Le recalage donne une bonne cohérence entre les écarts-types de la référence HIRLAM et ceux de la simulation à climat actuel recalée. On remarque un léger excès de variabilité sur certaines zones géographiques par rapport à la référence HIRLAM. Les écarts-types de la simulation recalée sont un peu plus élevés que ceux de la référence, du fait de la longueur de l'échantillon (200 ans) et du fait que les records de température sont presque toujours un peu plus sévères.

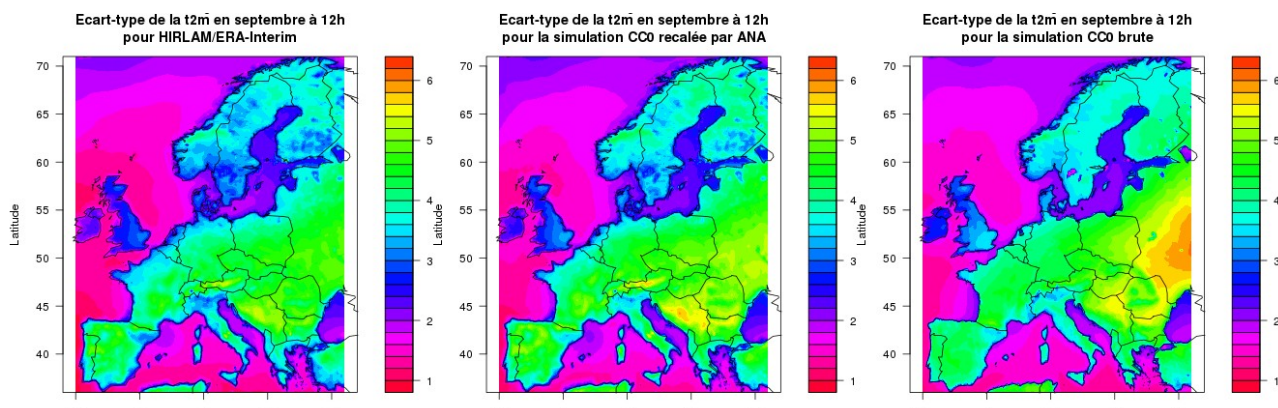


Figure 23 : Écarts-types de la température à 2 m en septembre à 12h pour HIRLAM, CC0 recalé et CC0 brut.

### 4.5.3 Températures minimales

Les records de température minimale sur 200 ans devraient a priori égaier ou dépasser les records sur 30 années. C'est ce qui est présenté dans les cartes suivantes données à titre d'exemple avec à gauche les records de la référence HIRLAM, au centre les records des simulations CC0 à climat actuel, à droite la différence entre les records des simulations CC0 recalées et les records de la référence. Cette différence est négative quand le record de température froide CC0 recalé est plus froid que le record de la référence.

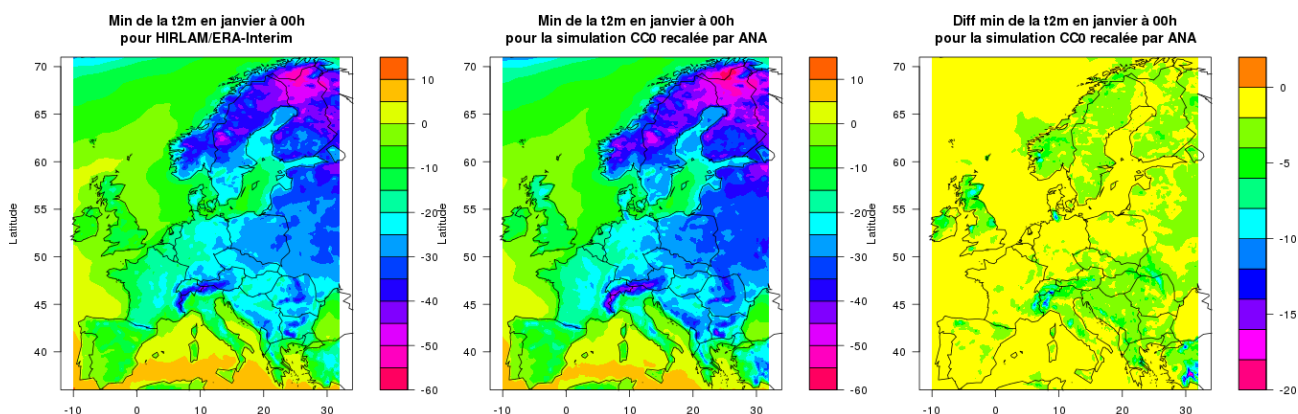
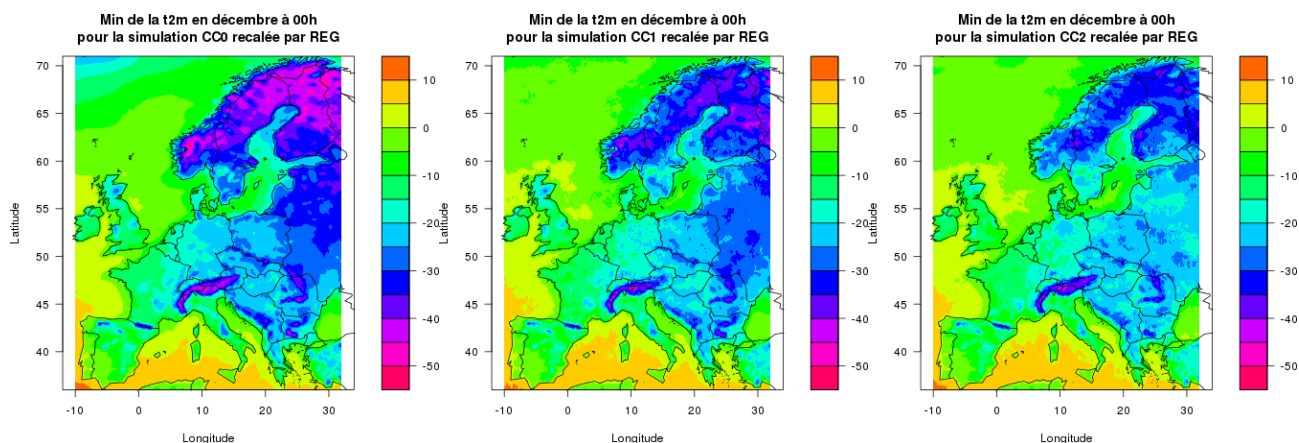


Figure 24 : records de température minimale en janvier à 00UTC pour la référence HIRLAM et pour CC0 à climat actuel, et différence entre les deux

On compare ensuite les records de température minimale des 3 scénarios, avec à gauche le scénario CC0 à climat actuel, au centre le scénario CC1 à climat 2050 RCP4.5, et à droite le scénario à climat 2050 RCP8.5.



*Figure 25 : records de températures minimales en décembre à 00UTC pour les scénarios CC0 à climat actuel et CC1 et CC2 à climat 2050*

Les scénarios à climat 2050 CC1 RCP4.5 et CC2 RCP8.5 sont très proches l'un de l'autre. Les hypothèses RCP4.5 et RCP 8.5 ne font diverger les températures à 2 m très nettement qu'après 2050.

Par ailleurs, il existe toujours la possibilité pour les extrêmes minimaux de présenter de grands écarts avec les températures minimales « de saison », dus à des situations météorologiques bien spécifiques générant des vagues de froid de grande ampleur. En effet, en sortie de la simulation CC2 2050 RCP4.5 présente des records de température minimale généralement plus froids que ceux de la simulation CC1 2050 RCP8.5. Cela ne correspond pas à ce qui est attendu a priori. Après examen des données, on remarque dans les 200 premières années de la simulation CC2 un évènement très froid qui n'a pas son équivalent dans les 200 premières années de la simulation CC1. On comprend qu'un évènement rare de durée de retour supérieure à 200 ans peut ne pas apparaître dans la simulation CC1. Toutefois, un examen rapide de la deuxième partie de la simulation CC1 (200 années supplémentaires) montre qu'un évènement similaire semble se détacher de l'ensemble des données.

Les graphes ci-après montrent les vagues de froid sur la France pour les scénarios CC0, CC1 et CC2.

Les 10 principales vagues de froid historiques observées sont présentées par des « bulles » bleues numérotées de 1 à 10, dont la date est référencée dans le cadre sous le graphe, et les vagues de froid des scénarios sont repérées par des bulles violettes.

Pour les historiques, on remarque une rupture entre les nombreuses vagues de froid de durée inférieure ou égale à 16 jours et les deux vagues de froid à 27 jours qui correspondent à des situations météorologiques particulières rares. La réduction en nombre, intensité et durée des vagues de froid entre le climat 2000 et le climat 2050 est très nette. Mais la présence dans le scénario à climat 2050 CC2 RCP8.5 d'une vague de froid de l'ordre de celle de l'hiver 1956 montre que le risque d'évènements majeurs n'est pas écarté, bien que ce type d'évènement devienne très rare (d'une durée de retour égale ou supérieure à 200 ans).

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

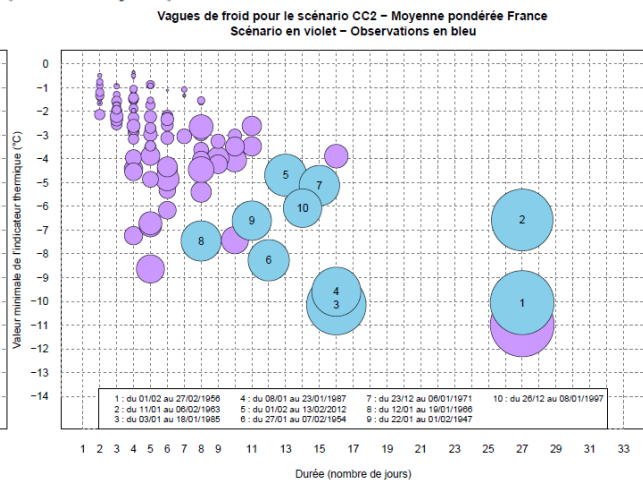
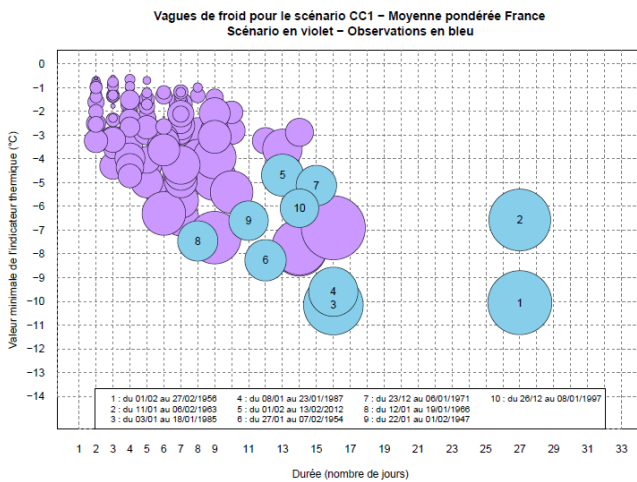
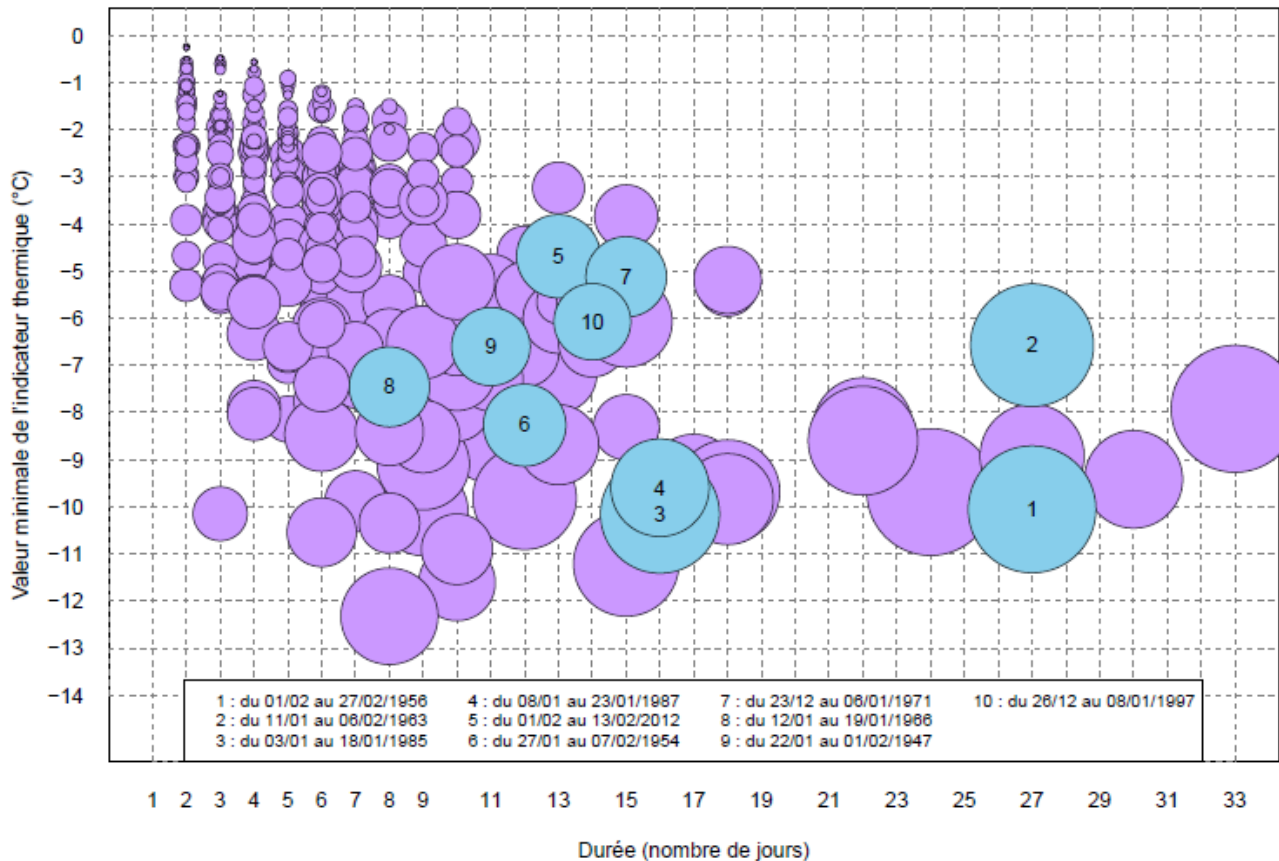


Figure 26: Vagues de froid sur la France en haut pour le scénario à climat 2000 CC0, en bas pour les scénarios à climat 2050, à gauche CC1 RCP4.5 et à droite CC2 RCP8.5

#### 4.5.4 Températures maximales

De la même façon que pour les températures minimales, les records de température maximale sur 200 ans devraient a priori égaier ou dépasser les records sur 30 années. C'est ce qui est présenté dans les cartes suivantes données à titre d'exemple avec à gauche les records de la référence HIRLAM, au centre les records des simulations CC0 à climat actuel, à droite la différence entre les records des simulations CC0 recalées et les records de la référence. Cette différence est positive quand le record de température chaude CC0 recalé est plus élevé que le record de la référence.

Pour le mois de juin, les records sont relevés un peu partout, toujours faiblement sur la mer, un peu plus sur certaines zones.

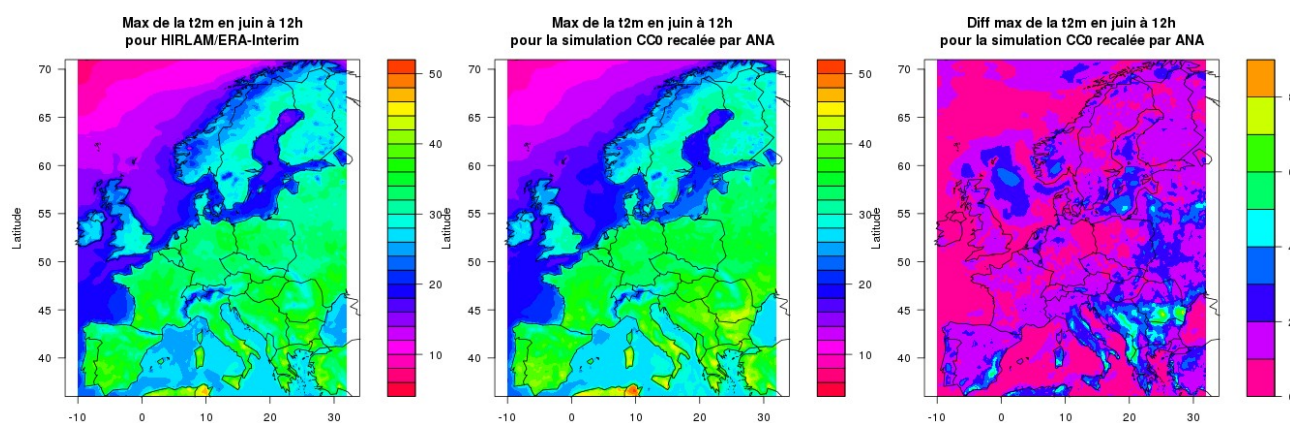


Figure 27 : Records de température maximale à 2 m en juin à 12 UTC pour la référence HIRLAM et le scénario CC0 à climat actuel et différence entre les deux (CC0 et HIRLAM)

On compare également les records de température maximale des 3 scénarios, avec à gauche le scénario CC0 à climat actuel, au centre le scénario CC1 à climat 2050 RCP4.5, et à droite le scénario à climat 2050 RCP8.5. Les scénarios CC1 et CC2 sont très proches l'un de l'autre, ils ne divergent très nettement qu'après 2050. Le réchauffement est visible sur les reliefs, sur le sud de l'Europe, sur la Scandinavie et en mer. Il faut retenir toutefois qu'il s'agit là de records établis lors d'évènements météorologiques particuliers.

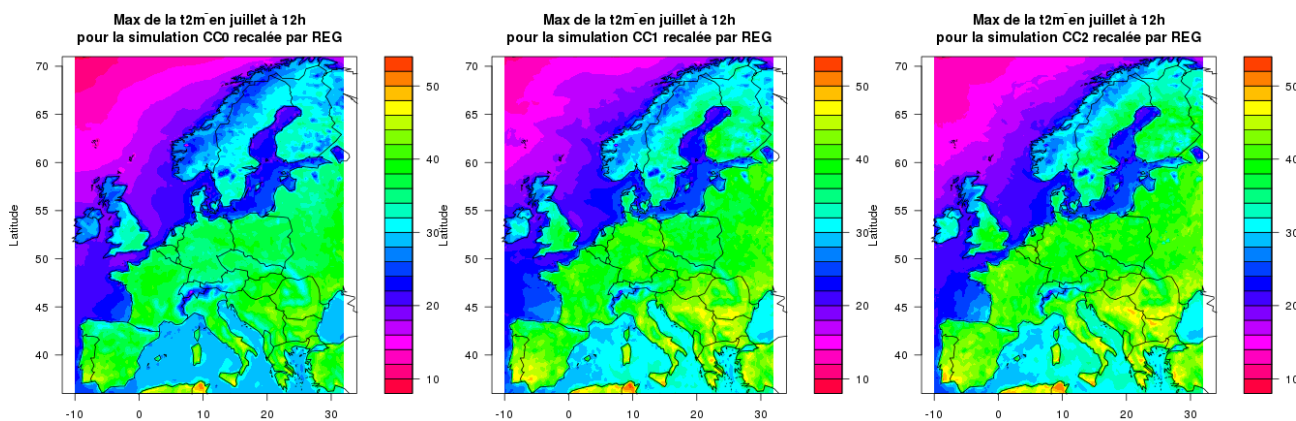


Figure 28 : records de températures maximales en juillet à 12UTC pour les scénarios CC0 à climat actuel et CC1 et CC2 à climat 2050



Les graphes ci-après montrent les vagues de chaleur sur la France pour les scénarios CC0, CC1 et CC2. Les 10 principales vagues de chaleur historiques observées sont présentées par des « bulles » rouges numérotées de 1 à 10, dont la date est référencée dans le cadre sous le graphe, (avec en 3 la vague juillet-août 2018) et les vagues de chaleur des scénarios sont repérées par des bulles orange.

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

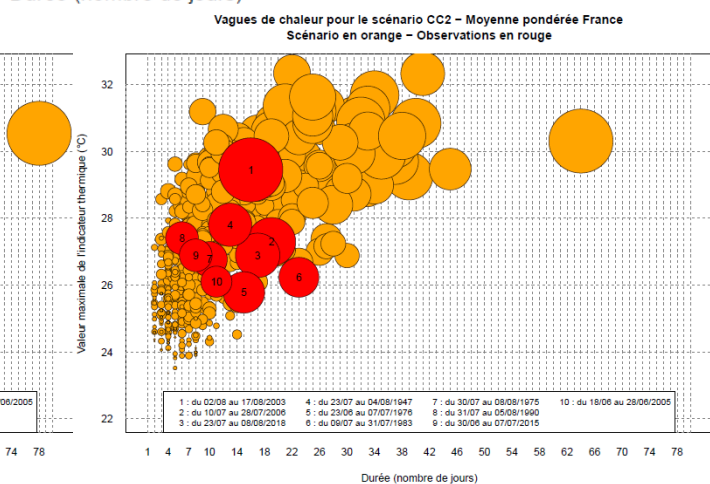
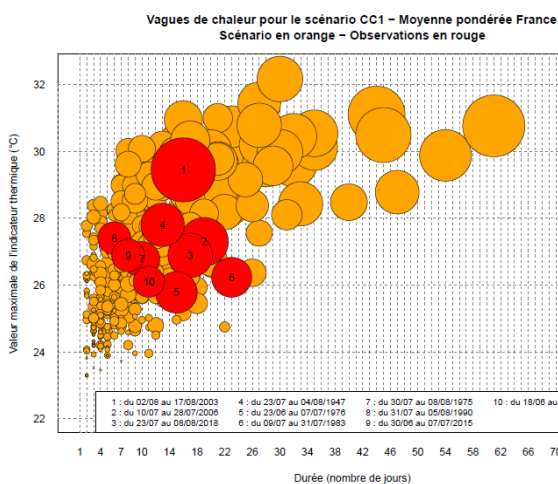
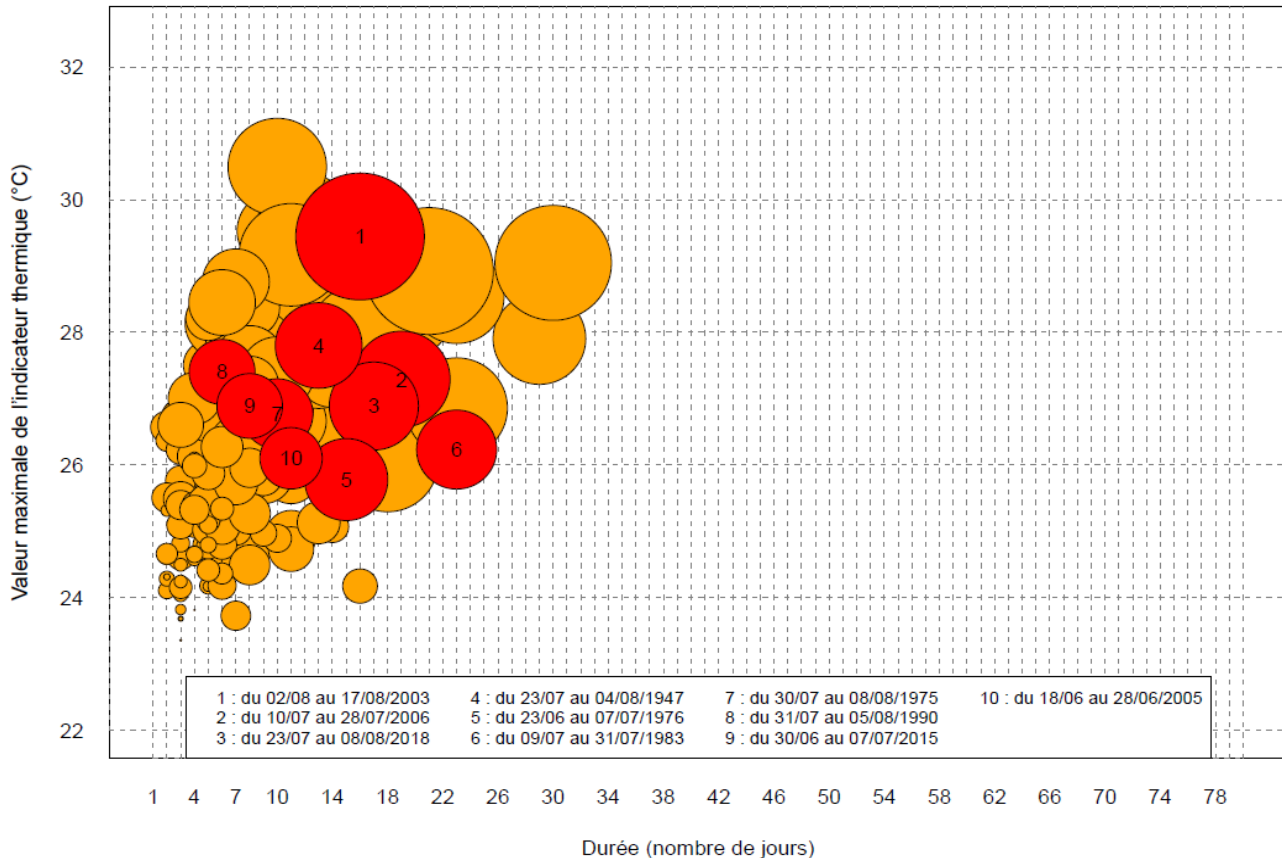


Figure 29: Vagues de chaud sur la France en haut pour le scénario à climat 2000 CC0, en bas pour les scénarios à climat 2050, à gauche CC1 RCP4.5 et à droite CC2 RCP8.5

On remarque l'extension en nombre, en intensité et en durée des vagues de chaleur au climat 2050 par rapport au climat 2000. Il faut toutefois noter que le modèle ne représente pas bien la convection, et donc que la possibilité d'orages peut ne être restituée correctement, en particulier pour des épisodes de très longue durée (dépassant 30 jours). De telles vagues de chaleur pourraient être fractionnées en plusieurs vagues entrecoupées par des passages orageux. Une telle hypothèse non validée, pour un climat qui aura évolué, ne supprime cependant pas le risque montré ici de vagues de chaleur de très longue durée.

#### 4.5.5 Points particuliers

Comme indiqué lors de la constitution des premières séries de températures recalées par la méthode quantile-quantile, le modèle a été défectueux sur certains points particuliers : les lacs Ladoga, Vänern et Vättern, une petite zone en Biélorussie et quelques points en mer de Marmara. Sur ces points, les données du scénario CC2 à climat 2050 RCP8.5 sont touchées, et ne peuvent être exploitées telles quelles. On remarque plus particulièrement les zones impactées sur la carte des différences entre les valeurs maximales recalées par quantile-quantile record CC2 climat 2050 RCP8.5 et CC0 climat 2000. En effet, le recalage par quantile-quantile aggrave ici les formes défectueuses données par le modèle pour CC2.

#### Diff\_max\_2050RCP85-actuel

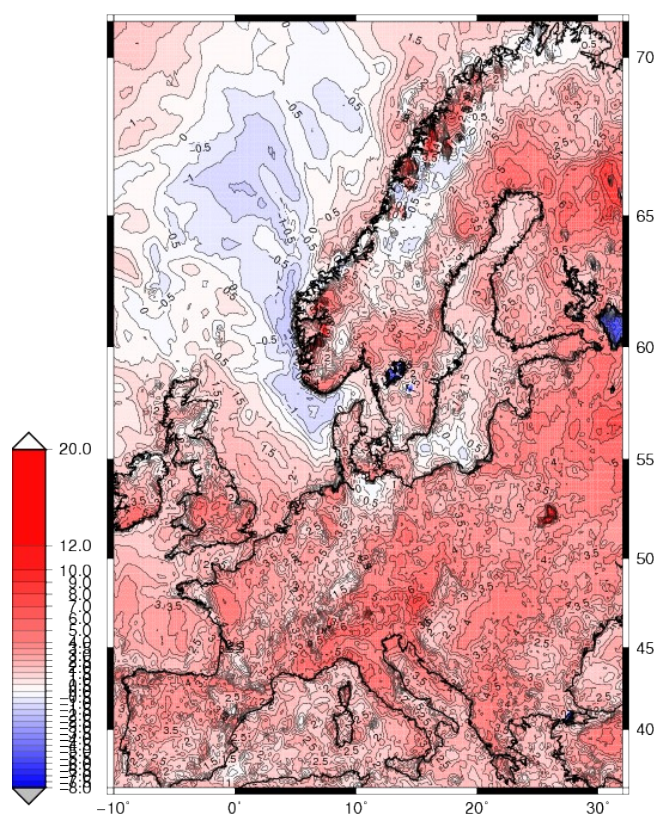


Figure 30: Différence entre les valeurs maximales recalées par quantile-quantile climat 2050 CC2 RCP8.5 et climat CC0 2000

Pour comprendre ce comportement, on visualise les fonctions de densité sur un point du lac Ladoga (point 11391 : 60,4°N, 31,4°E). La distribution de la réanalyse HIRLAM en ce point se présente sous la forme d'une courbe à deux pics, qui pourrait être approchée par la somme de deux lois normales. Cette distribution de référence est très étalée en largeur. La distribution des données à climat actuel CC0 (en vert) a également une forme à deux pics, mais bien moins étalée en largeur. La distribution de la série à climat 2050 RCP4.5 (CC1, en rouge) présente quant à elle un pic secondaire supplémentaire. La distribution du scénario 2050 RCP8.5 (CC2, en bleu) est très différente de des autres avec un pic central très important et une amplitude thermique beaucoup plus faible que les autres.

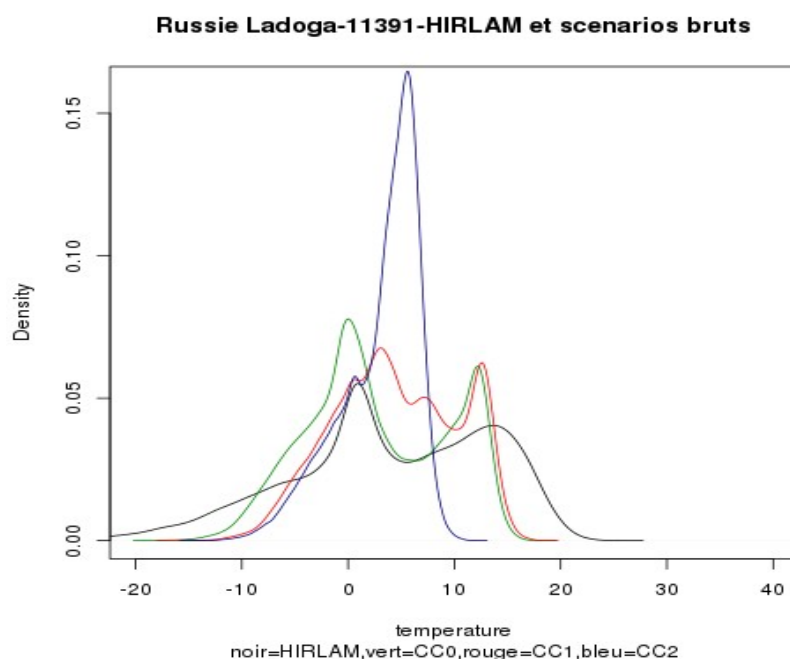


Figure 31: fonctions de densité HIRLAM et scénarios bruts sur un point du lac Ladoga

De même, pour analyser le comportement particulier de la petite zone atypique en Biélorussie, on trace les fonctions de densité des séries brutes au point de coordonnées 52,6°N, 26,0°E (point 19593).

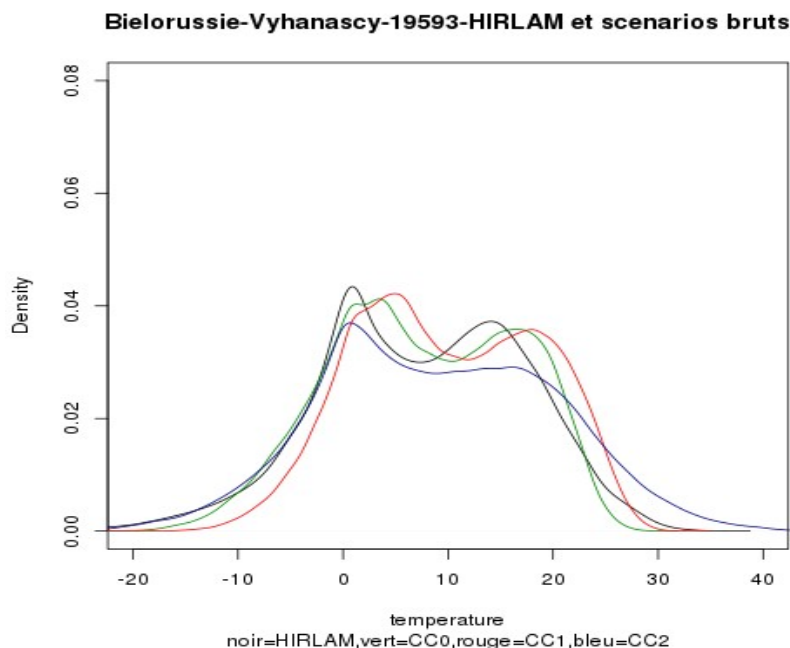


Figure 32: fonctions de densité HIRLAM et scénarios bruts sur un point particulier en Biélorussie

Les distributions HIRLAM et scénarios bruts se présentent sous la forme d'une somme de deux lois normales. La distribution de la série HIRLAM (en noir) est plus large que la distribution CC0 climat actuel (en vert). CC1 a une fonction de densité semblable à CC0, mais décalée vers les valeurs plus chaudes. CC2 (en bleu) est plus étalé que CC0, cette différence de forme est suffisante pour créer des anomalies au cours du recalage si on utilise une fonction quantile quantile avec extrapolation sur les valeurs extrêmes.

Pour la méthode de recalage maintenant utilisée, un test a été mis en place pour détecter les points défectueux, et la méthode de recalage a été complétée par une évaluation des valeurs sur les points voisins et une adaptation du recalage en prenant en compte les séries non défectueuses sur les 16 points de grille voisins. Il ressort que les défauts n'apparaissent plus du point de vue de la continuité spatiale, les séries semblent réalistes, mais elles sont probablement de qualité moindre que celles des points non défectueux.

## 5 Comparaison entre les deux méthodes de recalage

On compare ici les résultats obtenus par le recalage quantile-quantile et par la méthode développée à Météo-France pour ces simulations.

### 5.1 Moyennes mensuelles

On prend l'exemple des moyennes mensuelles en janvier à 00 UTC : sur la figure suivante, à gauche se trouve la référence HIRLAM, au centre la simulation à climat actuel recalée par la méthode quantile-quantile et à droite la même simulation recalée par la nouvelle méthode. On note

que les moyennes sont conformes aux moyennes HIRLAM, quelle que soit la méthode de recalage utilisée. Pour les autres mois de l'année on ne remarque pas non plus de différence entre les deux méthodes.

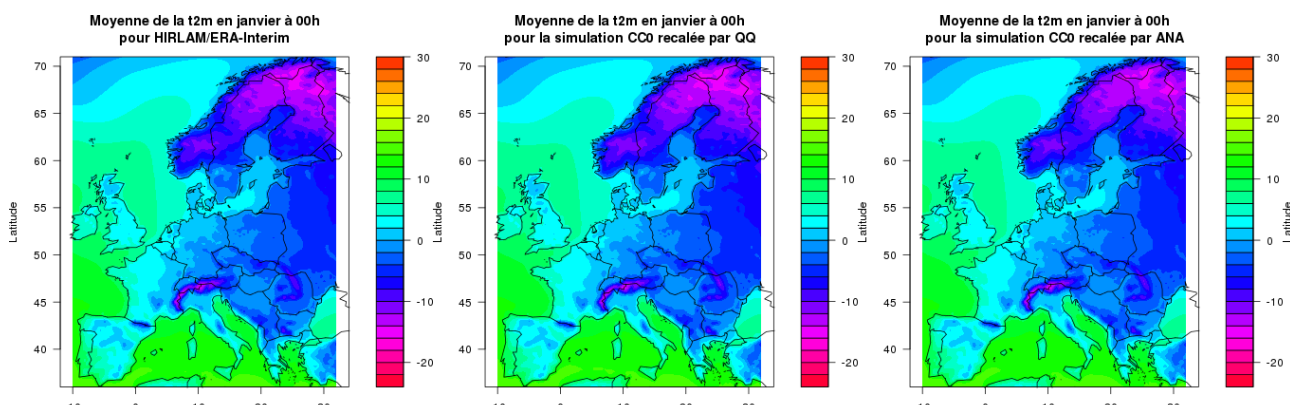


Figure 33: Moyennes de la température à 2 m en janvier à 00 UTC, pour la référence HIRLAM, pour la simulation à climat actuel, recalée par quantile-quantile et recalée par la nouvelle méthode.

Pour les simulations à climat 2050 CC1 RCP4.5 puis CC2 RCP8.5, on prend l'exemple du mois de juillet à 00 UTC. Les figures comprennent les cartes suivantes : à gauche, la simulation à climat 2050 recalée par quantile-quantile, au milieu, la simulation recalée avec la nouvelle méthode, et à droite les sorties brutes du modèle, non recalées. On remarque peu de différence entre le recalage par la méthode quantile-quantile et le recalage par la nouvelle méthode. Toutefois pour la simulation CC2 à climat 2050 RCP 4.5, on retrouve sur les données recalées par quantile-quantile les petites zones de données défectueuses existant sur les sorties brutes de modèle. Le recalage par la nouvelle méthode vient à bout de cette difficulté.

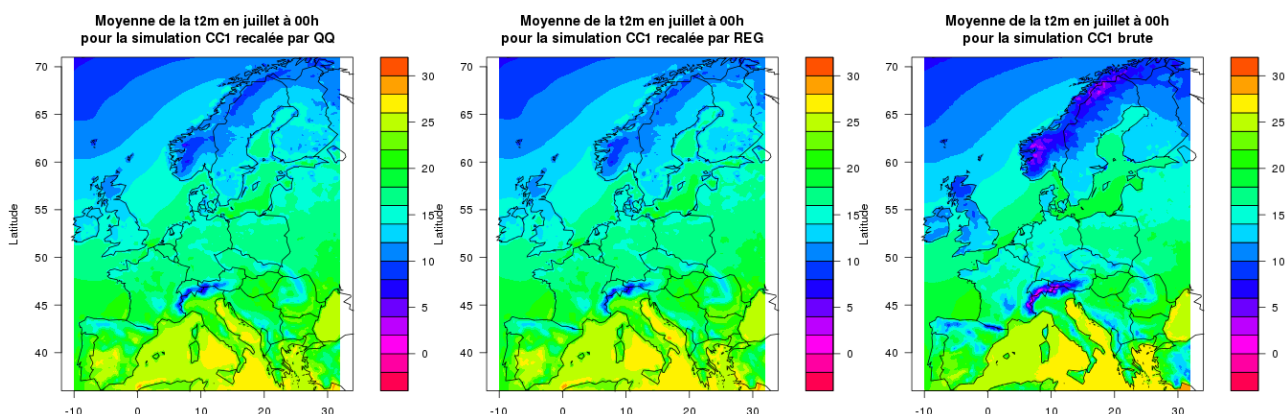


Figure 34 : Moyennes de la température à 2 m en juillet à 00 UTC, pour la simulation CC1 à climat 2050 RCP4.5, recalée par quantile-quantile, recalée par la nouvelle méthode, et non recalée

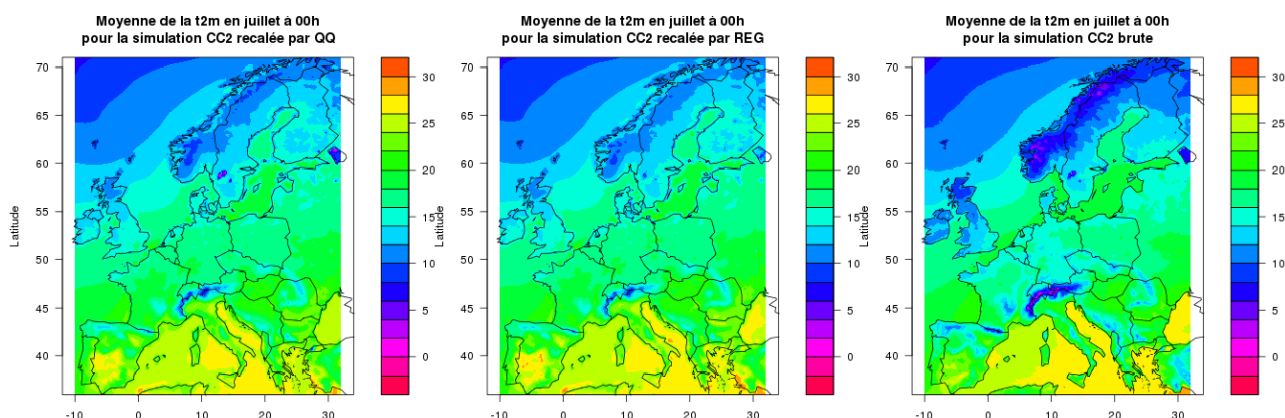


Figure 35: Moyennes de la température à 2 m en juillet à 00 UTC, pour la simulation CC2 à climat 2050 RCP8.5, recalée par quantile-quantile, recalée par la nouvelle méthode, et non recalée

## 5.2 Records de température minimale

On prend l'exemple des records de température minimale en janvier à 00 UTC : sur la figure suivante, à gauche se trouve la référence HIRLAM, au centre la simulation à climat actuel recalée par la méthode quantile-quantile et à droite la même simulation recalée par la nouvelle méthode.

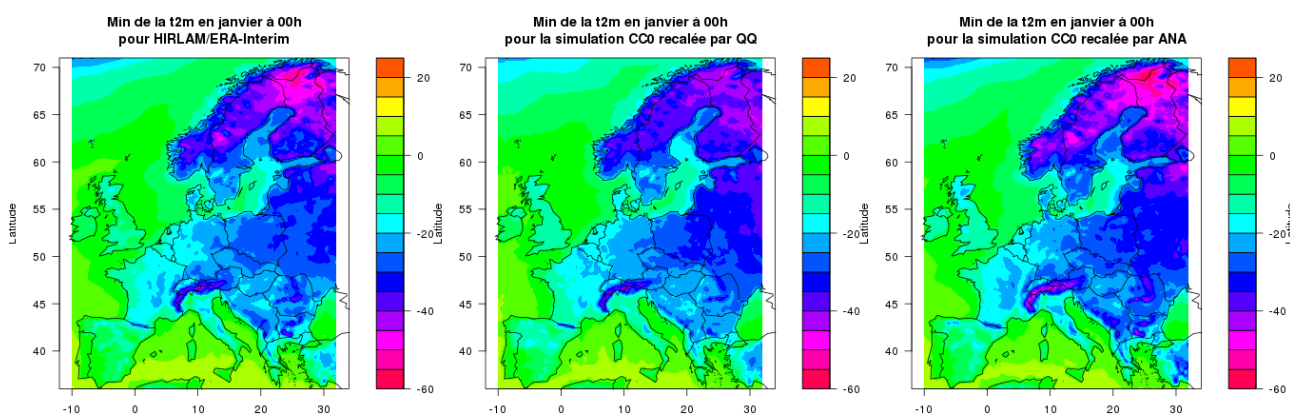


Figure 36: Records de minimum de température à 2 m en janvier à 00 UTC, pour la référence HIRLAM et pour la simulation à climat actuel, recalée par quantile-quantile et recalée par la nouvelle méthode.

On remarque que sur la Scandinavie, les extrêmes atteints sont moins froids avec le recalage quantile-quantile qu'avec la nouvelle méthode. La nouvelle méthode semble plus réaliste car plus en accord avec la référence HIRLAM.

On examine plus en détail les différences entre les records atteints par les simulations recalées suivant la méthode utilisée : à gauche la différence entre la référence HIRLAM et la simulation à climat actuel recalée par quantile-quantile et, à droite, la différence entre la référence HIRLAM et la simulation à climat actuel recalée par la nouvelle méthode. La palette colorée n'est pas identique sur les deux cartes. Avec la méthode quantile-quantile, pour laquelle on a choisi l'extrapolation les valeurs extrêmes en deçà du premier centile : sur plusieurs zones, on n'atteint pas les valeurs froides de la référence HIRLAM tandis que sur d'autres zones comme en Espagne, les records deviennent beaucoup plus froids. Avec la nouvelle méthode, il y a plus de cohérence spatiale et tous les records sont plus froids que la référence avec des différences plus importantes que  $-10^{\circ}\text{C}$

sur quelques points.

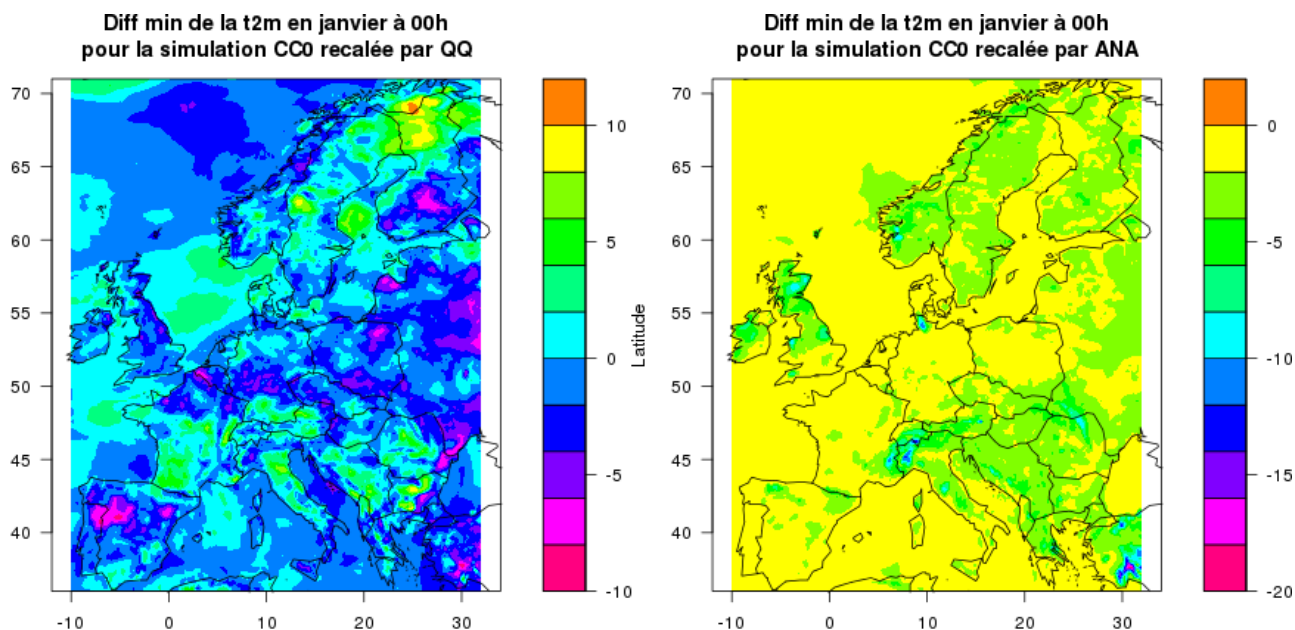


Figure 37 : Différences entre les records de température minimale à climat actuel et les records de la référence, suivant la méthode de recalage employée

Pour les scénarios à climat 2050, les records sont cohérents entre eux, plus prononcés sur la Scandinavie avec la nouvelle méthode de recalage. Les figures ci-après montrent pour CC1 à climat 2050 RCP4.5 puis pour CC2 à climat 2050 RCP8.5 les cartes suivantes : à gauche les records de minimum de température pour la simulation recalée par quantile-quantile, au centre, les records pour la simulation recalée avec la nouvelle méthode, à droite la simulation sans recalage.

Pour pour le climat futur, les records de température minimale de la méthode quantile-quantile restent un peu trop chauds. C'est un des inconvénients du choix de garder la même fonction de transfert pour le climat futur que celle définie entre le climat actuel et la référence HIRLAM. En effet, si les records de CC1 2050 RCP 4.5 sont égaux ou un peu au-dessus du 1<sup>er</sup> centile de CC0 climat actuel non recalé, la température recalée ne pourra pas être inférieure au 1<sup>er</sup> centile de la référence HIRLAM. Cet inconvénient n'existe pas avec la nouvelle méthode mise en œuvre.

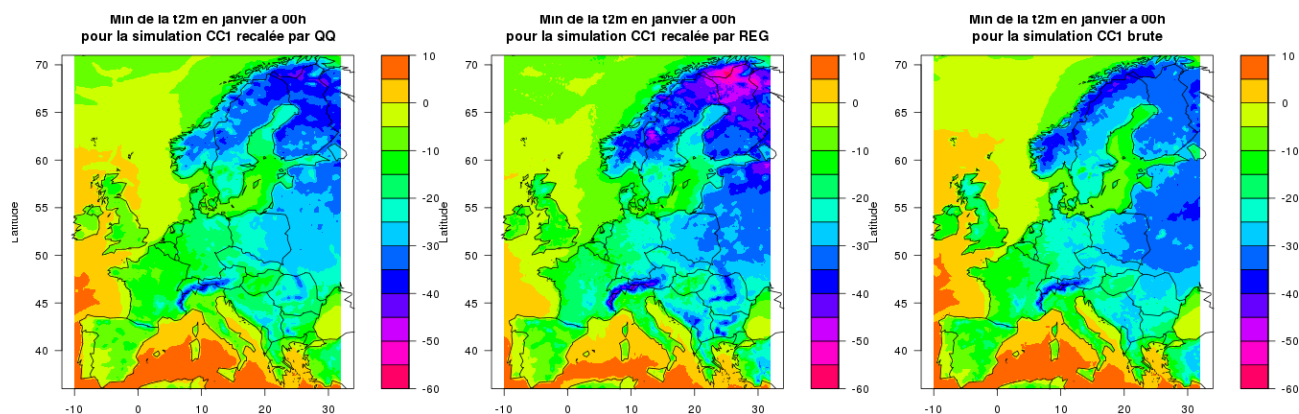


Figure 38: Records de minimum de température à 2 m en janvier à 00 UTC, pour la simulation CC1 à climat 2050 RCP4.5, recalée par quantile-quantile, recalée par la nouvelle méthode, et non recalée

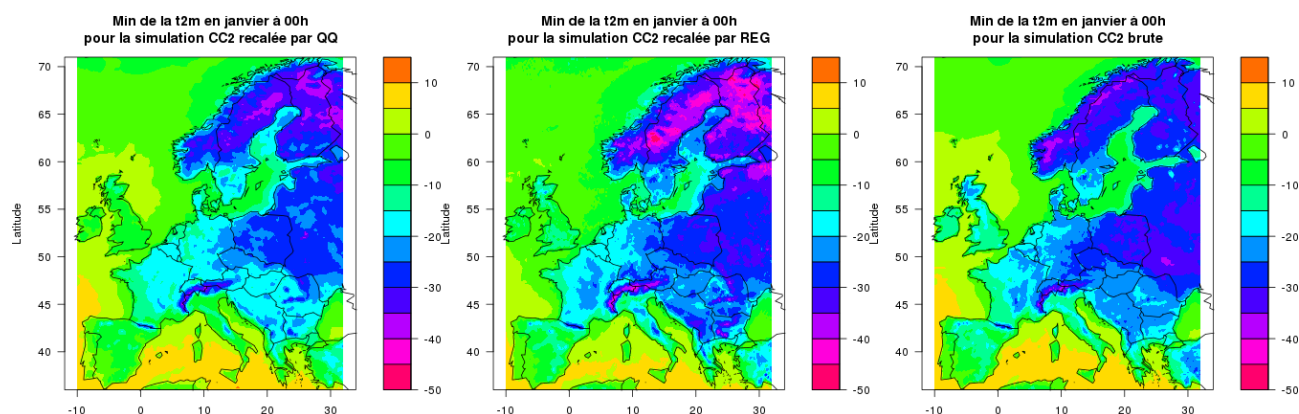


Figure 39 : Records de minimum de température à 2 m en janvier à 00 UTC, pour la simulation CC2 à climat 2050 RCP8.5, recalée par quantile-quantile, recalée par la nouvelle méthode, et non recalée

### 5.3 Records de température maximale

On prend l'exemple des records de température maximale en juin à 12 UTC : sur la figure suivante, à gauche se trouve la référence HIRLAM, au centre la simulation à climat actuel recalée par la méthode quantile-quantile et à droite la même simulation recalée par la nouvelle méthode. Il semble y avoir peu de différence entre les deux méthodes



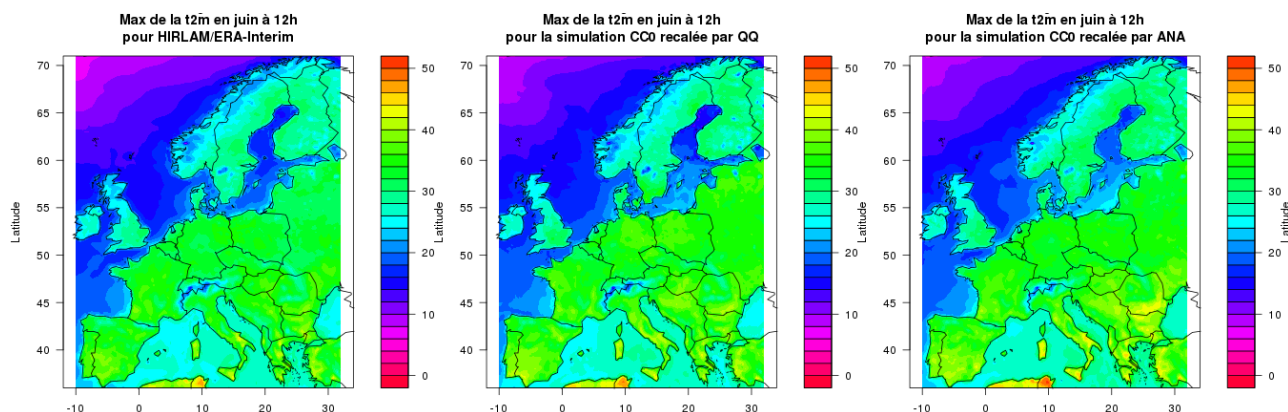


Figure 40: Records de maximum de température à 2 m en juin à 12 UTC, pour la référence HIRLAM et pour la simulation à climat actuel, recalée par quantile-quantile et recalée par la nouvelle méthode.

On examine plus en détail les différences entre les records atteints par les simulations recalées suivant la méthode utilisée : à gauche la différence entre la référence HIRLAM et la simulation à climat actuel recalée par quantile-quantile et, à droite, la différence entre la référence HIRLAM et la simulation à climat actuel recalée par la nouvelle méthode. La palette colorée n'est pas identique sur les deux cartes. Avec la méthode quantile-quantile, pour laquelle on a choisi l'extrapolation les valeurs extrêmes au-delà du dernier centile : sur quelques points, on n'atteint pas les valeurs chaudes de la référence HIRLAM, en particulier le long des côtes. Avec la nouvelle méthode, tous les records sont plus chauds que la référence, avec des différences plus marquées par endroits (jusqu'à +8°C en Roumanie).

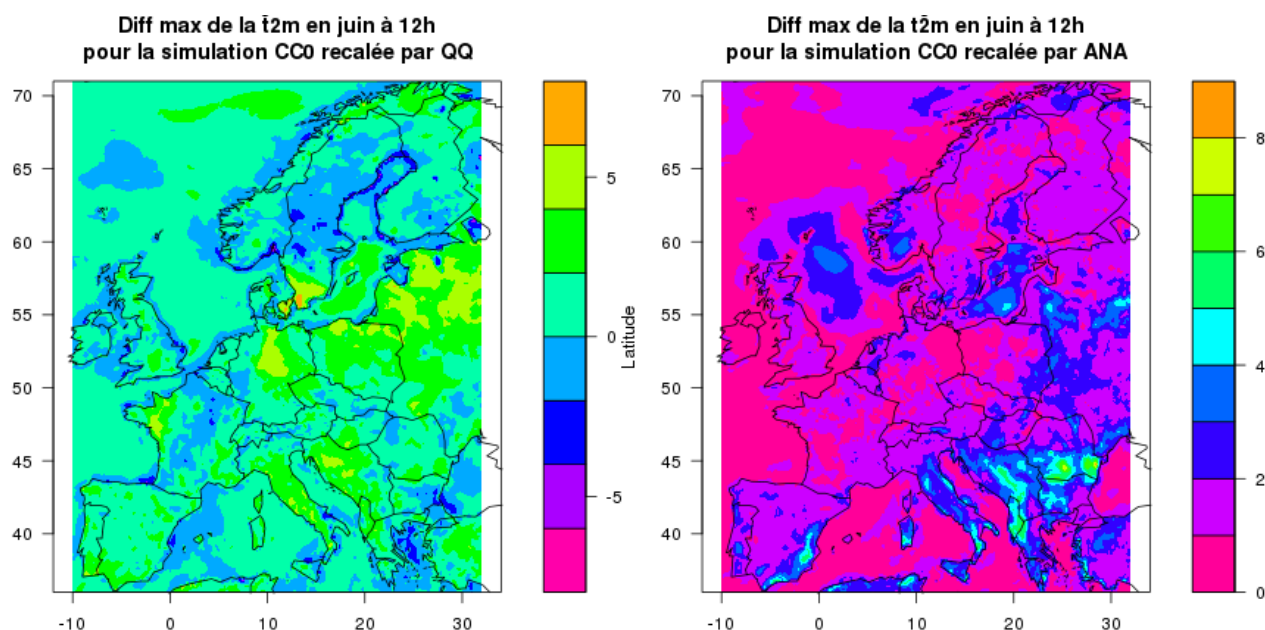
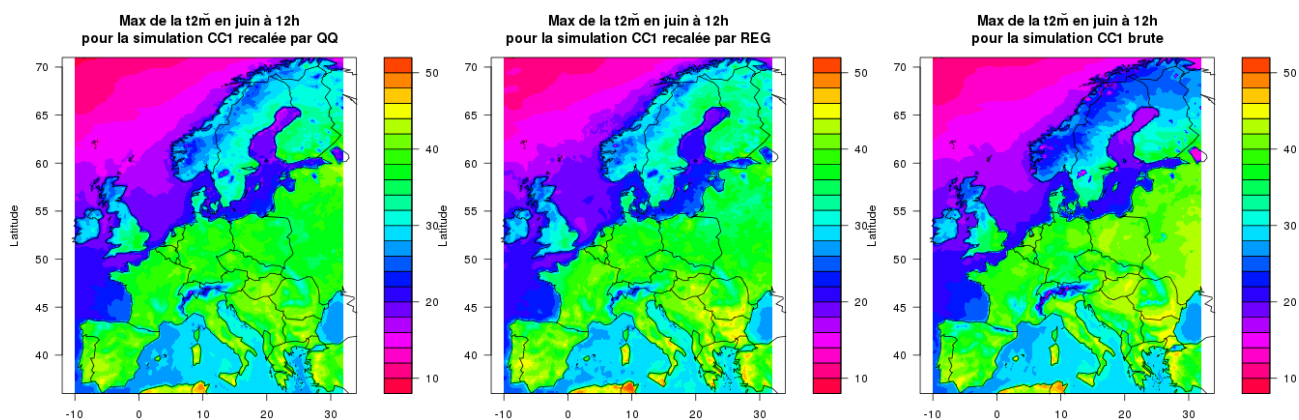


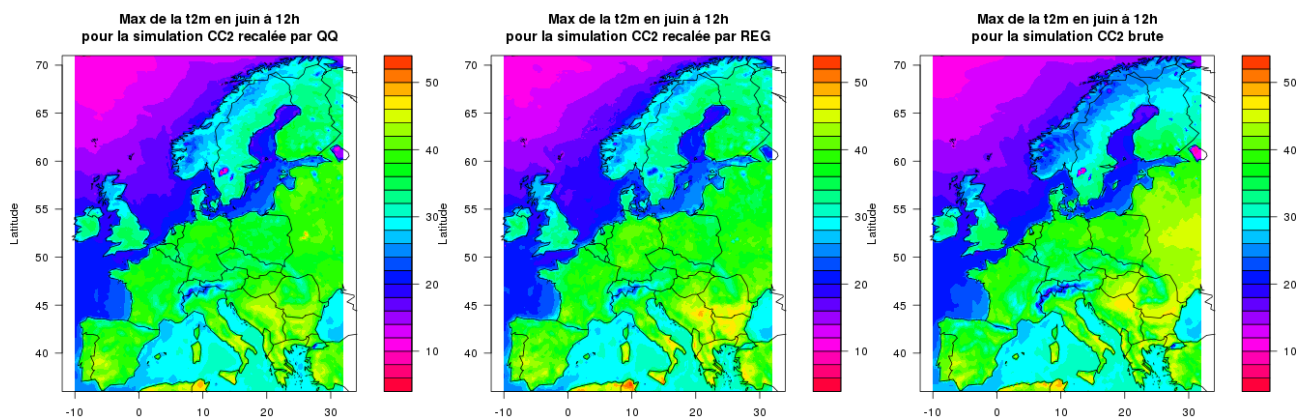
Figure 41 : Différences entre les records de température maximale à climat actuel et les records de la référence, suivant la méthode de recalage employée

Pour les scénarios à climat 2050, les records sont cohérents entre eux, un peu plus prononcés sur le sud de l'Europe avec la nouvelle méthode de recalage. Les figures ci-après montrent pour

CC1 à climat 2050 RCP4.5 puis pour CC2 à climat 2050 RCP8.5 les cartes suivantes : à gauche les records de maximum de température pour la simulation recalée par quantile-quantile, au centre, les records pour la simulation recalée avec la nouvelle méthode, à droite la simulation sans recalage.



*Figure 42: Records de maximum de température à 2 m en juin à 12h UTC, pour la simulation CC1 à climat 2050 RCP4.5, recalée par quantile-quantile, recalée par la nouvelle méthode, et non recalée*



*Figure 43 : Records de maximum de température à 2 m en juin à 12h UTC, pour la simulation CC2 à climat 2050 RCP8.5, recalée par quantile-quantile, recalée par la nouvelle méthode, et non recalée*

## 6 Conclusion

La nouvelle méthode de recalage est présentée. Elle s'appuie sur une estimation des températures extrêmes sur 200 ans prenant en compte l'auto-corrélation des températures à 2 m. Cette démarche présente l'avantage d'une prise en compte de la réalité physique du comportement des extrêmes alors que les extrapolations complétant la méthode quantile-quantile au-delà des derniers centiles sont un calcul purement mathématique qui n'a pas recours aux lois statistiques propres aux extrêmes.

Les résultats de cette nouvelle méthode sont examinés : médiane et extrêmes sur quelques points de grille, cycles quotidiens moyens sur un indice France, moyennes, écarts-types et extrêmes par mois sur l'Europe. Les résultats répondent bien à l'objectif avec une très bonne correspondance des moyennes et des écarts-types de la simulation recalée CC0 à climat 2000

avec ceux de la référence climatologique. De plus, les points présentant des valeurs défectueuses bénéficient maintenant de séries correctes.

Le travail effectué sur les extrêmes pour la nouvelle méthode de recalage a pour but de s'approcher au mieux du comportement des températures à 2 m même dans les cas les plus rares, avec des contrôles réguliers par rapport aux événements récents et passés, par exemple la bonne cohérence remarquée avec les records de températures minimales chaudes apparus en arctique lors de l'hiver 2017-2018. Les extrêmes à climat « actuel » 2000 ne sont plus bornés par les extrêmes de la référence climatologique comme imposé pour la précédente simulation (scénario 2012). On atteint donc des records dépassant ce qui est connu dans la référence et donc sans élément observé pour étayer la validation. Cependant, la connaissance des vagues de froid et de chaleur se produisant régulièrement en Europe, et l'examen des différentes possibilités offertes par les membres de la prévision d'ensemble utilisés en prévision opérationnelle permettent de confirmer que les valeurs record atteintes non seulement ne sont pas extravagantes, mais entrent dans le champ du possible.

La comparaison avec la méthode quantile-quantile montre une bonne correspondance, avec toutefois des records de valeurs extrêmes parfois bien différents. Pour les records de maximum, les deux méthodes donnent des résultats proches. Pour les records de minimum, le recalage quantile-quantile est proche de la nouvelle méthode pour le climat actuel, mais pour le climat futur, les records de température minimale de la méthode quantile-quantile restent souvent un peu plus chauds que ceux atteints par la nouvelle méthode.

**La nouvelle méthode, plus fine que la méthode quantile-quantile, donne des résultats très satisfaisants en particulier dans la comparaison du scénario CC0 à climat 2000 avec la référence climatologique. Le réalisme des simulations à climat actuel et surtout à climat futur n'est jamais totalement assuré, mais le recalage permet de s'en approcher et les travaux effectués pour la nouvelle méthode, en particulier pour les valeurs extrêmes a eu à chaque étape le réalisme comme objectif.**

## 7 Recommandations

### 7.1 Signification des séries simulées

**Les séries simulées ne sont pas des prévisions.** Elles sont une suite chronologique de réalisations potentielles de conditions météorologiques à climat constant actuel, décrites par un ensemble de paramètres. **Les dates sont fictives**, les paramètres astronomiques utilisés par le modèle ARPEGE Climat correspondent seuls aux dates indiquées.

Il n'est donc pas pertinent de comparer les données simulées à des observations qui auraient pu être effectuées à la même date.

### 7.2 Résolution horizontale

La résolution des données du modèle ARPEGE Climat est ici d'environ 20 km sur l'Europe. C'est une résolution cohérente avec les données climatologiques extraites de la ré-analyse HIRLAM à

0,2° de résolution. L'objectif de la production de séries sur des points de grille est de restituer la climatologie locale (dans un rayon de 20 km environ) et son évolution potentielle, et non pas de représenter la climatologie ponctuelle dans toute sa finesse (hors d'atteinte de ce type de modélisation).

**FIN DE DOCUMENT**

---