Biais froid sur le Plateau Tibétain et projection climatiques

**François-Luc Cimelière – Melvil Roucou – Simon Vauclare**

**M1 Sciences de la Terre et des Planètes – parcours ACSC Année universitaire 2021/2022**

**Variabilité climatique et environnementale – Projet tutoré encadré par Mickael Lalande**

01/12/2021

Table des matières

[1. Introduction 4](#_Toc89543906)

[2. Modèles de climat et données utilisées 5](#_Toc89543907)

[2.1. Qu’est-ce qu’un modèle de climat ? 5](#_Toc89543908)

[2.2. Qu’est-ce que les expériences CMIP ? 6](#_Toc89543909)

[2.3. Quels sont les scénarios pour CMIP6 ? 6](#_Toc89543910)

[2.4. Le modèle IPSL-CM6A-LR 7](#_Toc89543911)

[2.4.1. Résolution du modèle 8](#_Toc89543912)

[2.4.2. Choix du member\_id 8](#_Toc89543913)

[3. Mise en évidence et analyse du biais de température sur les HMA 8](#_Toc89543914)

[3.1. Mise en évidence – Comparaison « modèle / observations » 8](#_Toc89543915)

[3.2. Saisonnalité et évolution du biais avec l’altitude 11](#_Toc89543916)

[3.3. Lien entre biais de température et biais de couverture de neige 14](#_Toc89543917)

[3.4. Lien entre biais de température et résolution du modèle 16](#_Toc89543918)

[4. Projections climatiques sur les HMA pour le 21ième siècle 17](#_Toc89543919)

[4.1. Méthodologie 17](#_Toc89543920)

[4.2. Résultats 18](#_Toc89543921)

[4.3. Discussion 19](#_Toc89543922)

[Conclusion 20](#_Toc89543923)

[Références 21](#_Toc89543924)

# Introduction

La région des Hautes Montagnes d’Asie (HMA) inclus le Plateau Tibétain qui est l’un des plus hauts plateaux du monde avec une altitude moyenne de 4000m (Figure 1). De fait il a une influence considérable sur le climat régional et de manière plus globale (Orsolini et al. 2019). Les glaciers des montagnes de l’Himalaya abritent également les plus grands réservoirs d’eau douce de la planète en dehors des régions polaires. La fonte des neiges et des glaciers de cette région contribue grandement à l’approvisionnement annuel en eau de plusieurs centaines de millions de personnes dans la région (Sharma et al. 2019).

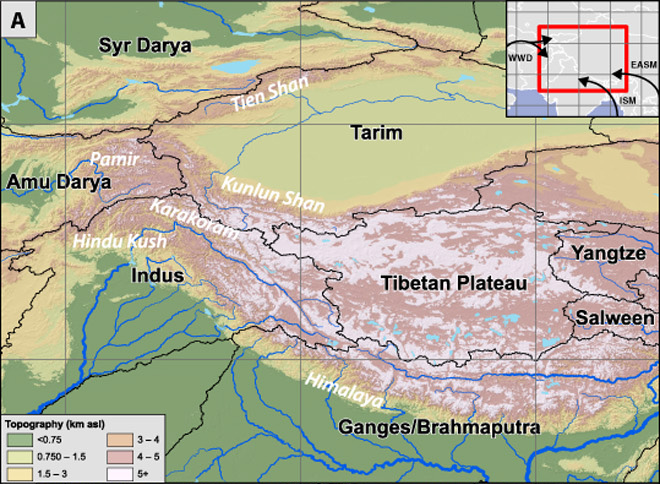


Figure 1: Carte topographique des HMA avec les limites (en noir) des bassins versants les plus importants ainsi que les noms massifs montagneux principaux (en blanc). La carte en insert montre les frontières politiques et les influences météorologiques : WWD (Winter Westerly Disturbances), ISM (Indian Summer Monsoon), EASM (East Asian Summer Monsoon). Adapté de (Smith, Bookhagen 2018)

De ce fait, il est crucial de bien représenter la région des HMA dans les modèles climatiques globaux. Cependant, du fait de sa topographie complexe et du manque d’observations (surtout en haute altitude), les modèles climatiques globaux ont des biais assez importants dans cette région du monde.

Dans cette étude, après une brève introduction sur les principes d’un modèle de climat, les expérience CMIP et leurs différents scénarios, nous mettons en évidence le biais de température sur le Plateau Tibétain. A partir d’informations sur l’évolution de ce biais de température au cours de l’année et en fonction de l’altitude, nous tentons de proposer quelques hypothèses sur l’origine de cet écart entre modèle et observation. Dans un deuxième temps, nous regardons les tendances du modèle pour cette région du monde au cours du 21ième siècle en fonction des différents scénarios. En particulier, nous cherchons à évaluer si les tendances proposées par le modèle pour les HMA sont conformes à celles proposées globalement et cela malgré l’existence du biais de température.

# Modèles de climat et données utilisées

## Qu’est-ce qu’un modèle de climat ?

Un modèle de climat est une modélisation mathématique du climat basée sur les lois fondamentales de la physique, de la thermodynamique, du mouvement des fluides et de la chimie. (*Modèle climatique* 2021).

Un modèle peut être global (représentation de l’ensemble du climat terrestre) ou bien régional (modélisation ciblée sur une région donnée du globe avec des conditions aux limites). Dans les deux cas, un maillage de la zone d’étude est réalisé dans les trois dimensions de l’espace (Figure 2). Chaque maille est considérée comme une zone homogène. « Exécuter » le modèle revient alors à regarder comment évoluent les grandeurs climatiques d’intérêts (température, humidité, vent, etc…) au fur et à mesure de la simulation des interactions entre les différentes mailles. La taille des mailles est un critère important, plus elle est petite, plus la modélisation sera précise mais plus elle sera couteuse à exécuter du fait de l’explosion combinatoire des interactions entre mailles.



Figure 2: Schematic for Global Atmospheric Model.(Cintra, de Campos Velho, Cocke 2016)

## Qu’est-ce que les expériences CMIP ?

L’objectif des expériences CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) est de mieux comprendre les changements climatiques passés, présents et futurs découlant de la variabilité naturelle du climat ou en réponse aux changements du forçage radiatif (*CMIP* 2021). Cette compréhension comprend l’évaluation du rendement du modèle au cours de la période historique et la quantification des causes de l’écart dans les projections futures. L’un des objectifs importants du PIMC est de rendre les résultats multi modèles accessibles au public dans un format normalisé.

Depuis 1995, le CMIP coordonne des expériences de modèles climatiques impliquant plusieurs équipes de modélisation dans le monde entier.

Le projet CMIP6 correspond à la 6ième phase des expériences CMIP. La conception des expériences du CMIP6 est axée autour de trois grandes questions :

* Comment le système Terre réagit-il au forçage ?
* Quelles sont les origines et les conséquences des biais systématiques des modèles ?
* Comment est-il possible d’évaluer les changements climatiques futurs compte tenu de la variabilité du climat mais aussi des incertitudes sur la prévisibilité des scénarios ?

## Quels sont les scénarios pour CMIP6 ?

Différents scénarios sont envisagés dans les expériences CMIP6 afin d’évaluer les différences réponses possibles du climat à différents niveaux de forçage anthropique d’ici la fin du 21ième siècle (O’Neill et al. 2016). Ces scénarios sont nommés SSP (*Shared Socioeconomic Pathways* 2021), les valeurs associées à chaque scénario correspondent à des valeurs de forçages radiatifs (bilan d’énergie montante/descendante exprimé en W/m²) en lien notamment avec la concentration de gaz à effet de serre.

Les différents scénarios sont regroupés en deux catégories (tier1, tier2) voici les quatre scénarios du tier1 (tier2 non évoqué ici) :

* SSP1-2.6 : “Sustainability (Taking the Green Road)”
  + Ce scénario représente l’extrémité inférieure de la gamme des voies de forçage futures. On s’attend à ce qu’il produise une moyenne multi-modèles nettement inférieure au réchauffement de 2°C d’ici 2100 et donc qu’il soutienne des analyses de cet objectif politique.
* SSP2-4.5 : « Middle of the road »
  + Ce scénario représente la partie moyenne des voies de forçage futures. Scénario qui sera souvent utilisé comme expérience de « référence ».
* SSP3-7.0 : “Regional rivalry (A Rocky Road)”
  + Ce scénario représente la partie « moyenne à élevée » de la gamme des voies de forçage futures. Ce scénario est particulièrement intéressant parce qu’il représente un niveau de forçage comparable à celui du SSP2 mais pour lequel les impacts ne sont pas ou peu atténués.
* SSP5-8.5 : “Fossil-Fueled Development (Taking the Highway)”
  + Ce scénario représente l’extrémité supérieure de la gamme des voies de forçage futures. Ce scenario correspond à un forçage radiatif maximal qui pourrait être atteint par un fort développement économique au cours du 21ième siècle dont le moteur serait toujours les énergies fossiles.

Le graphique de la Figure 3 représente l’évolution de la température moyenne prédite par les modèles de climat en fonction des différents scénarios SSP. Les écarts de température entre scenarios croissent au cours du 21ième siècle. On remarque également que, pour chaque scénario, l’incertitude sur la prévision augmente au fur et à mesure que l’on s’éloigne dans le temps.

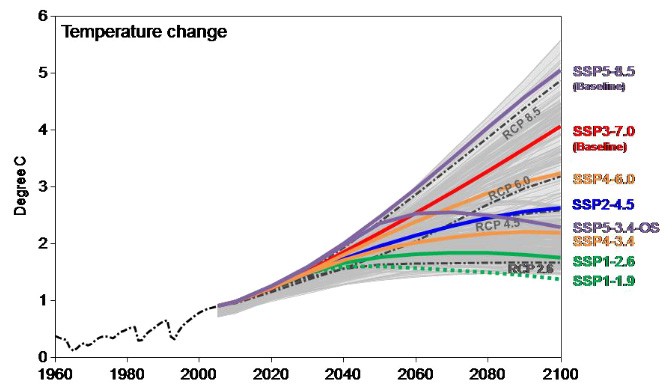


Figure 3: Evolution de la température moyenne globale en fonction des différents scénarios SSP (O’Neill et al. 2016)

## Le modèle IPSL-CM6A-LR

Le modèle que nous avons utilisé dans notre étude est le modèles « IPSL-CM6A-LR » :

* IPSL ⬄ Institut Pierre Simon Laplace
* CM6A ⬄ modèle atmosphérique LMDZ version 6A-LR
* LR ⬄ « Low Resolution »

### Résolution du modèle

Ce modèle global, développé notamment en vue des expériences du CMIP6 possède un maillage de 144 points en longitude (résolution 2,5°), de 142 points en latitude (résolution 1,3°) et 79 points en altitude sur 80km.

Aux latitudes considérées dans notre études (de 0° à 60°) la maille au niveau du sol à une taille moyenne de 240km (longitude) x 140km (latitude).

### Choix du member\_id

Le modèle fournit des résultats pour différents scénarios et différents « member\_id ». Les scénarios correspondent aux différents scénarios SSP évoqués ci-dessus auquel s’ajoute le scenarios « historical » pour les périodes passées.

Les « member\_id » correspondent à différentes manières de paramétrer le modèle. Quatre paramètres sont positionnables donnant au total 32 combinaisons différentes. Les quatre paramètres sont (*CMIP6\_global\_attributes\_filenames\_CVs* 2018):

* « r » ⬄ réalisation
* « i » ⬄ initialisation
* « p » ⬄ physique
* « f » ⬄ forçage

Dans notre étude, nous avons utilisé dans un premier temps le member\_id = r1i1p1f1 correspondant à la première valeur possible pour chaque paramètre. Le fait de récupérer tous les member\_id disponibles, permet de vérifier que les biais observés sont réellement dus au modèle et non à la variabilité interne du climat.

# Mise en évidence et analyse du biais de température sur les HMA

## Mise en évidence – Comparaison « modèle / observations »

Afin de nous assurer que nous ne nous intéressons pas à un biais de modélisation qui serait global mais qui est bien local, nous avons représenté ce biais sur tout l’hémisphère nord. Ce biais est issu des données de modélisation de la température du membre r1i1p1f1 sur la période 1950-2014. La cartographie du biais sur l’hémisphère nord est visible sur la Figure 4.

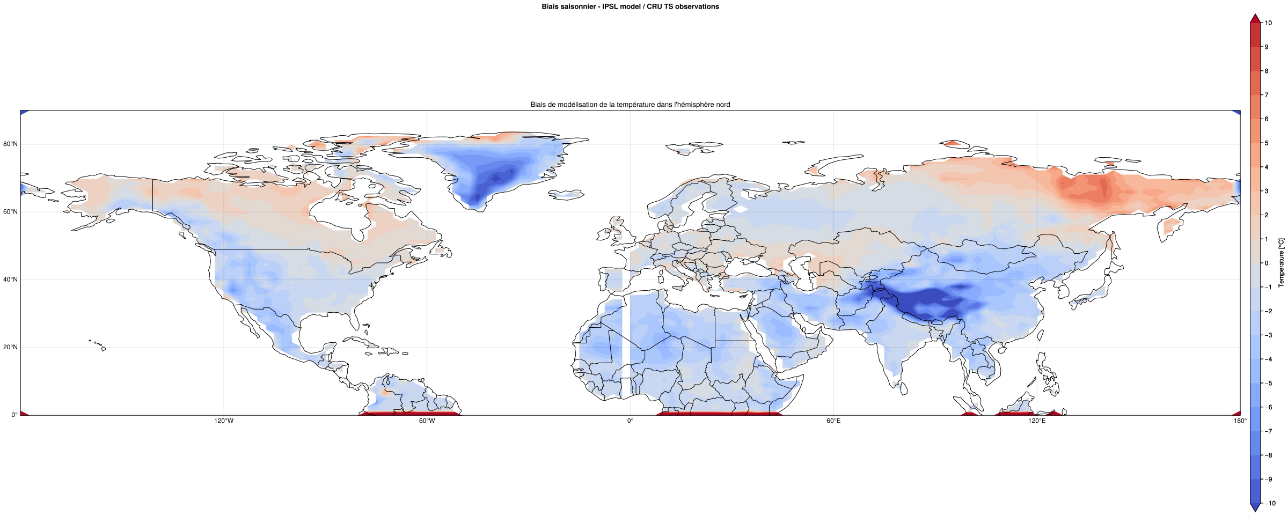


Figure 4: Cartographie du biais de modélisation de la température de surface sur l’hémisphère nord. Membre r1i1p1f1, période 1950-2014.

Deux régions laissent apparaître un fort biais froid (le modèle sous-estime la température), le Groenland et la région des HMA. On remarque également un biais froid plus marqué que sur le reste de l’hémisphère nord sur la région des Rocheuses. Des biais chauds (le modèle surestime la température) sont visibles en Sibérie et au nord du Canada. Nous émettons l’hypothèse que les biais froids sont renforcés par les régions en altitude et enneigées. Nous tenterons plus tard dans notre analyse d’établir une corrélation entre ces variables.

Observons désormais les différences entre le modèle, dans le membre « r1i1p1f1 », et les observations. Nous utilisons les données d’observation fournies par CRU TS (Climatic Research Unit gridded Time Series) version 4.4 (Harris et al. 2020).

Les observations, les valeurs prévues par le modèle ainsi que leur différence sont représentées dans la Figure 5. On observe que globalement, le biais (modèle – observations) est faible. Si on ne regarde pas les altitudes élevées, il est très proche de 0. Cependant, quand on se centre sur les Hautes Montagnes d’Asie, on trouve un biais allant jusqu’à -18°C dans le cas le plus extrême.

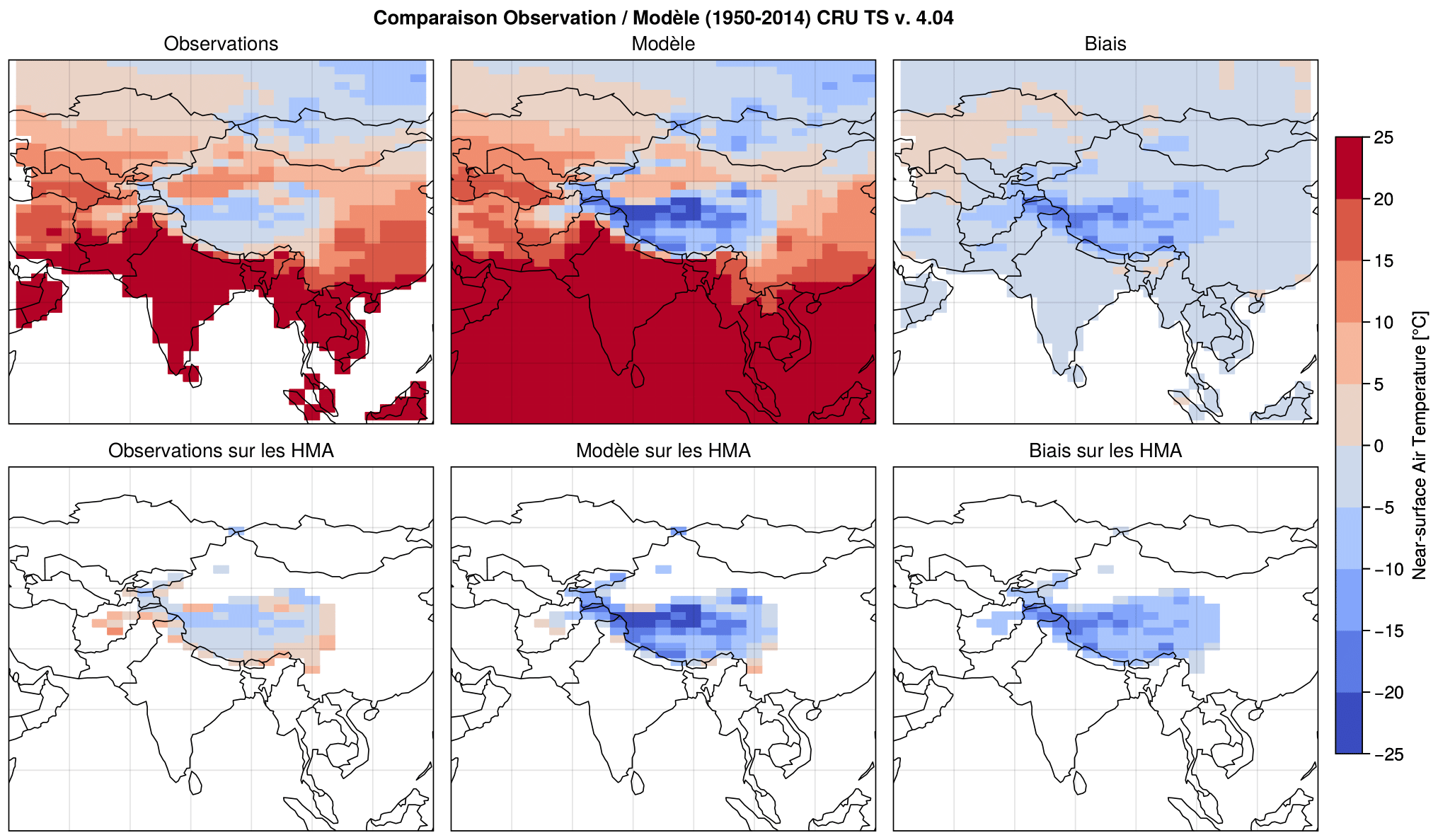


Figure 5: Comparaisons entre les données du modèles dans le membre « r1i1p1f1 » et celles des observations, à grande échelle puis centrée sur les Hautes Montagnes d’Asie, soit sur les altitudes supérieures à 2500 mètres.

Cette observation est très claire, cependant, nous devons vérifier que ce que nous observons s’applique aux 32 membres. Les graphiques de la Figure 6 représentent le biais de température entre modèle et observations pour chacun des 32 membres du modèle IPSL-CM6A-LR. Au premier abord on voit que les valeurs de biais restent dans les mêmes ordres de grandeurs pour tous les membres. Ainsi le biais ne semble pas lié à un membre en particulier, mais est constamment présent. Nous pouvons donc continuer nos analyses.

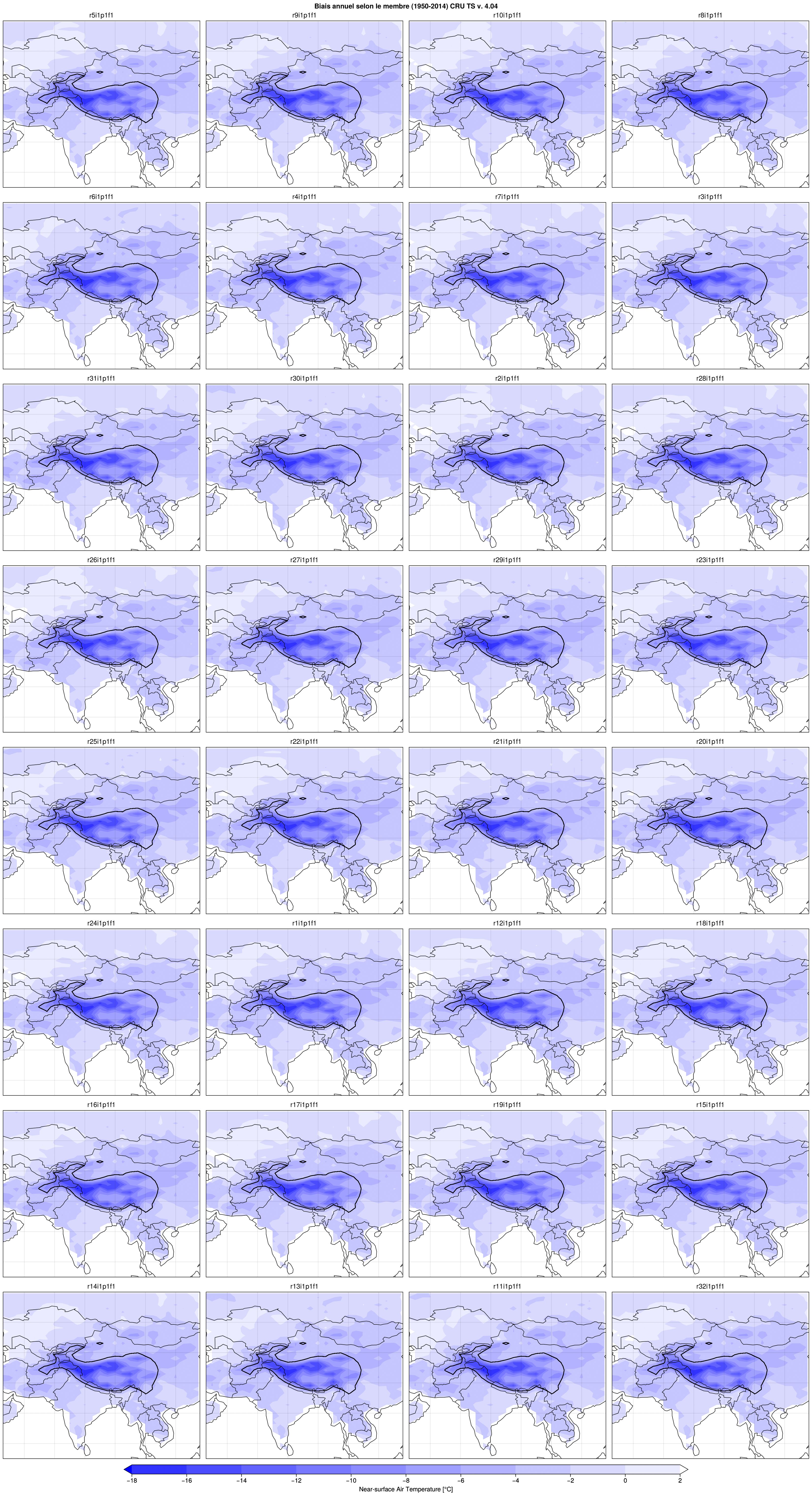


Figure 6: Affichage du biais au sein des 32 membres

## Saisonnalité et évolution du biais avec l’altitude

Nous allons regarder à présent si le biais suit un cycle saisonnier. Pour cela, nous avons moyenné sur chacune des quatre saisons la température de surface des 65 années où nous avons des données de biais (1950-2014). Les quatre graphiques spatiaux de la Figure 7 représente le biais de température pour les altitudes supérieures à 2500m pour chacune des saisons. Nous remarquons que le biais froid est bien plus fort à l’ouest des HMA et ce quelle que soit la saison. Toutefois, la différence est/ouest est particulièrement marquée au printemps avec des valeurs de biais de l’ordre de -6 à -3°C à l’est alors qu’il est de l’ordre de -12°C à l’ouest ! Le biais froid moyen sur toute la zone des HMA est difficile à évaluer sur ces graphiques.

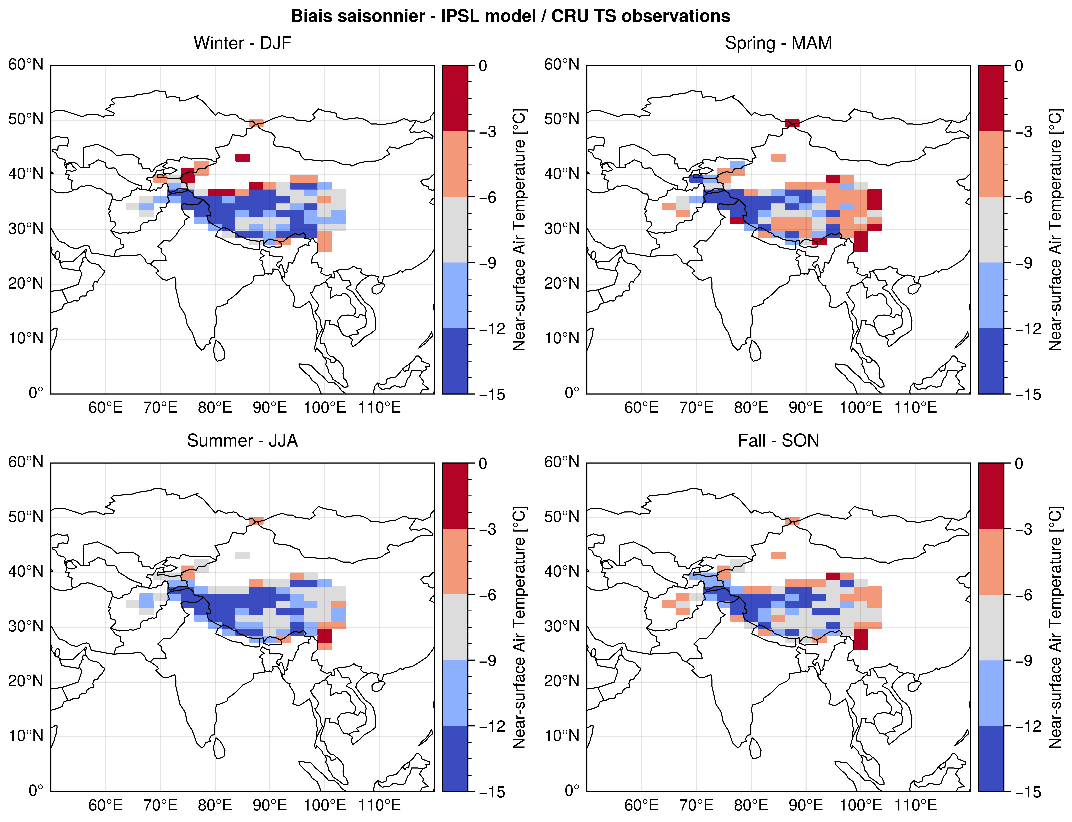


Figure 7: Cartographie saisonnière du biais de modélisation de la température de surface. Membre r1i1p1f1, altitude supérieure à 2500m

Afin d’avoir une meilleure idée de l’influence de la saison sur le biais de température, nous avons voulu représenter la différence des biais de température entre l’été et l’hiver. Le graphique de la Figure 8 représente cette différence. Là encore on note un contraste assez marqué entre l’est et l’ouest. Dans la partie orientale des HMA, la différence entre les biais est positive ce qui indique un biais plus fort en hiver. Dans la partie ouest (et également au nord de la zone) la tendance est moins nette avec un mélange de mailles « positives » et « négatives ».

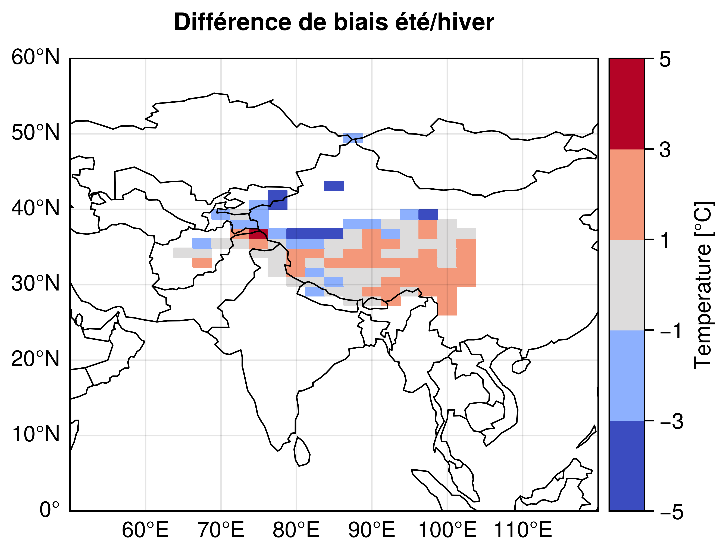


Figure 8: Cartographie de la différence de biais entre l'été et l'hiver. Membre r1i1p1f1, altitude supérieure à 2500m

Pour compléter cette analyse qualitative de la cartographie du biais, nous avons tracé le biais moyen sur 65 ans et sur des zones définies par différentes gammes d’altitudes.

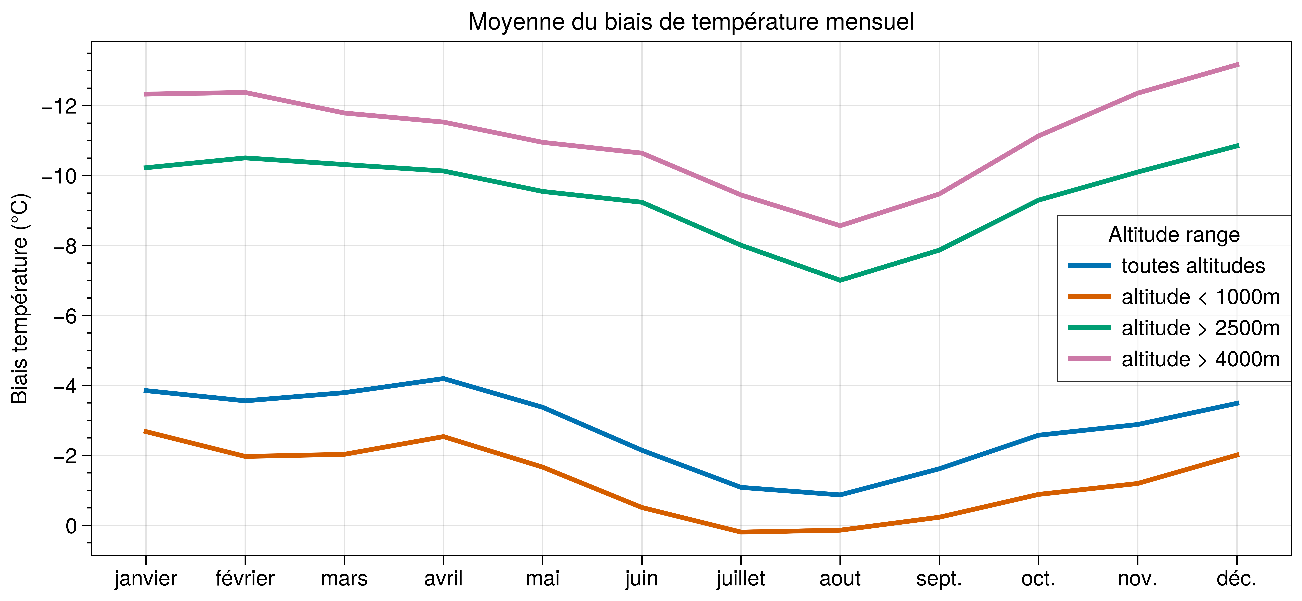


Figure 9:Evolution saisonnière du biais de température pour différentes plages d'altitudes

L’analyse des courbes de la Figure 9 montre clairement que le biais de température est plus fort en hiver qu’en été et cela pour toutes les gammes d’altitudes. On remarque aussi de manière évidente que le biais est en moyenne beaucoup plus fort sur les zones d’altitude élevée (et donc au niveau des HMA) que sur les zones de basses altitudes. La variation saisonnière est d’ailleurs plus marquée en haute altitude (~4°C) qu’à basse altitude (~2°C).

On l’a vu, la plage d’altitude a une influence importante sur le biais de température. Nous avons voulu voir si l’altitude d’un point de grille est corrélée au biais de température.

Chaque point du graphique de la Figure 10 représente un couple {« altitude »;« biais de température »} pour une maille du modèle (altitude > 2500m) moyennées sur notre période d’étude passée.

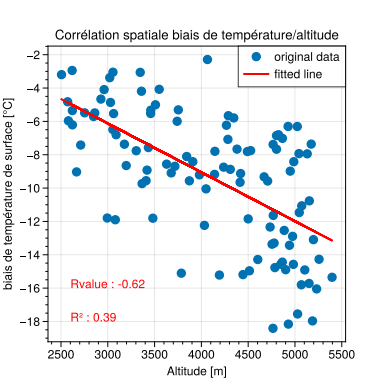


Figure 10: Corrélation spatiale de l’altitude et du biais de température. Membre r1i1p1f1 ; Altitude supérieure à 2500m ; Période 1950-2014

La droite de tendance ajustée permet de déterminer 39 % des biais de température à partir de l’altitude. Ce qui est marquant sur ce graphique est la présence d’un « seuil » à une altitude de 4500m où les biais sont plus dispersés autour de la droite de tendance. C’est à partir de cette altitude qu’on trouve les versants de montagnes qui bordent le plateau tibétain. Ces versants récoltent beaucoup plus de neige que le plateau lui-même mais la faible résolution du modèle ne permet pas de faire la distinction entre le plateau et les versants plus raides. C’est une des hypothèses que nous émettons quant à l’existence du biais de température sur cette région du monde. Dans la partie suivante, nous étudierons la corrélation entre biais de couverture de neige et biais de température.

## Lien entre biais de température et biais de couverture de neige

L’existence d’un biais de modélisation fort sur la région des HMA nous amène à étudier les raisons potentielles de ce biais. Cette région abrite parmi les plus hautes montagnes du monde et le plateau du Tibet est situé à environ 4500m d’altitude, elle a la plus forte étendue de neige au monde après les régions polaires (Ackroyd et al. 2021). L’observation des biais de modélisation sur l’hémisphère nord (Figure 4) réalisée précédemment nous a montré que les biais froids ou chauds étaient localisés sur des zones enneigées (HMA, Groenland, Rocheuses...) ou de hautes altitudes. Nous avons donc décidé de regarder si une corrélation spatiale existe entre le biais de modélisation de la couverture de neige et le biais de modélisation de la température de surface.

Pour cela, nous comparons les données d’observation aux données fournies par le modèle IPSL-CM6A-LR pour la variable « snow-cover ». Cette variable, pour les observations est issue de données satellite et s’exprime en pourcentage d’une surface donnée recouverte par la neige (sans notion d’épaisseur). Dans notre cas, les surfaces considérées correspondent aux mailles de notre modèle. Une valeur de 100% correspond donc à une maille totalement recouverte de neige. Le modèle nous fournit également une valeur de couverture de neige et de même que pour la température, nous calculons un biais de couverture de neige comme étant la différence entre les valeurs du modèle et les valeurs « observées ».

Chaque point du graphique de la Figure 11 représente un couple {« biais de couverture de neige »;« biais de température »} pour une maille du modèle (altitude > 2500m) moyennées sur notre période d’étude passée. Les valeurs positives du biais de neige correspondent ici à une surestimation de la couverture de neige par le modèle par rapport aux observations. On remarque que les forts biais positifs de couverture de neige (le modèle surestime la neige) correspondent le plus souvent à de forts biais négatifs pour la température (le modèle sous-estime la température).

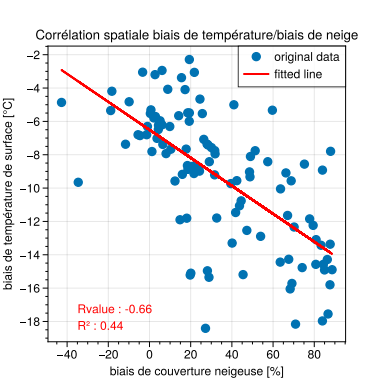


Figure 11: Corrélation spatiale du biais de couverture neigeuse et du biais de température. Membre r1i1p1f1. Altitude supérieure à 2500m. Période 1950-2014

Finalement, la relation entre les deux biais semble assez logique, il fait « plus chaud » que ce que le modèle annonce et il y a « moins de neige » que ce que prévoit le modèle. Mais est-ce aussi simple ? Ici, la droite de tendance ajustée sur le nuage de points est capable de déterminer 44 % des valeurs de biais de température à partir des valeurs de biais de couverture neigeuse. Cela montre qu’il y a une corrélation entre le biais de neige et de température mais que le biais de neige seul ne peut expliquer le biais de température et inversement.

On remarque que lorsque le biais de neige est nul, le biais de température vaut en moyenne -6°C, lorsqu’il n’y a pas de biais sur la neige, il y a toujours un biais sur la température. De plus même si la corrélation était totale (r² = 1) nous serions incapables de dire si c’est le biais de neige qui cause le biais de température ou l’inverse. En effet, nous pourrions avancer l’hypothèse que le Plateau Tibétain est relativement abrité des perturbations de la mousson indienne estivale et que de ce fait il reçoit moins de neige (en supposant que le modèle ne sache pas tenir compte de ces particularité topographiques) ce qui induit des températures plus élevées. Mais si l’on imagine que le biais de température est lié à une autre cause (qui resterait à déterminer) alors le biais de neige pourrait simplement résulter de températures plus élevées dans la réalité que dans le modèle.

## Lien entre biais de température et résolution du modèle

Dans une région avec un relief très irrégulier comme celle des HMA, nous avons pensé que le fort biais froid pouvait être en partie expliqué par la basse résolution du modèle (2,5°x 1,3°) qui « lisse » le relief et s’affranchit donc des différence d’accumulation de neige, des phénomènes aérologiques, des orientations des versants...etc.

L’IPSL met à disposition les données de sortie d’un « run » de son modèle haute résolution (0,7°x 0,5°). Nous avons comparé le biais moyen spatial de température sur les 32 membre du modèle basse résolution et le biais moyen spatial de température sur le membre unique du modèle haute résolution. Les résultats sont présentés pour la période 1950-2014 sur la Figure 12.

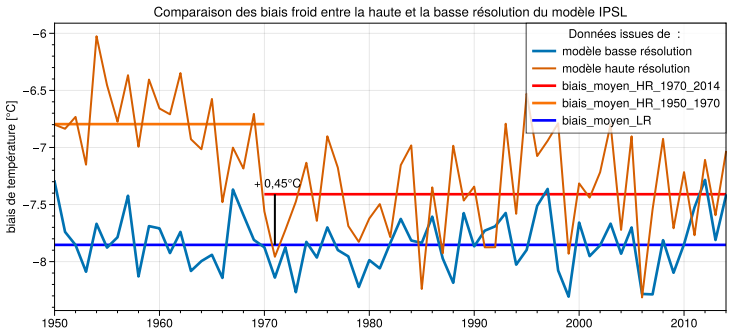


Figure 12: Comparaison du biais de température de surface obtenu par le modèle haute résolution (HR) (1 membre) et le modèle basse résolution (LR) (32 membres).

Sur l’ensemble de la période observée, le biais du modèle HR est en moyenne plus faible que celui du modèle LR. On observe deux tendances distinctes sur le modèle HR, une première sur la période 1950-1970 où le biais moyen est de -6,8°C et une deuxième sur la période 1971-2014 où le biais moyen est de -7,4°C. Cela peut s’expliquer par la différence de méthodologie pour obtenir les deux courbes. La courbe HR est issue d’un seul membre alors que la courbe LR est la moyenne de 32 membres. Le saut est sans doute attribuable à la variabilité du modèle (std = 0,49°C) qui est lissée lorsqu’on moyenne les 32 membres (std = 0,24°C) et qui est visible sur un seul.

En comparant les moyennes de biais sur les périodes où la tendance est similaire on observe un écart de 0,45°C soit un écart relatif de 6 %. Le modèle HR possède un nombre de points de grille environ 8 fois supérieur au modèle LR, la correction du biais apportée par l’augmentation de la résolution est donc presque négligeable.

# Projections climatiques sur les HMA pour le 21ième siècle

## Méthodologie

On s’intéresse dans cette partie à la variable de température proche de la surface « tas » fournie par le modèle IPSL-CM6A-LR. On récupère les valeurs fournies par le modèle pour la période passée (experiment\_id « historical » pour la période 1950 – 2014) ainsi que les valeurs pour la période à venir (2014 – 2100) pour les quatre scénarios suivants (tous les member\_id disponibles sont utilisés) :

* SSP1 2.6
* SSP2 4.5
* SSP3 7.0
* SSP 8.5

Notre zone d’étude, est le secteur du globe compris entre 50 et 120° de longitude et 0 et 60° de latitude. Les HMA sont totalement inclues dans cette zone.

On cherche ensuite à comparer les tendances pour deux niveaux d’altitude :

* Les zones où l’altitude est inférieure à 1000m
  + On considère que dans cette zone, le biais de température est faible ou inexistant
* Les zones où l’altitude est supérieure à 2500m
  + Dans cette zone, qui est une approximation de la région des HMA, le biais de température est fort.

Afin de faciliter la comparaison, on affiche non pas une valeur absolue de la température mais un écart à une valeur de référence. On utilise ainsi deux valeurs de référence différentes. Pour chaque zone d’altitude (< 1000m ou > 2500m), la valeur de référence correspond à la valeur moyenne de température proposée par le modèle pour la période passée.

Pour chaque scenario, la valeur affichée est la valeur moyenne annuelle. La valeur moyenne est obtenue par une moyenne géographique (pondérée par la surface des mailles du modèle) et une moyenne sur tous les « member\_id » disponibles. Autour de chaque valeur un intervalle de confiance est défini par les quantiles à 5% et à 95% des différentes valeurs des « member\_id »

## Résultats

Les deux graphiques obtenus sont présentés sur la Figure 13. Ils présentent tous les deux des tendances similaires sur certains points et notamment :

* Tendance de la température moyenne à la hausse sur la période passée (écart environ 1°C par rapport à la moyenne)
* A partir de la deuxième moitié du 21ième siècle, les quatre scénarios sont bien distincts, l’augmentation de température est d’autant plus forte que le forçage radiatif est élevé.
* Seul le scénario SSP1 2.6 présente un pic de température aux alentours de 2060 avec une légère diminution ensuite.
* Pour tous les autres scénarios, on n’observe pas de baisse de la température moyenne au cours du 21ième siècle (au mieux une stabilisation pour le scénario SSP2 4.5)

Des différences notables sont toutefois perceptibles entre les deux zones d’altitudes :

* L’intervalle de confiance est moins étendu pour tous les scénarios sur la zone de faible altitude.
* La valeur de l’écart à la moyenne est plus élevée dans la zone d’altitude élevée que dans la zone de basse altitude (+10° vs +7° pour le scenario SSP5 8.5 par exemple)

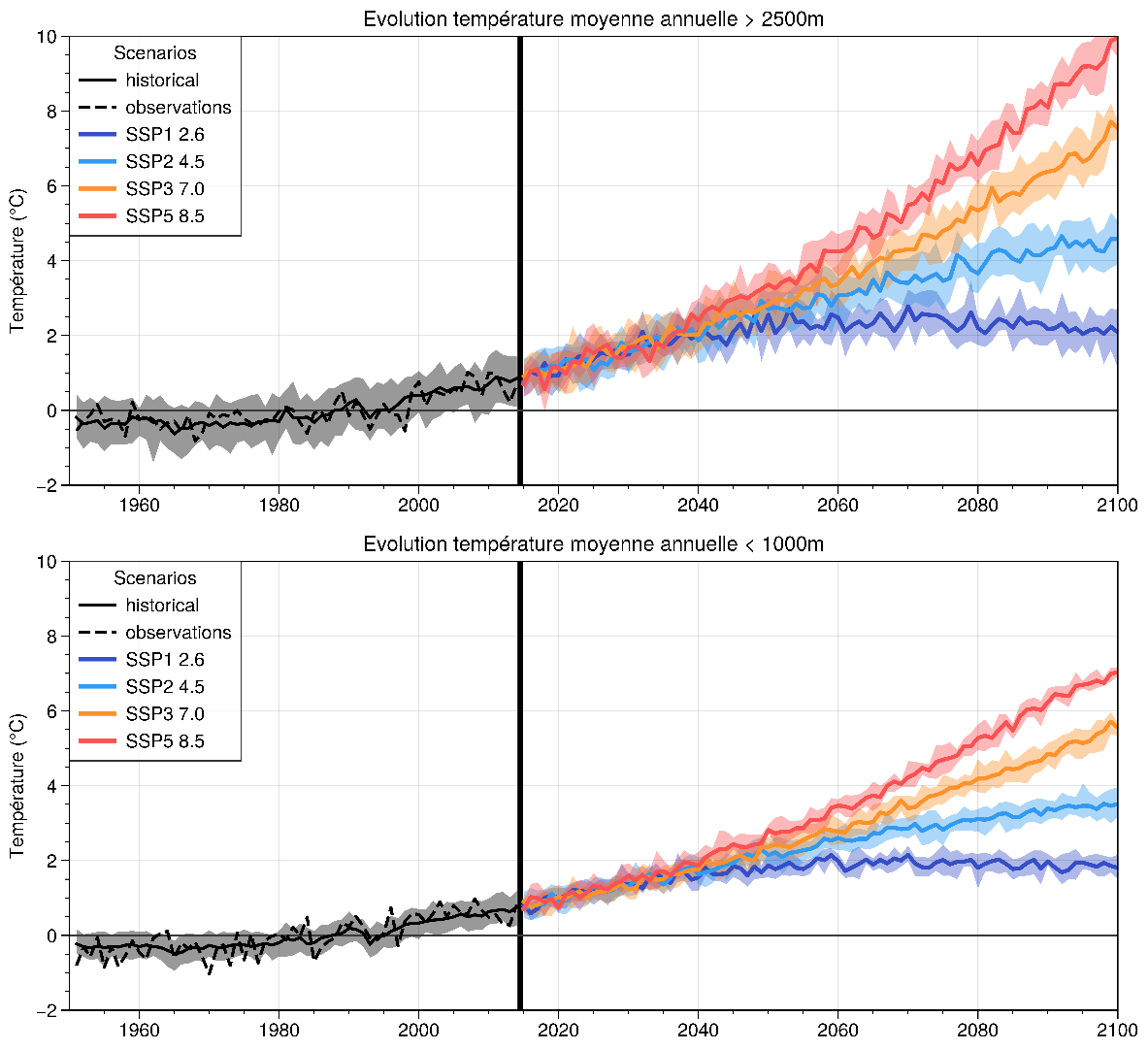


Figure 13: Evolution de l’écart entre la température moyenne annuelle et une température de référence pour deux niveaux d’altitudes et pour différents scénarios de forçage radiatif au cour du 21ième siècle.

## Discussion

L’allure dans l’ensemble comparable des graphiques de chaque zone d’altitude semble indiquer que, malgré le biais de température des modèles pour les HMA, ceux-ci réagissent qualitativement de manière équivalente aux différents niveaux de forçage radiatif. Les différences observées indiquent toutefois qu’il existe des particularités aux zones d’altitudes élevées.

Le fait que, pour chaque scénario, l’intervalle de confiance soit plus large sur les zones d’altitudes élevées, peut indiquer qu’il y a moins de variabilité de température sur les zones de basse altitude. Cette différence pourrait également s’expliquer par des surfaces géographiques différentes pour les deux zones d’altitudes (nombre de mailles moyennées différents), dans ce cas il est difficile d’en tirer des conclusions climatiques.

L’écart à la moyenne plus élevé dans le cas des zones de hautes altitudes, peut quant à lui s’interpréter par une sensibilité plus grande du Plateau Tibétain à l’augmentation du forçage radiatif qui conduirait à une plus grande augmentation des températures moyennes que dans les zones de basse altitude. Une explication à cela pourrait être la diminution de l’albédo lié à la diminution de la couverture neigeuse dans les zones des HMA. Cela pourrait également résulter d’autres effets qu’il n’est pas possible de mettre en évidence ici.

Enfin, on remarque que sur nos graphiques, les intervalles de confiance sur nos tendances sont relativement constants dans le temps alors que dans la plupart des publications scientifiques, ces intervalles de confiance ont tendance logiquement à s’élargir au fur et à mesure que l’on s’éloigne de la période actuelle. Cela est probablement dû au fait que nous n’avons utilisé qu’un seul modèle de climat pour construire nos courbes. Les variations que l’on observe sont dues aux variations des différents « member\_id » du même modèle qui est alors une estimation de la variabilité interne du climat. Pour avoir une information plus pertinente du niveau d’incertitude des projections, il aurait fallu mixer les prévisions de différents modèles qui ne réagissent pas tout à fait de la même manière aux paramètres de forçage.

# Discussion

Au cours de cette étude, nous nous sommes intéressés à deux grandeurs physiques permettant de caractériser le climat sur la région des HMA, la température de surface et la couverture neigeuse. La comparaison de données obtenues à partir du modèle CMIP6-IPSL-LR et de données d’observations nous a amené à repérer un biais froid marqué et une surestimation de la couverture de neige sur cette région durant la période 1950-2014.

Ce biais est localisé sur la région des HMA comme nous l’a montré la cartographie du biais sur l’hémisphère nord. De plus, il est présent quelles que soient les conditions de simulation (member\_id) et la saison. La présence conjointe de biais de modélisation sur ces deux variables nous a poussé à étudier la corrélation entre le biais de neige et le biais de température de surface. Ceux-ci semblent présenter une corrélation non négligeable mais qui ne peut expliquer à elle seule ces biais. De plus, le sens de la causalité n’est pas clairement établi. L’analyse en parallèle de la relation entre altitude réelle (issue d’un jeu de données de topographie) et biais de température a mis en évidence une implication directe non négligeable mais pas totale entre ces deux variables.

La tendance d’évolution de la température de surface moyenne sur la période 2015-2100 en réponse à 4 scénarios de forçages radiatifs évolue de manière assez similaire sur les zones avec biais fort et sur les zones sans biais. Toutefois, la variabilité interne de la température donnée par le modèle sur les zones de basse altitude (<1000m) est plus faible qu’aux hautes altitudes (>2500m) et la région des HMA semble également plus sensible à l’augmentation des forçages radiatifs.

Les résultats de notre étude soulèvent beaucoup de questions dont certaines n’ont pas ou peu de réponse :

* Les observations de référence peuvent-elles être considérées comme représentatives du climat réel de la région des HMA ?

En effet, le biais est calculé comme la différence entre la modélisation et les observations. Cela suppose que les observations sont toujours « vraies » et que seulement le modèle peut se « tromper ». Hors la qualité des mesures de variables climatiques par des capteurs placés sur des stations météorologiques (comme pour la température) (Harris et al. 2020) est dépendante de la densité spatiale des stations. Or, justement dans la région des HMA, le nombre de stations est peu élevé et cela particulièrement dans les zones de hautes altitudes pour lesquelles le biais est le plus fort. Le risque est alors qu’une seule mesure ponctuelle soit utilisée comme valeur pour une zone étendue et soit, de fait, peu représentative de la réalité. D’autres part d’autres indicateurs (couverture de neige par exemple) sont évalués de manière indirecte à partir d’images satellite (Atlaskina, Berninger, de Leeuw 2015). Quelle est la fiabilité de ces mesures ? Un indicateur de surface couverte, sans notion d’épaisseur, est-il le plus pertinent ?

• Quelle est l’origine du biais froid sur la région des HMA ?

Le biais de couverture de neige et l’altitude semblent expliquer une partie du biais de température. Nous avons émis plus haut une hypothèse sur la faible résolution du modèle qui lisserait trop les reliefs et dégraderait donc la représentation à plus fine échelle des phénomènes météorologiques et climatiques sur les HMA. La comparaison du biais de température dans le modèle LR et dans le modèle HR montre que, au vu de l’augmentation du nombre de points de grille (8 fois plus nombreux) la réduction du biais n’est que très faible (-6%). D’autre part, nous n’avons utilisé que trois indicateurs (altitude, température et couverture de neige) pour essayer d’analyser le biais. D’autres éléments (cumul des précipitations, influence des moussons estivales et des perturbations hivernales à l’ouest, …) peuvent sans doute aider à améliorer la compréhension de l’origine du biais de température.

• Dois-t ’on corriger le biais de température, et comment le faire ?

On l’a vu, l’existence de ce biais entre modèle et observations peut être lié à une modélisation imparfaite des phénomènes climatiques mais aussi à un manque de précisions des observations. Il reflète donc un manque de connaissance scientifique sur ce sujet et à ce titre il semble important de tenter de réduire ce manque de précision. Un autre point, est la problématique des tendances à venir. Le biais actuel entraine-t-il une déviation sur les tendances du 21ième siècle ? Si on estime que oui, alors c’est une raison supplémentaire de vouloir corriger le biais.

Les moyens pour le faire peuvent être divers et complémentaires :

* + - Modèles avec une résolution plus fine
    - Amélioration qualitative et quantitative des mesures de terrain
    - Compréhension plus fine des phénomènes climatiques locaux

Dans tous les cas, ces corrections ne doivent pas se faire aux dépends de la justesse du modèle à une échelle globale. C’est pourquoi il est important de cibler très précisément les causes du biais sur cette région pour pouvoir corriger seulement les paramètres physiques et climatiques qui lui sont propres.

# Références

ACKROYD, Chelsea, SKILES, S. McKenzie, RITTGER, Karl et MEYER, Joachim, 2021. Trends in Snow Cover Duration Across River Basins in High Mountain Asia From Daily Gap-Filled MODIS Fractional Snow Covered Area. *Frontiers in Earth Science*. 2021. Vol. 9, pp. 828. DOI 10.3389/feart.2021.713145.

ATLASKINA, K., BERNINGER, F. et DE LEEUW, G., 2015. Satellite observations of changes in snow-covered land surface albedo during spring in the Northern Hemisphere. *The Cryosphere*. 24 septembre 2015. Vol. 9, n° 5, pp. 1879‑1893. DOI 10.5194/tc-9-1879-2015.

CINTRA, Rosangela, DE CAMPOS VELHO, Haroldo et COCKE, Steven, 2016. Tracking the model: Data assimilation by artificial neural network. In : *2016 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)* [en ligne]. Vancouver, BC, Canada : IEEE. juillet 2016. pp. 403‑410. [Consulté le 22 novembre 2021]. ISBN 978-1-5090-0620-5. Disponible à l’adresse : http://ieeexplore.ieee.org/document/7727227/

CMIP, 2021. [en ligne]. [Consulté le 22 novembre 2021]. Disponible à l’adresse : https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip

CMIP6\_global\_attributes\_filenames\_CVs, 2018. *Google Docs* [en ligne]. [Consulté le 22 novembre 2021]. Disponible à l’adresse : https://docs.google.com/document/d/1h0r8RZr\_f3-8egBMMh7aqLwy3snpD6\_MrDz1q8n5XUk/edit?usp=sharing&usp=embed\_facebook

HARRIS, Ian, OSBORN, Timothy J., JONES, Phil et LISTER, David, 2020. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*. décembre 2020. Vol. 7, n° 1, pp. 109. DOI 10.1038/s41597-020-0453-3.

Modèle climatique, 2021. *Wikipédia* [en ligne]. [Consulté le 22 novembre 2021]. Disponible à l’adresse : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Mod%C3%A8le\_climatique&oldid=182627493

O’NEILL, Brian C., TEBALDI, Claudia, VAN VUUREN, Detlef P., EYRING, Veronika, FRIEDLINGSTEIN, Pierre, HURTT, George, KNUTTI, Reto, KRIEGLER, Elmar, LAMARQUE, Jean-Francois, LOWE, Jason, MEEHL, Gerald A., MOSS, Richard, RIAHI, Keywan et SANDERSON, Benjamin M., 2016. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*. 28 septembre 2016. Vol. 9, n° 9, pp. 3461‑3482. DOI 10.5194/gmd-9-3461-2016.

ORSOLINI, Yvan, WEGMANN, Martin, DUTRA, Emanuel, LIU, Boqi, BALSAMO, Gianpaolo, YANG, Kun, DE ROSNAY, Patricia, ZHU, Congwen, WANG, Wenli, SENAN, Retish et ARDUINI, Gabriele, 2019. Evaluation of snow depth and snow cover over the Tibetan Plateau in global reanalyses using in situ and satellite remote sensing observations. *The Cryosphere*. 27 août 2019. Vol. 13, n° 8, pp. 2221‑2239. DOI 10.5194/tc-13-2221-2019.

Shared Socioeconomic Pathways, 2021. *Wikipedia* [en ligne]. [Consulté le 22 novembre 2021]. Disponible à l’adresse : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Shared\_Socioeconomic\_Pathways&oldid=1054206944

SHARMA, Eklabya, MOLDEN, David, RAHMAN, Atiq, KHATIWADA, Yuba Raj, ZHANG, Linxiu, SINGH, Surendra Pratap, YAO, Tandong et WESTER, Philippus, 2019. Introduction to the Hindu Kush Himalaya Assessment. In : WESTER, Philippus, MISHRA, Arabinda, MUKHERJI, Aditi et SHRESTHA, Arun Bhakta (éd.), *The Hindu Kush Himalaya Assessment* [en ligne]. Cham : Springer International Publishing. pp. 1‑16. [Consulté le 1 décembre 2021]. ISBN 978-3-319-92287-4. Disponible à l’adresse : http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-92288-1\_1

SMITH, Taylor et BOOKHAGEN, Bodo, 2018. Changes in seasonal snow water equivalent distribution in High Mountain Asia (1987 to 2009). *Science Advances*. 17 janvier 2018. Vol. 4, n° 1, pp. e1701550. DOI 10.1126/sciadv.1701550.