

## CERFACS

*Marie PIAZZA, Julien BOE, Christian PAGE,  
Emilia SANCHEZ, Laurent TERRAY*

# Evaluation comparée des rétroactions de la couverture neigeuse sur la température, dans les observations et dans le modèle régional ALADIN

## SCAMPEI

**Etat d'avancement  
- Juin 2011 -**

Les régions de montagne sont très vulnérables aux changements climatiques et susceptibles d'être parmi les zones les plus impactées par le réchauffement global. A l'échelle régionale, ces changements pourraient être grandement conditionnés par les rétroactions locales dues aux effets de l'orographie, du couplage sol-atmosphère et de la circulation de méso-échelle. En particulier le réchauffement pourrait s'intensifier sur les zones où la couverture de neige est perdue à cause de la rétroaction de l'albédo de la neige (Hall et Qu 2007). Une première partie de ce travail consiste à identifier les rétroactions entre la couverture de neige et la température dans les réanalyses SAFRAN de Météo-France, et à proposer des hypothèses sur les mécanismes en jeu. Ensuite, on s'intéresse au modèle ALADIN et en premier lieu aux sorties brutes, c'est-à-dire n'ayant pas été corrigées pour être exploitables pour les études d'impacts. En effet, cette correction vers les valeurs SAFRAN pourrait altérer les possibles rétroactions. Une évaluation préliminaire permet ensuite de diagnostiquer l'existence de rétroactions semblables par leur distribution spatiale à celles observées dans SAFRAN, mais à des échelles temporelles plus courtes.



## Sommaire

Introduction.....	4
I. Rétroaction neige-température dans les réanalyses SAFRAN .....	4
I.1. Identification des rétroactions .....	5
I.2. Mécanismes associés.....	6
a) Région Sud.....	7
b) Région Est.....	7
c) Région Nord .....	8
I.3. Influence des rétroactions sur la tendance observée de TX .....	9
II. Rétroaction neige-température simulée par ALADIN .....	9
II.1. Évaluation des sorties ALADIN non corrigées et impact de la correction sur les projections..	10
a) Temps présent : Comparaison des sorties brutes aux données SIM .....	10
b) Projections : Comparaison des sorties avant et après correction .....	11
II.2. Identification de rétroactions dans ALADIN non corrigé.....	13
Conclusions et perspectives .....	14
Remerciements .....	15
Références.....	15
ANNEXE .....	16
Lexique des abréviations utilisées pour désigner les variables.....	16
Cycles saisonniers de SAFRAN-SIM, sur les Alpes (1960-2007).....	17
Moyennes par classes d'altitude .....	17
Couverture de neige climatologique .....	18
Cycles saisonniers d'ALADIN brut forcé par ERA-Interim, sur les Alpes (1960-2007) .....	19
Moyennes par classes d'altitude .....	19
Couverture de neige climatologique.....	20

## Introduction

Les recherches climatiques en cours mettent en évidence des signatures régionales et saisonnières du changement climatique et soulignent la grande vulnérabilité des milieux de montagnes. Mais l'étude du climat, de ses manifestations extrêmes et de ses impacts en zone de relief est compliquée par la topographie complexe des sites montagneux. En particulier, l'étude de la couverture neigeuse et de son évolution, préalable au développement de stratégies d'adaptation économique et de gestion de la ressource en eau, implique de prendre en compte les processus de méso-échelle régionaux et les possibles rétroactions sur le massif étudié. Au-delà des conséquences du réchauffement climatique au cours du siècle, un des points cruciaux concernant la prévisibilité des événements en zone de montagne se situe à l'échelle saisonnière.

Ce rapport s'inscrit dans le cadre du projet **ANR-SCAMPEI** (Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes), et fait état de l'avancement de l'évaluation des rétroactions sur les Alpes à partir de réanalyses et de scénarios climatiques à haute résolution spatiale (8-12 km). Une étude préliminaire des phénomènes « observés » (données SAFRAN et SIM) sur la période 1960-2007 offre un aperçu des rétroactions réelles existantes. C'est une étape nécessaire avant d'évaluer le réalisme des rétroactions dans le modèle régional de climat ALADIN.

Cette étude se focalisera sur les Alpes françaises, qui présentent une superficie, un relief et des contrastes climatiques régionaux importants. En plus d'un découpage climatique nord-sud important dans cette région, il s'est avéré qu'un découpage en trois tranches d'altitudes sur la grille SAFRAN (8km) était tout aussi pertinent :

<b>Basse altitude</b>	<b>500 à 1500 m</b>
<b>Moyenne altitude</b>	<b>1500 à 2500 m</b>
<b>Haute altitude</b>	<b>&gt; 2500 m</b>

*Remarque : Sur les cartes, ces tranches d'altitudes sont représentées par des contours noirs épais.*

## I. Rétroaction neige-température dans les réanalyses SAFRAN

Pour cette étude, on utilise les données la chaîne SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU, Figure 1) développée au CNRM (Habets et al. 2008), et dont on prendra les données pour référence pour la suite de cette étude. Les 3 systèmes qui la composent sont les suivants :

1. **SAFRAN**/France est un système d'analyse à méso-échelle de variables atmosphériques près de la surface (Quintana-Seguí et al. 2008). Il utilise des observations de surface, combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques pour produire les paramètres horaires nécessaires au fonctionnement d'ISBA au pas de temps horaire. Ces paramètres (température, humidité, vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire et infrarouge incident), sont analysés par pas de 300m d'altitude. Ils sont ensuite interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km).
2. **ISBA** (Interaction sol-biosphère-atmosphère) simule les échanges d'eau et d'énergie entre le sol et l'atmosphère. La version utilisée dans la chaîne SIM utilise 3 couches de sol (surface,

zone racinaire, zone profonde), et deux températures (température de surface globale du continuum sol-végétation et température profonde). ISBA simule l'ensemble des flux d'eau avec l'atmosphère (interception, évaporation, transpiration) et avec le sol (ruissellement des précipitations et drainage dans le sol). Son pas de temps est de cinq minutes.

3. **MODCOU** est un modèle hydrologique distribué. Il utilise en entrée le ruissellement et drainage d'ISBA pour calculer l'évolution des nappes (actuellement seules les nappes de la Seine et du Rhône sont représentées) et le débit des rivières (900 points simulés actuellement). Sa maille de calcul varie de 64 à 1 km en fonction de la limite des bassins versants et du réseau hydrographique. Son pas de temps est de trois heures.

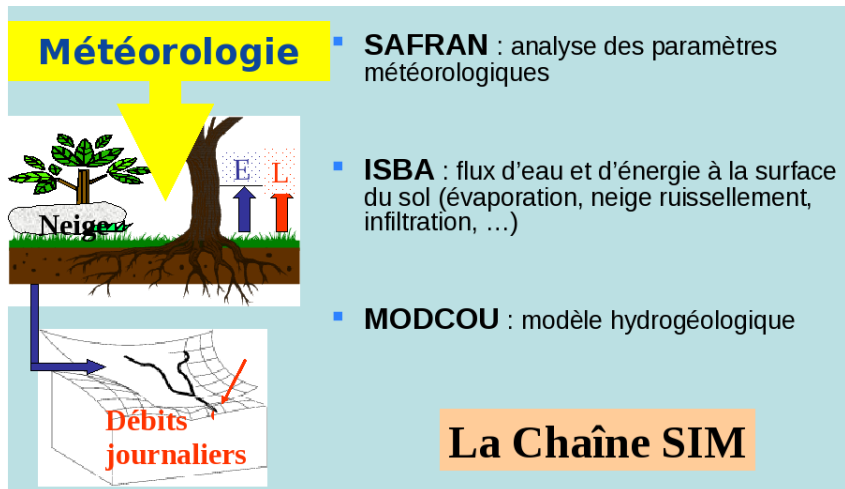


Figure 1: Schéma de fonctionnement de la chaîne SIM

## 1.1. Identification des rétroactions

La méthodologie employée pour mettre en évidence l'existence ou non d'une rétroaction de la couverture de neige (dans la suite de ce rapport on pourra utiliser l'abréviation NG), et la température maximale à 2m (abrégié dans la suite par TX), consiste à calculer les corrélations entre les deux variables, avec un décalage temporel variable, avec NG en avance sur TX. On travaille avec des moyennes mensuelles de données journalières et on s'intéresse seulement aux valeurs significatives pour l'échantillon considéré, soit 47 ans. L'existence d'une rétroaction NG-TX dans les données de référence se traduit par une anti-corrélation : une importante couverture de neige en hiver induit des températures maximales plutôt faibles, pour les mois et les régions considérés.

*Remarque : Pour le calcul des corrélations, on a pris soin d'enlever les tendances sur la période considérée.*

La Figure 2 présente seulement les valeurs de corrélations significatives, obtenues avec les différents décalages temporels testés (combinaisons entre NG de décembre à mai et TX de février à septembre, avec NG en avance sur TX). On remarque que malgré un décalage du cycle saisonnier selon l'altitude (voir en Annexe), la couverture de neige en février influence TX quels que soient le décalage ou la région. Et en particulier, cette relation est aussi vérifiée avec NG en janvier sur la partie nord des Alpes, pour TX au mois d'août.

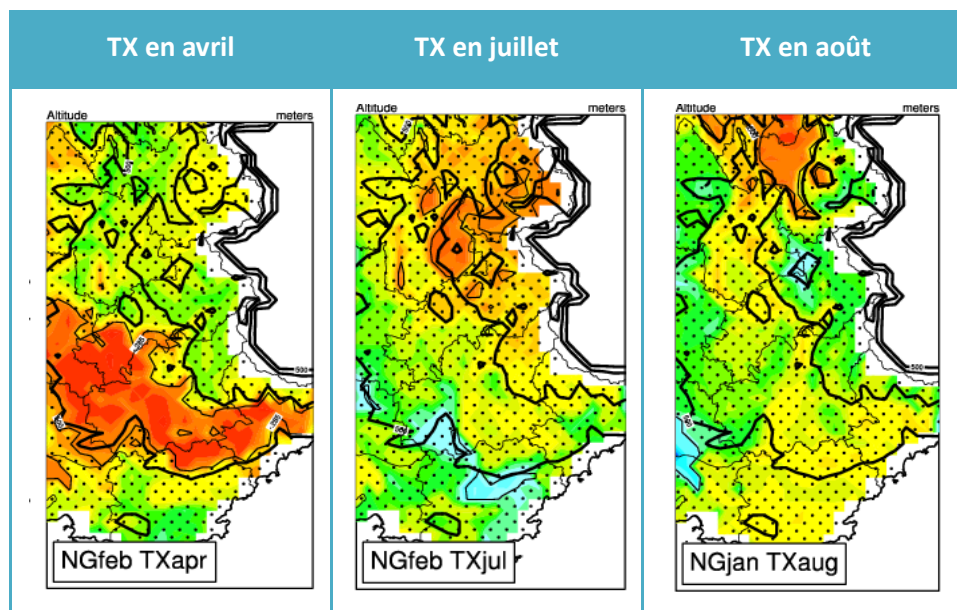


Figure 2: Corrélations entre la couverture neigeuse (NG) en février et la température maximale (TX) pour différents décalages temporels : 2 mois à gauche, 5 mois au centre, 6 mois à droite. (pointillés : corrélation non significative à 0.05)

Ces résultats montrent la spécificité spatiale et temporelle de la rétroaction NG-TX sur les Alpes et suggère un découpage en trois zones : Alpes du sud, Alpes de l'est et Alpes du nord. La couverture neigeuse de février est significativement anti-corrélée avec la température maximale en avril sur la partie sud. A l'est en revanche, NG a un lien plus tardif sur TX, en juillet. Au nord, cette relation est encore plus tardive, au mois d'août, et avec une influence de la couverture de neige qui se fait sentir dès le mois de janvier, et qui persiste avec une égale intensité avec la couverture de neige de février.

*Remarque : Les cartes de corrélations et les analyses étant très similaires pour NG en janvier et en février, on présentera ici seulement un des deux mois (janvier) par souci de clarté.*

L'inhomogénéité de la réponse de TX par rapport à NG suggère une étude par zones des mécanismes responsables de ces rétroactions.

## I.2. Mécanismes associés

Plusieurs hypothèses sont envisagées pour expliquer les rétroactions observées sur les différentes zones géographiques et aux échéances temporelles plus ou moins longues.

Dans le cas d'une rétroaction entre la neige et la température à faible décalage temporel (deux mois, région sud), on peut privilégier l'hypothèse de la rétroaction de l'albédo de la neige. En revanche, pour les phénomènes persistants (environ 6 mois, à l'est et au nord), on envisage un mécanisme (ou une combinaison de plusieurs mécanismes) utilisant la mémoire (l'inertie) du sol, comme le contenu en eau (caractérisé par l'indice d'humidité des sols, nommé SWI) et/ou la température de la première couche (nommée TSOIL1 par la suite). Ces hypothèses sont testées à l'aide de corrélations.

### a) Région Sud

La prospection au travers des différentes hypothèses suggère finalement que la nébulosité intervient comme intermédiaire dans l'anti-corrélation entre la couverture de neige et la température atmosphérique maximale ; en effet, la neige NG en février y est fortement anti-corrélée avec le rayonnement solaire descendant (GLO) du mois d'avril (Figure 3). Un tel signal est d'autant plus significatif qu'il n'apparaît qu'à cette période précise.

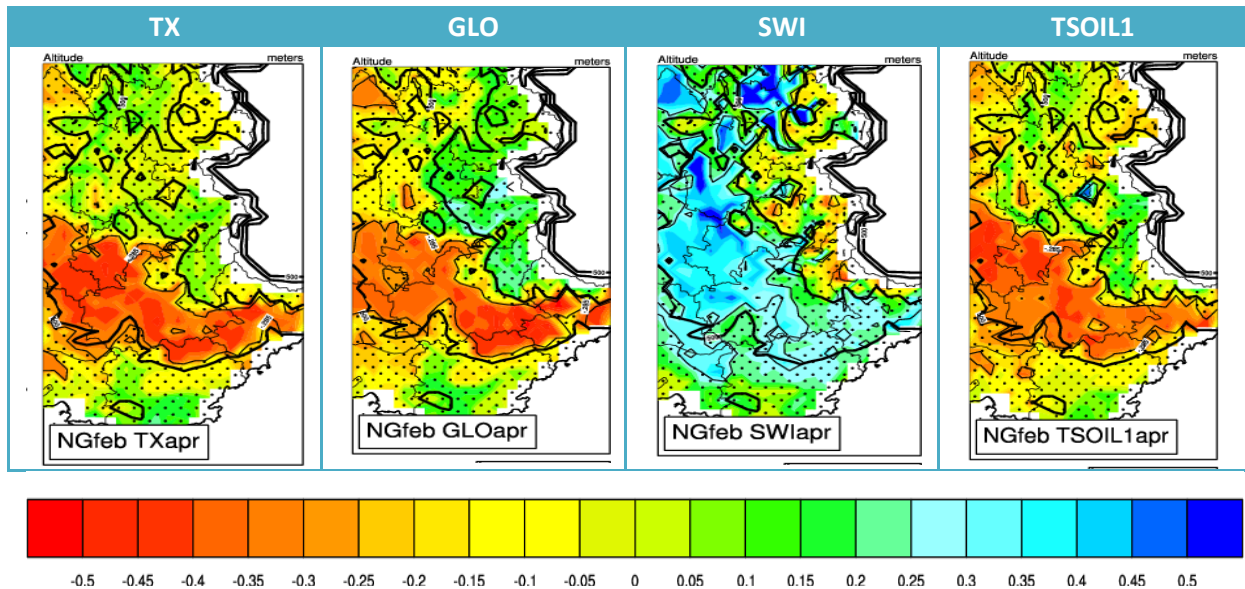


Figure 3: Corrélations entre la couverture neigeuse (NG) en février et plusieurs champs atmosphériques et terrestres en avril, de gauche à droite : température maximale (TX), flux solaire descendant de surface (GLO), indice d'humidité des sols (SWI), température du sol de la couche superficielle (TSOIL1). (pointillés : corrélation non significative à 0.05)

L'hypothèse d'explication de la corrélation NG-TX est donc la suivante : la couverture de neige présente en février, fondue en avril, fait augmenter l'indice d'humidité des sols (SWI), tout en maintenant le sol à faible température. C'est cette dernière qui favoriserait alors la formation de nuages bas (la neige en février est effectivement corrélée significativement avec l'humidité relative d'avril, *non montré ici*), expliquant ainsi l'obstruction du rayonnement solaire descendant et donc une faible température atmosphérique maximale.

### b) Région Est

Pour la région Est, c'est aux moyennes et hautes altitudes que l'anti-corrélation entre la couverture de neige en février et la température maximale en août est constatée, et avec un décalage temporel deux fois plus long. Les analyses effectuées suggèrent que c'est la température du sol qui contrôle le lien entre NG et TX. En effet, même si une forte corrélation existe entre NG en février et SWI en juillet, il n'y a aucun lien pour l'évapotranspiration ; ce n'est donc pas la persistance de l'humidité des sols qui joue sur TX en été. Par contre, du fait de l'augmentation de sa capacité calorifique avec son contenu en eau, le sol a une inertie plus grande et met donc plus de temps à se réchauffer pendant et après la fonte de la couverture. Une forte couverture de neige en février induit donc un fort indice d'humidité des sols en juillet associé à une faible température du sol et, par le biais du flux de chaleur sensible SHF, une faible température atmosphérique.

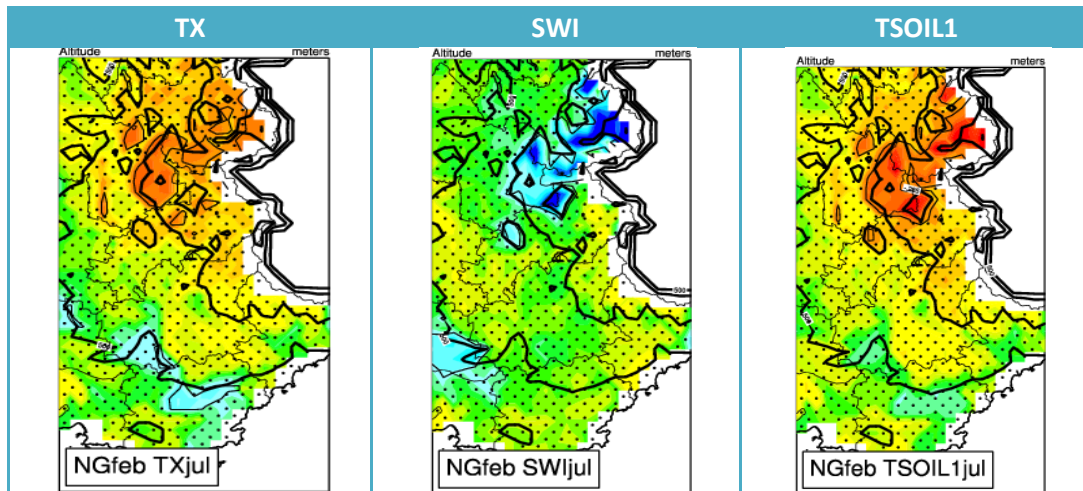


Figure 4: Corrélations entre la couverture neigeuse (NG) en février et plusieurs champs atmosphériques et terrestres en juillet, de gauche à droite : température maximale (TX), indice d'humidité des sols (SWI), température du sol de la couche superficielle (TSOIL1). (pointillés : corrélation non significative à 0.05)

### c) Région Nord

Sur le nord des Alpes, les mécanismes à l'œuvre dans la relation entre NG en janvier et février et TX en août, aux basses altitudes, semblent être les mêmes qu'à l'est au mois précédent : une humidité des sols qui ne contrôle pas l'évapotranspiration mais qui est liée à la vitesse de réchauffement du sol. Cette température du sol influe ensuite sur TX par l'intermédiaire du flux de chaleur sensible.

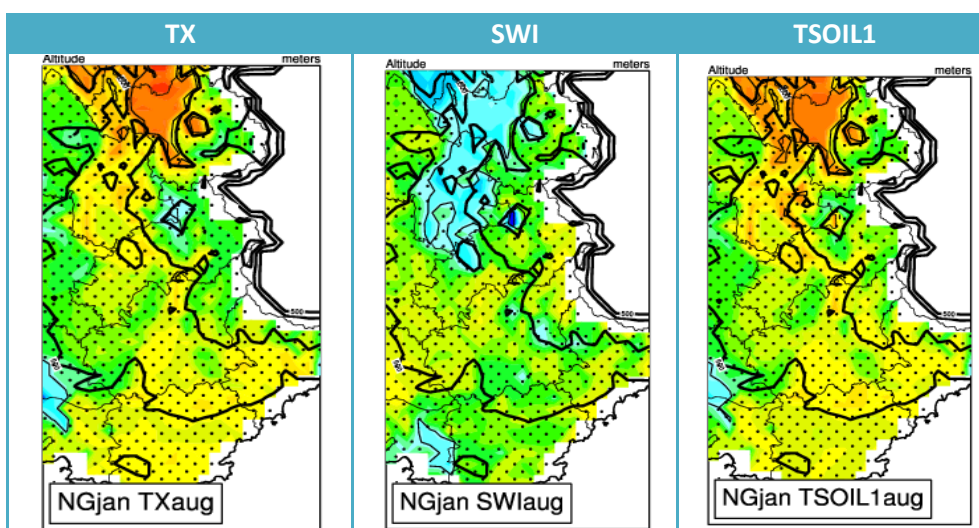


Figure 5: Corrélations entre la couverture neigeuse (NG) en janvier et plusieurs champs



atmosphériques et terrestres en août, de gauche à droite : température maximale (TX), indice d'humidité des sols (SWI), température du sol de la couche superficielle (TSOIL1). (pointillés : corrélation non significative à 0.05)

### I.3. Influence des rétroactions sur la tendance observée de TX

Entre 1960 et 2007, les données SIM montrent une tendance à l'augmentation de TX (de +2.1°C en moyenne au-dessus de 2500m jusqu'à +2.7°C entre 500 et 1500m) et à la diminution de NG (-122 kg/m<sup>2</sup> en moyenne aux hautes altitudes, et -62 kg/m<sup>2</sup> entre 500 et 1500m). On se propose dans cette section de quantifier la part du réchauffement attribuable aux rétroactions identifiées et associées à la diminution de la couverture de neige observée sur la période. Pour cela, on calcule le coefficient de régression linéaire (point par point, sans la tendance) entre TX et NG, que l'on multiplie par le rapport entre la tendance de NG et la tendance de TX (aux points où la tendance de TX est non nulle).

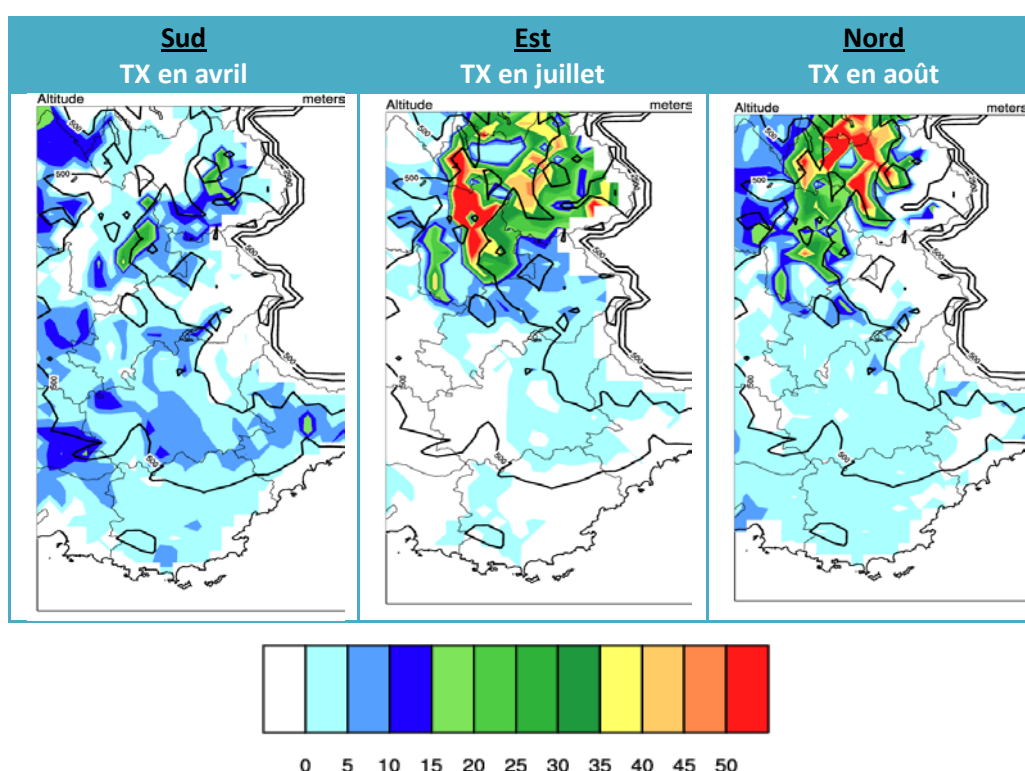


Figure 6: Part de la tendance de TX expliquée par la tendance de NG, pour NG en février et TX en avril (à gauche), juillet (au centre) et août (à droite), en %.

La rétroaction entre la couverture de neige hivernale et la température estivale impacte fortement la tendance sur les régions concernées, avec plus de 50% de la tendance de TX expliquée par la tendance de NG en juillet au nord, entre 500 et 1500 m d'altitude. Les valeurs sont plus modérées au sud au printemps, avec à peine 10% en moyenne de la tendance expliquée.

## II. Rétroaction neige-température simulée par ALADIN

L'étude menée précédemment sur les données de référence SIM renseigne quant aux rétroactions qu'on pourrait s'attendre à retrouver dans un modèle simulant le climat alpin de façon réaliste. Dans cette partie, il s'agira tout d'abord d'évaluer les sorties brutes du modèle ALADIN utiles pour l'étude des rétroactions. En effet, la correction quantile-quantile, bien que nécessaire pour

rendre les sorties exploitables pour les études d'impacts, rend plus difficile l'analyse des processus physiques en jeu dans le modèle. Il sera ensuite question des rétroactions entre couverture de neige et température maximale ultérieure ; nous verrons alors qu'elles sont bien présentes, mais avec une variabilité spatiale plus faible et des décalages temporels plus courts (jusqu'en mai seulement).

## **II.1. Évaluation des sorties ALADIN non corrigées et impact de la correction sur les projections**

Pour rendre les sorties du modèle climatique régional ALADIN exploitables pour les études d'impact, une méthode de correction quantile-quantile est utilisée (Déqué, 2007). Celle-ci consiste à élaborer une fonction de transfert pour ramener la distribution statistique des données simulées à celle des valeurs observées. La correction est réalisée par décomposition des deux jeux de données en quantiles. Dans ce cas les données utilisées comme observations sont les analyses SAFRAN.

Dans un premier temps, il s'agit de comparer les sorties du modèles ALADIN forcé par les réanalyse ERA40/ERA-Interim aux données SAFRAN pour la période 1960-2007. La comparaison s'appuie sur les paramètres pouvant intervenir dans les mécanismes des rétroactions couverture de neige-température maximale sur les zones de montagnes : couverture de neige ( $\text{kg/m}^2$ ), rayonnement net global ( $\text{W/m}^2$ ).

Ensuite, les résultats issus des simulations ALADIN selon les scénarios A1B, A2 et B1 seront comparées avant et après correction quantile-quantile, pour la variable température maximale, pour les saisons printemps et été, c'est-à-dire quand la probabilité de détecter une rétroaction est la plus forte.

### **a) Temps présent : Comparaison des sorties brutes aux données SIM**

Une première évaluation des sorties brutes consiste à comparer les cycles saisonniers de la couverture de neige et du rayonnement net total (appelé par la suite RN) d'ALADIN et de SIM, sur la France entière et en particulier sur les Alpes (Figure 7).

Alors qu'ALADIN surestime légèrement la couverture de neige en moyenne sur la France par rapport aux observations, il la sous-estime sur les Alpes. D'autre part, le cycle saisonnier d'ALADIN connaît un décalage systématique de 15 jours en moyenne, avec une apparition puis une fonte de la couverture neigeuse plus précoce que dans SIM. (voir la climatologie en Annexe).

Concernant RN, les résultats coïncident avec ceux de NG, dans la mesure où le cycle d'ALADIN est lui aussi en avance d'un demi mois sur le cycle SIM. RN présente une forte surestimation en moyenne sur la France de mars à octobre. Ce biais est beaucoup plus faible sur les Alpes.

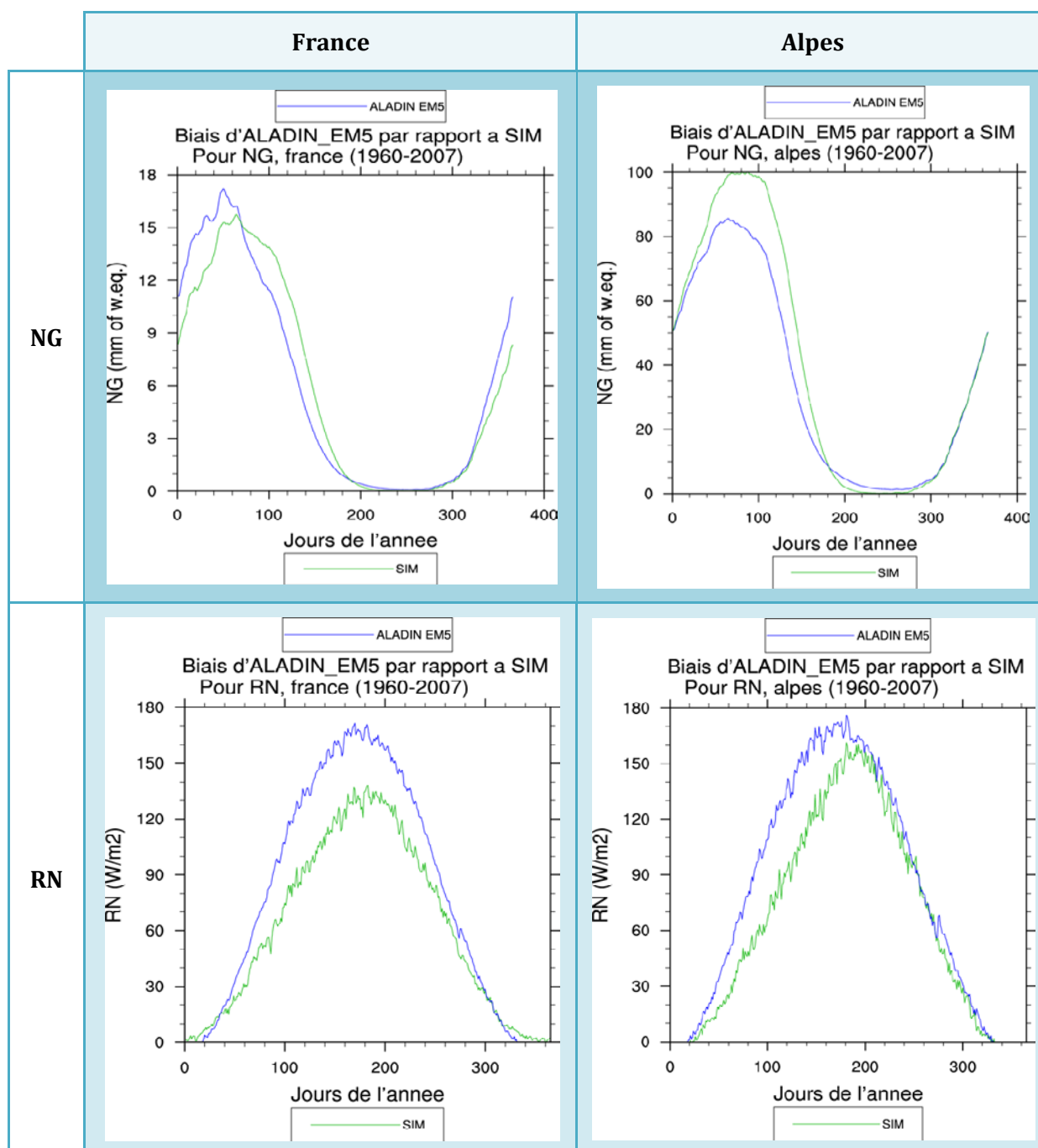


Figure 7: Cycles saisonniers de la couverture de neige (NG, ligne du haut) et du rayonnement net total (RN, ligne du bas), moyennés sur la France (colonne de gauche), et seulement sur les Alpes (colonne de droite). Sorties brutes ALADIN forcé par les réanalyses ERA-Interim (1960-2007)

### b) Projections : Comparaison des sorties avant et après correction

L'évaluation des sorties brutes passe aussi par la comparaison avec les données corrigées, d'une part pour quantifier les biais du modèle, d'autre part pour évaluer l'impact de la correction sur les résultats. La comparaison des scénarios permet de mettre en évidence l'impact de la correction sur les changements climatiques modélisés.

La Figure 8 présente les changements de températures maximales pour 3 scénarios de l'IPCC, A1B, A2 et B1, et pour deux périodes futures de 30 ans chacune : milieu de siècle (2021-2050) et fin

de siècle (2071-2100), pour les saisons du printemps (mars-avril-mai, MAM) et d'été (juin-juillet-août, JJA), pour les données ALADIN sans et avec correction.

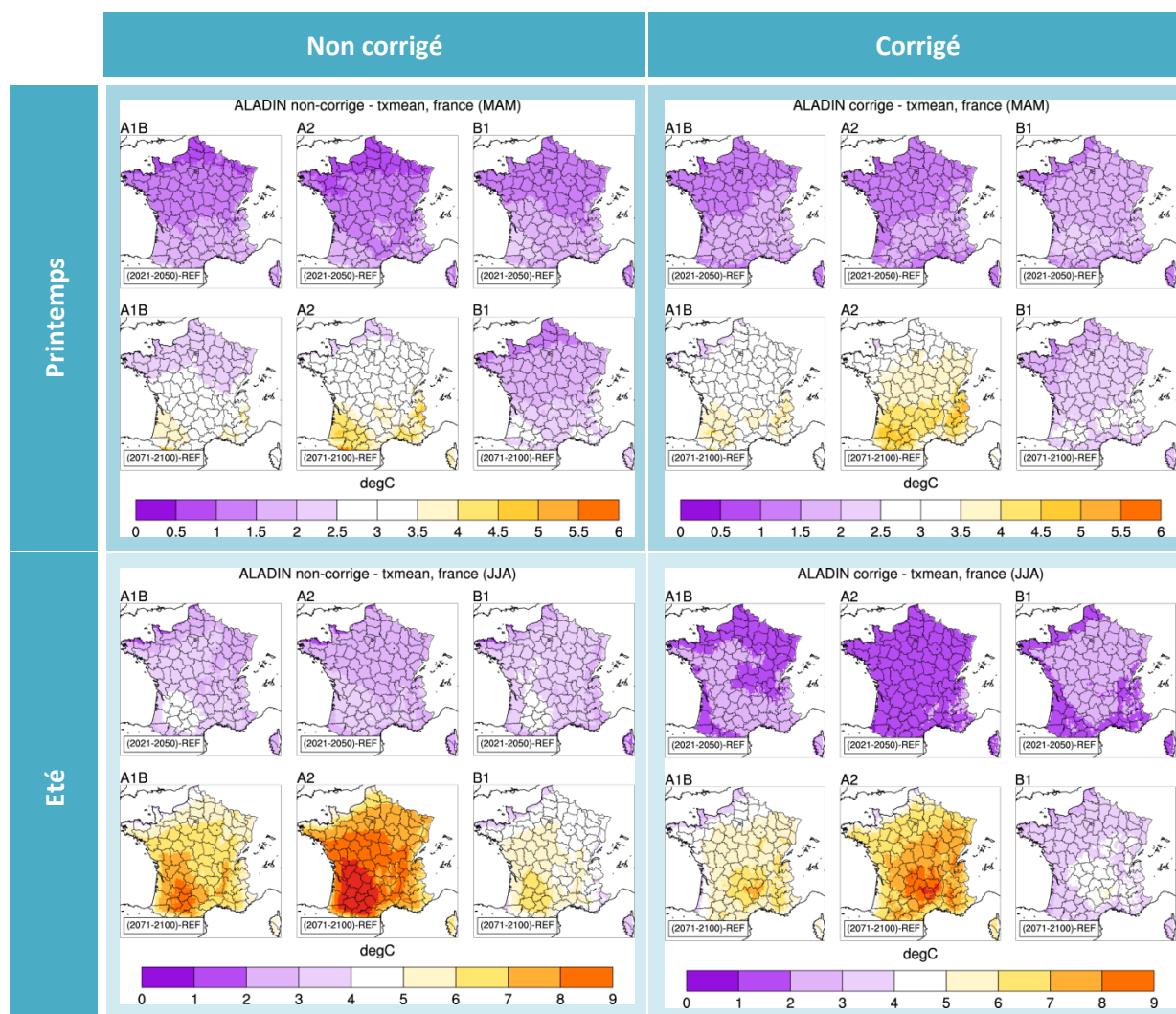


Figure 8: Evolution de TX en milieu et fin de siècle par rapport à la période de référence, au printemps (en haut) et en été (en bas). A gauche: sorties brutes. A droite: sorties corrigées. (Simulations ALADIN forcé par ARPEGE référence (1961-1990) et scénario A1B, A2, B1)

On s'intéresse aux saisons de printemps et d'été, pendant lesquelles la probabilité d'existence de rétroactions est la plus élevée. En particulier, on remarque que le signal du réchauffement climatique est particulièrement visible sur les régions d'altitude (Pyrénées, Alpes), dans la deuxième moitié du siècle. En terme d'amplitude, la correction a tendance à amplifier globalement le réchauffement au printemps sur la France (de l'ordre de +0.5°C), et à le réduire en été (de l'ordre de -1.5°C). Spatialement, l'impact de la correction est particulièrement visible sur la fin du siècle : alors qu'ALADIN prévoit un maximum de réchauffement dans le sud-ouest, la correction décale ce maximum sur le Massif Central.

En conclusion, la correction appliquée aux scénarios modifie l'amplitude et la structure spatiale des changements de la température maximale, en particulier en été dans la moitié sud de la France. Ces cartes appuient la pertinence de l'utilisation des données brutes du modèle dans l'étude des rétroactions de la neige sur la température, en particulier pour les comparer à celles de SIM.

## II.2. Identification de rétroactions dans ALADIN non corrigé

La méthodologie employée pour identifier les rétroactions NG-TX dans les simulations ALADIN est la même que celle suivie précédemment pour les données SIM. La Figure 9 montre les valeurs de corrélation obtenues entre NG et TX pour les mois où des valeurs significatives sont observées.

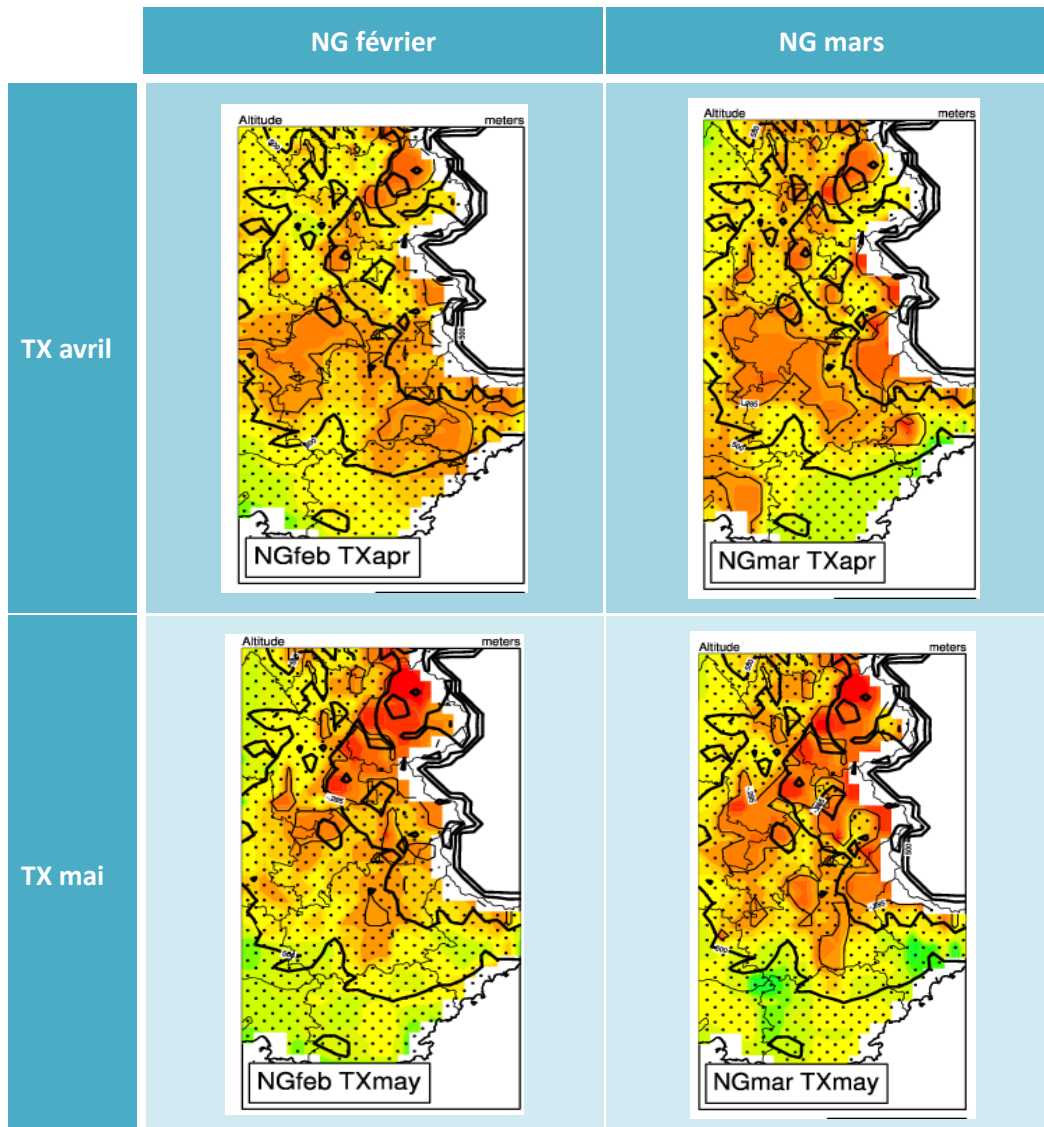


Figure 9: Corrélations entre la couverture neigeuse (NG) en février (colonne de gauche) et en mars (colonne de droite), et la température maximale (TX) en avril (ligne du haut) et en mai (ligne du bas). (pointillés : corrélation non significative à 0.05)

Le modèle climatique régional ALADIN est donc capable de représenter un lien entre la couverture de neige et la température maximale, à une échéance temporelle supérieure à un mois.

La répartition spatiale du lien entre NG et TX est moins inhomogène que dans SIM. On reconnaît tout de même la réponse de la température maximale d'avril à la couverture de neige sur la partie sud des Alpes, avec un décalage de 1 à 2 mois. Quant à la région Est des Alpes, elle est

davantage impactée au mois de mai, alors que dans SIM elle l'est au mois d'août. Cette faible persistance des effets de la couverture de neige peut s'expliquer de plusieurs façons :

- la fonte précoce de la neige dans ALADIN induit un effet plus précoce des rétroactions ;
- les mécanismes mis en jeu dans les rétroactions d'ALADIN n'invoquent pas une grande mémoire des sols (albédo) ;
- les phénomènes physiques responsable de la mémoire des sols ne sont pas modélisés de façon suffisamment réaliste par ALADIN.

## Conclusions et perspectives

L'étude des projections climatiques suggère des changements particulièrement importants sur les régions de montagnes. Il s'agissait ici de vérifier si ces évolutions spécifiques pouvaient être liées à l'évolution de la couverture de neige, et en particulier par le biais d'une rétroaction entre la neige et la température. La première étape de ce travail a donc été de s'assurer de l'existence d'une telle rétroaction dans les données de référence (réanalyses SIM), avec un cas d'étude sur les Alpes, particulièrement intéressantes de par leur topographie et par leurs contrastes climatiques régionaux . On y a effectivement observé une relation entre la couverture de neige en février et la température maximale à 2 mètres en avril, puis en juillet et en août, avec des distributions spatiales spécifiques : moins il y a de neige en février, et plus la température maximale sera élevée (et inversement). Localement , ces rétroactions expliquent jusqu'à 50% de la tendance au réchauffement observée sur la température estivale, pour la période 1960-2007.

L'étude des mécanismes associés à ces rétroactions a permis d'élaborer deux hypothèses principales. Dans le sud, la rétroaction a lieu en avril, soit avec un décalage de 2 mois. C'est aussi la région où la neige, si présente en février, fond le plus tôt dans la saison. Cette fonte est associée à une température de sol favorisant la condensation de l'eau atmosphérique près du sol, et la formation de brumes bloquant le rayonnement solaire. Dans l'est et le nord, où la température est impactée en juillet et août respectivement (soit avec un décalage de plus de 6 mois), c'est le contenu en eau et la température des sols qui permet de la persistance de l'effet de la neige de février. La fonte au printemps va augmenter l'indice d'humidité du sol, augmentant par là sa capacité thermique ; plus il y a de neige en hiver et plus le sol reste froid, et ce plus longtemps. La température du sol est elle-même fortement corrélée à la température à 2m, via le flux de chaleur sensible.

Suite à l'étude des rétroactions dans les données de référence, il s'agit de vérifier que ces rétroactions existent aussi dans les modèles régionaux utilisés dans l'étude de l'évolution du climat. Notons cependant qu'il n'est pas garanti que les rétroactions mises en évidence pour la période de référence se produisent de la même façon dans une climat modifié. ALADIN présente des schémas spatiaux ressemblant à ceux de SIM concernant les relations entre la couverture de neige hivernale et la température maximale printanière. Néanmoins, les décalages temporels sont sous-estimés dans ALADIN, avec seulement 2 mois au maximum pour observer une corrélation.

Le travail déjà réalisé offre de solides hypothèses quant aux processus physiques réels intervenants dans les Alpes et reliant la température estivale à la neige de l'hiver précédant. On pourrait par la suite s'intéresser aux sorties corrigées par la méthode quantile-quantile, qui modifie probablement les rétroactions existantes.

## Remerciements

Ce projet a été financé dans le cadre du projet ANR-SCAMPEI (ANR VMCS 2008), contrat ANR-08-VULN-0009-01. Merci à Michel Dequé pour les simulations ALADIN Climat.

## Références

- Boé, J., Terray, L. (2008). Uncertainties in summer evapotranspiration changes over Europe and implications for regional climate change, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L05702, doi:10.1029/2007GL032417.
- Boé, J., Terray, L., Habets, F., Martin, E. (2009). Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21<sup>st</sup> century. *Water Resour. Res.*, 45, W08426.
- Brun, E., Martin, E., Simon, V., Gendre, C. and Coléou, C. (1989). An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting. *J. Glaciol.*, 35(121) : 333–342.
- Déqué, M., 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57, 16-26.
- Durand, Y., Brun, E., Mérindol, L., Guyomarc'h, G., Lesaffre, B. and Martin, E. (1994). A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Ann. Glaciol.*, 18 : 65–71.
- Durand, Y., Laternser, M., Giraud, G., Etchevers, P., Lesaffre, B. & Mérindol, L. (2009a). – Reanalysis of 44 years of climate in the French Alps (1958-2002) : Methodology, model validation, climatology and trends for air temperature and precipitation, *J. Appl. Meteor. and Climatol.*, 48, 429-449, doi :10.1175/2008JAMC1808.1.
- Durand, Y., Giraud, G., Laternser M., Etchevers, P., Mérindol L. and B. Lesaffre (2009b). – Reanalysis of 47 years of climate in the French Alps (1958-2005) : Climatology and trends for snow cover, *J. Appl. Meteor. and Climatol.*, 48, 2487-2512, doi:10.1175/2009JAMC1810.1.
- Giorgi, F. (1990). – Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model, *J. Climate*, 3, 941-943.
- Habets, F., Boone, A., Champeaux, J. L., Etchevers, P., Le Moigne, P., Martin, E., Franchisteguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Morel, S., Noilhan, J., Quintana Seguí, P., Rousset-Regimbeau, F., Viennot, P. (2008). – The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France, *J. Geophys. Res.*, 113, D06113, doi:10.1029/2007JDO08548.
- Quintana Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., Morel, S. (2008). – Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 92-107.

## ANNEXE

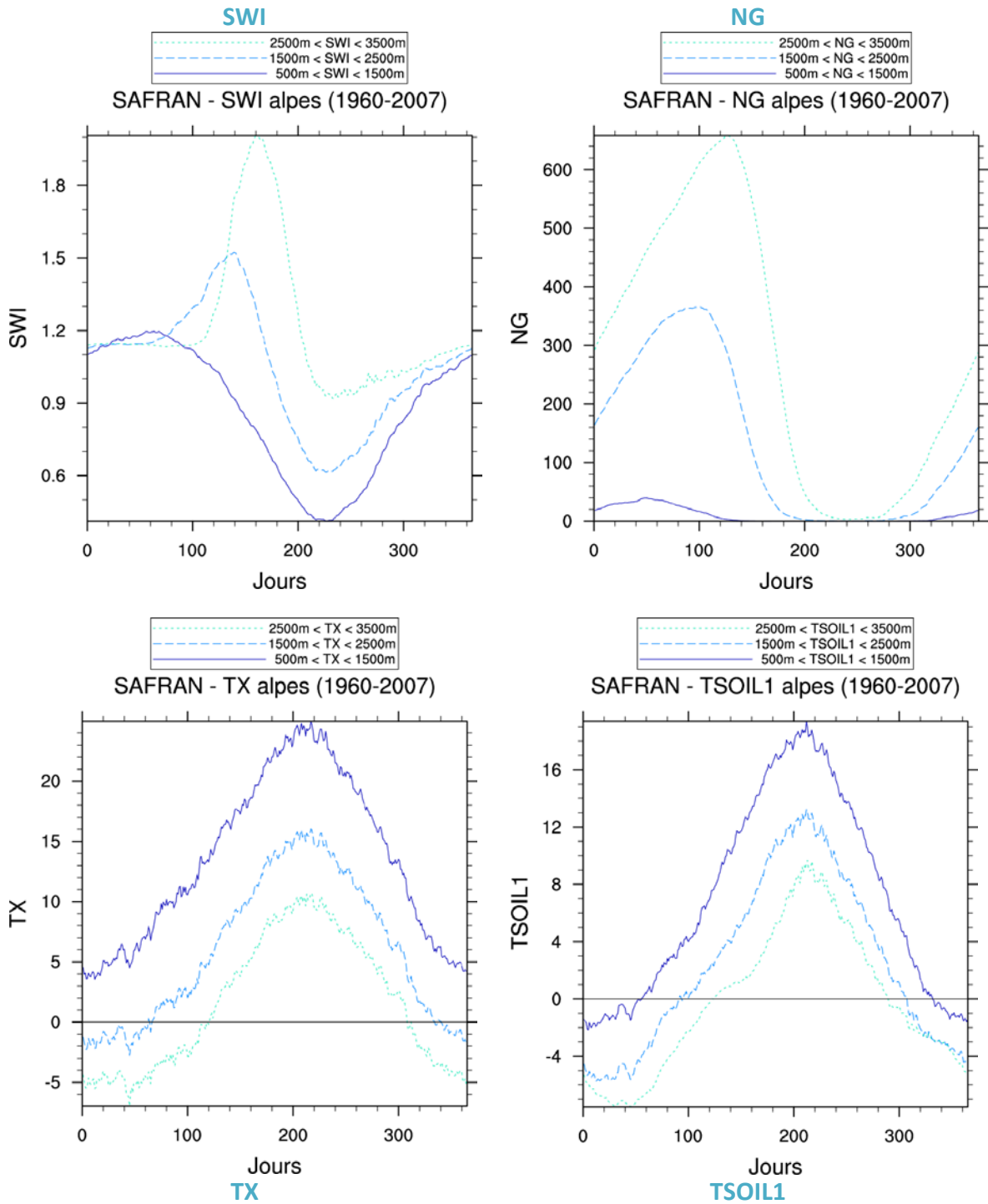
### Lexique des abréviations utilisées pour désigner les variables

<b>ET</b>	Evapotranspiration	<i>(mm/jour)</i>
<b>GLO</b>	Flux solaire descendant	<i>(W/m<sup>2</sup>)</i>
<b>NG</b>	Couverture de neige	<i>(kg/m<sup>2</sup>)</i>
<b>RAT</b>	Infrarouge descendant	<i>(W/m<sup>2</sup>)</i>
<b>SHF / LHF</b>	Flux de chaleur sensible / latente	<i>(W/m<sup>2</sup>)</i>
<b>SWI</b>	Indice d'humidité des sols	<i>(sans dimension)</i>
<b>TG</b>	Température du sol (ALADIN)	<i>(°C)</i>
<b>TN / TX</b>	Température minimale/maximale	<i>(°C)</i>
<b>TSOIL 1, 2</b>	Température du sol (SIM)	<i>(2 couches, °C)</i>
<b>WC</b>	Contenu en eau du sol	<i>(kg/kg dans SIM, kg/m<sup>2</sup> dans ALADIN)</i>



# Cycles saisonniers de SAFRAN-SIM, sur les Alpes (1960-2007)

## Moyennes par classes d'altitude



Couverture de neige climatologique

SAFRAN - NG Clim de 1960 a 2007 (alpes)

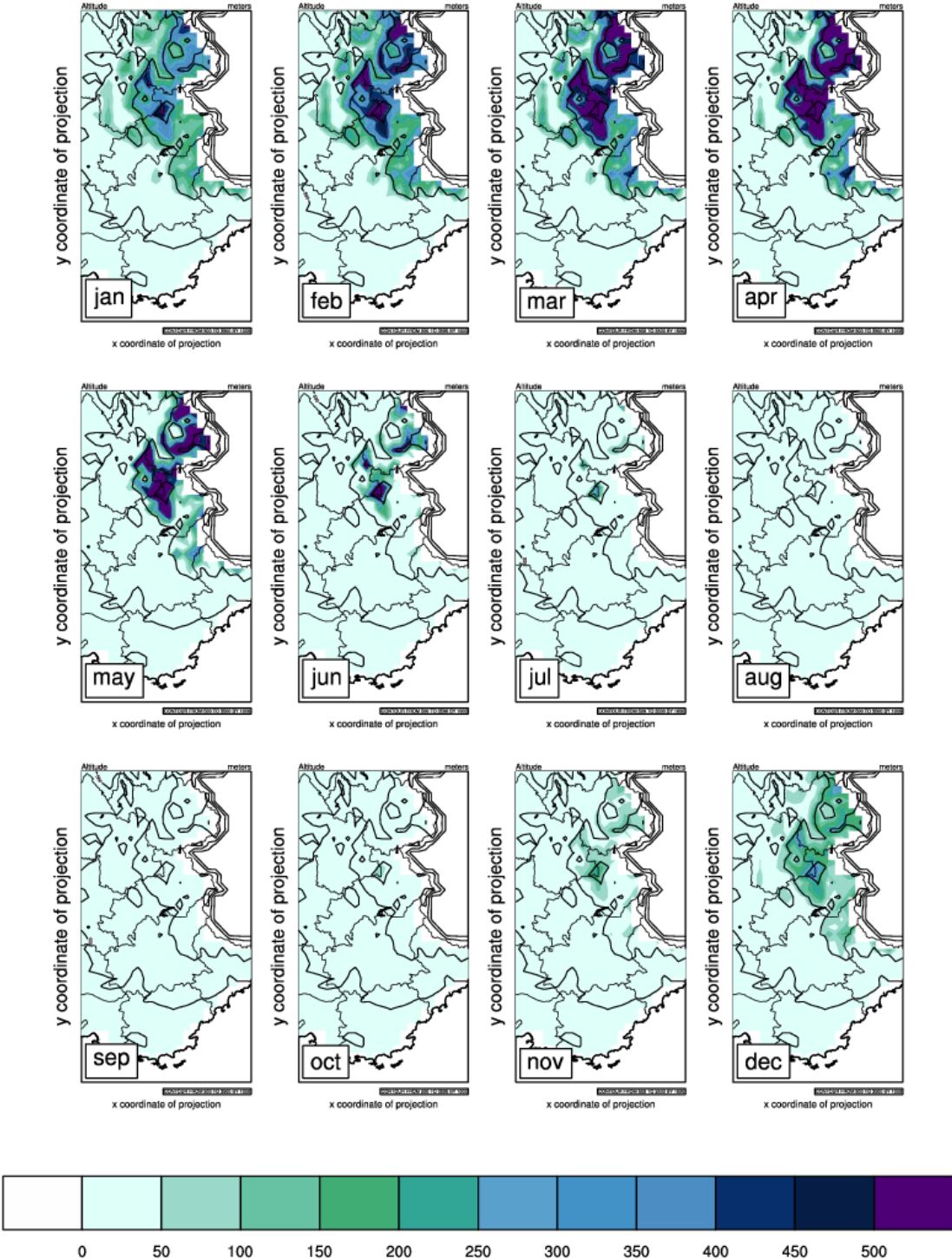
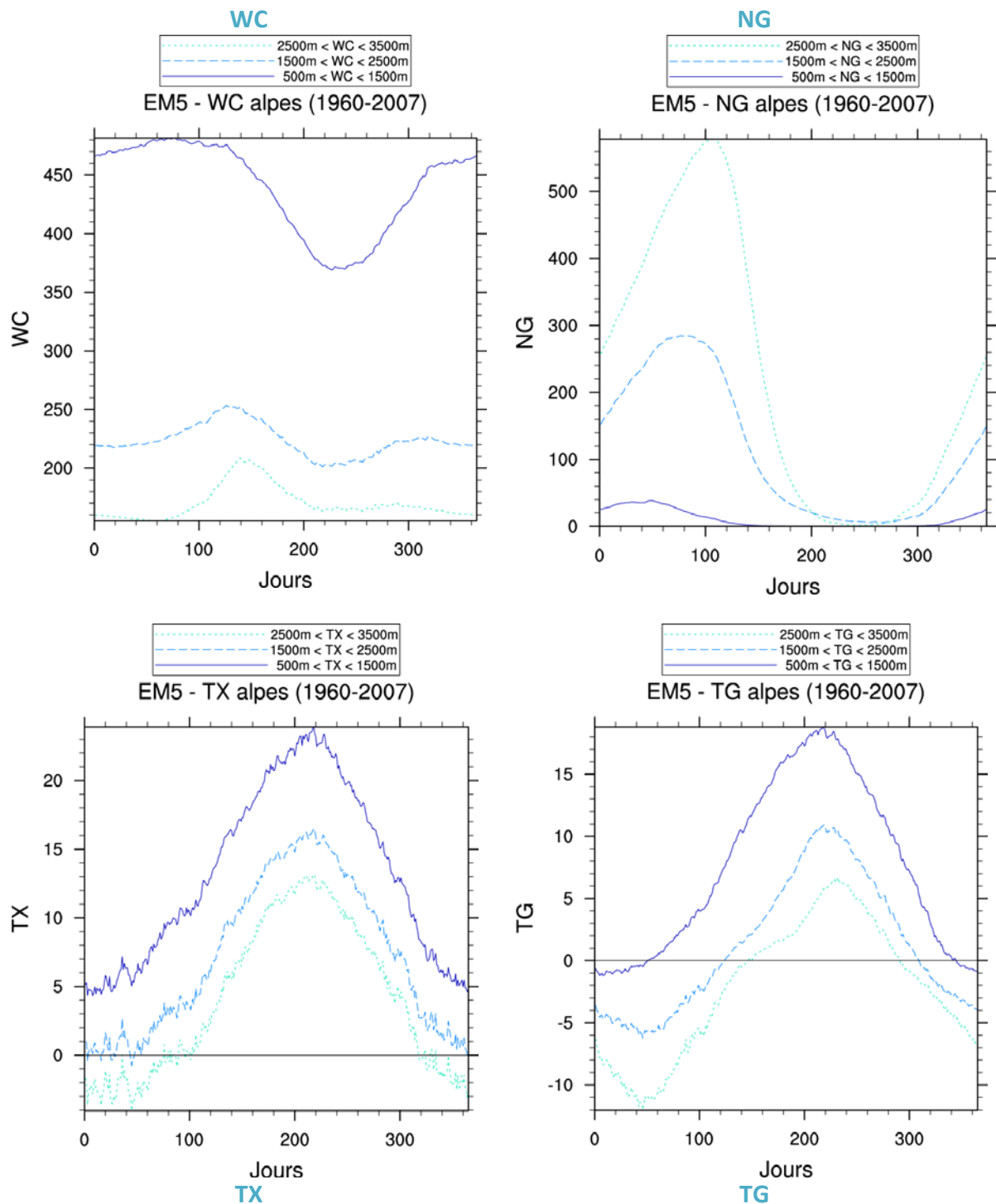


Figure 2 Couverture de neige climatologique de SIM (kg/m²)

# Cycles saisonniers d'ALADIN brut forcé par ERA-Interim (simulation EM5), sur les Alpes (1960-2007)

## Moyennes par classes d'altitude



## Couverture de neige climatologique

### EM5 - NG Clim de 1960 a 2007 (alpes)

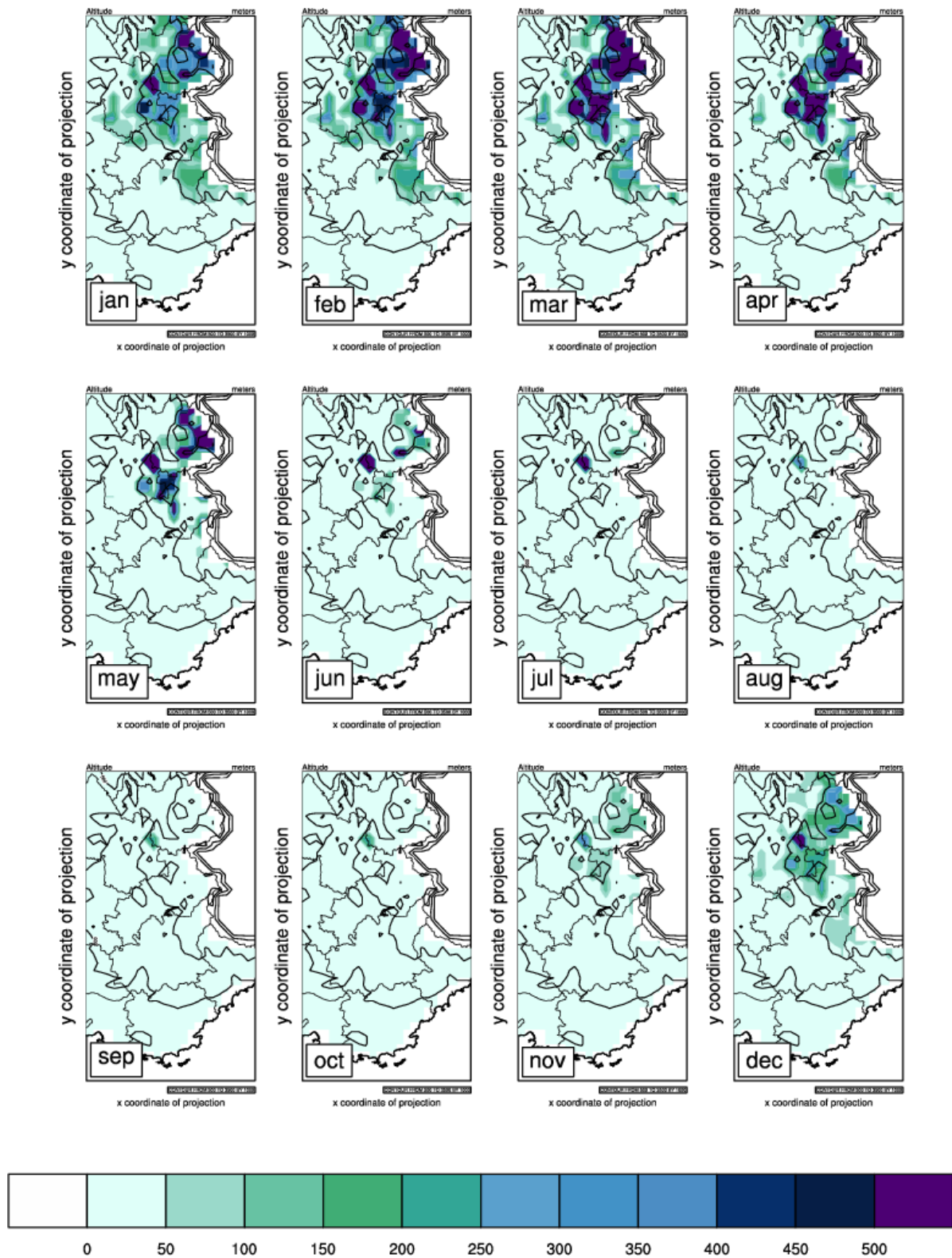


Figure 3 Couverture de neige climatologique d'ALADIN non corrigé ( $\text{kg/m}^2$ )