

Impact du changement climatique sur l'enneigement et le risque d'avalanche à partir de différents scénarii climatiques issus de modèles régionaux de climat (MRC) : application aux Alpes Françaises

Adaptation of current modeled snow covers and avalanche hazards to future climate according several RCM scenarii: application to French Alps.

G. Giraud¹, Y. Durand¹, M. Rousselot¹, L. Mérindol¹, I. Dombrowski-Etchevers¹, M. Déqué²,
H. Castebrunet^{1/3} et N.Eckert³

¹Météo - France/CNRS, CNRM - GAME UMR – 3589/Grenoble/France

²Météo - France/CNRS, CNRM - GAME UMR – 3589/Toulouse/France

³IRSTEA-ETNA/Grenoble /France

RESUME : Cet article présente une partie des résultats du projet ANR SCAMPEI (Scénario Climatique Adapté aux zones de Montagne Phénomènes Extrêmes Enneigement et Incertitudes). Dans ce projet, différents scénarii d'évolution du manteau neigeux sont modélisés pour les Alpes Françaises suite à une désagrégation dynamique de variables météorologiques issues du MRC (Modèle Regional de Climat) Aladin sur une période de référence (1961-1990) puis pour 2 périodes du futur (milieu et fin du XXI^{ème} siècle) et 3 scénarii d'émissions de gaz à effet de serre (GES) B1, A1B et A2. Utilisant des procédures de descente d'échelle et les analyses Safran, toutes les variables sont adaptées au relief des alpes découpé en massif, altitude, exposition et pente.

Ces séries temporelles de paramètres météorologiques issues des analyses Safran sont ensuite fournies au modèle de neige Crocus qui simule le manteau neigeux et son évolution dans les 23 massifs alpins avec une discrétisation vertical de 300 m, différentes expositions et pentes. Les caractéristiques régionales et les variations saisonnières ainsi simulées sont analysées tout comme l'influence des différents scénarii économiques.

Concernant l'enneigement, les résultats indiquent que l'équivalent en eau du manteau neigeux va décroître fortement quels que soient les scénarios climatiques particulièrement dans le sud et l'extrême sud des Alpes à la fin du XXI^{ème} siècle. Quant au danger d'avalanche estimé à partir d'un indice de synthèse journalière du risque d'avalanches modélisé (MEPRA), de premiers résultats en cours d'approfondissement suggèrent qu'il va décroître d'ici le milieu et la fin du siècle en moyenne annuelle/hivernale, et plus fortement en termes de nombre de situations « extrêmes », les plus hauts massifs et les plus au Nord des Alpes étant moins concernés.

Cette étude est à compléter en utilisant d'autres MRC afin de mieux évaluer les incertitudes.

MOTS-CLEF: Changement climatique, modélisation, manteau neigeux, risque d'avalanches.

ABSTRACT: This paper presents parts of the results of the SCAMPEI ANR project. In this project, snowpack scenarios are modelled across the French Alps using dynamically downscaled variables from the French ALADIN Regional Climate Model (RCM) for the control period (1961–1990) and three emission scenarios (SRES B1, A1B and A2) for the mid- and late 21st century (2021–2050 and 2071–2100). All the variables are statistically adapted to the different elevations, aspects and slopes of the Alpine massifs using downscaling procedures and Safran results.

The resulting temporal series of Safran meteorological parameters are then used to run the physical snow model CROCUS and simulate snowpack evolution over the 23 massifs studied in the alpine area with a vertical step of 300m and several aspects and slopes. The seasonal and regional characteristics of the simulated climate and snow cover changes are explored, as is the influence of the scenarios on these changes.

Concerning snow cover, results suggest that the snow water equivalent (SWE) of the snowpack will decrease dramatically in the different GHG scenarios, especially in the Southern and Extreme Southern parts of the Alps and at the end of the century. Regarding avalanche hazard, estimated through a daily index of Mepra avalanche risks for each massif, first results from work in progress suggest that it will decrease in mid century and at the end of the century, the North of the Alps and the highest massifs being less affected. This study needs to be completed using simulations from other RCMs, which will precise the evaluation of the uncertainties of this study

KEYWORDS: climate change, modelling, snowpack, avalanche risk

Corresponding author address: Giraud G rald,
Météo - France/CNRS, CNRM - GAME UMR –
3589/Grenoble/France
tel: +0033 4 76637916; fax: +0033 4 76515346;
email: gerald.giraud@meteo.fr

1 INTRODUCTION

Le projet **ANR-SCAMPEI** : Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes (Déqué, 2010) a eu pour objectif l'évaluation des impacts du changement climatique sur les régions de montagne en France et ses incertitudes à partir de scénarios climatiques à haute résolution spatiale (8-12 km). L'étude du climat, de ses manifestations extrêmes et de ses impacts en zone de relief est compliquée par la complexité géographique et climatique des sites montagneux. Par exemple, 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 au mieux les caractéristiques géographiques du massif étudié. L'échelle des MRC (8-12km) n'étant pour le moment pas suffisante, différentes méthodes de désagrégation statistiques appliquées aux projections de climat futur issues du modèle global ALADIN-Climat (Aire Limitée, Adaptation Dynamique pour la Coopération Internationale, Radu et al. 2008) ont été développées dans SCAMPEI. Une simulation de référence pour la période 1961-1990, et deux projections climatiques pour 2021-2050 et 2071-2100 pour les scénarii d'émissions de gaz à effet de serre (GES) B1, A1B et A2 ont été réalisées. Pour la partie neige et avalanches, une méthode spécifique de descente d'échelle a été appliquée aux sorties d'ALADIN-Climat, ensuite l'impact du changement climatique pour les périodes 2021-2050 et 2071-2100 sur l'enneigement et les risques d'avalanche dans les Alpes a été étudié après avoir validé la méthodologie pour le climat présent (Rousselot, 2012).

2 METHODOLOGIE

La méthode statistique appliquée aux sorties d'ALADIN-Climat pour les applications nivologiques (Rousselot et al, 2012) est une recherche d'analogue simple, basée sur une distance de type Mahalanobis (1936), entre des champs de géopotential Z500 et de température proche du sol (T2m) du MRC et des réanalyses ERA40 (ECMWF, 2004), projetés sur une même grille. La date de la journée analogue d'ERA40 permet ensuite de faire le lien avec des champs météorologiques issus d'une climatologie détaillée des Alpes françaises (Durand et al., 2009a). Cette dernière, obtenue avec la version de SAFRAN adaptée à la modélisation nivologique (Durand

et al. 1999), fournit des données de T2m, d'intensité et phase des précipitations, d'humidité, de vent et de rayonnement de courte et grande longueur d'onde, à échelle du massif montagneux, par tranches d'altitude de 300 m et 6 orientations (N, NE, NO, S, E, O). Ainsi, grâce à cette méthode, des scénarios climatiques détaillés pour les différents massifs des Alpes françaises sont obtenus pour les périodes et les hypothèses d'émission de GES cités précédemment. Ces scénarios sont finalement utilisés en forçage du modèle de neige CROCUS (Brun et al. 1989), qui construit et fait évoluer un manteau neigeux en calculant l'évolution du bilan énergétique de surface, du bilan de masse et du métamorphisme du manteau neigeux. Ensuite, le système expert MEPRA (Giraud, 1995) analyse mécaniquement chaque manteau neigeux simulé et fournit journalièrement un indice de risque naturel modélisé (Martin et al, 2001).

Cette méthode a fait l'objet de validations sur la période de contrôle 1961-1990 (Rousselot et al., 2012) pour différents paramètres météorologiques et nivologiques : type de temps, température de l'air et précipitation et équivalent en eau du manteau neigeux. Les résultats ont montré que la méthode de descente d'échelle n'induit pas de biais et reproduit très fidèlement la moyenne et la variabilité interannuelle des différents paramètres.

3 IMPACT SUR L'ENNEIGEMENT ET L'EQUIVALENT EN EAU

Par comparaison avec la climatologie de Durand et al. (2009b), la figure 1 indique que, même si la variabilité interannuelle reste très forte, la diminution de la hauteur moyenne de neige hivernale actuellement observée dans les Alpes se poursuit très nettement tout au long du siècle à venir. Celle-ci concerne l'ensemble des Alpes, toutes les altitudes et les scénarios du GIEC considérés, même si elle semble un peu moins prononcée sur le Nord des Alpes. Au sein d'une même zone géographique, les altitudes les plus basses sont les plus touchées. Notons que pour les massifs au sud et à l'extrême sud des Alpes, les valeurs aux basses altitudes (1200-1800 m) sont entachées d'un fort bruit car la hauteur de neige y est actuellement déjà faible, de l'ordre de 40 cm à 1800 m en moyenne (Durand et al., 2009b).

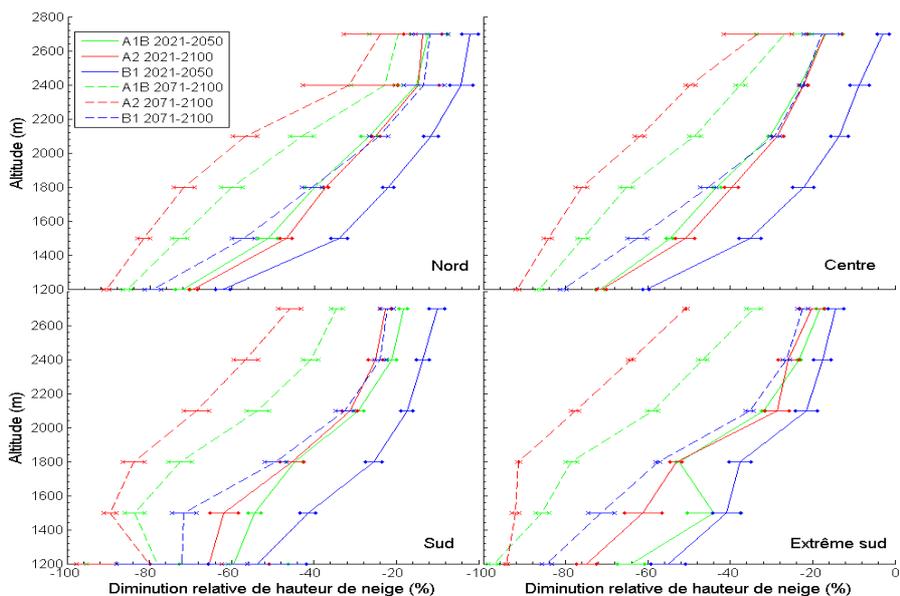


Figure 1 : Evolution relative de la hauteur de neige en fonction de l'altitude par rapport à la période de référence 1961-1990, pour différentes régions des Alpes (Nord, Centre, Sud et extrême Sud) et hypothèses de scénarii d'émissions du GIEC. Les barres horizontales indiquent la déviation standard maximale de la diminution relative de la hauteur de neige. .

La comparaison (figure 2) du nombre moyen de jours sans neige par tranche d'altitude entre les 2 massifs des Alpes Françaises les plus éloignés (Chablais le plus au Nord et Haut Var/Haut Verdon le plus au Sud) apporte une information complémentaire intéressante.

Dans le cas du scénario A2 en fin de siècle, l'enneigement dans le Chablais serait très proche de celui que l'on a eu entre 1960 et 1990 dans le Haut Var/ Haut Verdon soit une remontée vers le nord d'environ 250 km des caractéristiques actuelles d'enneigement.

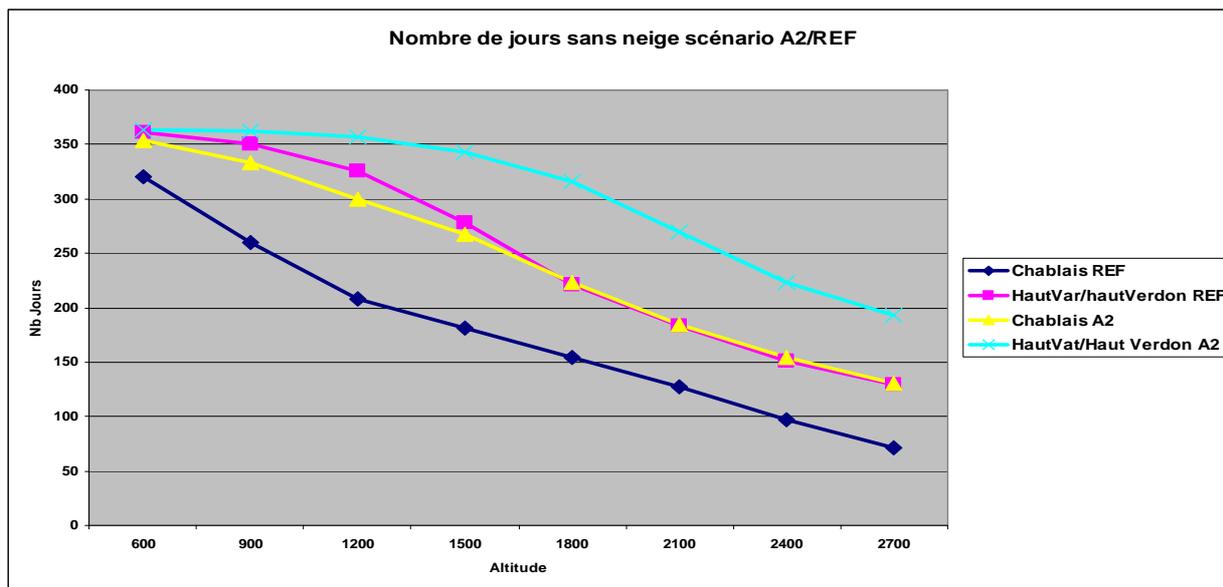


Figure 2 : Comparaison du nombre moyen de jours sans neige par hiver entre le scénario de référence (1961-1990) et le scénario du futur (fin de siècle) pour les 2 massifs les plus éloignés des Alpes (Chablais au nord et Haut Var/Haut Verdon au sud)

Quant à l'évolution de l'équivalent en eau du manteau neigeux, la figure 3 montre qu'il suit la même tendance que la hauteur de neige avec une quasi disparition de la neige à basse altitude (< 1200 m) en fin de siècle pour le scénario A2 notamment dans les Alpes du Sud.

A noter qu'au dessus de 2000m, quel que soit le scénario, la baisse reste faible en milieu de siècle (< 20 %), un peu plus marquée toutefois en fin de siècle notamment dans la tranche 2000/2500 m et pour le scénario A2.

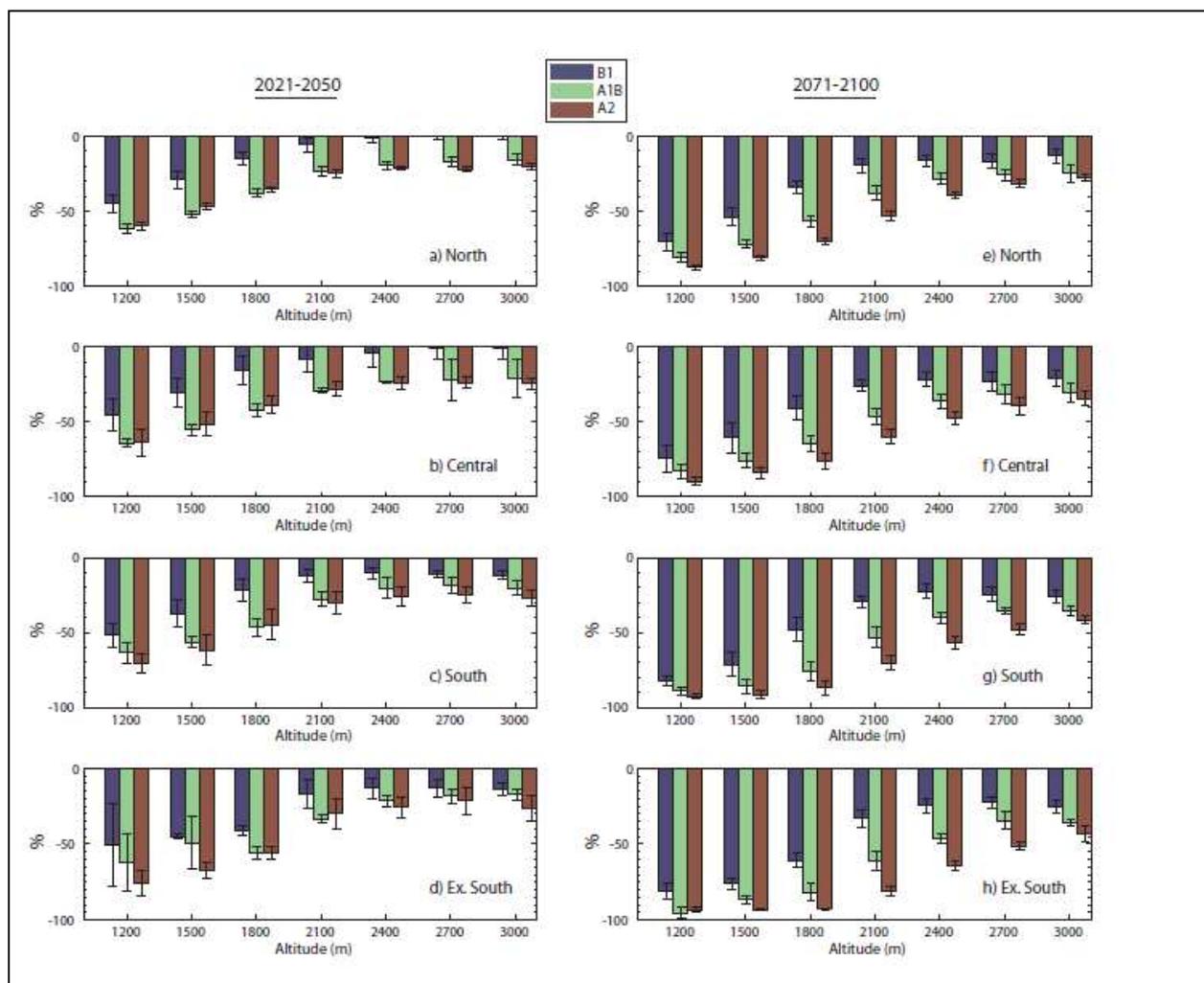


Figure 3 : Evolution de l'équivalent en eau moyen du manteau neigeux modélisé (%) calculé sur la période JFM (Janvier/Février/Mars) fonction de l'altitude et pour 4 zones des Alpes : (a-e) Nord, (b-f) Centre, (c-g) Sud et (d-h) Extrême Sud des Alpes Françaises pour les scénarii B1 (bleu), A1B (vert) et A2 (rouge) et les 2 périodes 2021-2050 (colonne de gauche) et 2071-2100 (colonne de droite). La barre d'erreur indique 1.5 écarts types de la variabilité interannuelle modélisée.

4 IMPACT SUR LE RISQUE NATUREL D'AVALANCHES MODELISE

L'indice de risque naturel d'avalanches modélisé (Martin et al, 2001) sur lequel nous avons travaillé est un indice utilisé opérationnellement par les prévisionnistes avalanches de

Météo-France. C'est une synthèse journalière de toutes les analyses MEPRAs en chaque point (entre 1500 m et l'altitude la plus élevée du massif bornée à 3000 m pour chaque expo-

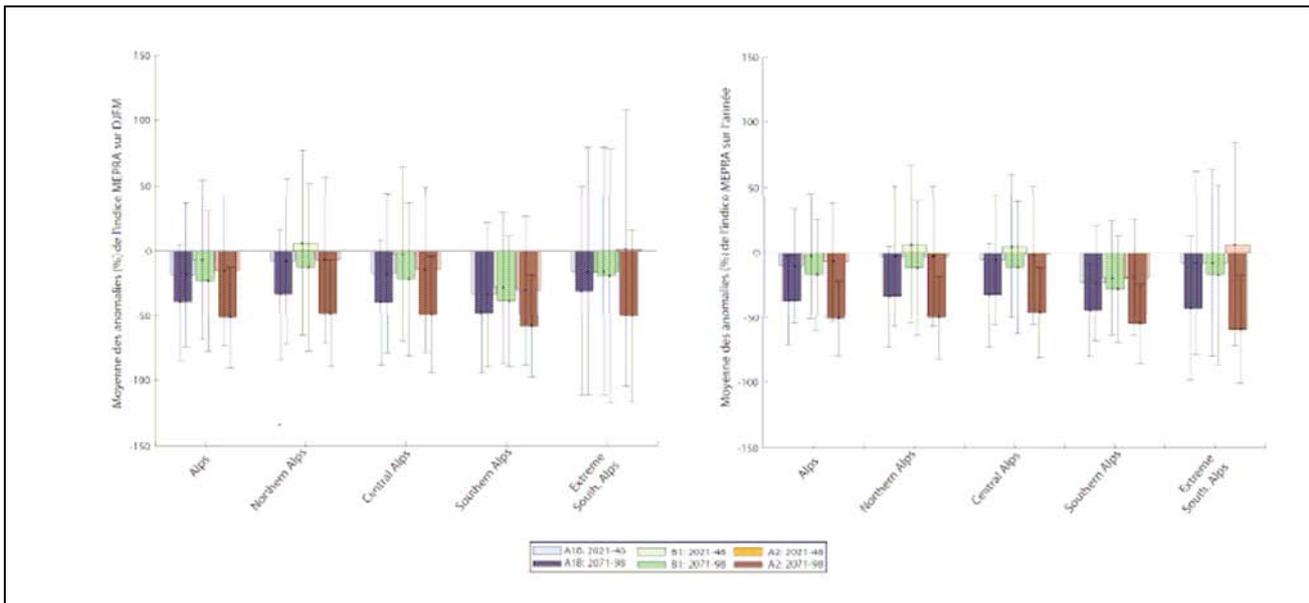


Figure 4 : Anomalies (%) par rapport à la référence de l'indice MEPR : à gauche, à partir des moyennes hivernales et à droite à partir des moyennes annuelles. Les barres d'erreur correspondent à la variabilité inter annuelle.

Une autre manière d'appréhender la problématique est de travailler sur les situations à très fort risque d'avalanches, situations à fort enjeux de sécurité des biens et des personnes et générant très souvent des alertes météorologiques « avalanches ». Ces situations correspondent à des valeurs d'indice de risque naturel d'avalanches modélisé supérieures à 4.

Leur nombre (figure 4) devrait considérablement diminuer en fin de siècle et notamment pour le scénario A2 avec des diminutions de plus de 90%, diminution de 60 à 80% pour les 2 autres scenarii.

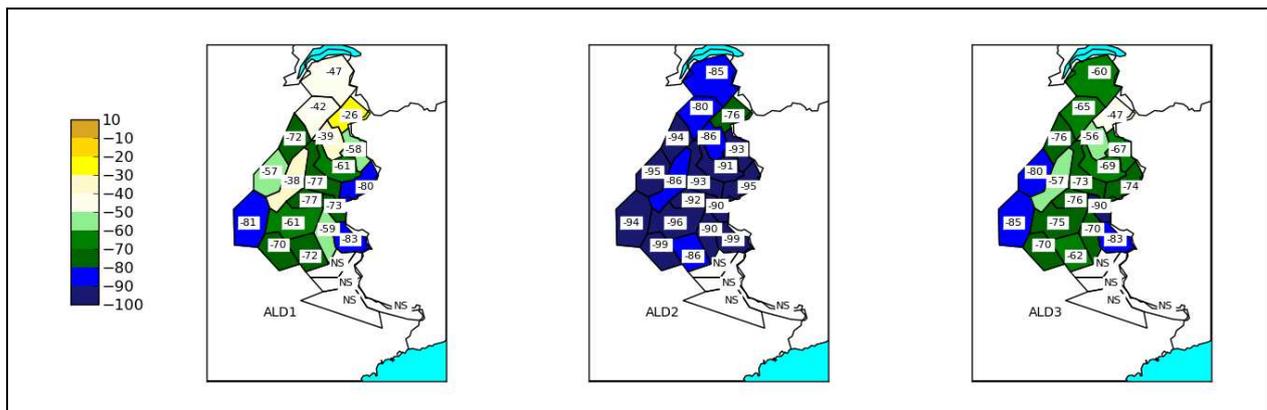


Figure 5 : Anomalie (en %) de l'évolution des situations à très fort risque d'avalanches modélisé en fin de siècle pour le scénario B1 (ALD1), A2 (ALD2) et A1B (ALD3). NS indique une valeur non significative, le nombre de cas étant trop faible.

5 DISCUSSION

Ces premiers résultats concernant l'évolution futur du risque d'avalanche dans les Alpes Françaises restent toutefois tributaires des hypothèses effectuées. En particulier, si la technique de descente d'échelle utilisée permet de mieux appréhender les situations extrêmes, des incertitudes persistent sur la modélisation des situations à fortes précipitations neigeuses en zone de montagne par les MRC. Quant à l'indice de risque naturel modélisé, il a été mis au point sur la période de référence, de sorte que sa pertinence en climat changé

6 CONCLUSION

L'objectif du projet SCAMPEI était d'évaluer l'impact du changement climatique en zone de montagne en réalisant un focus sur l'enneigement et le risque d'avalanches dans les Alpes. L'utilisation d'un outil spécifique de descente d'échelle a permis de modéliser le climat futur, l'enneigement et les risques d'avalanches à l'échelle d'un massif en utilisant la chaîne de modélisation Safran-Crocus-Mépera.

Les quelques résultats détaillés dans ce papier démontrent la pertinence de cette utilisation couplée de la modélisation du climat et du manteau neigeux pour mieux appréhender les conséquences du changement climatique en zone de montagne (enneigement, ressource en eau de fonte et activité avalancheuse notamment).

Les conclusions principales que l'on peut tirer de ce travail sont :

- des différences en fonction du scénario considéré (B1, A1B et A2), notamment au niveau des équivalents en eau et du nom-

reste à vérifier. Enfin, de par sa construction, cet indice donne de meilleurs résultats en situation hivernale (avalanches spontanées de neige récente sèche) qu'en situation printanière (avalanches de neige humide), ce qui pourrait impliquer une sous-estimation de l'activité avalancheuse en climat changé plus chaud. Des travaux sont donc en cours pour approfondir cette première approche en couplant les simulations SAFRAN CROCUS issues de cette étude, des indices d'activité avalancheuses dérivés de l'activité naturelle observée et de ses paramètres nivo-météorologiques de contrôle (Castebrunet, 2012) et des techniques statistiques d'analyse de séries temporelles adaptés (Eckert, 2013).

bre de situations avalancheuses extrêmes.

- un sensibilité marquée du changement climatique modélisé à l'altitude, avec des réductions significatives des hauteurs de neige et de l'équivalent en eau du manteau neigeux en dessous de 2000 à 2400 m, en particulier pour le risque naturel d'avalanches, les massifs peu élevés étant les plus impactés par la réduction prévue dans le futur.
- les Alpes du Sud et extrême Sud des Alpes nettement plus sensibles notamment en fin de siècle (période 2071–2100).

De nombreuses incertitudes liées aux scénarii d'émissions de GES mais aussi aux imperfections de la modélisation du climat, de la méthode de descente d'échelle, de la modélisation de la neige et de l'évaluation du risque d'avalanche (indice d'instabilité) perdurent. La quantification de ces incertitudes reste un des axes majeurs des recherches à mener dans les années à venir.

7 REFERENCES

- Brun E., Martin E., Simon V., Gendre C., Coléou C., 1989. An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting. *J. Glaciol.*, **35(121)** : 333–342.
- Castebrunet, H., Eckert, N., Giraud, G., 2012, Snow and weather climatic control on snow avalanche occurrence fluctuations over 50 yr in the French Alps, *Climate of the Past*, 8: 855–875.
- Dequé M, 2010. Regional climate simulation with a mosaic of RCMs, *Meteorologische Zeitschrift*, 19 (3): 259-266
- Durand, Y., Giraud, G., Brun, E., Merindol L., and Martin, E., 1999. A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting, *J. Glaciol.*, 45(151): 469–484
- Durand Y., Laternser M., Giraud G., Etchevers P., Lesaffre B., Méridol L., 2009. - 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.
- Durand Y., Giraud G., Laternser M., Etchevers P., Méridol L., Lesaffre B., 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.
- Eckert, N., Keylock, C. J., Castebrunet, H., Lavigne, A., Naaim, M. (2013). Temporal trends in avalanche activity in the French Alps and subregions: from occurrences and runout altitudes to unsteady return periods. *Journal of Glaciology*. Vol. 59, issue 213 : 93-114.
- Giraud, G., 1992. MEPRA : an expert system for avalanche risk forecasting, *Proceedings of the International snow science workshop, Breckenridge, Colorado, USA* : 97-106.
- Giorgi F., 1990. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model, *J. Climate* : **3**: 941-943.
- Mahalanobis P. C. (1936). - On the generalized distance in statistics, *Proceedings of the National Institute of Sciences of India* , **2(1)**: 49–55.
- Martin, E., Giraud, G., Lejeune, Y., Boudart, G., 2001. Impact of climate change on avalanche hazard, *Annals of Glaciology*, 32 : 163-167.
- Radu R., Déqué M., Somot S., 2008. Spectral nudging in a spectral regional climate model, *Tellus*, **60A**: 898-910.
- Rousselot M., Durand Y., Giraud G., Méridol L., Dombrowski-Etchevers I., Déqué M. and Castebrunet H., 2012. Statistical adaptation of ALADIN RCM outputs over the French Alps – application to future climate and snow cover, *The Cryosphere*, 6 : 785–805