

PROJECTIONS CLIMATIQUES ET CONDITIONS D'ENNEIGEMENT DANS LES MASSIFS MONTAGNEUX FRANÇAIS

Raphaëlle SAMACOÏTS ^(1,3), Samuel MORIN ⁽²⁾, Jean-Michel SOUBEYROUX ⁽¹⁾, Matthieu LAFAYSE ⁽²⁾, Carlo CARMAGNOLA ^(2,4), Hugues FRANÇOIS ⁽³⁾

¹ : Météo-France, Direction de la Climatologie et des Services Climatiques, Toulouse, France

raphaelle.samacoits@meteo.fr, jean-michel.soubeyroux@meteo.fr

² : Univ. Grenoble Alpes, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, CNRM, Centre d'Etudes de la Neige, Grenoble, France - samuel.morin@meteo.fr, matthieu.lafaysse@meteo.fr

³ : Université Grenoble Alpes, INRAE LESSEM – hugues.francois@inrae.fr

⁴ : Dianeige, Grenoble, France – carlo.carmagnola@meteo.fr

Résumé : Les territoires de montagne sont particulièrement vulnérables au changement climatique, dont les conséquences affectent en profondeur les écosystèmes et sociétés humaines. Le jeu de données Adamont, panel d'indicateurs atmosphériques et nivologiques, découle des scénarios climatiques Euro-CORDEX corrigés et adaptés sur les massifs montagneux français en utilisant la méthode Adamont. Ce jeu de données offre une perspective détaillée du changement climatique en montagne et alimente plusieurs projets et études traitant des problématiques d'agro-pastoralisme et fiabilité de l'enneigement pour les stations de ski.

Mots-Clés : changement climatique, régions de montagne, enneigement, tourisme hivernal

Abstract : Mountain regions are particularly sensitive to climate change, its consequences profoundly affecting ecosystems and human societies. The Adamont dataset, which is a panel of atmospheric and snow cover indices, derives from Euro-CORDEX simulations, adjusted to the French mountains using the Adamont statistical adjustment method. This dataset offers a detailed perspective of climate change in the mountains and feeds several projects and studies dealing with issues of agro-pastoralism and reliability of snow cover for ski resorts.

Keywords : climate change, mountain regions, snow cover, winter tourism

Introduction

L'enneigement saisonnier actuel et futur constitue un sujet d'intérêt dans les régions montagneuses françaises, où le tourisme des sports d'hiver et l'hydroélectricité sont des contributeurs importants au revenu régional. Les questions de changements de débits fluviaux associés, leurs conséquences sur la gestion de la ressource en eau, la vulnérabilité future des écosystèmes alpins ainsi que l'occurrence d'aléas tels que les glissements de terrain, éboulements rocheux ou avalanches, sont également un sujet de préoccupation. Cet article a pour objet de présenter les données d'entrée et la méthodologie adoptée pour la production du jeu de données Adamont, panel d'indicateurs atmosphériques et nivologiques couvrant l'ensemble des massifs montagneux français. Des exemples d'analyse et possibilité d'exploitation de ce jeu de données sont ensuite développées.

1. Méthodologie et données d'entrée

Les scénarios climatiques CORDEX ne peuvent être directement utilisés pour des études locales ces scénarios présentant des biais systématiques par rapport aux observations. La méthode de correction statistique de biais ADAMONT (Verfaillie D. et al 2017) permet de corriger les scénarios climatiques, sur la

base d'une réanalyse de référence S2M version 2019 (Vernay M. et al. 2019) et donc d'adapter ces simulations à des données locales.

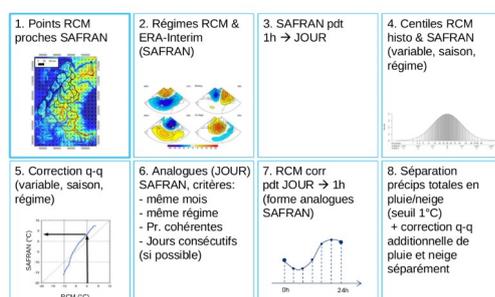


figure 1 : Étape de traitement de la méthode Adamont

Les différentes étapes de cette correction sont décrites ci-dessous :

- une sélection des points des modèles climatiques les plus proches des centroïdes des massifs définis dans la réanalyse de référence S2M est effectuée (1),
- 4 régimes de temps, basés sur une analyse du géopotential à 500hPa sont calculés, ceci pour chaque GCM et pour la réanalyse S2M, en utilisant dans ce cas la réanalyse européenne ERA-Interim. (2),
- la correction quantile-quantile univariée, différenciée par saison et régime de temps, s'applique sur des données journalières pour l'ensemble des variables atmosphériques (température, humidité, précipitations, vent, rayonnement) (4,5),
- les données journalières issues de l'étape (5) sont désagrégées au pas de temps horaire, en utilisant les données de la réanalyse S2M horaires et suivant une recherche de journée analogue (6,7). Différents critères sont appliqués afin de respecter au mieux le cycle journalier de la variable considérée,
- un raffinement de la correction est appliqué aux quantités de précipitation liquide et solide (pluie et neige) (8)

Ainsi, la méthode a l'avantage de produire des jeux de données climatiques à un pas de temps horaire, permettant la réutilisation directe de ces scénarios dans des chaînes de modélisation de surface. Nous avons utilisé la chaîne de modélisation de surface nivo-météorologique SURFEX Crocus Resort (Spandre P. et al. 2016), qui intègre le damage et la production de neige de culture (Hanzer, F. et al. 2020). Quatre configurations ont été implémentées : neige naturelle, avec damage seul, avec damage et productions de neige de culture par lances ou ventilateurs (figure 2).

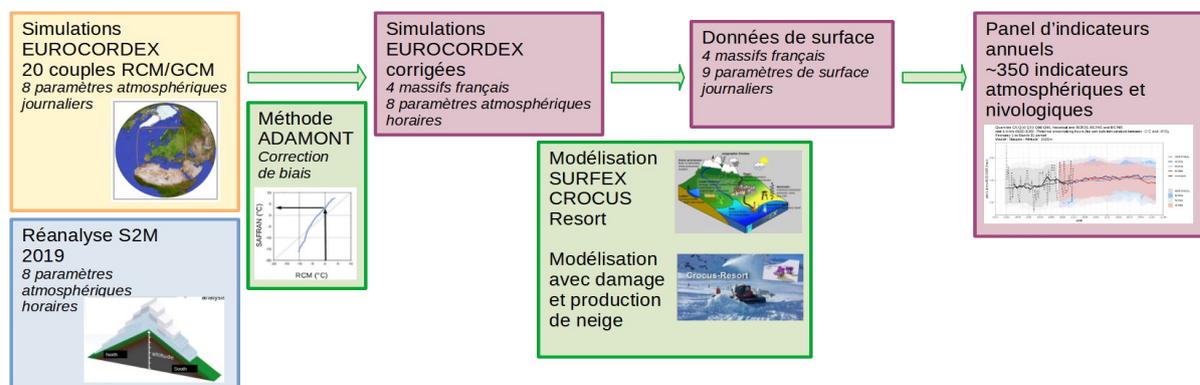
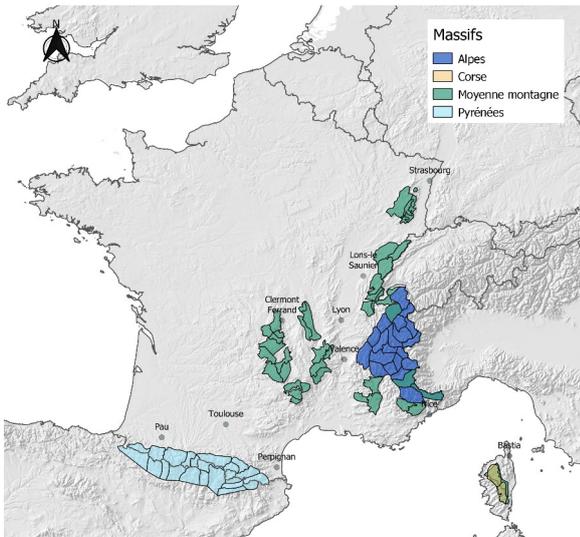


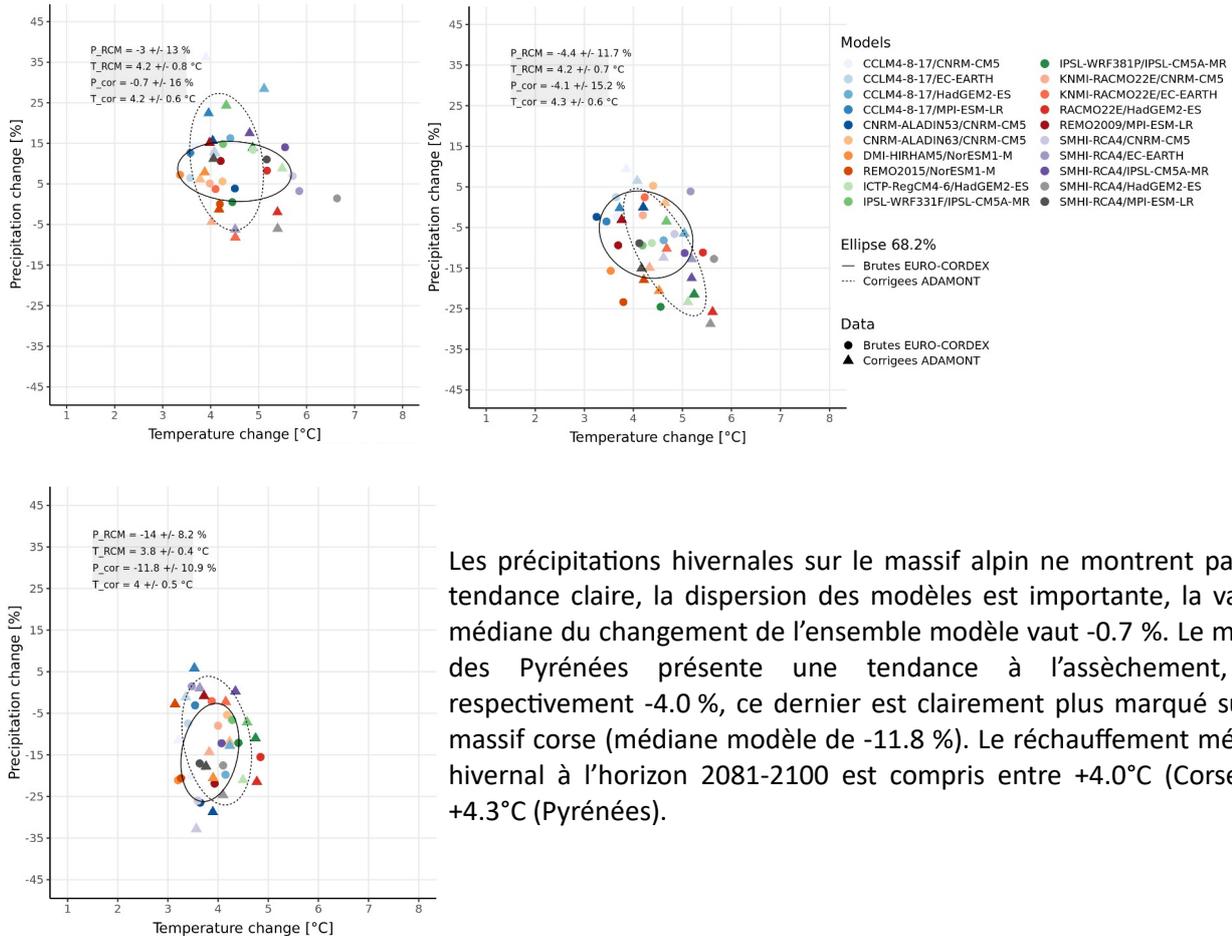
figure 2 : Schéma de production des données Adamont



Les données produites couvrent 4 ensembles montagneux français : Alpes (263 points), Pyrénées (232 points), Corse (18 points) et massifs de moyenne montagne (Vosges, Jura, Massif central, Alpes du Sud, Corse, 242 points), voir figure 3. Ces ensembles montagneux sont divisés massifs ou zones dites "symposium" (pour la moyenne montagne), climatologiquement homogènes, par tranche d'altitude de 300 m. Les données ont également été déclinées plus finement, en fonction des orientations et degré de pente, pour chaque altitude. Vingt simulations Euro-CORDEX, dont les 12 simulations sélectionnées dans le jeu DRIAS 2020 sur la France métropolitaine, déclinées en 3 scénarios de gaz à effet de serre RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5, ont été traitées dans le cadre de cette étude.

figure 3 : Carte des massifs traités

Les graphiques suivants (figure 4) présentent l'évolution de la température (°C) et des précipitations totales (%) à l'horizon 2081-2100 pour le scénario RCP8.5 et la saison hivernale, par rapport à la période de référence 1976-2005. Les données de chaque couple, brut et corrigé par la méthode Adamont, ont été agrégées à l'échelle des massifs des Alpes, Pyrénées et Corse.



Les précipitations hivernales sur le massif alpin ne montrent pas de tendance claire, la dispersion des modèles est importante, la valeur médiane du changement de l'ensemble modèle vaut -0.7 %. Le massif des Pyrénées présente une tendance à l'assèchement, de respectivement -4.0 %, ce dernier est clairement plus marqué sur le massif corse (médiane modèle de -11.8 %). Le réchauffement médian hivernal à l'horizon 2081-2100 est compris entre +4.0°C (Corse) et +4.3°C (Pyrénées).

figure 4 : Evolution relative des précipitations totales (%) en fonction de l'évolution des températures (°C) – horizon fin de siècle 2081-2100 pour le RCP8.5 – saison hiver. Alpes (haut-gauche), Pyrénées (haut-centre), Corse (bas-gauche)

Tableau 1 : Evolution des précipitation et température hivernales à l'horizon 2081-2100 pour le RCP8.5

		Evolution médiane par rapport à la période historique 1976-2005	
	Ensemble modèle	Précipitations totales (%)	Température (°C)
Alpes	brut	-3.0	+4.2
	corrigé	-0.7	+4.2
Pyrénées	brut	-4.4	+4.2
	corrigé	-4.1	+4.3
Corse	brut	-14.0	+3.8
	corrigé	-11.8	+4.0

2. Indicateurs atmosphériques et nivologiques

Un panel d'indicateurs atmosphériques et nivologiques annuels a été produit à partir des données corrigées de forçage et des sorties du modèle Crocus. Ces indicateurs, calculés pour chaque modèle de climat, couvrant la période 1950 – 2100, permettent la représentation du climat et des conditions d'enneigement moyens ; d'autres indicateurs ont été développés pour servir à des applications plus spécifiques, pour l'hydrologie ou le tourisme hivernal (tableau 2).

Tableau 2 : Description des indicateurs atmosphériques et nivologiques

Type	Exemple d'indicateur
Température (°C)	Température moyenne saisonnière, annuelle, mensuelle
Précipitation (kg/m ²)	Précipitations totales hivernales, annuelles
Hauteur de neige (m)	Hauteur de neige moyenne hivernale, annuelle
Nombre de jours dépassant un certain seuil de hauteur de neige ou d'équivalent en eau du manteau neigeux (jour)	Nombre de jours dont la hauteur de neige au sol est supérieure à 30 cm de neige, dont l'équivalent en eau du manteau neigeux est supérieur à 100 kg/m ²
Équivalent maximum en eau du manteau neigeux (kg/m ²)	Équivalent en eau du manteau neigeux au 1 ^{er} avril
Date de début et de fin de saison (jour julien)	Dates de début et de fin d'un couvert de neige continu et le plus long, de 5 cm
Nombre d'heures vérifiant une plage de température humide pour la production de neige (heure)	Nombre d'heures dont la température humide calculée entre le 01/11 et le 31/12 est inférieure à -2°C
Quantité de neige de culture produite (kg/m ²)	Quantité de neige totale produite par ventilateurs sur une année hydrologique

Des visualisations graphiques ensemblistes, prenant en compte la dispersion de l'ensemble des modèles étudiés (évolution temporelle, profil altitudinal, boxplot, carte) ont été générées pour chaque indicateur. Sont présentés ci-après quelques exemples d'analyse pour le massif de la Haute-Ariège (figures 5 et 6).

Le réchauffement à moyen terme 2041-2060 est globalement constant selon l'altitude, la médiane de l'ensemble des modèles montre un réchauffement moyen de +1.0°C pour le RCP2.6, +1.2°C pour le RCP4.5, +1.9°C selon RCP8.5 et par rapport à la période historique 1986-2005. La dispersion et la variabilité interannuelles des 20 modèles étudiés sont quantifiées par l'écart entre les percentiles P10 et 90.

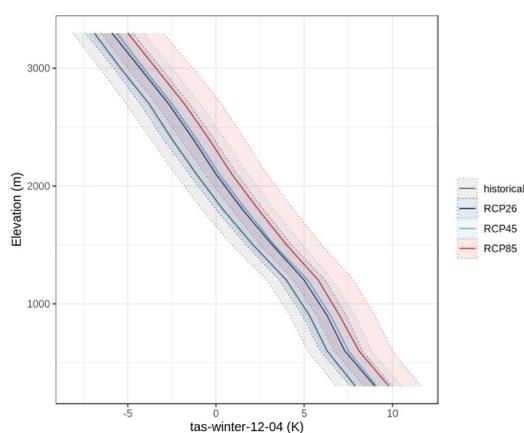


figure 5 : Profil altitudinal de la température hivernale décembre - avril. Percentile 10, médiane, percentile 90 de l'ensemble des modèles sur la période 2041-2060, selon les RCPs pour 2041-2060

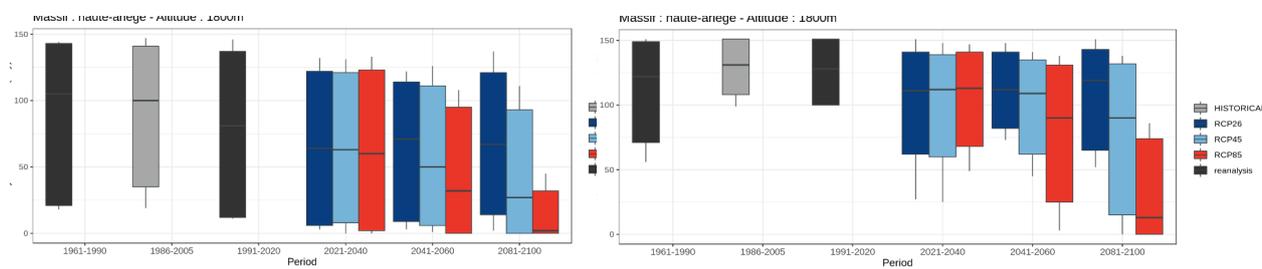


figure 6 : Nombre de jours annuel dont la hauteur de neige est supérieure à 30 cm, en neige naturelle (noté NN, gauche), avec damage et production de neige avec lances (noté LANCE, droit) – massif de la Haute-Ariège – altitude 1800 m.

La figure 6 présente l'évolution selon les RCPs et horizons temporels du nombre de jours annuels dont la hauteur de neige est supérieure à 30 cm, ceci pour 2 configurations de neige Crocus Resort, en neige naturelle et production de neige et effet du damage. En neige naturelle et pour le scénario RCP4.5, l'indicateur décroît graduellement au fil des horizons, passant de 100 jours (médiane) sur la période historique à 63 jours à l'horizon proche et 27 jours en fin de siècle. La gestion de la neige en configuration LANCE sécurise l'enneigement et réduit la variabilité interannuelle importante, intrinsèque à la configuration NN. Elle permet en moyenne 1 mois d'enneigement supplémentaire sur la période historique 1986-2005 (131 jours). L'indice d'enneigement décroît, de 112 jours sur l'horizon proche à 90 jours pour la période 2081-2100.

Tableau 3 : Percentile 10, 90, médiane de l'indicateur « Nombre de jours annuel dont la hauteur de neige est supérieure à 30 cm » pour les configurations de neige NN et LANCE, scénario RCP4.5

RCP4.5 nombre de jour annuel	P10		P50		P90	
	NN	LANCE	NN	LANCE	NN	LANCE
1986-2005	35	108	100	131	141	151
2021-2040	8	60	63	112	121	139
2041-2060	1	62	50	109	111	135
2081-2100	0	15	27	90	93	132

3. Conclusion et perspectives

Le jeu de données Adamont complète les projections climatiques déjà disponibles sur la France métropolitaine via le portail de données climatiques DRIAS. Les données produites sont actuellement utilisées dans le cadre de ClimSnow ⁽¹⁾ (François et al., AIC 2022). Ce service climatique, développé par l'INRAE, Météo-France (CNRM) et le bureau d'études Dianeige, permet d'évaluer la fiabilité de l'enneigement à l'échelle d'un domaine skiable. Outil d'aide à la décision et déjà mis en œuvre pour une centaine de stations françaises, ClimSnow délivre une information précise et locale, et permet d'accompagner les gestionnaires de stations de ski et acteurs du tourisme pour l'aménagement du territoire. Ces données ont également alimenté le dispositif Alpes Sentinelles ⁽²⁾ et le projet européen Alpine Drought Observatory ⁽³⁾, tous deux en partenariat avec l'INRAE, et qui visent à mieux comprendre et anticiper les conséquences du changement climatique et des phénomènes de sécheresse en alpage. Ces projets ont permis la production d'indicateurs agro-climatiques (bilan hydrique, ETP, qualification de périodes de sécheresse) sur le massif alpin. Ce jeu de données sera élargi et enrichi aux autres massifs français et mis à disposition sur un portail de données agro-climatique.

Bibliographie

Hanzer, F., Carmagnola, C., Ebner, P., Koch, F., Monti, F., Bavay, M., Bernhardt, M., Lafaysse, M., Lehning, M., Strasser, U., François, H., and Morin, S.: Simulation of snow management in Alpine ski resorts using three different snow models, *Cold Regions Science and Technology*, 172, doi:doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.102995, 2020.

Jean-Michel Soubeyroux, Sébastien Bernus, Lola Corre, Agathe Drouin, Brigitte Dubuisson, Pierre Etchevers, Viviane Gouget, Patrick Josse, Maryvonne Kerdoncuff, Raphaëlle Samacoits et Flore Tocquer. 2020 - LES NOUVELLES PROJECTIONS CLIMATIQUES DE RÉFÉRENCE DRIAS 2020 POUR LA MÉTROPOLE - <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>

Spandre, P., S. Morin, M. Lafaysse, Y. Lejeune, H. François and E. George-Marcelpoil, Integration of snow management processes into a detailed snowpack model, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 125, 48-64, doi: 10.1016/j.coldregions.2016.01.002, 2016.

Verfaillie, D., Déqué, M., Morin, S., and Lafaysse, M.: The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models, *Geosci. Model Dev.*, 10, 4257-4283, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017>, 2017.

Verfaillie, D., Lafaysse, M., Déqué, M., Eckert, N., Lejeune, Y., and Morin, S.: Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps, *The Cryosphere*, 12, 1249-1271, <https://doi.org/10.5194/tc-12-1249-2018>, 2018.

Vernay, M., Lafaysse, M., Hagenmuller, P., Nheili, R., Verfaillie, D., & Morin, S.: The S2M meteorological and snow cover reanalysis in the French mountainous areas (1958 - present) [Data set]. AERIS. <https://doi.org/10.25326/37>, 2019.

(1) <https://www.climsnow.com/>

(2) <https://www.alpages-sentinelles.fr/>

(3) <https://www.alpine-space.org/projects/ado/en/home>