

ÉVALUATION DU MODÈLE ARÔME POUR APPRÉHENDER L'ÉVOLUTION PASSÉE ET FUTURE DU CLIMAT DANS LES ALPES FRANÇAISES

Diego MONTEIRO¹, Cécile CAILLAUD², Raphaëlle SAMACOITS³, Matthieu LAFAYSSSE¹, Samuel MORIN^{1,2}

¹ Univ. Grenoble Alpes, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, CNRM, Centres d'Etudes de le Neige, 38000 Grenoble, France (diego.monteiro@meteo.fr)

² CNRM, Météo-France, CNRS, Université de Toulouse, Toulouse, France,

³ Météo-France, Direction de la Climatologie et des Services Climatiques, Toulouse, France,

Résumé : L'évaluation de simulations climatiques utilisant le modèle non-hydrostatique AROME sur le domaine alpin est une approche nouvelle permise par les récentes simulations lancées au CNRM dans le cadre de l'exercice Flagship Pilot Study "Convection" du programme EUROCORDEX.

Cette étude analyse les caractéristiques en moyenne annuelle à l'échelle de l'ensemble des Alpes françaises de 4 variables (la température de l'air à 2m, les précipitations totales, la fraction solide des précipitations et l'épaisseur de neige) issues des simulations AROME modélisant l'évolution passée et future du climat.

La comparaison des sorties AROME en climat passé avec la réanalyse S2M (SAFRAN – SURFEX/ISBA-Crocus - MEPR) et le modèle de climat régional ALADIN met en avant des caractéristiques que l'on retrouve lors de la comparaison en climat futur. Il s'agit notamment d'un écart froid s'accroissant avec l'altitude, ainsi que l'accumulation excessive de neige au sol. Néanmoins, la meilleure représentation de la topographie et la résolution explicite de la convection profonde semble permettre à AROME de simuler des cumuls de précipitations (totaux et neigeux) et des champs de températures à 2m plus réalistes que le modèle de climat régional ALADIN. Cette étude prépare l'utilisation croissante de modèles de climat à haute résolution pour soutenir le progrès des connaissances et de leur application notamment en matière d'adaptation au changement climatique.

Mots-Clés : CP-RCM, Montagne, Changement climatique, AROME, Neige.

Introduction

Les socio-écosystèmes de montagne sont soumis à de fortes pressions dans le contexte imposé par le changement climatique. Depuis plusieurs années, un nombre croissant d'acteurs régionaux sollicitent la communauté scientifique sur des questionnements relatifs à l'évolution future du manteau neigeux (stations de sports d'hivers, ressources en eaux, devenir des glaciers, avalanches...).

L'occurrence et l'intensité futures des phénomènes extrêmes (vagues de chaleurs, précipitations intenses, orages violents...) pouvant directement porter atteinte à la sécurité des personnes et des biens constituent également une source d'incertitude qu'il devient impératif de qualifier et quantifier en utilisant des outils de modélisations spécifiques (modèles d'impacts) afin de pouvoir mettre en place des mesures d'adaptation efficaces pour prévenir et limiter l'accroissement de l'ampleur des catastrophes à venir (Hock et al., 2019).

Dans ce cadre, la production et l'évaluation de simulations climatiques à fine échelle constituent le socle élémentaire indispensable pour alimenter les modèles d'impacts précisant les évolutions passées et futures du changement climatique.

À l'heure actuelle, les modèles de climat régionaux (RCM) à 12km de résolution au mieux, utilisés par la communauté internationale (EUROCORDEX) sont limités pour qualifier précisément l'évolution des phénomènes météorologiques porteurs d'enjeux en montagnes.

La principale stratégie pour la production de données et d'information climatique mise en place sur le domaine des Alpes françaises repose sur la descente d'échelle statistique assurée par la méthode ADAMONT, qui utilise la réanalyse SAFRAN-Crocus (S2M) comme base d'observation pour l'ajustement (Samacoïts et al. , 2022).

Il existe néanmoins d'autres stratégies s'appuyant notamment sur une descente d'échelle dynamique, qui permet de résoudre explicitement les phénomènes de plus fines échelles, et dont la plus-value sur les régions de montagne a déjà pu être démontrée dans certains cas (Prein et al., 2013). De plus l'utilisation des CP-RCMs (Convection Permitting-RCM) pour l'étude du climat profite d'un élan de la communauté scientifique à l'échelle internationale offrant de belles perspectives dans le domaine (TEAMx, Flagship Pilot Study "Convection" d'EUROCORDEX Coppola et al., (2020).

La présente étude évalue les caractéristiques régionales (moyenne spatiale dans les Alpes françaises) en moyenne annuelle sur une large gamme d'altitudes de simulations AROME récemment produites par le CNRM en climat passé et futur. L'étude porte sur 4 variables : la température à 2 mètres, les cumuls de précipitations, la fraction solide des précipitations ainsi que l'épaisseur de neige.

Les simulations AROME ont dans un premier temps été comparées en climat passé aux simulations ALADIN brutes et à la réanalyse S2M, considérée comme référence d'observation.

Les résultats des projections climatiques suivant le RCP8.5 d'AROME ont ensuite été comparées aux projections climatiques d'ALADIN et d'ADAMONT permettant une comparaison des deux types de descente d'échelle sur la base du même couple GCM/RCM.

1. Données et Méthodes

1.1. Implémentation des simulations

La Figure 1 présente l'ensemble des jeux de données utilisées et indique pour chacun d'entre eux la période couverte.

Dans cette étude, le modèle ALADIN et AROME sont utilisés dans deux configurations d'alimentation de grande échelle différentes : la réanalyse ERA-interim et le modèle de circulation générale CNRM-CM5.

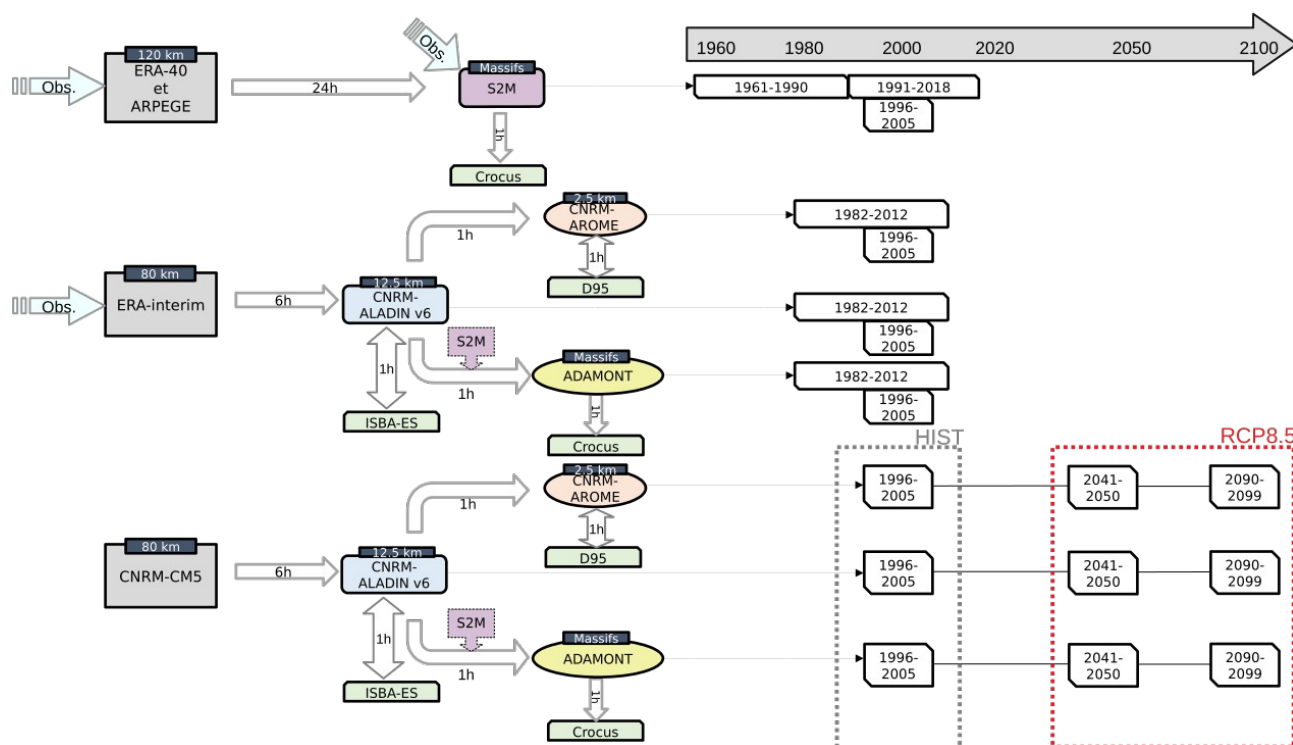


figure 1. Illustration des différents jeux de données utilisés dans cette étude et leurs compositions. En gris, les réanalyses ou modèles planétaires (GCMs), en bleu, les modèles régionaux (RCMs) forcés par les modèles planétaires, en orange, les modèles régionaux à plus haute résolution (descente d'échelle dynamique ou statistique) puis en vert, les modèles de neige donnant accès aux variables d'enneigement. Les flèches larges partent des modèles servant à forcer les modèles régionaux, avec leurs fréquences de forçage indiqués en heures. Les doubles flèches larges indiquent la présence d'un couplage entre deux composants. Les flèches fines pointent vers les périodes pour lesquelles les jeux de données sont exploités dans ce rapport.

La réanalyse ERA-Interim utilisée pour forcer ALADIN chaque 6h permet d'imposer des conditions aux limites du domaine conformes à la chronologie passée des événements météorologiques, pour la période 1982-2012. Dans cette configuration, ALADIN est utilisé comme modèle intermédiaire en transmettant chaque heure les conditions aux limites nécessaires dans la descente d'échelle dynamique assurée par AROME sur la même période ainsi que comme base pour l'ajustement statistique ADAMONT (Samacoïts et al., 2022). C'est sur cette période qu'est effectuée la comparaison des simulations AROME et de la réanalyse S2M.

Le modèle de climat planétaire CNRM-CM5 est utilisé comme forçage du modèle ALADIN pour simuler le climat passé sur la période 1951-2005 ainsi que le climat futur sur la période 2006-2100. De la même façon que pour la période d'évaluation, ALADIN est utilisé comme entrée de la descente d'échelle dynamique AROME et statistique via la méthode ADAMONT.

Trois périodes de 10 ans ont été simulées sur la base de la configuration CNRM-CM5/ALADIN/AROME : 1996-2005 (période historique), 2041-2050 (milieu de siècle), et 2090-2099 (fin de siècle).

Les projections climatiques ont été réalisées sur la base du scénario de concentrations de gaz à effet de serre RCP8.5, correspondant à de fortes émissions tout au long du 21ème siècle.

Ce cadre de simulation à haute-résolution correspond aux choix effectués dans le cadre de programmes internationaux de réalisation de simulations climatiques, notamment l'exercice Flagship Pilot Study "Convection" d'EUROCORDEX.

1.2. Agrégation des simulations AROME et ALADIN sur les massifs S2M

Afin de comparer les simulations AROME et ALADIN à la réanalyse SAFRAN-Crocus (S2M) et aux sorties ADAMONT, les données des simulations ont été regroupées par tranche de 300m d'altitude et par massifs (23 massifs pour les Alpes françaises, voir figure 2). L'étude porte sur la gamme d'altitude allant de 900m à 2700m.

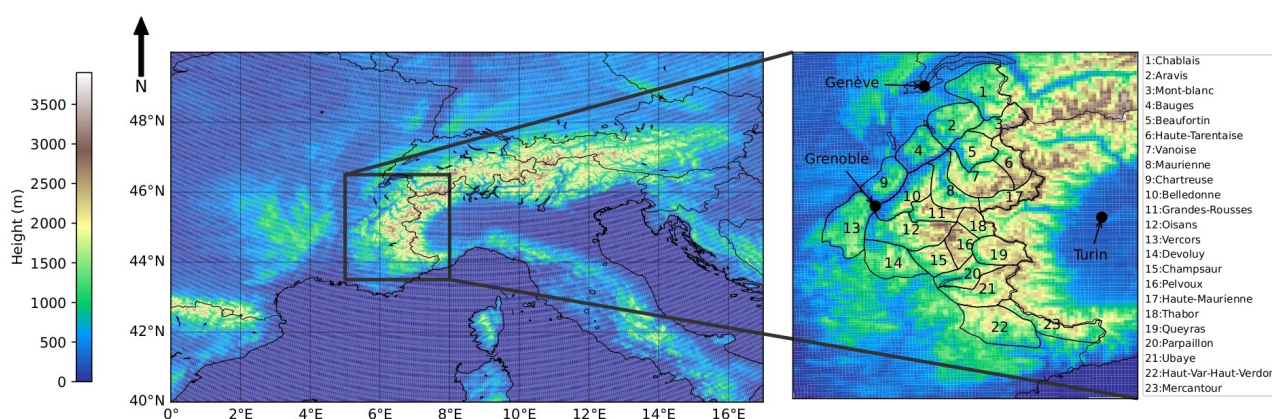


figure 2. Domaine géographique de l'étude. A gauche, la topographie AROME sur le domaine ALP-3. A droite, un zoom sur la topographie AROME couvrant les Alpes françaises, sur laquelle les contours des massifs S2M sont superposés.

Malgré la dégradation de la richesse de la résolution des simulations AROME induite par cette méthode, c'est la seule qui permette de les confronter sur le domaine des Alpes françaises à un produit de réanalyse finement résolu en altitude.

2. Résultats

L'ensemble des graphes de cet article sont des profils altitudinaux, réalisés à l'échelle des Alpes françaises, moyennés en temps sur l'ensemble de la période indiquée. Pour toutes les variables, il s'agit de moyennes ou cumuls annuels. L'épaisseur de neige est exprimée en moyenne sur la période allant de novembre à avril.

2.1. Évaluation d'AROME et ALADIN en climat passé

La figure 3 montre les profils altitudinaux, en moyenne sur la période 1982-2012 pour les simulations ERAi/ALADIN/AROME (AROME), ERAi/ALADIN, ainsi que la réanalyse S2M.

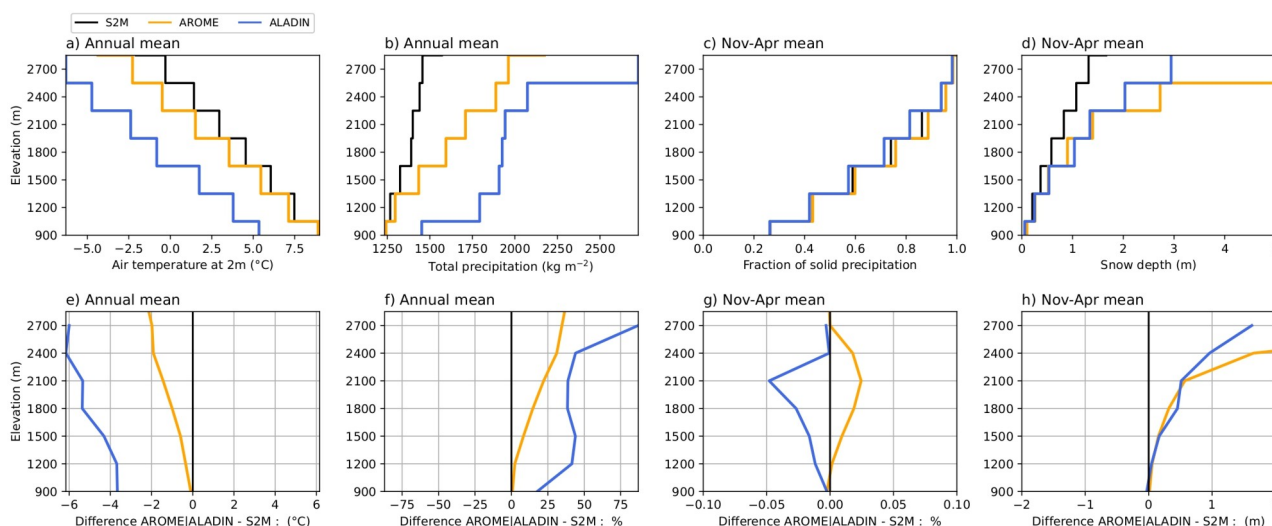


figure 3. Profils altitudinaux des valeurs moyennes annuelles ou hivernales sur la période 1982-2012, pour 4 variables : a) la température à 2m, b) les précipitations totales, c) la fraction solide des précipitations, et d) l'épaisseur de neige. Sur la deuxième ligne, (Figure e),f),g),h)), les différences respectives entre les jeux de données, AROME - S2M (en orange) et ALADIN - S2M (en bleu).

Les simulations AROME et ALADIN fournissent des températures plus basses que S2M sur toute la gamme des altitudes représentées. Cet écart qui augmente avec l'altitude est sensiblement plus élevé entre ALADIN et S2M, il est de -4°C à 900m, tandis qu'il est nul dans AROME, et atteint -6°C à 2700m, seulement -2°C avec AROME.

Les précipitations sont plus abondantes dans les simulations AROME et ALADIN que dans S2M. L'écart des cumuls annuels moyens entre AROME et S2M s'accroît de façon linéaire avec l'altitude, et sont jusque 40% plus élevés à 2700m. ALADIN produit des cumuls encore plus élevés qu'AROME, pouvant aller jusque 85% des cumuls S2M à 2700m.

L'observation de la fraction solide des précipitations ne présente que de faible écart entre les données AROME, ALADIN et S2M, positif pour l'ensemble des altitudes pour AROME, négatif pour ALADIN.

Concernant les épaisseurs de neiges, les deux modèles simulent un manteau neigeux plus épais que ce soit l'altitude considérée, en présentant de nouveau un gradient altitudinal marqué. Notons que les hauteurs de neige simulées par le modèle de neige AROME présentent des valeurs anormalement hautes pour les altitudes supérieures à 2400m.

2.1. Projections climatiques

La figure 4 représente les différences entre les moyennes des périodes 2090-2099 et 1996-2005 pour chacun des jeux de données, permettant de quantifier les signaux du changement climatique simulés par les deux types de descente d'échelle, et ceux du RCM dont ils sont issus. Cette figure montre également la différence entre AROME ou ALADIN et S2M pour la période 1996-2005.

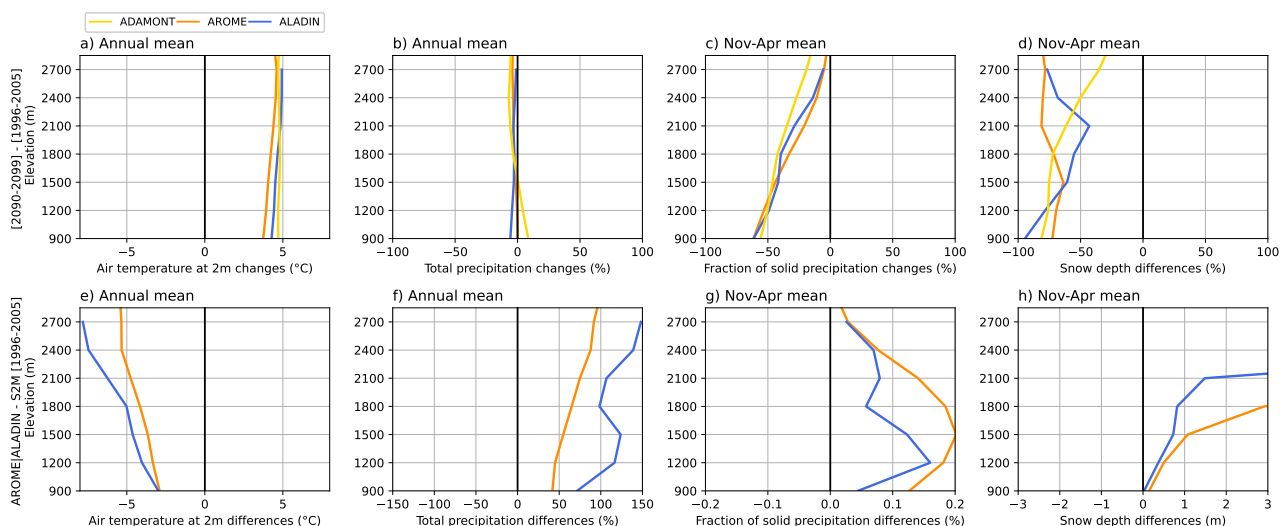


figure 4. Profils altitudinaux, pour 4 variables : a) la température à 2m, b) les précipitations totales, c) la fraction solide des précipitations, et d) l'épaisseur de neige. La première ligne correspond à la différence entre les moyennes des périodes fin de siècle (2090-2099) et début de siècle (1996-2005), pour les données AROME en orange, ADAMONT en jaune et ALADIN en bleu. Sur la deuxième ligne, (Figure e),f),g),h)), les différences respectives entre les jeux de données, AROME - S2M (en orange) et ALADIN - S2M (en bleu), pour la période 1996-2005.

Dans les simulations ADAMONT, les signaux de températures Figure 4.a présentent de faibles variations altitudinales sur la plage d'altitude représentée avec un réchauffement en 2100 de l'ordre de 5°C, tandis qu'AROME et ALADIN simule un réchauffement légèrement moins fort à 900m s'accroissant en l'altitude, augmentant d'un peu plus de 0.5°C entre 900m et 2700m.

Concernant les précipitations, les différences entre début et fin de siècle Figure 4.b sont très faibles pour les trois simulations, des signaux plus marqués sont retrouvés sur les valeurs saisonnières (non montrés ici).

La figure 4.b montre une diminution relative de la fraction solide des précipitations quelle que soit l'altitude et des tendances similaires pour les trois simulations. L'écart relatif est plus marqué en basse altitude (50% de 900m à 1500m), puis diminue en altitude jusque 20% à 2700m.

Les signaux sur les épaisseurs de neiges sont difficilement exploitables en ce qui concerne les simulations AROME et ALADIN qui accumulent de trop grandes quantités de neiges. Sur la figure 4.h, une accumulation de plusieurs mètres de neige est présente, dès 1800m pour AROME, 2100m pour ALADIN.

Cette accumulation neige bien plus importante lors du forçage par CNRM-CM5 (Figure 4.h) que par ERAi (figure 3.h) est à relier à une exacerbation générale des écarts entre S2M et les deux modèles pour l'ensemble des variables analysées: un écart froid plus important (Figure 4.a), une plus grande quantité de précipitations (Figure 4.b) et une plus grande proportion de précipitation neigeuse (Figure 4.c). C'est un axe important de travail futur en vue d'améliorer le fonctionnement et l'exploitation d'AROME, tant pour son utilisation comme modèle de climat que pour son usage en prévision numérique du temps.

Discussion et conclusions

L'étude comparative des simulations AROME forcées par la réanalyse ERA-interim avec la réanalyse S2M et le RCM ALADIN met en évidence certains avantages à l'utilisation d'AROME par rapport à ALADIN. Il s'agit d'un biais froid bien moins marqué que pour ALADIN ainsi que des valeurs de cumuls de précipitations plus proches de la référence.

Les cumuls de précipitations et la phase solide des précipitations plus élevés simulés par AROME par rapport à S2M en climat passé constituent probablement une plus-value intéressante inhérente à l'utilisation des simulations climatiques régionales permettant la convection profonde (CP-RCMs). D'après Vionnet et al., (2019), la fiabilité de la réanalyse SAFRAN sur les précipitations est fortement dégradée en altitude par le manque d'observation, et la défaillance des instruments de mesure dans certaines conditions météorologiques. Bien qu'il soit difficile d'évaluer la qualité des cumuls simulés par AROME à cause du manque d'observations fiables en altitude, il est possible que les précipitations d'AROME à haute altitude soient plus réalistes que celles de la réanalyse S2M.

Néanmoins, certains obstacles persistent à l'utilisation d'AROME, il s'agit notamment d'un biais froid de forte amplitude, bien que moindre que ce lui présent dans les simulations utilisant ALADIN.

Ce biais froid se retrouve sur plusieurs études antérieures, et ne semble pas pouvoir être attribué à un manque de résolution (résolution horizontale) sur les régions de montagnes. Les différentes investigations (Arnould et al., 2021) s'accordent plutôt sur une origine physique internes au modèle, principalement relié à la représentation des interactions surface-atmosphère (justesse du bilan radiatif lié au schéma de microphysique des nuages, défauts du modèle de neige, problème de représentation de la turbulence en conditions stables...).

Ce biais froid peut également être relié aux problèmes d'accumulations de neige. En effet les défauts permettant d'expliquer le biais froid vont également dans le sens d'une sous-estimation des processus de fonte de la neige, et la mise en place de boucles de rétroactions positives entre ce biais froid et l'accumulation erronée de neige sont fortement suspectées, d'autant que leurs installation est facilitée par des cumuls neigeux plus importants dans les simulations AROME.

Ces comportements sont visibles voire amplifiés en projection climatique. Cette amplification peut être due à des caractéristiques intrinsèques d'AROME atténuées sur la période d'évaluation par le forçage d'ERAi, par des caractéristiques froides et humides héritées du modèle CNRM-CM5. De plus amples études pourraient être effectués afin d'identifier précisément l'origine des biais du modèle et de pouvoir proposer des stratégies pour s'en affranchir.

Les défauts analysés ci-dessus limitent la possibilité d'utilisation d'AROME pour analyser directement l'impact du changement climatique dans les Alpes en l'état actuel. Toutefois, ce travail a permis de révéler l'exacerbation des comportements identifiés par des études en prévision numérique du temps (PNT) sur de plus courtes périodes de simulations, montrant l'intérêt d'utiliser des outils de modélisations communs pour des études PNT et climat (Arnould et al., 2021). L'usage de ce type de modèle est particulièrement attendu pour ce qui concerne l'étude des phénomènes intenses voire extrêmes.

Malgré les améliorations évidentes que peuvent apporter l'utilisation de CP-RCM pour décrire le changement climatique futur, les différences observées entre descente d'échelle dynamique et statistique concernant les signaux du changement climatique restent difficiles à évaluer, tant par le manque de bases d'observations robustes finement résolues que par le manque d'une estimation robuste des incertitudes. La réelle plus-value des CP-RCM pourra être effective lorsqu'il sera notamment possible de quantifier plus précisément par des études multi-modèles l'origine de leurs incertitudes, ce qui est possible de façon croissante dans le cadre d'études internationales coordonnées (Flagship Pilot Study « Convection » EURO-CORDEX, voir Coppola et al., 2020).

Bibliographie

- Coppola E, Sobolowski S, Pichelli E, Raffaele F, Ahrens B, Anders I, Ban N, Bastin S, Belda M, Belusic D, et al., 2020 : A first-of-its-kind multi-model convection permitting ensemble for investigating convective phenomena over Europe and the Mediterranean. *Climate Dynamics* **55**(1) :3–34
- Hock R, Rasul R, Adler C, Cáceres B, Gruber S, Hirabayashi Y, Jackson M, Käab A, Kang S, Kutuzov S, Milner A, Molau U, Morin S, Orlove B, Steltzer H., 2019 : High Mountain Areas. In : Pörtner HO, Roberts D, Masson-Delmotte V, Zhai P, Tignor M, Poloczanska E, Mintenbeck K, Alegría A, Nicolai M, Okem A, Petzold J, Rama B, Weyer N (eds) IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, pp131–202
- Prein A, Gobiet A, Suklitsch M, Truhetz H, Awan N, Keuler K, Georgievski G., 2013 : Add edvalue of convection permitting seasonalsimulations. *Climate Dynamics* **41**(9-10):2 655–2677
- Arnould, Gabriel ; Dombrowski-Etchevers, Ingrid ; Gouttevin, Isabelle ; Seity, Yann., 2021 : Améliorer la prévision de température en montagne par des descentes d'échelle. *La Météorologie*, **115**, 37-44.
- Samacoïts, Raphaëlle, Samuel Morin, Jean-Michel Soubeyroux, Matthieu Lafaysse, Carlo Carmagnola, Hugues François, Projections climatiques et conditions d'enneigement dans les massifs montagneux français, Colloque 2022 de l'Association Internationale de Climatologie, Toulouse, 2022.
- Vionnet V, Six D, Auger L, Dumont M, Lafaysse M, Quéno L, Réveillet M, Dombrowski Etchevers I, Thibert E, Vincent C., 2019 : Sub-kilometer precipitation datasets for snowpack and glacier modeling in alpine terrain. *Frontiers in Earth Science* **7** :182