

Annexe : Contributions étendues des partenaires au mémoire

L'ANR demande pour son rapport final un mémoire de cinq pages maximum sous une forme assez synthétique. Aussi, cette annexe permet de détailler, par partenaire, le travail accompli dans le projet.

GAME/GMGEC

Notre contribution au projet s'est déroulée en trois phases :

- la mise en place d'une version d'Aladin à 12 km sur la France et la réalisation des scénarios
- le développement de méthodes statistiques pour passer des sorties des 3 modèles Aladin, LMDZ et Mar à un format identique aux analyses Safran
- la production ou la collecte de cartes et de fichiers pour le site web du projet

Aladin est un modèle qui existe depuis plus de 15 ans à Météo-France pour la prévision à court terme, mais qui n'est utilisé pour des simulations climatiques que depuis moins de 10 ans. Scampei a été l'occasion de mettre en place une version à haute résolution sur un petit domaine (La France et ses voisins immédiats, 12 km). Nous avons d'abord réalisé une simulation de 1960 à 2010 pilotée par les réanalyses du CEPMMT. Nous avons mis en évidence que le climat moyen sur la France était comparable à ce que donne le modèle global Arpege étiré de résolution 50 km sur la France. Par contre la distribution des extrêmes de précipitations et de vents est plus réaliste. A partir de scénarios de l'AR4 du Giec réalisés avec Arpege étiré, nous avons réalisé une simulation continue de 1950 à 2100 en suivant le scénario A1B à partir de 2000. Nous l'avons complétée par quatre simulations de 30 ans couvrant les périodes 2021-2050 et 2071-2100 pour les scénarios A2 et B1.

A partir de ces simulations, des cinq simulations fournies par le LMD et des trois simulations fournies par le LGGE, nous avons produit, par correction statistique, deux familles de données. La famille dite Safran contient des données quotidiennes sur une grille de 8 km de côté (8602 points sur la France). On effectue d'abord une interpolation de la grille du modèle vers cette grille par plus proche voisin. Quand les données ont une fréquence inférieure à la journée, on agrège sur la journée. On fait ensuite une correction quantile-quantile par saison et par régime de temps. Pour chaque saison, le géopotential à 500 hPa a été réparti en 4 classes. L'attribution de régime se fait avec une distance qui ne tient pas compte du réchauffement climatique. Chaque variable est corrigée indépendamment des autres. La méthode quantile-quantile nécessite un traitement particulier pour la nébulosité et l'humidité relative. Comme la correspondance n'est pas inversible en 0% (nébulosité) et en 100% (humidité relative et nébulosité) on doit faire un tirage au sort au lieu d'une correspondance univoque dans ces cas. Il n'y a pas de traitement spécial pour les queues de distribution : aux 99 centiles on ajoute les quantiles 0,5% et 99,5% et on fait une correction constante au delà.

La famille dite Symposium est destinée à piloter le modèle Isba/ES. On produit donc des séries quotidiennes des moyennes, maxima et minima quotidiens sur les 615 zones Symposium (par plus proche voisin). On effectue une correction différente pour chaque tranche d'altitude. On reconstitue des données horaires en tirant une journée au sort dans Symposium et on reconstitue la série horaire en respectant moyenne, maximum et minimum diurne. Un document plus technique contenant les algorithmes et les noms des fichiers est disponible dans l'équipe du projet. La reconstitution des précipitations sous forme pluie ou neige à l'échelle horaire est assez délicate, car il ne suffit pas de conserver les propriétés statistiques des précipitations totales et des températures de manière séparée.

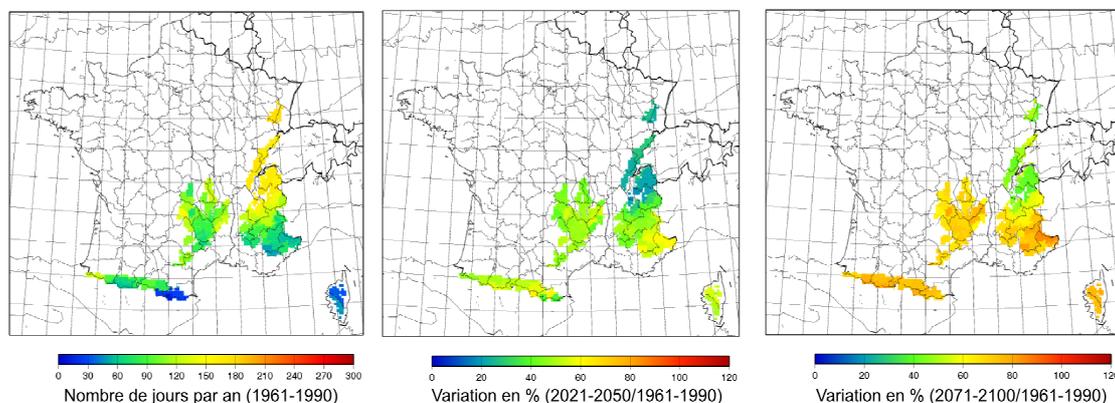
En ce qui concerne le site web, on s'est inspiré du site public mis à disposition en 2004 lors de projet GICC/Imfref. On a toutefois cartographié moins d'indices, car le nombre de scénarios est

nettement plus élevé. Les séries quotidiennes de la famille dite Safran, corrigées et resynchronisées sur des années de 365 jours ont été rassemblées sous forme d'un fichier par variable, avec tous les scénarios en colonne et les jours en ligne. On a utilisé le format du monde Windows pour ne pas décourager les internautes amateurs. Ce site est une base de téléchargement, non un serveur multifonctions. Le visiteur qui ne sait pas traiter des données numériques et veut des cartes qui ne sont pas présentes sur le site doit attendre une vraie offre de service climatique (par exemple Drias).

GAME/GMME

L'enneigement en France a été simulé avec le modèle de neige multicouches Isba-ES (pour explicit snow). Ce modèle est un bon compromis en terme de temps de calcul et de qualité des simulations, lorsqu'on s'intéresse au manteau neigeux en terme de hauteur et masse. Deux types de simulations ont été réalisées : des simulations sur la grille de 8km sur la France, cohérente avec les autres résultats du projet, et des simulations spécifiques par pas d'altitude de 300m pour les régions de montagne. Ces simulations ont pour but l'étude du manteau neigeux hors influence importante des expositions, pentes, de la végétation ou du bâti, les simulations ont donc été faites supposant une couverture végétale de type prairie, sur un terrain plat et sans masque solaire.

L'enneigement français à 1500m (il s'agit d'une extrapolation pour les Vosges, dont le sommet atteint 1424m) augmente de manière générale du sud vers le nord, mais avec des disparités entre massifs. Ainsi, à latitude égale, le nord du massif central est moins enneigé que les Alpes. De même, les Pyrénées présentent de fortes disparités entre l'ouest et l'est de la chaîne. Le gradient d'enneigement orienté nord-ouest / Sud-est dans les Alpes est également reproduit de manière réaliste (Figure 1 pour le nombre moyen de jours avec hauteur supérieure à 5 cm)



Nombre moyen de jours avec hauteur de neige supérieure ou égale à 5 cm.
Altitude 1500m, scénario A1B, moyenne des modèles haute résolution SCAMPEI

Figure 1 : Durée d'enneigement à 1500m

Les variations en pourcentage de la durée moyenne du couvert neigeux (Figure 1) pour le futur proche et le futur lointain (scénario A1B, moyenne des modèles haute résolution du projet) montrent la forte baisse de l'enneigement liée aux scénarios climatiques. Ainsi, les zones dont les variations sont les plus fortes sont les Alpes du sud et la partie centrale des Pyrénées. La diminution peut atteindre jusqu'à 80% de la durée de référence. Néanmoins, l'impact sur les massifs corse et le reste du massif des Pyrénées est limité également par le faible enneigement du temps présent (faible significativité des variations). Les massifs du nord (Alpes du nord, Jura, Vosges), d'une manière générale, présentent une diminution plus faible en pourcentage que les autres massifs.

A la fin du siècle, l'impact sur l'enneigement est très marqué en moyenne montagne. Une des conséquences est qu'il y a peu de différences entre les scénarios A1B et A2 (dès le scénario A1B,

l'enneigement est très réduit).

GAME/CEN

La nécessité de simuler sur les Alpes en climat changé un manteau neigeux réaliste avec un maximum de détails sur sa stratigraphie (50 couches max. dans notre cas) et ses principales caractéristiques physiques est liée à l'objectif d'estimer l'aléa avalanche (en terme de cisaillement potentiel au sein ou entre 2 couches) pour ces nouvelles conditions météorologiques avec le modèle Mepra. Un tel manteau neigeux peut être simulé avec le modèle Crocus couplé au pas horaire avec une estimation des principaux flux énergétiques et massiques reçus par la couche supérieure du manteau neigeux (9 variables horaires). Ce couplage n'utilise pas d'information sur le manteau neigeux lui-même mais uniquement des données issues de l'atmosphère. Pratiquement, le challenge se résume donc à reconstituer ces données de forçage sur 23 massifs alpins, une dizaine d'altitudes, sept expositions et trois pentes, à partir des champs météorologiques disponibles des RCM utilisés dans le projet afin de quantifier et de mettre en évidence pour un ensemble de variables nivologiques la variabilité des résultats induits par l'utilisation de différents modèles sur plusieurs scénarios pour deux périodes du 21^{ème} siècle.

Pour arriver à ce but, une descente d'échelle climatique statistique a donc été réalisée à partir des sorties à haute résolution (12 km) des RCM, Aladin, LMDZ et Mar sur le domaine alpin. Afin d'unifier la méthode pour les trois modèles nous n'avons utilisé comme champs RCM de base que ceux disponibles dans les archives Aladin au pas de 6 heures sur notre domaine à savoir la hauteur du géopotential 500hPa et la température (2m) sur le relief du modèle. Ce choix limité nous prive pratiquement en amont d'information directe sur les champs précipitations et l'humidité qui seront donc totalement à la charge de notre méthode de descente d'échelle. La méthode est basée sur un comparaisons journalière de ces champs de base avec des quantités équivalentes issues des réanalyses Era40 (et des archives opérationnelles du CEPMMT pour les années les plus récentes) afin de déterminer les meilleures journées analogues sur le domaine alpin des simulations climatiques quotidiennes de chaque RCM. Les variables météorologiques nécessaires pour Crocus sont ensuite extraites d'une base climatique alpine spécifique couvrant les Alpes à la résolution demandée sur la période 1958-2007 et générée au préalable par le modèle d'analyse Safran.

La méthode a été validée lors d'une simulation de contrôle sur 30 ans qui utilisait à la place des sorties de RCM des champs issues de la réanalyse Era40 en interdisant la plage temporelle correspondante et donc recherchait une autre date analogue pour chaque journée de la réanalyse. Néanmoins son application ultérieure aux trois RCM sur le climat présent (1960-1990) a mis en évidence une certaine variabilité spatio-temporelle et un petit biais dans les données météo reconstruites due à la finesse plus grande des champs RCM par rapport aux extractions Era40 utilisées et à la seule utilisation de deux champs de base. Le critère de distance des journées analogues a donc été calibrée pour retrouver la climatologie Safran du climat présent et une légère correction quantile-quantile a été apportée à tous les champs notamment aux précipitations qui sont le paramètre le plus difficile à retrouver à partir de nos champs initiaux. La répartition des types de temps synoptique calculée avec Aladin en climat présent a également été vérifiée et s'est révélée conforme à celle de la climatologie sur la même période. Cette reconstruction la meilleure possible du climat présent sur les Alpes à partir des RCM était nécessaire afin de pouvoir évaluer ensuite l'évolution des risques d'avalanche avec Mepra en climat changé; ces comparaisons ne pouvant être réalisées que sur des manteaux neigeux réalistes et non biaisés à causes des effets de seuils de la mécanique de la rupture qui y sont utilisés.

En collaboration avec le CERFACS qui nous a fourni directement les dates des situations analogues de 4 simulations issues du Giec (CM3, CM4, MPI ; GIS) en climats présent et futur, nous avons pu calculer de manière identique à celle utilisée pour Aladin l'enneigement et les risques d'avalanches par massifs pour ces quatre modèles. Le résultat, non disponible sur le site web, servira à une prochaine publication.

Pour l'enneigement, les résultats sont les suivants. Dans chaque scénario, les résultats obtenus illustrent bien la variabilité spatiale qui existe entre les massifs et les larges différences entre le nord et le sud des Alpes françaises où la perte est la plus grande. Même si ces différences et leur amplitude varient d'un modèle à l'autre et selon l'altitude on retrouve les caractéristiques générales des scénarios employés : la diminution de l'enneigement (hauteur moyenne et durée) déjà observée ces dernières années continue à l'avenir, pour tous les massifs et scénarios. Pour une altitude moyenne (1800m) et dans le scénario B1, la diminution est significativement moindre que pour les deux autres scénarios, en particulier dans les massifs les plus au nord et correspond grossièrement aux valeurs simulées par les autres scénarios en milieu de siècle (de 35 à 60% de réduction en hauteur et 15 à 40 % en durée). Toujours à 1800m, la diminution calculée avec le scénario A2 pour la fin de siècle est la plus importante et atteint presque deux fois celle du scénario B1 (de 40 à 75% de réduction en durée); le scénario A1B donnant un résultat intermédiaire (de 25 à 65% de réduction en durée qui correspondent à environ 35 jours en milieu de siècle et 75 jours à la fin). On notera aussi la réduction dramatique de l'enneigement (de près de 90% pour la hauteur de neige) dans les massifs les plus au sud pour le scénario A2.

Pour les fréquences de situation à risque d'avalanche important, les résultats sont les suivants. Dans le projet, le paramètre utilisé est la moyenne sur 30 ans du nombre de jours par hiver où l'indice de synthèse journalier par massif d'instabilité naturel est supérieur à 3. Des cartes de tendance (en %) sont fournies pour les différents scénarios, modèles et périodes. Le peu de journées à forte activité avalancheuse naturelle ne nous permet pas d'afficher une tendance pour les 4 massifs de l'extrême sud des Alpes à savoir : Mercantour, Haut Var/Haut Verdon, Ubaye et Parapaillon. Dans le scénario A2, l'indice d'activité avalancheuse naturelle modélisée baisse fortement dans un futur proche et notamment dans le sud des Alpes avec des baisses supérieures à 80%, baisses qui s'accroissent avec le temps puisque dans un futur lointain, les baisses sur tous les massifs des Alpes sont supérieures à 85 %. La conséquence est une quasi-absence d'activité avalancheuse significative dans le sud et dans la majorité des autres massifs. Seul l'extrême nord des Alpes et notamment le massif du Mont Blanc conservent un caractère significativement avalancheux avec un nombre de jours à forte activité de 2,5 environ en moyenne par hiver à comparer aux 10 jours dans le climat actuel. Pour le scénario A1B, les modèles Aladin et Mar donnent des résultats semblables pour un futur proche avec un gradient Nord-Ouest/Sud-Est. Les Préalpes voient leur activité avalancheuse diminuer faiblement alors que le Sud-Est des Alpes est plus fortement impacté. Le modèle LMDZ est quant à lui plus pessimiste, surtout dans le Sud, en cohérence avec une baisse plus forte de l'enneigement et de l'équivalent en eau du manteau neigeux. Dans un futur lointain, la tendance à la baisse s'accroît pour tous les massifs, seul l'extrême Nord des Alpes gardant un nombre de jours à forte activité significatif avec en moyenne 7 jours par an dans le massif du Mont Blanc. Les différences entre modèles ont tendance à s'estomper même si LMDZ reste globalement le plus pessimiste. Dans le scénario B1, les résultats montrent aussi une baisse importante de l'activité avalancheuse naturelle dans un futur lointain finalement assez proche du A1B. Quant au futur proche, l'impact sur le nord des Alpes est moins marqué mais la baisse reste importante sur les massifs plus au sud (entre 40 et 66 %).

CERFACS

Un ensemble de simulations a été mené dans le projet: une simulation de référence utilisant les données analysées de référence Safran, des simulations correspondant aux scénarios climatiques produits au sein de Scampei, des simulations à partir de scénarios Giec/AR4 désagrégés avec la méthode DSCLim. Pour la première fois en France, des simulations homogènes sur l'ensemble des massifs français au pas quotidien ont été obtenues pour le climat actuel et des scénarios climatiques.

Pour affiner l'évaluation des incertitudes, nous avons également traité les scénarios globaux du 4ème rapport du Giec (CMIP3). Un algorithme, baptisé DSCLim, a été mis en place par le Cerfacs. Néanmoins, le logiciel doit être adaptée au problème particulier, dans le cas de Scampei il s'agit

d'adapter la méthode aux régions d'altitude. Une fois que la configuration optimale de DSCLim a été obtenue, le Cerfacs a effectué la génération des scénarios de changement climatique à haute résolution (8km) à partir des projections climatiques de la base de données de CMIP3. On dispose d'un total de 14 modèles du climat.

Une comparaison de deux techniques de désagrégation différentes, l'une statistique et l'autre dynamique, a été effectuée. Les résultats montrent que les données désagrégées présentent des écarts faibles par rapport à Safran. Ensuite, les projections du climat futur pour deux périodes, 2021 à 2050 et 2071 à 2100, ont été étudiées avec les deux techniques pour plusieurs scénarios d'émission des gaz à effet de serre du Giec. Les résultats issus des différentes méthodologies s'accordent sur une forte diminution du nombre de jours de gel dans les trois zones de montagnes (Alpes, Corse et Pyrénées), accompagnée d'une importante diminution des quantités de précipitations solides, mais aussi des précipitations liquides avec une augmentation moyenne du pourcentage de jours secs supérieure à 10%. Les résultats obtenus sur la Corse pour les deux méthodes sont plus contrastés et discutables car le domaine spatial est réduit et ne permet sans doute pas un échantillonnage statistique suffisamment pertinent. En revanche, sur les autres massifs, un raffinement du découpage spatial s'avère nécessaire.

Afin de mieux comprendre les incertitudes, nous avons procédé à l'évaluation comparée des rétroactions de la couverture neigeuse sur la température, dans les observations et dans le modèle régional Aladin. En effet, à l'échelle régionale, les changements liés aux changements climatiques 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. 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 elle est 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. Aladin présente des schémas spatiaux ressemblant à ceux de Safran-Isba-Modcou 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.

LGP

La connaissance des conditions de déclenchement des laves torrentielles dans les Alpes françaises, reste très mal connue ce qui rend particulièrement difficile la mesure des impacts du changement climatique sur le fonctionnement de ce processus. Dans le cadre de ce projet nous avons constitué une base de données de 607 laves sur une zone couvrant trois départements des Alpes françaises (73, 05, 04) dont le déclenchement est postérieur à 1970. Notre première approche a consisté à déterminer les seuils d'intensité/durée de précipitations issues de Safran et des observations à l'origine du déclenchement de ces laves. Les résultats de cette approche classique montrent que ce processus a lieu pour des seuils d'intensité inférieurs à 10 mm/h et/ou de durée inférieure à 3 jours. En complément une analyse probabiliste montre que dans les Alpes du Nord les années à lave sont liées aux précipitations de longue durée alors que dans les Alpes du Sud l'activité du processus est contrôlée par des précipitations extrêmes ($P > 20$ mm). L'utilisation des scénarios produits par Aladin, LMDZ et Mar a permis d'estimer les impacts du changement climatique à l'horizon 2050 et 2100. Dans les Alpes du Nord, les probabilités de déclenchement augmenteraient dès 2050 si l'on

utilise les scénarios d'Aladin, mais resteraient constantes ou diminueraient d'un tiers par rapport à l'actuel selon les scénarios de Mar et de LMDZ respectivement. Dans les Alpes du Sud, la réponse est robuste avec une augmentation de la probabilité de déclenchement sans différence marquée entre les modèles et les scénarios. La probabilité d'observer au moins 5 déclenchements par an est multipliée par 4 (scénario A1B) par rapport à l'actuel dès le futur proche.

Parallèlement nous avons analysé la vulnérabilité du réseau liée à cet aléa. Une analyse des sources historiques fait ressortir 4 zones principalement impactées (la vallée de la Maurienne, le Briançonnais, la Haute Tarentaise et la Haute Ubaye). Une carte régionale d'indice de risque de coupure a été réalisée selon le taux d'endommagement et les valeurs fonctionnelle/d'usage de chaque tronçon impacté. Les conséquences socio-économiques liées à la coupure d'un ou de plusieurs tronçons routiers dans ces secteurs sont très importantes pour plusieurs raisons. Il s'agit d'axes routiers le plus souvent de 1er ordre (niveau national, autoroute) à forte valeur fonctionnelle (contournement difficile) qui permettent de desservir des grandes villes françaises et italiennes. De plus ils permettent l'accès aux principales stations de ski, véritable poumon économique régional (700 millions d'€/ an de chiffre d'affaire dont 47% en été).

LGGE

Le Modèle Atmosphérique Régional (Mar) a été développé pour simuler les processus météorologiques et climatiques ainsi que le climat des grandes calottes de glace (Antarctique, Groenland), mais a également été mis en oeuvre sur l'Afrique de l'Ouest. Il a été utilisé ici pour simuler le changement climatique au cours du XXI^e siècle sur un domaine s'étendant des monts cantabriques jusqu'au Sud de l'Irlande, et de la Corse à l'Allemagne de l'ouest. Les résultats montrent une augmentation des températures au cours du XXI^e siècle. Mar simule également une augmentation des précipitations en hiver et une diminution en été. En hiver la fraction de pluie augmente au détriment de celle de neige. Malgré tout les extrêmes des événements neigeux augmentent en intensité l'hiver tandis que les extrêmes des événements pluvieux augmentent en toute saison. Cependant l'augmentation en intensité des événements neigeux extrêmes peut aussi être la conséquence du biais froid du modèle pour le climat présent.

La simulation du climat de montagne est un sujet ancien qui ne progresse pas beaucoup suite à l'extrême finesse des processus physiques dominants. En effet la mise en oeuvre de modèles numériques pour simuler le climat à l'échelle d'une montagne est encore trop chère en temps calcul. Tout au plus peut-on espérer simuler le climat d'un massif montagneux, tout en simplifiant les méthodes mises en oeuvre (désagrégation physique ou statistique par exemple). Ainsi la modélisation climatique régionale doit faire face à un saut d'échelle considérable quand on considère les processus convectifs. En effet la paramétrisation de la convection ne peut se faire qu'avec des maillages pas plus fins que 20 km (si on veut éviter de mélanger les effets de la paramétrisation de la convection et de sa résolution explicite), ou pas plus grossiers que 2 km (si on veut représenter correctement d'une manière explicite les grosses tours convectives). Ces contraintes ont été définies à l'occasion de l'étude des systèmes convectifs aux États-Unis. Certaines études ont suggéré qu'un maillage de 15 km était encore acceptable pour la paramétrisation de la convection, mais sans faire l'unanimité. Afin de tenir compte de cette expertise Mar a été mis en oeuvre avec une résolution horizontale de 20 km, et incorpore un schéma en flux de masse pour représenter la convection.

En ce qui concerne la représentation des processus d'interaction atmosphère-champs de neige, Mar est le seul modèle climatique régional incluant un modèle de neige multi-couches contenant une représentation de l'eau s'écoulant à travers le manteau neigeux et des propriétés optiques de la neige, permettant de calculer l'albédo de celle-ci. Il a été mis en oeuvre avec succès sur le Groenland.

Au cours du projet MAR a été imbriqué dans le modèle LMDZ pour 3 périodes de 30 ans (1971-2000, 2021-2050, et 2071-2100). La résolution horizontale utilisée pour LMDZ est ici égale à 80

km, tandis que celle de Mar est 20 km. Nous avons préféré travailler avec une résolution horizontale de 20 km au lieu de 12 km initialement prévus pour les motifs invoqués plus hauts et concernant la représentation de la convection.

En hiver les températures augmentent au cours du XXI^e siècle tandis que les quantités de précipitations pluvieuses augmentent, ainsi que leurs extrêmes. Les quantités de précipitations neigeuses diminuent mais leurs extrêmes ont tendance à augmenter vers la fin du siècle. Cela peut s'expliquer par le fait que les courants d'air froid et humide dans Mar restent suffisamment froids pour générer des précipitations neigeuses mais voient leur quantité en humidité augmenter suite à l'augmentation de la tension de vapeur à saturation. Ce résultat est cependant à considérer avec prudence vu le biais froid du Mar, lorsque celui-ci est imbriqué dans les ré-analyses. Ce biais froid est probablement dû à une sous-estimation du flux infra-rouge descendant faisant suite à la sous-estimation de la fraction nuageuse. Il est à noter que ce problème n'est pas spécifique à Mar, puisque le modèle de prévision Arome a tendance à montrer le même problème en hiver. De même le RCM WRF souffre d'une sous-estimation de la nébulosité antarctique.

Mar simule une augmentation des températures en été, mais la quantité de pluie estivale simulée au cours du XXI^e siècle diminue. Par contre les événements pluvieux extrêmes sont plus intenses. Cette caractéristique s'explique également par le potentiel plus important de l'air plus chaud à contenir de l'humidité, mais également par la capacité des événements convectifs extrêmes à collecter l'énergie potentielle disponible pour la convection sur des domaines d'autant plus grands qu'ils sont plus intenses.

Mar a été mis en oeuvre dans ce projet pour la première fois pour simuler l'évolution du changement climatique sur la France depuis la fin du XX^e jusqu'à la fin du XXI^e siècle, et ce en simulant trois périodes de 30 ans à partir d'un forçage fourni par LMDZ. Du fait de cette première utilisation, le modèle a dû subir une validation pour le climat présent en l'imbriquant dans les ré-analyses européennes ERA-Interim. Un biais froid de l'ordre de 2°C a été obtenu. Cette validation ne faisait pas partie du projet mais a été nécessaire pour la bonne exécution de celui-ci.

La présence d'un biais aussi bien dans les champs de forçage LMDZ que dans Mar nécessitait dès lors un réajustement des champs météorologiques simulés pour les deux périodes du climat futur considérées. Les simulations Mar ont ainsi été traitées par le Game, partenaire du projet.

Sur les Alpes et à différentes altitudes, nous avons calculé la hauteur minimale de neige sur la meilleure période de 100 jours consécutifs d'enneigement. Cet indice annuel donne une indication pertinente sur la « skiabilité » à une altitude donnée et est souvent utilisé à pour évaluer la viabilité économique d'une exploitation commerciale à cette altitude ; le seuil habituellement utilisé dans ce but de 30 jours n'est plus atteint en-dessous de 1800m en fin de siècle dans aucun massif. Des cartes par massif de cet indice sur 3 altitudes sont disponibles sur le site web.

La mise en oeuvre du Mar sur la France montre la validité pour l'Europe d'un modèle de climat régional développé pour les régions polaires. Elle est d'ailleurs une confirmation du bon comportement du Mar sur l'Afrique de l'Ouest et peut s'expliquer par le fait que les régions polaires sont une région intéressante pour tester un modèle, probablement du fait des conditions extrêmes qui y règnent.