

Mémoire

Auteur : Wuest, Cyril

Promoteur(s) : Fettweis, Xavier; 14872

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences géographiques, orientation global change, à finalité approfondie

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/12569>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Faculté des sciences
Département de géographie

Apport et validation du Modèle Atmosphérique Régional (MAR) en région Alsace-Vosges

Mémoire présenté par : **Cyril WUEST**

pour l'obtention du titre de

**Master en sciences géographiques,
orientation climatologie**

Année académique :

2020-2021

Date de défense :

Septembre 2021

Président de jury :

Pr. Aurélia HUBERT-FERRARI

Promoteur :

Pr. Xavier FETTWEIS

Jury de lecture :

Pr. Sébastien DOUTRELOUP

Pr. Aurélia HUBERT-FERRARI

Pr. Patrice PAUL (UStrasbourg)

REMERCIEMENTS

Septembre 2020. Début de ma M2 à l'ULg, ne m'imaginant pas que je n'allais pas voir mon université en présentiel une seule fois de toute l'année. Entre crise sanitaire et adaptation totale en cours à distance, cette année fut longue et difficile, mais constitue une expérience unique dans ma vie. Ce mémoire n'aurait pas vu le jour sans l'aide et le soutien de nombreuses personnes.

Je remercie tout d'abord chaleureusement mon promoteur Dr. Xavier Fettweis, pour m'avoir attribué ce sujet et pour m'avoir fait confiance tout au long de l'élaboration de cette étude. Nos échanges hebdomadaires du début à la fin m'ont aidé à rester dans le droit chemin.

Je remercie également Bruno Ambroise, dont sa rigueur, et sa grande implication dans ce travail m'ont permis de grandement progresser au fur et à mesure de ce mémoire, merci infiniment. Merci à mon co-promoteur Patrice Paul, qui s'est également beaucoup impliqué dans la vérification des données, mais qui m'a également soutenu et qui s'est soucié de l'avancée du mémoire à maintes reprises.

Un grand merci à Pierre-Marie David et à l'ensemble des membres de l'association Niv'Ose, sans qui ce travail n'aurait pas pu être réalisé. La journée de terrain que j'ai pu faire au Chitelet avec vous m'a fait énormément plaisir et m'a permis de me donner une idée sur le travail accompli par les observateurs de la neige.

Je remercie mes parents pour la force qu'ils m'ont apportée durant toute l'année académique et qui ont su me remonter le moral dans les moments difficiles. Merci à ma sœur pour sa bonne humeur et sa positivité, et à mon grand-père pour la relecture de ce mémoire.

Merci à mon amie de Liège Clara, qui, malgré la distance, a toujours été disponible pour m'aider dans la réalisation de ce mémoire lorsque j'avais des problèmes.

Enfin, merci au reste de ma famille et à mes proches qui m'ont soutenu d'une quelconque façon au cours de cette année.

RÉSUMÉ

Cette étude se concentre sur la région Alsace-Vosges où une application du Modèle Atmosphérique Régional (MAR) avait été préalablement testée sans validation afin d'étudier le manteau neigeux vosgien (Fettweis, 2020). Après de nombreux biais du modèle mis en évidence, une validation robuste du modèle est maintenant nécessaire afin de mettre en adéquation le modèle MAR avec les observations.

Le massif des Vosges, possédant plusieurs régimes pluviométriques selon la distance à la ligne de crête principale, constitue également une zone d'étude intéressante pour tester le modèle MAR au niveau des précipitations, mais également au niveau des températures. L'effet de foehn présent sur le versant alsacien du massif ainsi que sur la plaine centrale alsacienne permet d'estimer les erreurs relatives au modèle.

Grâce à beaucoup de données observées fiables de plusieurs stations représentatives des topoclimats vosgiens et alsaciens, les premiers résultats des comparaisons permettent d'ajuster certains paramètres du modèle MAR, tels que l'humidité spécifique aux frontières. Une hausse relative de l'humidité spécifique au sein du modèle MAR permet de corriger les biais en termes de précipitations. Cependant, ces ajustements ne permettent pas dans un premier temps de faire face aux forts biais existants en ce qui concerne le manteau neigeux.

Ce mémoire mêle à la fois l'étude du manteau neigeux, mais également l'ajustement du modèle MAR pour faire face aux événements météorologiques liés à l'effet de foehn.

ABSTRACT

This study focuses on the Alsace-Vosges region where an application of the regional climate model MAR (Modèle Atmosphérique Régional) was previously tested without validation in order to study the Vosges snowpack (Fettweis, 2020). After numerous model biases have been identified, a robust validation of the model is now required to match the MAR model with the observations.

The Vosges Mountains, with several rainfall regimes depending on the distance to the main ridge line, is also an interesting study area to test the MAR model for precipitation, but also for temperature. The foehn effect present on the Alsatian side of the massif as well as on the central Alsatian plain makes it possible to estimate the errors in the model.

Thanks to a lot of reliable observed data from several stations representative of the Vosges and Alsace topoclimates, the first results of the comparisons allow to adjust some parameters of the MAR model, such as the specific humidity at the boundaries. A relative increase of the specific humidity within the MAR model makes it possible to correct the bias in terms of precipitation. However, these adjustments do not initially correct for the strong biases in the snowpack.

This master thesis combines both the study of the snowpack, but also the adjustment of the MAR model to cope with meteorological events related to the foehn effect.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	2
Résumé	2
Abstract	4
Table des matières	5
Liste des figures	7
Liste des tableaux	11
Liste des acronymes	12
Introduction Générale	13
1.1 Contexte de l'étude et motivations	13
1.2 Objectifs de l'étude	16
1.3 Annonce du plan	17
Etat de l'art	18
2.1 Climat	20
2.2 Effet de foehn	25
2.3 Utilisation des Modèles Climatiques Régionaux sur les Vosges	28
Méthodologie et données utilisées	32
3.1 Délimitation du domaine d'étude	32
3.2 Périodes choisies (2017-2018 et 2020-2021)	33
3.3 Données observées des huit stations	34
3.3.1 Stations utilisées au départ de l'étude	34
3.3.2 Choix des données utilisables et méthode de calcul	36
3.4 Données du Chalet Universitaire (CHU)	38
3.5 Le modèle MAR	39
3.5.1 Présentation succincte du modèle	39
3.5.2 Intérêt de l'utilisation du modèle MAR pour cette étude	40
3.5.3 Méthode de traitement des données MAR	41

3.6 Ajout de plusieurs stations et introduction des Pixels_P	43
3.7 Liste de l'ensemble des simulations MAR utilisées au cours de l'étude	47
3.8 Conclusion de la méthodologie	49
Résultats de l'étude	50
4.1 Réglage des températures sur 8 stations (MAR01)	50
4.1.1 En plaine d'Alsace	51
4.1.2 Dans le massif vosgien	57
4.1.3 Bilan de la simulation MAR01 sur les 8 stations en températures	62
4.2 Mises au point des simulations MAR02-MAR03	62
4.3 Réglage des précipitations avec MAR09-16 pour les 14 stations retenues	72
4.4 Réglage complet en températures, précipitations et hauteurs de neige au CHU	81
4.4.1 Résultats des simulations MAR09 et MAR14	81
4.4.2 Introduction des trois dernières simulations (MAR17-18-19)	85
4.5 Tests de MAR18 sur deux hivers passés (1988-1989 / 1989-1990)	90
Conclusion Générale	92
5.1 Discussion des résultats	92
5.2 Perspectives	95
5.3 Conclusion	96
Bibliographie	97
Annexes	101

LISTE DES FIGURES

Fig 1.01 : Dernière extension maximale glaciaire dans les Vosges

Fig 1.02 : Évolution de l'enneigement hivernal (Décembre-Janvier-Février) au niveau du Col de la Schlucht (1150m) dans les Vosges de 1980 à 2018

Fig 1.03 : Évolution passée et future de l'enneigement hivernal (Décembre-Janvier-Février) et du nombre de jours de neige par an avec une épaisseur d'au moins 10 cm au sol, au Col de la Schlucht (1150m)

Fig 1.04 : Comparaison d'un maillage produit par un modèle climatique global classique avec le maillage du modèle climatique régional d'EURO-CORDEX (« Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment – European Domain »)

Fig 2.01 : Topographie du massif des Vosges

Fig 2.02 : Moyenne annuelle de référence 1981-2010 des précipitations en région AV

Fig 2.03 : Variabilité de l'enneigement au Chalet Universitaire de la Schlucht (CHU) à 1220 m sur la période 1976-1997

Fig 2.04 : Mécanisme de l'effet de foehn

Fig 2.05 : Schéma explicatif de l'effet de vallée (lié à l'effet de foehn) présent au sein d'un massif

Fig 2.06 : Topographie de l'ECMWF Reanalysis, CHRM56, CHRM14, et du modèle de ruissellement distribué WaSiM pour illustrer les domaines du modèle et les résolutions des différents modèles

Fig 2.07 : Résultats des précipitations quotidiennes moyennes en mm des 5 hivers (1989/1990 à 1993/1994), chacun de novembre à janvier, simulées par CHMR56 et CHRM14 en comparaison avec les observations

Fig 2.08 : Zone d'étude contenant les sept sous-bassins versants hydrographiques

Fig 3.01 : Domaine d'étude sur le fond topographique du domaine d'intégration utilisé par MAR

Fig 3.02 : Même figure que la Fig 3.01 avec les huit stations retenues ajoutées

Fig 3.03 : Logo de l'association Niv'OSE, créée en 1976 par P-M. DAVID

Fig 3.04 : Représentation de la création du maillage du modèle MAR et variables interpolées par NESTOR

Fig 3.05 : Carte en coordonnées géographiques en degrés décimaux (Latitude/Longitude) montrant le maillage MAR sur un fond topographique IGN représentant le massif vosgien et une partie de la plaine d'Alsace

Fig 4.01 : Évolution des températures moyennes journalières TMj observées (OBS: en bleu) et simulées (MAR01: en rouge) pour la station Strasbourg-Entzheim (151 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

Fig 4.02 : Comparaison des températures moyennes journalières TMj simulées (MAR01) et observées (OBS) pour la station Strasbourg-Entzheim (151 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

Fig 4.03 : Évolution des températures moyennes journalières TMj observées (OBS: en bleu) et simulées (MAR01: en rouge) pour la station Kogenheim (162 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

Fig 4.04 : Comparaison des températures moyennes journalières TMj simulées (MAR01) et observées (OBS) pour la station Kogenheim (162 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

Fig 4.05 : Évolution des températures moyennes journalières TMj observées (OBS: en bleu) et simulées (MAR01: en rouge) pour la station Colmar-Meyenheim (207 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

Fig 4.06 : Comparaison des températures moyennes journalières TMj simulées (MAR01) et observées (OBS) pour la station Colmar-Meyenheim (207 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

Fig 4.07 : Évolution des températures moyennes journalières TMj observées (OBS: en bleu) et simulées (MAR01: en rouge) pour la station Bâle-Mulhouse (263 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

Fig 4.08 : Comparaison des températures moyennes journalières TMj simulées (MAR01) et observées (OBS) pour la station Bâle-Mulhouse (263 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

Fig 4.09 : Évolution des températures moyennes journalières TMj observées (OBS: en bleu) et simulées (MAR01: en rouge) pour la station Vieux-Moulin (404 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

Fig 4.10 : Comparaison des températures moyennes journalières TMj simulées (MAR01) et observées (OBS) pour la station Vieux-Moulin (404 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

Fig 4.11 : Évolution des températures moyennes journalières TMj observées (OBS: en bleu) et simulées (MAR01: en rouge) pour la station Geishouse (660 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

Fig 4.12 : Comparaison des températures moyennes journalières TMj simulées (MAR01) et observées (OBS) pour la station Geishouse (660 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

Fig 4.13 : Évolution des températures moyennes journalières TMj observées (OBS: en bleu) et simulées (MAR01: en rouge) pour la station Xonrupt-Longemer (785 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

Fig 4.14 : Comparaison des températures moyennes journalières TMj simulées (MAR01) et observées (OBS) pour la station Xonrupt-Longemer (785 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

Fig 4.15 : Évolution des températures moyennes journalières TMj observées (OBS: en bleu) et simulées (MAR01: en rouge) pour la station Xonrupt-Chitelet : CHU (1220 m) dans la période 01/11/2017-30/04/2018

Fig 4.16 : Comparaison des températures moyennes journalières TMj simulées (MAR01) et observées (OBS) pour la station Xonrupt-Chitelet : CHU (1220 m) dans la période 01/11/2017-30/04/2018

Fig 4.17 : Évolution du manteau neigeux observé (en bleu) et simulé par MAR01 (en rouge) pour la station Xonrupt-Chitelet : CHU (1220 m) dans la période 01/11/2017-30/04/2018

Fig 4.18 : Évolution du manteau neigeux observé (en bleu) et simulé par MAR01 (en rouge) et par MAR02 (en jaune) pour la station Xonrupt-Chitelet : CHU (1220 m) dans la période 01/11/2017-30/04/2018

Fig 4.19 : Évolution du manteau neigeux observé (en bleu) et simulé par MAR01 (en rouge) et par MAR02 (en jaune) pour la station Xonrupt-Longemer (785 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

Fig 4.20 : Précipitations (fraction chutes de pluie + chutes de neige) tombées vs simulées par MAR02 au pas de temps journalier à Strasbourg-Entzheim

Fig 4.21 : Évolution du manteau neigeux observé (en bleu) et simulé par MAR01 (en rouge); par MAR02 (en jaune) et par MAR03 (en vert) pour la station Xonrupt-Longemer (785 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

Fig 4.22 : Évolution du manteau neigeux observé (en bleu) et simulé par MAR01 (en rouge); par MAR02 (en jaune) et par MAR03 (en vert) pour la station Xonrupt-Chitelet : CHU (1220 m) dans la période 01/11/2017-30/04/2018

Fig 4.23 et 4.24 : Part pluie/neige des précipitations simulées par MAR03 au CHU

Fig 4.25 et 4.26 : Comparaisons de températures MAR03 vs OBS au CHU

Fig 4.27 : Évolution du manteau neigeux observé (en bleu) et simulé par MAR03 (en rouge). En jaune, MAR03 où +20cm ont été rajoutés le 23/12/2018 et en vert MAR03 où +40 cm ont été rajoutés le 19/01/2018

Fig 4.28 et 4.29 : Cumuls de précipitations OBS, comparés avec MAR09 et MAR14 pour les 5 stations possédant au moins un Pixel_V avec leur Pixel_P

Fig 4.30 : Comparaison MAR09 vs OBS pour les températures TMj, les hauteurs de neige HNj et le cumul total des précipitations Pj tombées sur la période hivernale 2017-2018. En bleu les OBS et en rouge MAR09

Fig 4.31 : Comparaison MAR09 vs OBS pour les températures TMj, les hauteurs de neige HNj et le cumul total des précipitations Pj tombées sur la période hivernale 2020-2021. En bleu les OBS et en rouge MAR09

Fig 4.32 : Comparaison MAR14 vs OBS pour les températures TMj, les hauteurs de neige HNj et le cumul total des précipitations Pj tombées sur la période hivernale 2017-2018. En bleu les OBS et en rouge MAR14

Fig 4.33 : Comparaison MAR14 vs OBS pour les températures TMj, les hauteurs de neige HNj et le cumul total des précipitations Pj tombées sur la période hivernale 2020-2021. En bleu les OBS et en rouge MAR14

Fig 4.34 : Comparaison MAR17 vs OBS pour les températures TMj, les hauteurs de neige HNj et le cumul total des précipitations Pj tombées sur la période hivernale 2017-2018. En bleu les OBS et en rouge MAR17

Fig 4.35 : Comparaison MAR17 vs OBS pour les températures TMj, les hauteurs de neige HNj et le cumul total des précipitations Pj tombées sur la période hivernale 2020-2021. En bleu les OBS et en rouge MAR17

Fig 4.36 : Évolution du manteau neigeux observé (en bleu) et simulé par MAR18 (en rouge) et par MAR19 (en jaune) pour la station Xonrupt-Chitelet : CHU (1220 m) dans la période 01/11/2017-30/04/2018

Fig 4.37 : Évolution du manteau neigeux observé (en bleu) et simulé par MAR18 (en rouge) et par MAR19 (en jaune) pour la station Xonrupt-Chitelet : CHU (1220 m) dans la période 01/11/2020-30/04/2021

Fig 4.38 : Évolution du manteau neigeux observé (en bleu) et simulé par MAR18 (en rouge) pour la station Xonrupt-Chitelet : CHU (1220 m) dans la période 01/11/1988-30/04/1989

Fig 4.39 : Évolution du manteau neigeux observé (en bleu) et simulé par MAR18 (en rouge) pour la station Xonrupt-Chitelet : CHU (1220 m) dans la période 01/11/1989-30/04/1990

LISTE DES TABLEAUX

Tab 2.01 : Caractéristiques de l'enneigement pour différentes tranches d'altitude dans des massifs à climat tempéré

Tab 3.01 : Tableau synoptique des huit stations retenues au préalable de cette étude

Tab 3.02 : Tableau synoptique de la disponibilité (sur la période hivernale 2017-2018) des données nécessaires à l'étude

Tab 3.03 : Tableau de comparaison des coordonnées et des altitudes des stations vs celles des Pixels_T correspondants

Tab 3.04 : Tableau synoptique des 14 stations, avec leurs caractéristiques topographiques ainsi que les Pixels_T et Pixels_P correspondants

Tab 3.05 : Liste des stations possédant, ou non, leur Pixel_P et leur Pixel_T confondus ainsi qu'un pixel voisin (Pixel_V)

Tab 3.06 : Liste des simulations MAR utilisées et leurs caractéristiques, sans MAR04-08

Tab 4.01 : Tableau statistique des biais entre MAR01 et OBS pour les températures moyennes journalières, pour huit stations de la région AV

Tab 4.02 : Liste des biais absolus et relatifs entre MAR15 et OBS pour les cumuls de précipitations totaux sur la période (2017+2018+2020+2021[01-04]) pour les 14 stations retenues

Tab 4.03 : Liste des biais relatifs en pourcentage du cumul de précipitations total pour les deux hivers étudiés (2017-2018 et 2020-2021) pour les 14 stations retenues

Tab 4.04 : Biais relatifs en pourcentage du cumul total de précipitations des deux hivers 2017-2018 et 2020-2021 entre les simulations MAR14 et MAR09 et les observations

Tab 4.05 : Biais relatifs et absolus des cumuls totaux des températures T, précipitations P et hauteurs de neige HN pour les hivers 2017-2018 et 2020-2021

Tab 4.06 : Biais absolus et relatifs entre MAR18/MAR19 et OBS pour le cumul de neige total sur les hivers 2017-2018 et 2020-2021

Tab 4.07 : Biais absolus et relatifs entre MAR18 et OBS pour le cumul de neige total sur les hivers 1988-1989 et 1989-1990

LISTE DES ACRONYMES

MAR : Modèle Atmosphérique Régional

MAR01-19 : Ensemble des simulations du MAR utilisées au cours de l'étude

MCR : Modèle Climatique Régional

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

MF : Météo-France

OMM : Organisation Mondiale de la Météorologie

AV : Alsace-Vosges

CHU : Chalet Universitaire de Xonrupt-Chitelet situé à 1220 m dans les Hautes-Vosges

OBS : Données observées

TM_j / T_j (°C) : Température moyenne journalière (calculée selon la norme de l'OMM)

P_j (mm) : Précipitations totales journalières (calculées selon la norme de l'OMM)

Pan (mm/an) : Cumul annuel des précipitations journalières P_j

HN_j (cm) : Hauteur de neige journalière au sol à 06h TU (calculée selon la norme de l'OMM)

CumHN_j (cm): Cumul annuel des hauteurs de neige au sol journalières HN_j

Pixel_P d'une station : Pixel MAR où se trouve la station, utilisé pour la comparaison des précipitations MAR et OBS

Pixel_T d'une station : Pixel MAR de même altitude moyenne que l'altitude de la station, choisi comme représentatif de cette station pour la comparaison des températures MAR et OBS

Pixel_V : Pixel voisin du pixel où se trouve la station météorologique. Les stations situées en bordure de leur Pixel_P possèdent un Pixel_V

Màj : Mise à jour

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Contexte de l'étude et motivations

Le samedi 03 octobre 2020, à l'occasion du 31ème Festival International de Géographie qui se déroulait à St-Dié-des-Vosges, une conférence délocalisée à Remiremont fut organisée par le chercheur en climatologie Xavier Fettweis, sur le thème de l'évolution actuelle et future de son enneigement au sein du massif des Vosges, et plus généralement au sein de l'ensemble des massifs montagneux français. Le massif vosgien est un massif montagneux de faible à moyenne altitude ne dépassant pas les 1424 m avec le point culminant correspondant au Grand Ballon. Pourtant, malgré son altitude "modeste" (Humbert, 1986; Wintz, 1994), ce massif possède une histoire climatique très riche. En effet, lors de la dernière période glaciaire du Würm il y a 12 000 ans, les Vosges étaient recouvertes d'une épaisse couche de glace (Collomb, 1847; Weisrock, 2013). La *Figure 1.01* ci-dessous montre les différents stades chronologiques de déglaciation des Vosges, ainsi que les limites de l'extension des glaces à cette période.

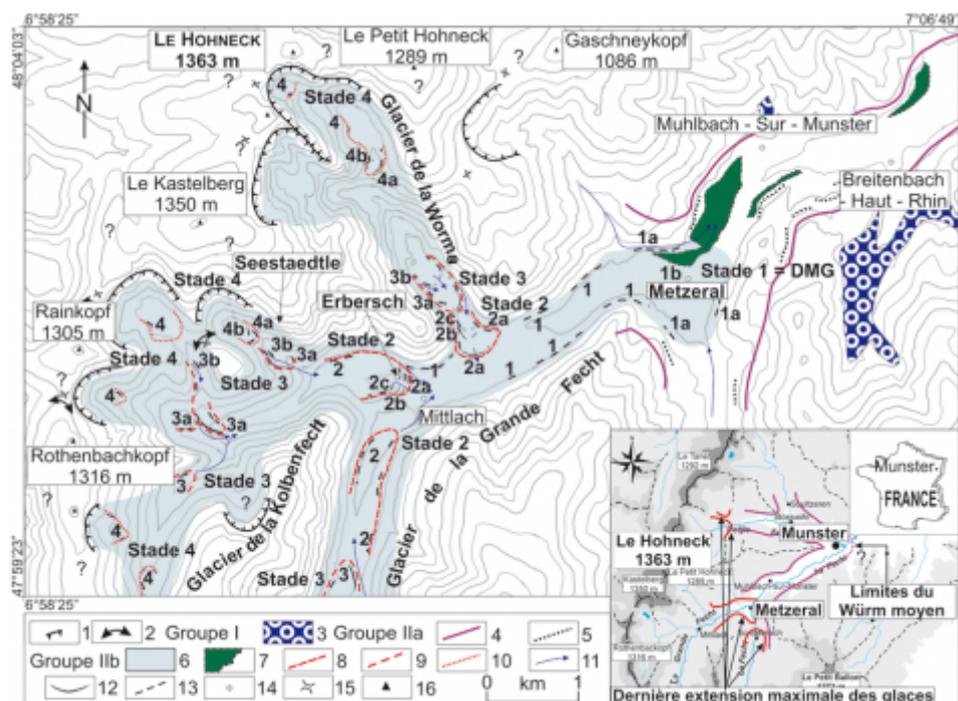


Fig 1.01 : Dernière extension maximale glaciaire dans les Vosges (Andreoli et al., 2006)

Depuis la fin du XXème siècle, à l'image du reste des massifs de l'Europe occidentale, le massif des Vosges subit une décroissance progressive des précipitations neigeuses et de l'enneigement (voir *Fig 1.02*), liée à l'augmentation des températures, ce qui a provoqué depuis 1960 une hausse de la limite pluie-neige d'environ 300 m (Clivaz et al., 2015). Cette hausse de la limite pluie-neige n'est, et ne sera pas sans conséquences au sein du massif vosgien, dont l'enneigement n'est significatif qu'au-dessus de 900 m d'altitude (Humbert, 1986).

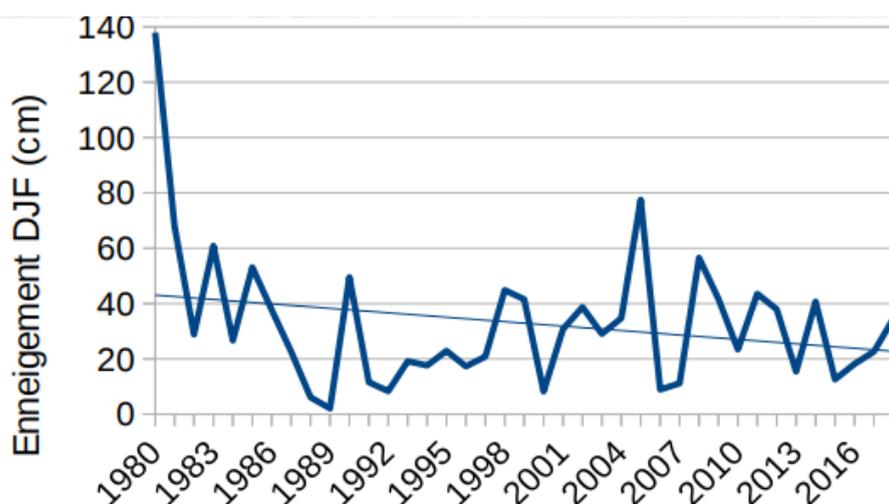


Fig 1.02 : Évolution de l'enneigement hivernal (Décembre-Janvier-Février) au niveau du Col de la Schlucht (1150m) dans les Vosges de 1980 à 2018, d'après Wahl et al., 2009

D'après le dernier rapport du GIEC (AR5) sur base de modèles globaux, la température moyenne globale va continuer de croître, jusqu'à 4 à 6°C si les accords de Paris (COP 21 en 2015) ne sont pas respectés. Cette augmentation de température provoquera sans aucun doute la raréfaction plus intense du manteau neigeux au sein du massif des Vosges (voir *Fig 1.03, version 3.11 du modèle MAR qui n'a pas été validé dans le cadre de cette conférence*), mais il est difficile d'étudier le climat vosgien à l'aide de modèles globaux comme ceux du GIEC. La résolution spatiale de ces modèles est en effet trop grossière (typiquement 100km) et ne permet pas de donner avec détails des informations précises pour une zone telle que le massif vosgien, comme la physique de la neige par exemple.

Les modèles climatiques régionaux sont beaucoup plus appropriés pour les petits domaines. La résolution est plus fine (typiquement 1-10km) et les physiques du modèle (représentation de la neige, de la turbulence, des précipitations convectives, ...) sont à la fois plus détaillées et adaptées à une région précise, ce qui peut permettre de les appliquer sur une région telle que les Vosges (voir *Fig 1.04*).

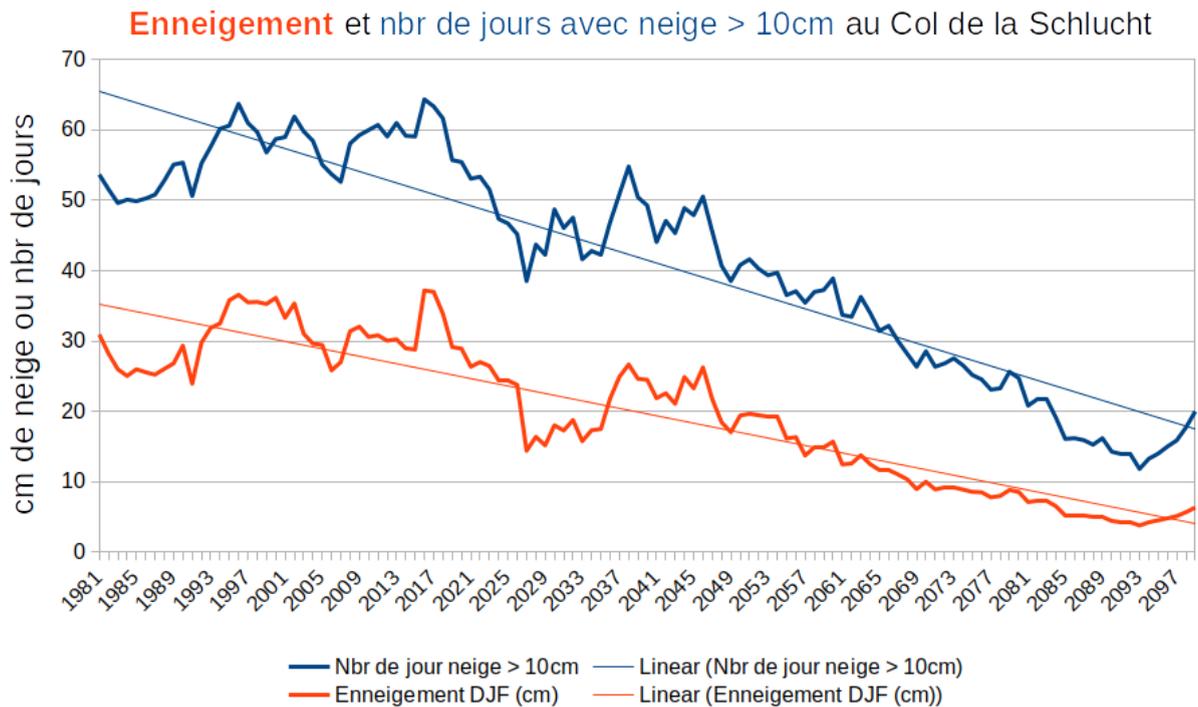


Fig 1.03 : Évolution passée et future de l'enneigement hivernal (Décembre-Janvier-Février) et du nombre de jours de neige par an avec une épaisseur d'au moins 10 cm au sol, au Col de la Schlucht (1150m). MAR forcé par MPI-ESM 1-2-HR (ssp 585¹: scénario le plus pessimiste), d'après Fettweis, 2020

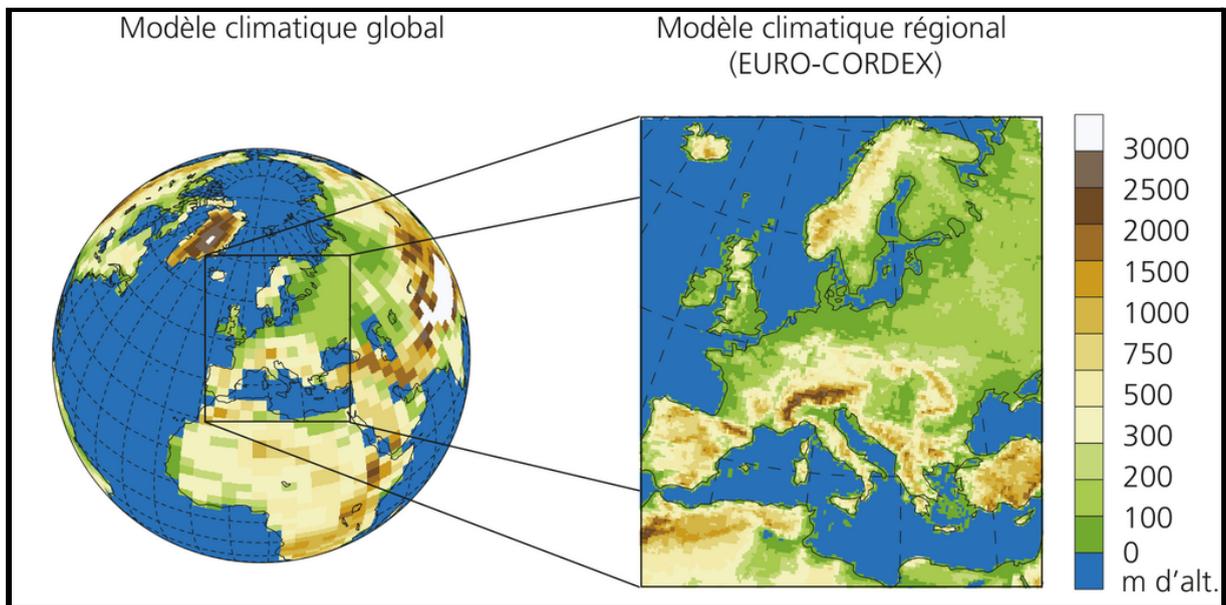


Fig 1.04 : Comparaison d'un maillage produit par un modèle climatique global classique avec le maillage du modèle climatique régional d'EURO-CORDEX (« Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment – European Domain »), (Fischer, 2018)

¹ Scénario RCP 8.5 (Representative Concentration Pathway) basé sur SSP 5 (Shared Socio-economic Pathways)

1.2 Objectifs de l'étude

Compte tenu des difficultés pour les modèles climatiques globaux de simuler précisément le manteau neigeux au sein des Vosges, ce mémoire a pour principal but de tester et de valider le Modèle Atmosphérique Régional (MAR) développé à l'Université de Liège sur ce massif vosgien. Après une application sans validation du modèle MAR pour étudier l'enneigement dans les Vosges (Fettweis, 2020), une validation robuste du modèle est nécessaire sachant que de nombreux biais du modèle ont été mis en évidence. L'étude sera plus généralement étendue sur la plaine d'Alsace également, en comparant les sorties du modèle avec des données observées sur plusieurs stations représentatives du domaine d'étude, et ce aussi bien pour l'échelle spatiale (régionale) que pour l'échelle temporelle (journalière). Compte tenu également des disparités pluviométriques importantes entre le massif vosgien et le fossé rhénan, ce mémoire a également pour objectif de vérifier la capacité du modèle MAR à représenter l'effet de foehn présent au sein du domaine d'étude. Les objectifs de cette étude sont donc multiples, mais reposent globalement sur l'amélioration du modèle MAR à l'échelle régionale, avant de pouvoir passer à l'étude de l'évolution passée et actuelle de l'enneigement dans les Vosges.

En raison de la pluralité des objectifs de cette étude, nous pouvons identifier plusieurs problématiques :

“Comment le modèle MAR simule-t-il la variabilité climatique temporelle (journalière) et spatiale (de l'ordre de 5km) dans la région des Vosges ?”

“Quelle est la capacité du modèle MAR à simuler les disparités pluviométriques dues à l'influence orographique ?”

“Le modèle MAR peut-il simuler de façon précise des événements météorologiques extrêmes ? Brefs dans le temps ?”

“Comment le modèle MAR simule-t-il l'évolution passée et actuelle de l'enneigement au sein du massif des Vosges ?”

1.3 Annonce du plan

Afin de répondre aux objectifs posés lors de cette introduction, il est nécessaire d'établir un état de l'art, notamment pour bien comprendre le climat de la région AV ainsi que l'effet orographique que le massif vosgien provoque. La littérature associée à l'utilisation des modèles régionaux sur notre domaine d'étude est également primordiale. Cet état de l'art constitue le deuxième Chapitre de cette étude.

Par la suite, le Chapitre III se concentrera sur toute la méthodologie adoptée, comprenant à la fois le choix des données et des périodes temporelles, avec également les problèmes rencontrés tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Le quatrième Chapitre inclura les résultats des comparaisons faites entre les simulations du modèle MAR et les données observées, suivis de la discussion générale des résultats et des perspectives dans le dernier Chapitre.

CHAPITRE II

ÉTAT DE L'ART

Le massif des Vosges constitue la zone principale de notre étude. Massif de moyenne montagne étant le plus bas en France métropolitaine, et se construisant de façon quasi-linéaire du SSO au NNE suivant la ligne de crête (47°60 N à 48°50 N), sa partie la plus élevée se situe dans sa partie sud, les Hautes-Vosges. La *Figure 2.01* nous montre que c'est dans cette partie que se trouvent les plus hauts sommets : le Grand Ballon (1424 m), le Hohneck (1363 m), ou encore le Kastelberg (1350 m). Ce massif traverse au total sept départements au sein des régions Grand-Est et Bourgogne-Franche-Comté et se caractérise notamment comme séparation entre le plateau lorrain et la plaine d'Alsace. Il s'étire sur 70 km de large dans sa partie Sud, en se rétrécissant vers le Nord, pour 120 km de long, ce qui induit une extension longitudinale assez importante et ainsi une barrière orographique notable sur la circulation atmosphérique zonale océanique (Marand, 1992).



Fig 2.01 : Topographie du massif des Vosges réalisée avec SRTM3 v2, BD Carthage® et IGN-GEOFLA® (Boldair, 2005). Projection : Lambert 93

2.1 Climat

Le climat du massif vosgien est contrôlé par l'influence océanique (Claerr, 2010; Chaumont, 2008), ce climat est considéré comme semi-continentale du fait de son altitude et de son orientation (Météo-France). A l'instar d'une grande partie de la France métropolitaine, les vents dominants proviennent de l'Ouest au cours d'une grande partie de l'année, avec un flux océanique zonal fréquent lié au courant-jet de haute altitude (Aussenac, 1973), ce qui permet au massif des Vosges d'être régulièrement arrosé. Malgré son statut de faible à moyenne montagne, le climat vosgien devient rude et montagnard au-dessus de 800 à 1000 mètres d'altitude (Wahl et *al.*, 2007; Chaumont, 2008), avec des températures forcément plus froides qu'en plaine d'Alsace.

La *Figure 2.02* montre la moyenne annuelle des précipitations (1981-2010), et l'on constate que sur les crêtes vosgiennes, le cumul annuel dépasse les 2 000 mm/an de précipitations, similaire aux cumuls des autres reliefs de France pour une altitude plus élevée (Joly et *al.*, 2009) et unique sur toute la région Grand-Est (Angot, 1920). Les Hautes-Vosges se caractérisent donc par une pluviométrie remarquable due à l'influence du relief (Angot, 1920), mais également due à l'orientation et à la position de celles-ci qui constituent le premier véritable obstacle aux masses d'air océaniques sur le Nord de la France (Wahl et *al.*, 2007). En obligeant ces masses d'air à subir une ascendance orographique, c'est-à-dire à se refroidir puis à condenser en s'élevant en altitude, le relief tend à provoquer des précipitations importantes sur la partie Ouest du massif, comme en témoigne cette *Figure 2.02*.

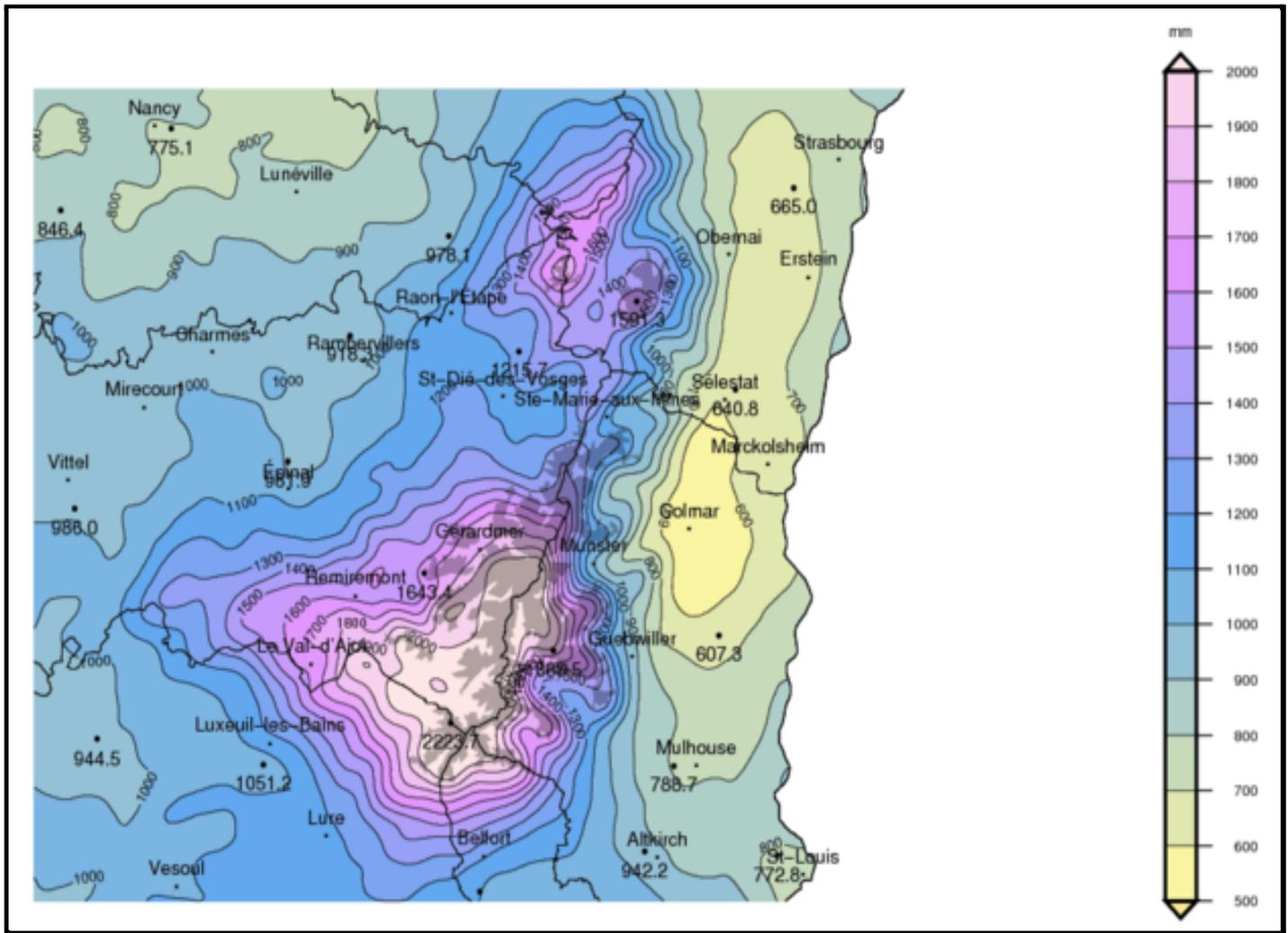


Fig 2.02 : Moyenne annuelle de référence 1981-2010 des précipitations en région AV (Météo France, 2012 [Zone climatique : 8628/10416/22962/24230])

Au niveau de la plaine d'Alsace, les précipitations sont beaucoup plus rares car le relief vosgien agit fortement sur la répartition des pluies sur l'ensemble du fossé rhénan (Delachaux & Niestlé, 1998). Il tombe en effet moins de 700 mm/an de précipitations au niveau de la plaine centrale, qui jouit d'un effet "d'abri" ou effet de "foehn" (qui seront décrits plus en détails dans la *Section 2.3*). Du fait de son altitude moyenne beaucoup plus basse, les températures sont également beaucoup plus douces que dans les Vosges, en plus d'une atmosphère plus sèche, ce qui donne à la plaine alsacienne un climat plus continental (Lebon, 1993), typique du régime continental classique de l'Europe Centrale ou d'Europe de l'Est (Paul, 1982). Néanmoins, pour toutes altitudes confondues, c'est le mois de Janvier qui est le plus froid dans la région AV (Humbert, 1986).

Les orages constituent une majeure partie des précipitations tombant en plaine d'Alsace lors de l'été, ce qui explique une pluviométrie plus importante lors de la saison estivale. Étant donné que les vents dominants en été sont beaucoup moins favorables aux apports pluvieux, en étant orientés Nord ou Sud (Lefort, 1957), cela explique d'autant plus l'apport pluvieux sous forme d'orages locaux.

Sur l'ensemble de la région AV, il existe trois régimes saisonniers en ce qui concerne la répartition des précipitations les plus importantes (Lefort, 1957) selon la dominance de la direction des vents :

- Les pluies dominantes d'automne concernent une grande partie du massif vosgien, notamment sur tout le versant Ouest (côté lorrain) avec une dynamique océanique régulière.
- En été, c'est la plaine d'Alsace qui subit le plus de précipitations, avec une dynamique continentale importante et des orages fréquents.
- Les précipitations dominantes d'hiver, concernent quelques foyers localisés comme le Ballon d'Alsace ou encore le Lac d'Alfeld. Ce sont des précipitations dites de "relief" (Musset, 1943).

Par ailleurs, au sein des Vosges, et notamment dans les Hautes-Vosges, la pluviométrie est beaucoup plus importante lors des hivers, car elles récoltent une grande partie des pluies océaniques, dont une grande part des précipitations sous forme neigeuse au-dessus de 1 000 mètres d'altitude. Par exemple, dans le département du Haut-Rhin, la ville de Colmar possède des précipitations moyennes mensuelles (référence 1951-1970) d'environ 30 mm en Janvier, contre presque 200 mm pour le même mois de Janvier à Mittlach (Paul, 1982). Les précipitations sont donc très contrastées au sein de la zone d'étude.

Même si l'enneigement est faible en plaine d'Alsace du fait de sa basse altitude ainsi que d'une pluviométrie faible en hiver, il est important dans le massif vosgien, bien que très variable dans l'espace et le temps (Juillard, 1954; Rothe & Herrensneider, 1963; Baud, 1975; Adjizian-Gerard, 1985). Cette variabilité est liée au climat océanique qui règne sur les sommets vosgiens, faisant fréquemment et rapidement fluctuer l'isotherme 0°C avec le brassage du vent et des précipitations, notamment en hiver (Humbert, 1986). Ces fluctuations ne permettent donc pas un bon maintien du manteau neigeux, ce qui explique des grandes disparités spatiales et temporelles des hauteurs de neige, au sein même des Hautes-Vosges,

d'un hiver à un autre (Wahl et *al.*, 2007). Le maintien d'un manteau neigeux conséquent dépend donc directement des conditions météorologiques synoptiques (un flux de Sud-Ouest sera défavorable au maintien du manteau neigeux, contrairement à un flux de Nord-Ouest). Compte tenu également de la faible tranche altitudinale des Vosges dans laquelle le manteau neigeux peut perdurer de manière significative l'hiver (entre 900 et 1 400 m d'altitude [voir *Tab 2.01*]), une hausse rapide de l'isotherme 0°C a de grandes conséquences sur la variabilité spatiale de l'enneigement. Il est effectivement estimé que pour chaque degré d'augmentation de la température, l'altitude de la limite pluie-neige augmente d'environ 100 à 150 m (Baumgartner & Apfl, 1994; McCarthy et *al.*, 2001). Il est donc très difficile d'estimer le stock de neige à un point donné, d'autant plus que des accumulations de neige peuvent avoir lieu au-dessus du point de congélation si les précipitations sont importantes (McCarthy et *al.*, 2001). Ces variations spatiales de l'enneigement résultent donc de phénomènes thermo-pluviométriques (Quense, 2011).

ALTITUDE	NOMBRE MOYEN DE JOURS D'ENNEIGEMENT	NOMBRE DE JOURS AVEC CHUTE DE NEIGE	HAUTEUR MAXIMALE
500 m	30-50 jours	20-40 jours	aléatoire
750 m	60-70 jours	40-50 jours	début février
1 000 m	110-145 jours	50-60 jours	mi-février
1 250 m	160-180 jours	70-90 jours	début mars

Tab 2.01 : Caractéristiques de l'enneigement pour différentes tranches d'altitude dans des massifs à climat tempéré (Juillard, 1954; Humbert et al., 1984).

Malgré ces variations spatiales et temporelles de l'enneigement, les précipitations neigeuses font leur apparition dès l'automne en général, vers la mi-octobre (Rothe, 1935; Wahl et *al.*, 2007) sur les plus hauts sommets, mais le manteau neigeux ne devient conséquent qu'à partir de la fin novembre jusqu'à la fin de la saison hivernale début avril avec ~100 cm de neige en moyenne en février au-dessus de 1200 mètres d'altitude (Wahl et *al.*, 2007), comme le montre la *Figure 2.03* ci-dessous :

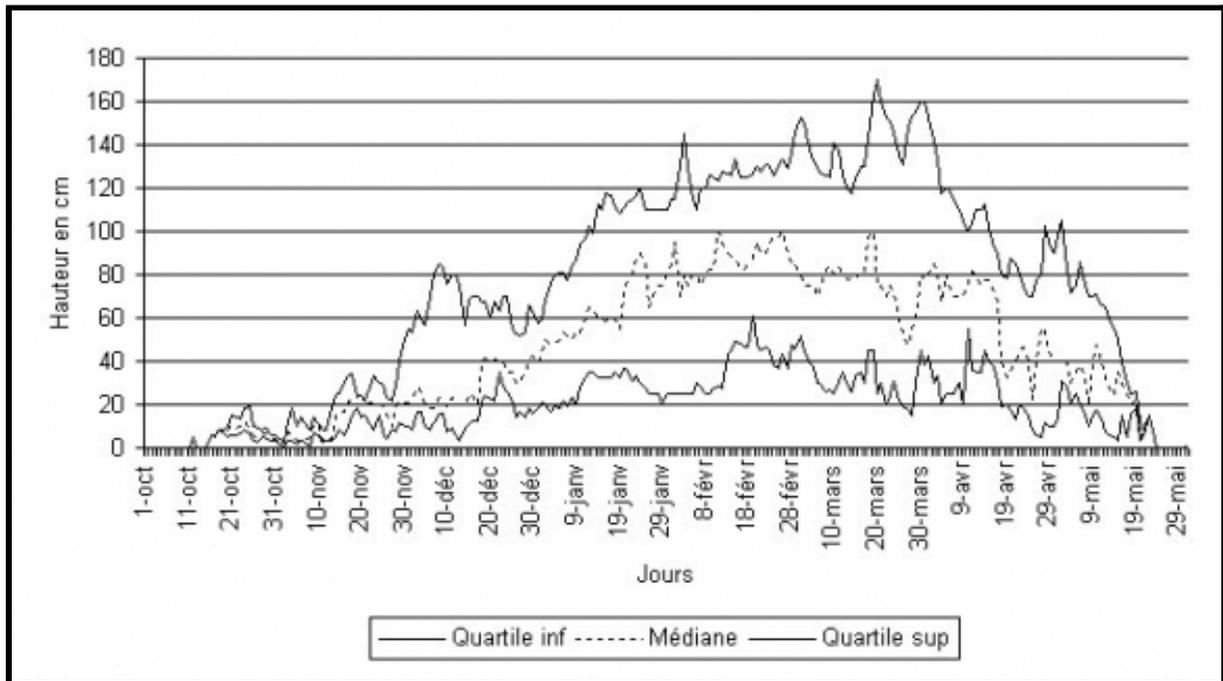


Fig 2.03 : Variabilité de l'enneigement au Chalet Universitaire de la Schlucht (CHU) à 1220 m sur la période 1976-1997 (Wahl et al., 2007). Cet enneigement augmente progressivement au cours des mois hivernaux avant d'atteindre son pic à la fin de l'hiver (vers fin mars), avant de se démanteler plus rapidement lorsque les températures printanières se manifestent. La progression de l'enneigement reste très irrégulière d'un hiver à l'autre.

En résumé, la région AV possède des disparités importantes en hiver au niveau climatique. Après ces différentes lectures, la zone d'étude peut être décomposée en trois topoclimats distincts :

- La partie Ouest vosgienne avec un climat à dominante océanique, humide et ventée.
- Les Hautes-Vosges avec un climat froid, humide et rude.
- Le versant alsacien et la plaine, protégés par la ligne de crête, avec par conséquent un climat beaucoup plus sec, plus doux et moins venté.

Ces trois topoclimats qui constituent le domaine d'étude sont directement liés à la barrière orographique que constitue le massif des Vosges.

2.2 Effet de foehn

L'effet de foehn est un concept très important pour comprendre la répartition des précipitations ou encore la variabilité des températures sur notre zone d'étude. Comme expliqué par Picard (1958) ou encore Seluchi *et al.* (2003), l'effet de foehn est perçu comme une augmentation de la température ainsi qu'une baisse de l'humidité relative (Hoinka, 1985).

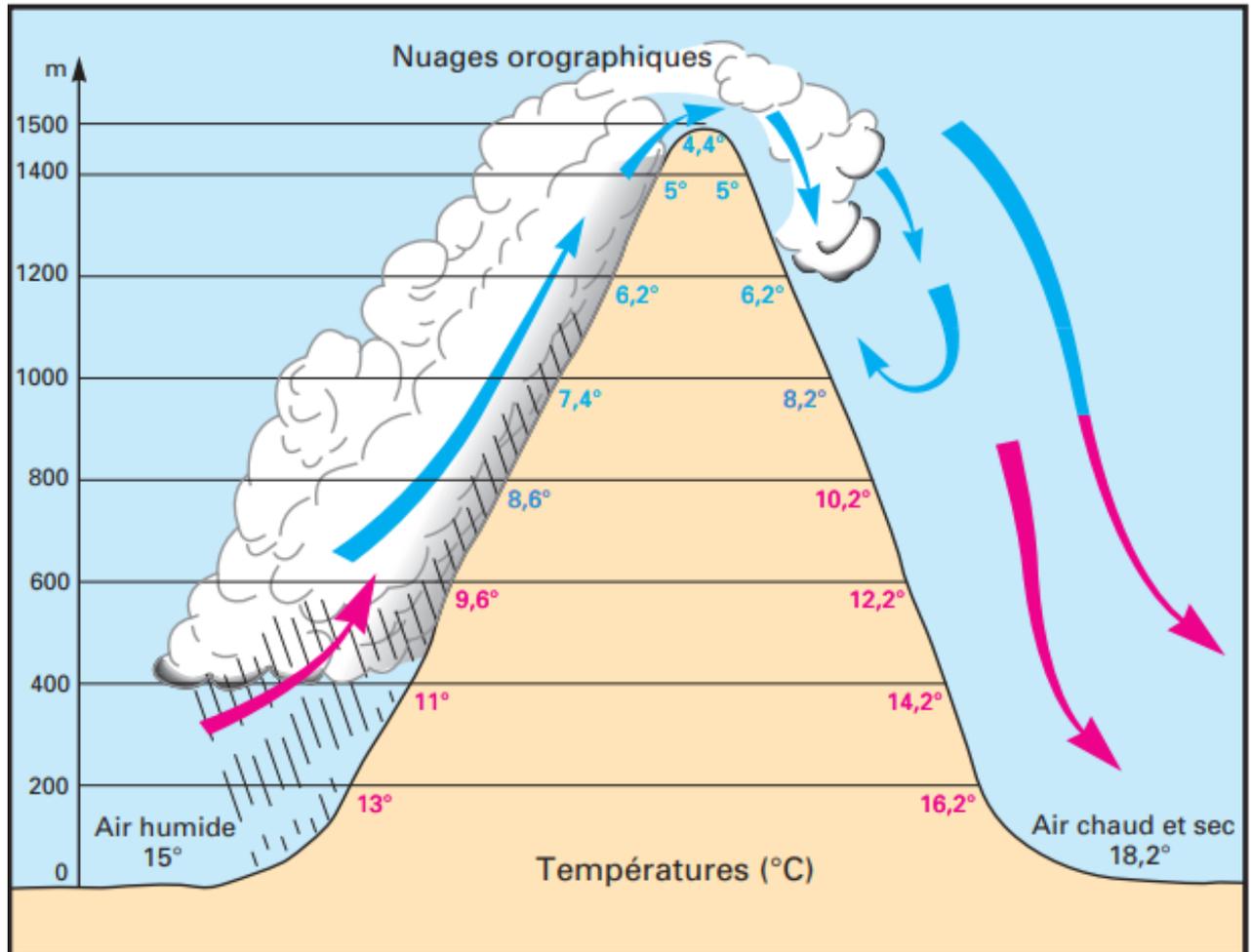


Fig 2.04 : Mécanisme de l'effet de foehn (SHOM², 2003)

La Figure 2.04 ci-dessus montre schématiquement le mécanisme classique de formation d'un effet de foehn, qui peut facilement être utilisé pour le massif des Vosges. En effet, lorsque les masses d'air océaniques arrivent d'ouest, le massif des Vosges, grâce à l'orientation méridienne (NNE-SSW) de sa principale ligne de crête, va servir de barrière à ces masses d'air (Marand, 1992).

² SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

Concrètement, les principales masses d'air poussées par les vents d'Ouest océaniques sont obligées de s'élever en altitude car elles ne peuvent pas contourner le relief, elles subissent une ascendance orographique. La condensation forcée de ces masses d'air due au refroidissement adiabatique conduit à des hauteurs d'eau remarquables sur la partie occidentale du massif jusqu'aux crêtes vosgiennes (voir *Fig 2.02*). Cette forte condensation conduit à une faible baisse des températures sur le versant Ouest, avec un gradient de température de $-0.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, c'est-à-dire en suivant l'adiabatique humide. Lorsque ces masses d'air franchissent la ligne de crête, elles subissent au contraire une compression, et donc un réchauffement, en plus d'une baisse très rapide de l'humidité relative. Cette baisse de l'humidité provoque une montée rapide de la température en descendant le versant alsacien, avec cette fois-ci un gradient de température de $+1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ en suivant l'adiabatique sèche. Par conséquent, l'air se réchauffe en aval du relief, dans la partie orientale des Vosges et en plaine centrale alsacienne.

C'est exactement ce qui est observé en terme de pluviométrie : les Vosges présentent une pluviométrie supérieure à 1 000 mm/an alors que, sur la majeure partie de la plaine, il tombe moins de 700 mm/an à l'exception du Sundgau qui est situé face à la trouée de Belfort, et donc n'étant pas protégé par les Vosges, et de la partie septentrionale au nord de la Zorn où la protection du massif vosgien devient plus faible (Dion, 1972; Cachan, 1974). Cet effet de foehn s'affirme pleinement à Colmar où il ne tombe qu'en moyenne 519 mm/an (Paul, 1982; Becker & Schipfer, 1982). Le gradient pluviométrique entre Colmar et la ligne de crête est, en outre, unique en France (Claerr, 2010), de l'ordre de 1 100 mm sur seulement 25 km. Le versant alsacien est donc protégé de la circulation océanique, et constitue "l'ombre pluviale" ou l'ombre pluviométrique de la chaîne des Vosges (Millot et *al.*, 1955; Lecarpentier & Shamsi, 1972; Paul, 1982; Marand, 1992; François & Humbert, 2000).

Dès le début du XXème siècle, certains auteurs mettent déjà en évidence l'effet de foehn présent en Alsace, provoqué par la barrière orographique vosgienne (Angot, 1920; Lefort, 1957), puis plusieurs articles ont confirmé ce phénomène en région AV (Dion, 1972; Cachan, 1974; Scherer, 1977; Marand et *al.*, 1988, Dion et *al.*, 1988; Marand, 1992). C'est donc ce phénomène de foehn qui explique la décroissance très rapide des hauteurs de pluie entre la ligne de crête et la plaine alsacienne. Plus précisément, sur le versant oriental des Vosges, ce n'est pas tant l'altitude elle-même qui régit le gradient pluviométrique, mais plutôt

la distance à la ligne de crête (Rempp, 1937; Becker & Schipfer, 1982; Douguedroit & Saintignon, 1984).

Par conséquent, il n'existe pas d'augmentation régulière des précipitations avec l'altitude dans le massif des Vosges, notamment sur le versant Est "sous le vent" (Marthelot, 1950; Scherer, 1977; Douguedroit & Saintignon, 1984; Marand & Zumstein, 1988). Il est donc difficile d'estimer avec exactitude des précipitations moyennes en chaque point de l'espace, notamment lorsque certaines stations se trouvent dans des vallées encaissées, ou lorsque certaines stations sont très exposées aux vents dominants d'Ouest (Scherer, 1977; Laborde, 1982).

Pour estimer de façon plus correcte les gradients pluviométriques, les relations précipitations-altitude d'un lieu donné peuvent être rendues linéaires comme Scherer (1977) a pu le démontrer, en utilisant non pas l'altitude réelle des stations, mais leur altitude "lissée", c'est-à-dire en utilisant les altitudes des stations de celles des crêtes environnantes. Effectivement, lorsque les stations sont situées dans des vallées ou des bassins relativement étroits, les flux atmosphériques ne suivent pas le détail des reliefs en creux mais l'allure générale du relief (Douguedroit, 2011). Manifestement, le massif des Vosges semble incompatible avec cette méthode, au vu du grand nombre de ses vallées fortement incisées, notamment au Sud du massif dans les Hautes-Vosges. Ces nombreuses vallées en auge ou cirques glaciaires qui donnent les formes caractéristiques des Hautes-Vosges sont le résultat de l'érosion du quaternaire (Marand & Zumstein, 1988).

Néanmoins, cette méthode d'altitudes "lissées" est, toujours d'après Scherer (1977), applicable lorsque la largeur de la vallée est inférieure à 5 km. Dans ce cas, les masses d'air donnent la même lame d'eau précipitée dans la vallée que sur les sommets environnants. En revanche, si la vallée est plus large que 5 km, l'effet de foehn apparaît et les précipitations sont moindres. La *Figure 2.05* illustre bien ce phénomène.

La disparité des précipitations vosgiennes est donc en partie expliquée par la grande variabilité de la taille des vallées (Laborde, 1982). Certaines de ces vallées possèdent une largeur très faible, de moins de 1 km (Geishouse ou Pierre-Percée), et d'autres ont une largeur supérieure à 5-6 km (Stosswihr, St-Dié ou encore Villé). Néanmoins, cette variabilité des précipitations au sein de ces vallées dépend également de leur orientation face aux vents

pluvieux dominants (Mentré-Hildenbrand, 1986), ce qui rend complexe les méthodes de mesure.

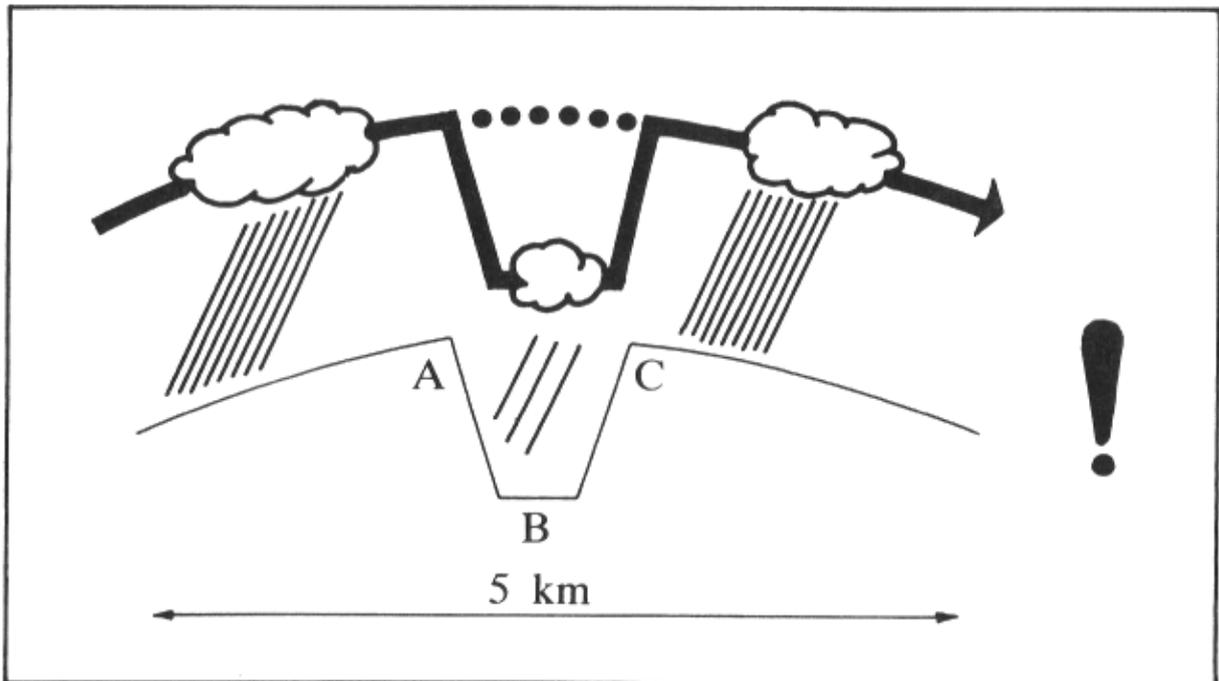


Fig 2.05 : Schéma explicatif de l'effet de vallée (lié à l'effet de foehn) présent au sein d'un massif, d'après Scherer, 1977.

Sur cette figure, les points A et C sont représentatifs des sommets environnants de la vallée représentée en B.

Le relief des Vosges a donc une influence prépondérante sur les températures et les précipitations qui seront utilisées dans cette étude, et constitue plus généralement un facteur de contrôle important sur le climat de la région AV.

2.3 Utilisation des Modèles Climatiques Régionaux sur les Vosges

Les modèles climatiques sont des représentations subjectives de la réalité. Ils ne représentent que de manière très simplifiée le fonctionnement réel du système climatique (Drogue & François, 2014). Les Modèles Climatiques Régionaux (MCR ou RCM en anglais) permettent de “zoomer” sur une zone d'étude plus locale, à des échelles de dizaines de kilomètres, afin de mieux percevoir les interactions qui ont lieu au sein du domaine étudié. *“L'une des conséquences de cette représentation simplifiée réside dans l'existence de biais systématiques entre la simulation brute du modèle et l'observation. Ce biais systématique est susceptible de s'amplifier lorsque les conditions climatiques ne sont pas stationnaires”*

(Teutschbein & Seibert, 2013). Plus concrètement, un modèle climatique ne peut représenter avec perfection le système climatique, sa qualité peut donc être jugée au niveau des biais existants entre la simulation et l'observation (Déqué, 2007). Ces MCR permettent de donner des détails spatiaux supplémentaires, notamment au niveau topographique, dans des régions dépourvues de stations météorologiques, mais peuvent également permettre d'avoir une meilleure résolution temporelle vu qu'ils ont des pas de temps de typiquement 1 min.

De nombreuses études ont été réalisées avec l'aide de MCR en prenant les Vosges comme zone d'étude (Kleinn et al., 2005; Feldmann et al., 2013; Strandberg et al., 2011; Drogue & François, 2014; Becker, 1989), mais généralement ces études se sont concentrées sur l'aspect hydrographique dans le bassin du Rhin supérieur. L'idée est ici de succinctement résumer les études déjà réalisées sur les Vosges avec des MCRs.

Kleinn et al. (2005) ont étudié les risques hydrologiques à l'aide d'un couplage d'un modèle hydrologique (WaSIM-ETH) avec un modèle climatique régional, le modèle CHRM (Climate High Resolution Model), dans le bassin du Rhin (voir Figure 2.06). Les variables climatiques suivantes ont été utilisées : température, précipitations, rayonnement de surface net total, vitesse du vent à 10 m et humidité relative. Le modèle climatique régional CHRM est exploité en mode emboîté à deux espacements de grille différents ($0,5^\circ$ et $0,125^\circ$, correspondant à environ 56 et 14 km). Les deux configurations de modèle ont été désignées par CHRM56 et CHRM14 dans cette étude. Ces deux simulations du MCR, CHRM56 et CHRM14, utilisent respectivement 20 et 30 niveaux verticaux et un pas de temps de 300 et 75 secondes.

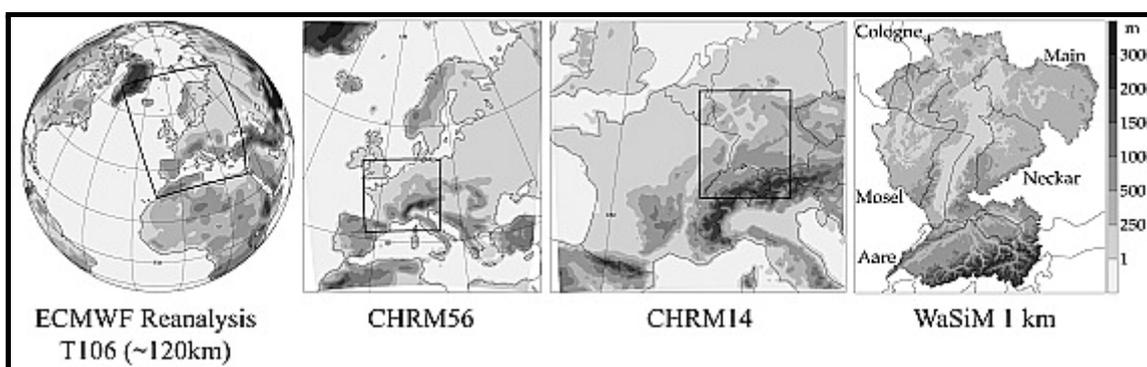


Fig 2.06 : Topographie de l'ECMWF Reanalysis, CHRM56, CHRM14, et du modèle de ruissellement distribué WaSiM pour illustrer les domaines du modèle et les résolutions des différents modèles (Kleinn et al., 2005).

Cette étude a permis de calibrer les précipitations dans CHMR. La *Figure 2.07* montre que CHRM14 simule de façon plus précise la répartition des précipitations que CHMR56, avec un effet de foehn bien présent sur la plaine d'Alsace.

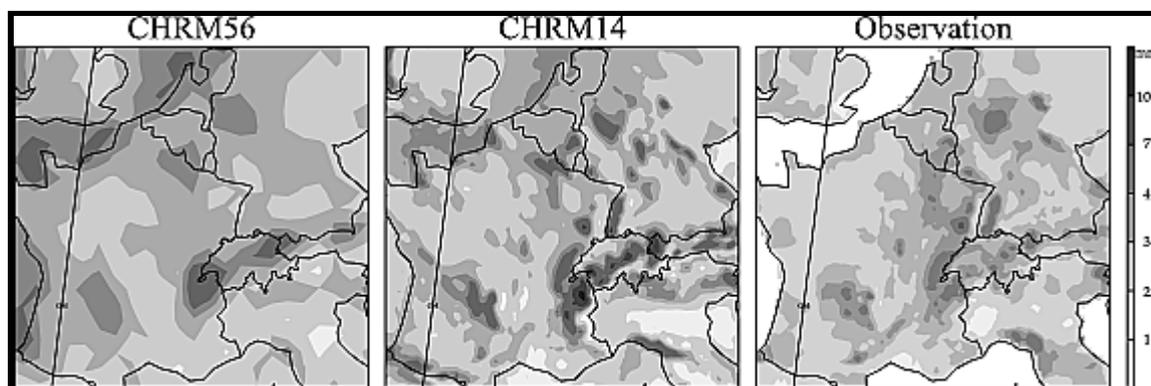


Fig 2.07 : Résultats des précipitations quotidiennes moyennes en mm des 5 hivers (1989/1990 à 1993/1994), chacun de novembre à janvier, simulées par CHMR56 et CHRM14 en comparaison avec les observations (Kleinn et al., 2005).

Une autre étude du même type réalisée par Khanal et al. (2019), a également fait l'objet d'un couplage d'un MCR avec un modèle hydrologique, dans le bassin du Rhin (voir *Figure 2.08*) Le modèle climatique régional RACMO 2 (Regional Atmospheric Climate Model) a été utilisé pour réduire dynamiquement l'ensemble des MCG EC-Earth pour la période 1951-2000 (Van Meijgaard et al., 2008; Hazeleger et al., 2012). Les données de précipitations quotidiennes de la grille E-OBS v14 à une résolution de 0,25° ont été utilisées pour corriger les biais des sorties du MCR. Ce MCR a permis encore une fois d'estimer avec une bonne précision les précipitations à l'échelle de ce domaine d'étude, en couplage avec le modèle hydrologique Spatial Processes in Hydrology (SPHY).

Enfin, d'autres études utilisant ces couplages MCR-Modèle hydrologique ont permis de calibrer et de valider ces MCR en ce qui concerne les précipitations ou encore l'humidité du sol :

- Khodayar et al. (2012) avec l'utilisation du MCR COSMO-CLM centré sur le fossé rhénan.
- Minarova (2017) en faisant une étude comparative des fortes précipitations dans les Vosges ainsi que dans les monts métallifères en Europe centrale en utilisant le WEI (Weather Extremity Index)

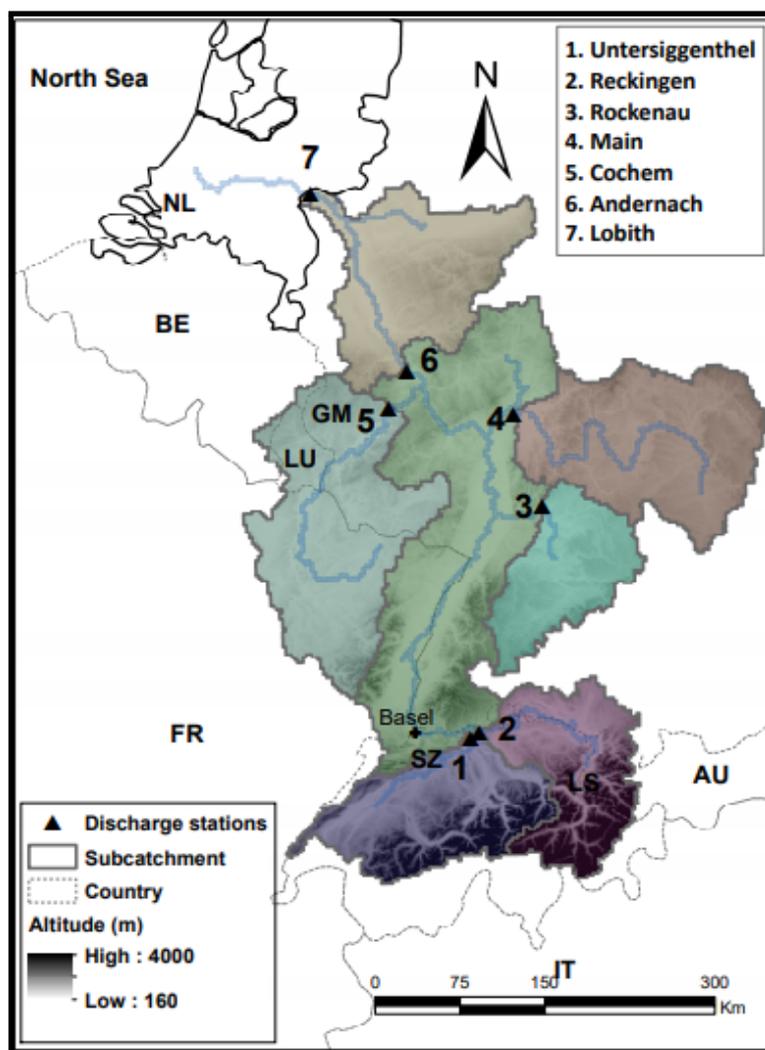


Fig 2.08 : Zone d'étude contenant les sept sous-bassins versants hydrographiques (Khanal et al., 2019)

En résumé, peu d'études se sont uniquement concentrées sur l'enneigement et l'effet de foehn présent dans les Vosges et en plaine d'Alsace, en utilisant un MCR. Néanmoins, d'autres massifs de moyenne montagne ont pu faire l'objet de calibrations et de validations de MCRs, dans le massif du Jura (Scherrer et al., 2019), et plus généralement sur l'ensemble des massifs français (Marteau et al., 2015; Rousselot et al., 2012; Zimmermann et al., 2013). Ce mémoire a donc pour but de tester et de valider un MCR, ici le modèle MAR, sur une zone dont l'échelle de travail n'a pas encore fait l'objet de telles études.

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE ET DONNÉES UTILISÉES

Ce chapitre a pour but de rassembler l'ensemble des données utilisées, que ce soient les données observées à disposition de cette étude, mais aussi les sorties du modèle MAR avec ses nombreuses configurations testées tout au long de cette étude.

Cette partie inclut donc deux phases de méthodologie. La première fait état du premier choix de stations, au nombre de huit, qui couvrent l'ensemble du domaine d'étude. Les problèmes rencontrés avec ce premier choix ont conduit à la nouvelle méthodologie qui présentera le choix de 14 stations. A la fin de ce chapitre, les problèmes rencontrés lors de certaines simulations MAR seront très brièvement évoqués.

3.1 Délimitation du domaine d'étude

Le domaine d'étude s'étend entre le massif des Vosges et une grande partie de la plaine d'Alsace, entre les stations de Strasbourg-Entzheim et de Bâle-Mulhouse (voir *Figure 3.01*). La région Alsace avec le massif des Vosges, constitue donc notre zone d'étude, nous pouvons donc la considérer au sein de ce travail comme la région AV.

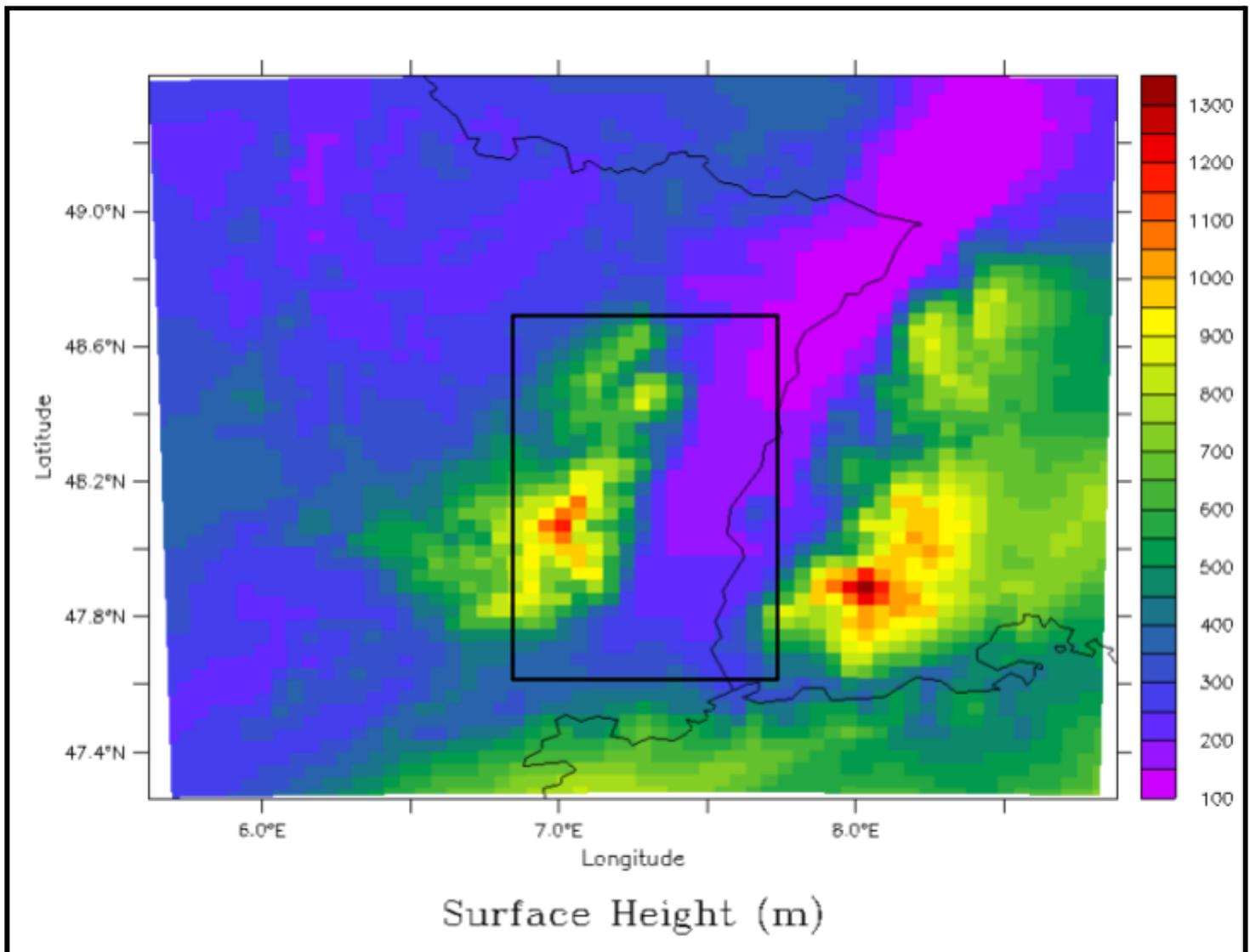


Fig 3.01 : Domaine d'étude (dans le rectangle noir) sur le fond topographique du domaine d'intégration utilisé par MAR. La résolution spatiale du modèle MAR correspond à 4x4 km² pour chaque pixel. L'échelle colorée correspond à l'altitude moyenne des pixels

3.2 Périodes choisies (2017-2018 et 2020-2021)

Dans le but de calibrer MAR en analysant et en comparant des hauteurs de neige, la période temporelle la plus importante à retenir est évidemment la saison hivernale. Dans un premier temps, sur sept des huit stations retenues, les comparaisons ont été faites sur une période s'étalant de début décembre à fin février afin de couvrir l'ensemble de l'hiver météorologique.

Pour le CHU, les hauteurs de neige peuvent être significatives bien plus tôt, et l'épaisseur de neige persiste jusqu'au printemps. La période temporelle s'est donc allongée de début novembre à fin avril. Par la suite, avec le choix des 14 stations, toutes les comparaisons ont été faites de début novembre à fin avril pour les périodes hivernales. Le total annuel des précipitations des quatre années : 2017, 2018, 2020 et 2021 (de janvier à fin avril) a également été comparé pour les 14 stations. Tous ces résultats seront vus dans le Chapitre IV.

Il est aussi important de tester MAR sur un hiver a priori banal, mais également un hiver récent, dans lequel il est plus facile d'obtenir assez de données observées pour les comparer. Le premier choix s'est donc porté sur l'hiver 2017-2018 qui s'est présenté en région AV comme un hiver assez standard mais plus doux que la normale dans l'ensemble (écart moyen de +1 à +1.5°C par rapport à la moyenne saisonnière de référence [1981-2010] selon Météo-France) et plus humide (+130% de précipitations par rapport à la moyenne saisonnière de référence, toujours selon Météo-France), avec donc peu de neige en plaine et de bonnes accumulations de neige au sein du massif vosgien, avec néanmoins une grande période de douceur en janvier qui a fait fondre une partie du manteau neigeux.

Pour l'hiver 2020-2021, la neige a été très présente au sein du massif vosgien, mais également en plaine dans une moindre mesure durant le mois de janvier. Malgré ce bon enneigement, une grande alternance de périodes de douceur et de froid s'est manifestée. L'excédent thermique a au final été également de l'ordre de +1°C en région AV sur l'ensemble de l'hiver, avec un excédent pluviométrique de +30% en moyenne. Cet hiver étant le plus récent, les données sont très fiables, notamment pour l'enneigement au CHU.

3.3 Données observées des huit stations

3.3.1 Stations utilisées au départ de l'étude

Au départ, huit stations équitablement réparties sur l'ensemble du domaine d'étude furent utilisées (voir *Tableau 3.01*), quatre stations au niveau de la plaine d'Alsace et quatre autres stations situées dans le massif des Vosges :

Nom de la station	Coordonnées (lat/lon)	Altitude de la station (m)	Type de station météorologique
Plaine d'Alsace			
Strasbourg-Entzheim	48.5495 / 7.6403	150	Station METAR/SYNOP
Kogenheim	48.3400 / 7.5400	162	Station amateur Infoclimat (depuis 2015)
Colmar-Meyenheim	47.9286 / 7.4076	207	Station METAR/SYNOP
Bâle-Mulhouse	47.6143 / 7.5100	263	Station METAR/SYNOP
Massif vosgien			
Vieux-Moulin	48.4000 / 7.0000	404	Station amateur Infoclimat (depuis 2017)
Geishouse	47.8800 / 7.0600	660	Station amateur Infoclimat (depuis 2017)
Xonrupt-Longemer	48.0800 / 6.9200	785	Station amateur Infoclimat (depuis 2015)
Xonrupt-Longemer CHU Chitelet	48.0516 / 7.0083	1220	Données Tj : AtMO_GE ; données HNj P-M. DAVID et al. (Niv'OSE), vérifiées par P. PAUL

Tab 3.01 : Tableau synoptique des huit stations retenues au préalable de cette étude

Ces huit stations ont été choisies dans un but de calibration spatiale du modèle MAR. En effet, les huit stations couvrent l'ensemble de la zone d'étude (voir *Figure 3.02*) permettant la vérification de la qualité du modèle MAR à simuler les variables climatiques sur toute la zone étudiée.

Le choix de ces stations s'est également fait sur la base de données vérifiées, précises et/ou justes. Les données des stations MF proviennent de données météorologiques prises en temps réel et donc avec peu d'erreurs. Pour les stations amateurs provenant du site Infoclimat, ces données proviennent du réseau statIC où les valeurs sont précises et où les données sont vérifiées par leur propriétaire, malgré certaines données manquantes ou pas toujours disponibles. Ces stations du réseau statIC permettent de consulter des relevés provenant de zones non couvertes par les stations synoptiques de Météo-France.

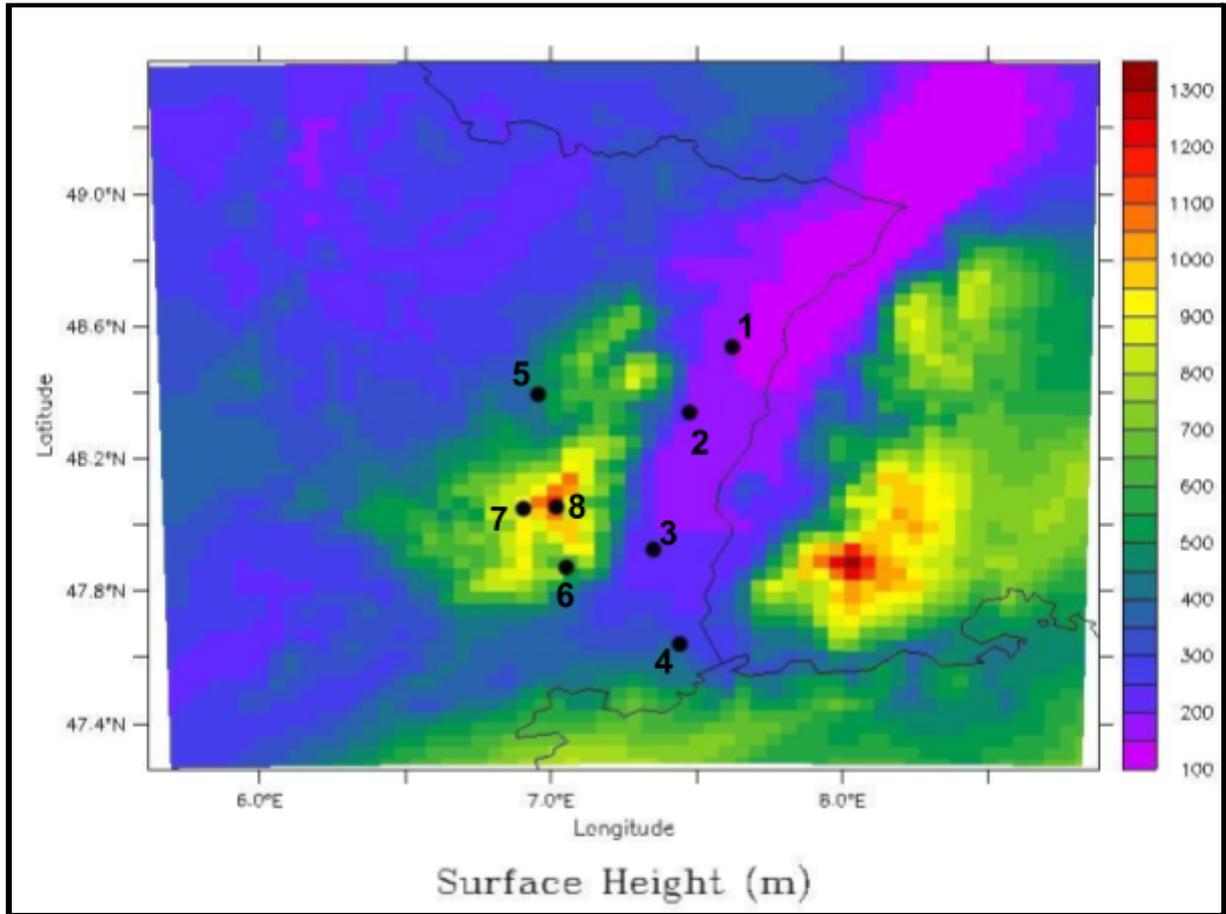


Fig 3.02 : Même figure que la Fig 3.01 avec les huit stations retenues ajoutées : 1 = Strasbourg-Entzheim; 2 = Kogenheim; 3 = Colmar-Meyenheim; 4 = Bâle-Mulhouse; 5 = Vieux-Moulin; 6 = Geishouse; 7 = Xonrupt-Longemer; 8 = Xonrupt-Chitelet

3.3.2 Choix des données utilisables et méthode de calcul

L'enneigement est l'objectif principal de cette étude. Pour ce faire, les variables qui vont contrôler l'enneigement doivent être étudiées et comparées avec MAR. Ces variables climatiques font partie des variables climatiques essentielles (VCE) introduites par le GCOS (Global Climate Observing System) en 1982. Le travail s'est donc concentré sur les températures de l'air en surface influençant la limite pluie/neige et les précipitations (pluvieuses et neigeuses), au pas de temps journalier. Sur certaines stations retenues, les hauteurs de neige ont été mesurées chaque jour.

Pour toutes les stations retenues (MF ou amateurs), mais également pour les 14 stations retenues par la suite, les températures et les précipitations ont été calculées selon les normes officielles de l'OMM (Organisation Mondiale de Météorologie) :

- La température minimale TN du jour J a été calculée comme la température la plus basse entre 18h UTC du jour J-1 et 18h UTC du jour J
- La température maximale TX du jour J a été calculée comme la température la plus élevée entre 06h UTC du jour J et 06h UTC du jour J+1
- La température moyenne journalière TM du jour J a été calculée comme la moyenne des TN et TX du jour J: $TM = (TX + TN)/2$
- Les précipitations journalières Pj correspondent au cumul des précipitations totales tombées de 06h UTC du jour J à 06h UTC du jour J+1
- La hauteur de neige HN du jour J est la hauteur de neige mesurée à 06h UTC le jour J

Enfin, il est important de noter que certaines stations retenues ne possèdent pas des données de hauteurs de neige ou possèdent des données incomplètes (voir *Tableau 3.02*) sur la période temporelle choisie.

Nom de la station	Disponibilité des données journalières		
	Températures (°C)	Précipitations (mm)	Hauteurs de neige (cm)
Strasbourg-Entzheim	X	X	X
Kogenheim	X	X	O
Colmar-Meyenheim	X	X	X
Bâle-Mulhouse	X	X	X
Vieux-Moulin	X	X	X
Geishouse	X	X	O
Xonrupt-Longemer	X	X	O
Xonrupt-Chitelet	X	E	X

Tab 3.02 : Tableau synoptique de la disponibilité (sur la période hivernale 2017-2018) des données nécessaires à l'étude. (X= disponible et aucune donnée manquante; O = indisponible et/ou donnée manquante; E = données estimées)

3.4 Données du Chalet Universitaire (CHU)

Les données récoltées du CHU proviennent de plusieurs sources :

- Les températures proviennent des données ATMO Grand-Est, qui est une association agréée chargée de la surveillance de la qualité de l'air dans l'ensemble de la région Grand-Est.
- Les précipitations ont été estimées selon une très bonne régression linéaire des données (1991-1997) de la station MF de Xonrupt-Longemer au Lac (745 m).
- Enfin, les données d'enneigement proviennent de P-M. David, ("observateur de la neige" diplômé et président le réseau vosgien Niv'Ose) et *al.*



*Fig 3.03 : Logo de l'association Niv'OSE, créée en 1976 par P-M. DAVID
(David, 2021)*

Niv'Ose (contact : niv.ose.hv@gmail.com et site web : <https://nivose-vosges.org/>) est une association bénévole qui constitue un réseau d'observateurs de la neige au sein du massif vosgien. Elle est constituée d'un ensemble de collaborateurs observateurs, qui, au départ, a été initié en 1976 par P-M. DAVID. Les observations sont aujourd'hui réalisées au niveau du Jardin du CHU à 1220 mètres d'altitude. Grâce aux mesures quotidiennes du manteau neigeux depuis plus de 44 ans, cette association Niv'Ose peut suivre l'évolution des hauteurs de neige dans les Hautes-Vosges et nous permet également de réaliser cette étude avec soin.

3.5 Le modèle MAR

3.5.1 Présentation succincte du modèle

Le Modèle Atmosphérique Régional (MAR), est un MCR, créé dans les années 1990, qui est maintenant développé à l'Université de Liège (ULg) en Belgique et à l'Université de Grenoble-Alpes (UGA) en France respectivement par Dr. Fettweis et Dr. Gallée. MAR sera utilisé tout au long de cette étude et servira de base aux comparaisons.

Le modèle MAR permet de simuler le climat sur un domaine d'intégration assez restreint (Fettweis et *al.*, 2017). Il consiste en un modèle atmosphérique tridimensionnel à équations primitives qui peut prédire l'évolution climatique/météorologique à méso-échelle (3-30km) d'un domaine couplé terre-atmosphère défini et donc restreint (Gallée & Schayes 1994; Fettweis et *al.* 2005; Damseaux, 2018). Concrètement, le modèle MAR simule aussi bien les processus atmosphériques (Gallée & Schayes, 1994; Gallée et *al.*, 1995), que les processus de surface, c'est-à-dire la végétation ainsi que la couverture de neige ou de glace. Plus précisément, ce MCR est couplé à un module de transfert surface-atmosphère (1-D SISVAT Multi-Layered [Soil Ice Snow Vegetation Atmosphere Transfer]) composé lui-même de trois sous-modules (De Ridder & Gallée, 1998) :

- Sous-module sol et végétation
- Sous-module neige
- Sous-module glace

Le modèle MAR a d'ailleurs d'abord été testé et développé dans les régions polaires telles que le Groenland (Fettweis et *al.*, 2013). Il a ensuite été testé et adapté pour un climat tempéré comme la Belgique (Wyard et *al.*, 2016; Wyard et *al.*, 2017), puis dans un climat équatorial en Afrique Intertropicale (Doutreloup et *al.*, 2017).

Enfin, le modèle MAR a récemment été testé en Patagonie en Amérique du Sud dans le cadre d'une étude sur l'effet de foehn créé par la chaîne de montagnes des Andes (Dамseaux, 2018). MAR peut donc s'adapter à n'importe quel type de climat et de topographie, au vu de son aspect régional permettant de calibrer sa physique à un climat donné. Ce couplage induit des transferts d'énergie et des flux de masse entre la surface et l'atmosphère. Les frontières atmosphériques à tous les niveaux verticaux (vent, humidité, température et pression de surface) et océanographiques (température de surface de la mer

ainsi que la couverture de glace de mer) du modèle MAR sont forcées toutes les six heures par les réanalyses ERA-5 développées par le Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen terme (ECMWF) à une résolution spatiale de $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ (Fettweis, 2020).

MAR possède un outil de pré-traitements autonome NESTOR (NESTing Organization for the preparation of meteorological and surface fields in Regional models), qui permet d'initialiser le domaine MAR (voir *Fig 3.04*) en interpolant les variables climatiques issues des réanalyses ERA-5.

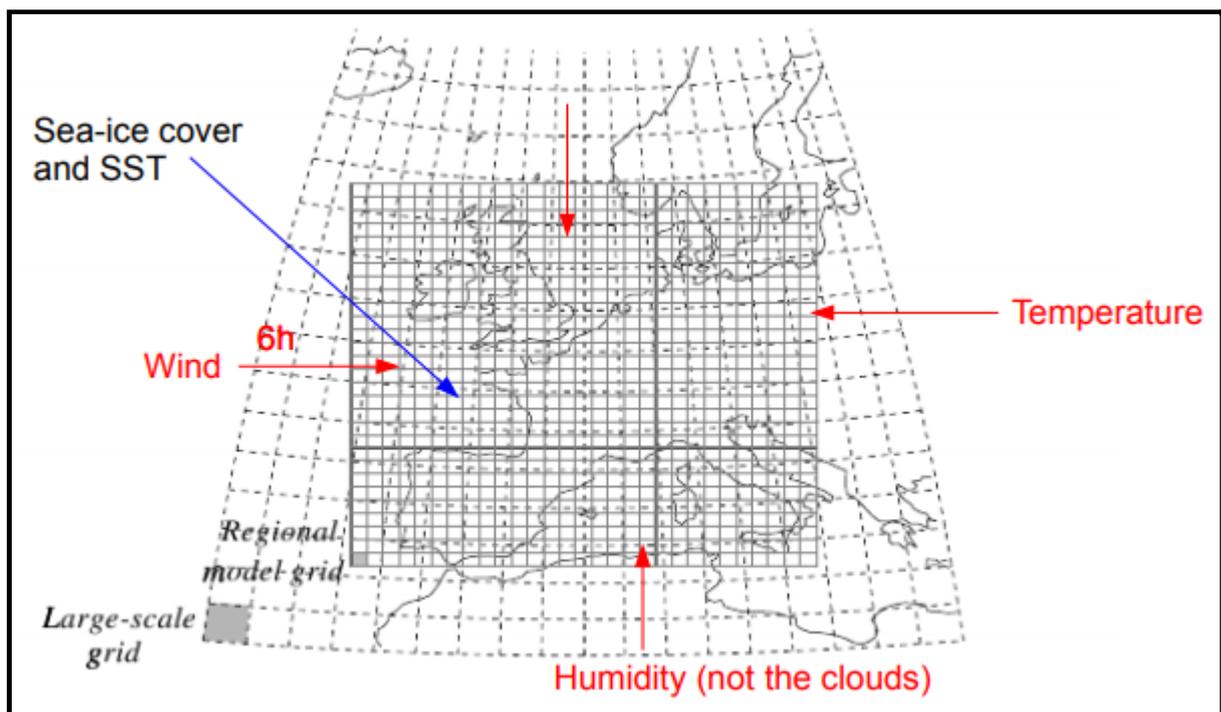


Fig 3.04 : Représentation de la création du maillage du modèle MAR et variables interpolées par NESTOR (Fettweis, 2020)

3.5.2 Intérêt de l'utilisation du modèle MAR pour cette étude

L'utilisation d'un MCR est primordial dans le cadre de cette étude. Les comparaisons établies sur une zone "régionale" doivent se faire précisément, aussi bien pour les variables climatiques atmosphériques (température + précipitations) que pour le module SISVAT avec les épaisseurs de neige simulées au sol. Les nombreuses études réalisées avec le modèle MAR montrent que son modèle de neige est très sophistiqué car il a été initialement développé pour les régions polaires. Ce modèle a d'ailleurs déjà montré ses aptitudes à simuler la neige en Ardenne Belge (Wyart et *al.*, 2017). De façon secondaire, le modèle MAR possède également des aptitudes à simuler les vents catabatiques (Gallée & Schayes,

1994), ce modèle étant utilisé dans des zones à forte diversité topographique. MAR se présente donc comme le candidat parfait dans le cadre de ce mémoire.

3.5.3 Méthode de traitement des données MAR

Les pixels du modèle MAR font 4 km de côté, donc chaque station météorologique se trouve au moins dans un pixel du maillage MAR. Mais il sera vu que plusieurs stations se retrouveront dans le même pixel, dont certaines qui se localiseront “à cheval” entre plusieurs pixels voisins. Le pixel MAR correspond au climat du centre du pixel, utilisant la topographie moyenne de l’ensemble du pixel. Par conséquent, une station, même si elle est incluse dans le pixel, peut avoir une altitude complètement différente au sein du modèle (voir *Tab 3.03*)

La méthode a donc été de prendre le pixel MAR le plus proche en altitude dans un rayon de 10 km autour de la station. L’idée a été de faire correspondre au maximum l’altitude moyenne du pixel avec l’altitude de la station, car les températures et l’enneigement sont très dépendants de l’altitude. Cette méthode s’apparente donc à un “ajustement altitudinal” pour le choix du pixel MAR.

L’ajustement altitudinal au dépit de la géolocalisation exacte des stations sur le maillage du modèle MAR doit permettre une meilleure simulation des températures, et donc par conséquent de l’enneigement, car celui-ci dépend à la fois des températures et des précipitations. Ces pixels choisis “selon l’altitude” sont appelés dans cette étude les “Pixels_T”, en référence à la dépendance de la température “T” selon l’altitude. Les Pixels_T sont donc uniquement choisis afin de pouvoir calibrer MAR sur les températures, car dans la réalité et au sein du modèle MAR, la décroissance des températures se fait selon l’altitude, et non selon la distance à la ligne de crête (Douguédroit et *al.*, 1970). Les résultats des comparaisons sur les huit stations qui seront vus dans le Chapitre IV seront établis avec les Pixels_T des stations.

Par ailleurs, lorsque ce choix de Pixels_T a été fait au début de l’étude, la répartition et la variabilité spatiale des précipitations “P” par rapport à la ligne de crête vosgienne n’ont pas été prises en compte. Ces Pixels_T fausseront donc largement les résultats s’ils sont utilisés pour les comparaisons en précipitations.

De façon concrète, voici le tableau de l'altitude des stations retenues au départ, et leur altitude choisie, avec les coordonnées des pixels MAR (*Tab 3.03*).

Nom de la station	Coordonnées (lat/lon) de la station	Altitude de la station (m)	Coordonnées (lat/lon) du Pixel_T choisi	Altitude moyenne du Pixel_T (m)	Distance entre le Pixel_T utilisé et la station (km)
Strasbourg-Entzheim	48.5495 / 7.6403	150	48.54 / 7.663	146	2.67
Kogenheim	48.3400 / 7.5400	162	48.32 / 7.554	162	2.25
Colmar-Meyenheim	47.9286 / 7.4076	207	47.93 / 7.393	208	1.27
Bâle-Mulhouse	47.6143 / 7.5100	263	47.60 / 7.553	265	3.41
Vieux-Moulin	48.4000 / 7.0000	404	48.39 / 6.797	407	9.86
Geishouse	47.8800 / 7.0600	660	47.89 / 7.071	618	1.95
Xonrupt-Longemer	48.0800 / 6.9200	785	48.07 / 6.801	779	8.93
Xonrupt-Chitelet	48.0516 / 7.0083	1220	48.07 / 7.016	1218	2.13

Tab 3.03 : Tableau de comparaison des coordonnées et des altitudes des stations vs celles des Pixels_T correspondants

Le traitement des sorties des températures, des précipitations et des hauteurs de neige du modèle MAR s'est fait selon la même norme utilisée pour les données observées, à savoir la norme de l'OMM. C'est-à-dire le calcul de la moyenne journalière des températures (de 00h TU à 24h TU), le calcul des cumuls journaliers de précipitations (de 06h TU à 06h TU [j+1]), ainsi que la hauteur de neige (à 06h TU), sachant qu'il faisait des sorties avec un pas de temps horaire de 6 heures : (T00h=> T06h). Il y a donc quatre intervalles de pas de temps horaire de 6 heures par jour au sein du modèle MAR.

3.6 Ajout de plusieurs stations et introduction des Pixels_P

De nouvelles stations ont été ajoutées, en ayant les données de ces stations vosgiennes en plus, et très fiables, sur les hivers 2017-2018 et 2020-2021. Ces stations sont représentatives des différents topoclimats du massif vosgien :

- La station CHU du Chalet Universitaire à Xonrupt-Longemer, proche de la crête principale
- 9 stations MF vosgiennes: 2 sur le versant vosgien "au vent", 2 proches des crêtes principales, 5 sur le versant alsacien "sous le vent" (3 à l'E, 2 au SE et S du massif)
- 4 stations MF en plaine d'Alsace

C'est donc au total 14 stations qui ont été choisies, selon la ligne de crête vosgienne principale. Voici ci-dessous le tableau synoptique de ces 14 nouvelles stations (*Tab 3.04*):

Stations	MF/INSEE	sigle	11 14 9 34				Caractéristiques topographiques					Pixels_P (station)			Pixels_T (altitude station)			
			Tj	Pj	HNj	34	Altitude (m)	Latitude (°)	Longitude (°)	Distance O-E à crête (km)	Crête proche	coord i	coord j	Altitude (m)	coord i	coord j	Altitude (m)	Dist (km) à la station
versant vosgien:																		
LA BRESSE-3 SPAC	88075005	La Bresse	x	x	x	3	772	48.0076	6.9415	-3.0	Rainkopf	25	21	859.9	22	23	779	12.55
XONRUPT-LONGEMER_LAC	88531002	XL_Lac		x	x	2	745	48.0685	6.9485	-5.3	Schlucht	25	23	1057.0	22	24	725	11.52
crêtes:																		
XONRUPT-LONGEMER_CHU		CHU	x	(estimé)	x	3	1220	48.0516	7.0083	-0.6	3 Fours	26	23	1218.0	26	23	1218	2.13
ODEREN_MARKSTEIN	68247003	Marks	x	x	x	3	1184	47.9230	7.0316	0.0	Markstein	26	19	727.3	26	22	1084	11.97
ORBAY_LAC BLANC-2	68249002	Lac_BI	x	x		2	1080	48.1358	7.1038	1.0	Calvaire	27	25	1073.0	27	25	1073	2.63
versant alsacien:																		
- est:																		
MITTLACH	68210002	Mittlach		x	x	2	552	48.0053	7.0293	3.3	Rainkopf	26	21	985.6	29	23	549	13.14
BREITENBACH	68051001	Breit		x	x	2	466	48.0213	7.1036	7.5	Kastelberg	28	22	843.1	30	23	449	10.92
MUNSTER	68226005	Munster	x	x		2	420	48.0471	7.1173	7.5	Martinswand	28	22	843.1	30	21	408	10.02
- sud-est et sud:																		
KRUTH_BARRAGE SAPC	68171002	Kruth	x	x		2	512	47.9441	6.9550	2.5	Ventron	25	19	701.3	20	23	512	24.02
GEISHOUSE	68102001	Geis	x	x		2	618	47.8753	7.0568	11.0	Drumont	27	18	618.0	27	18	618	1.95
plaine d'Alsace:																		
COLMAR_INRA	68066001	Col_In	x	x		2	202	48.0633	7.3300	23.0	Tanet	32	23	202.0	32	23	202	1.00
COLMAR_MEYENHEIM	68205001	Col_Me	x	x	x	3	207	47.9286	7.4076	28.0	Markstein	33	19	208.0	33	19	208	1.27
BLE_MULHOUSE	68297001	Bâ_mu	x	x	x	3	263	47.6143	7.5100	34.0	Trouée Belfort	36	10	265.0	36	10	265	3.41
STRASBOURG_ENTZHEIM	67124001	Stras	x	x	x	3	150	48.5495	7.6403	29.0	Donon	38	36	146.0	38	36	146	2.67

Tab 3.04 : Tableau synoptique des 14 stations, avec leurs caractéristiques topographiques ainsi que les Pixels_T et Pixels_P correspondants.

Au sein de ce *Tableau 3.04*, les 14 stations sont organisées selon leur emplacement par rapport à la ligne de crête vosgienne principale. La colonne MF/INSEE correspond au numéro Météo-France de chaque station, ce sont donc toutes des stations professionnelles. Les sigles de chaque station seront utilisés dans le Chapitre IV avec les résultats.

La deuxième catégorie de colonnes montre la disponibilité en données journalières de températures (T_j), de précipitations (P_j) et de hauteurs de neige (HN_j). Au total, 34 jeux de données sont disponibles pour l'ensemble des stations. La distance Ouest-Est (O-E) à la ligne de crête est un bon indicateur dans le but de donner une idée sur la pluviométrie de chaque station. En effet, comme vu précédemment, le gradient pluviométrique dépend surtout de la distance à la ligne de crête, avec notamment un gradient plus fort sur le versant alsacien dû à l'effet de foehn.

Ne dépendant pas vraiment de l'altitude, c'est pour cela que les "Pixels_P" ont été introduits pour chaque station, en référence aux précipitations P. Ces Pixels_P sont en réalité les pixels où se trouvent les stations, afin que la distance entre la station et la ligne de crête soit similaire avec la distance entre le pixel MAR lui-même et cette ligne de crête. Il est donc normal que les différences d'altitudes soient notables entre les stations et leur Pixel_P respectifs.

C'est donc par souci de visualisation que le pixel de la station s'appelle "Pixel_P" au sein de ce mémoire, en opposition avec les Pixels_T. Néanmoins, certaines stations possèdent le même Pixel P et T (voir *Tab 3.05*), et notamment les quatre stations de plaine, en raison de leur topographie plane et donc une altitude moyenne du pixel MAR correspondant ou presque à la même altitude de la station. Au total, 8 stations ont un Pixel_T différent du Pixel_P sur les 14 étudiées.

De plus, certaines stations sont également situées en bordure de leur Pixel_P (pixel dans lequel elles sont situées). C'est le cas pour cinq stations : La Bresse, Mittlach, Breitenbach, Munster (en bordure avec deux autres pixels), Kruth et Colmar-Meyenheim.

Etant donné que les résultats d'un pixel correspond à une moyenne sur l'ensemble du pixel MAR, si la station est située en bordure de celui-ci, il est important d'effectuer également des comparaisons sur le pixel dont il est le "voisin", afin de voir quel pixel donne les meilleurs résultats. Ce pixel voisin sera appelé "Pixel_V" dans ce travail.

Station	Pixel_T = Pixel_P	Pixel_T ≠ Pixel_P	Pixel_V
La Bresse		X	X
XL_Lac		X	
CHU	X		
Markstein		X	
Lac_Blanc	X		
Mittlach		X	X
Breitenbach		X	X
Munster		X	XX
Kruth		X	X
Geishouse	X		
Colmar_Inra	X		
Colmar_Meyenheim	X		X
Bâle_Mulhouse	X		
Strasbourg_Entzheim	X		

Tab 3.05 : Liste des stations possédant, ou non, leur Pixel_P et leur Pixel_T confondus ainsi qu'un pixel voisin (Pixel_V)

Ci-dessous, le maillage du modèle MAR sur un fond de carte topographique représentant le domaine d'étude, à l'exception de Strasbourg-Entzheim et de Bâle-Mulhouse (voir *Fig 3.05*). Sur cette carte est montré les pixels du maillage MAR à 4x4km avec la position exacte des 12 stations numérotées de 1 à 12 et représentées par les points noirs :

- 1= La Bresse; 2= XL_Lac; 3= CHU; 4= Markstein; 5= Lac_Blanc; 6= Mittlach; 7= Breitenbach; 8= Munster; 9= Kruth; 10= Geishouse; 11= Colmar_Meyenheim; 12= Colmar_Inra.

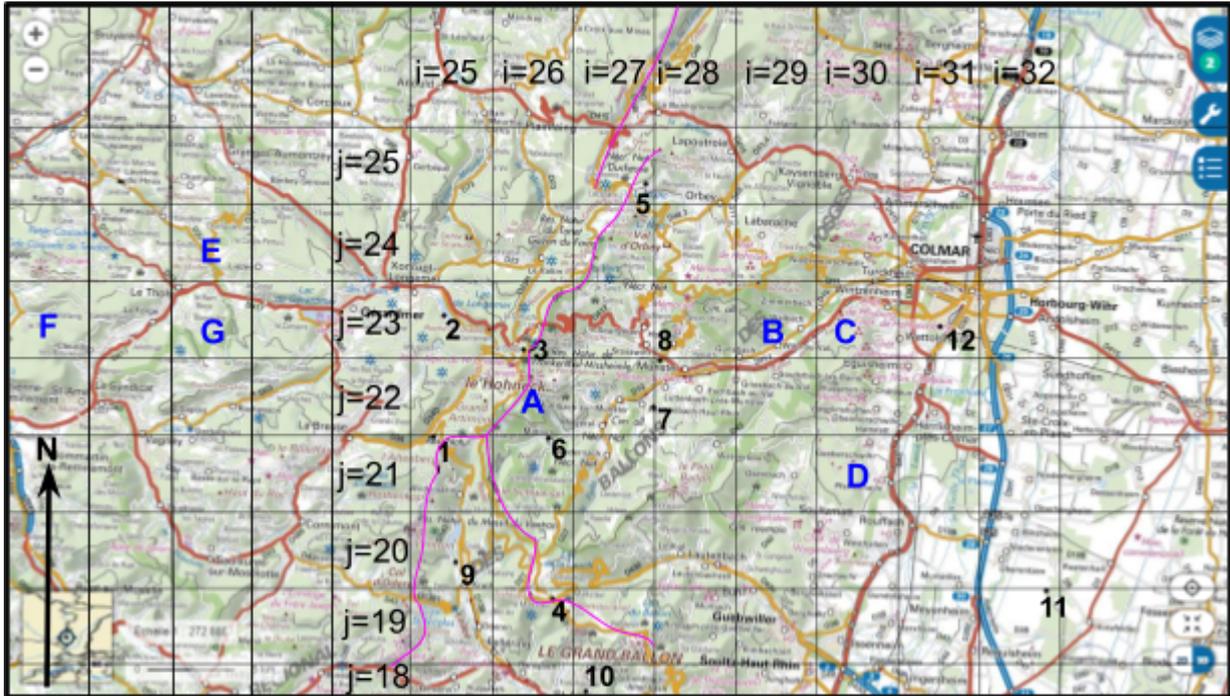


Fig 3.05 : Carte en coordonnées géographiques en degrés décimaux (Latitude/Longitude) montrant le maillage MAR sur un fond topographique IGN représentant le massif vosgien et une partie de la plaine d'Alsace, avec les principales lignes de crête représentées en rose.
(Source du fond : <https://www.geoportail.gouv.fr/>)

Mis à part les deux stations de Colmar, l'ensemble des stations se concentrent donc sur le massif vosgien, avec visuellement, les stations qui représentent chaque partie de ce massif : La Bresse (1) et XL_Lac (2) situées à l'Ouest de la principale ligne de crête, sur le versant vosgien "au vent"; le CHU (3), le Markstein (4) et le Lac_Blanc (5) situées à proximité de la crête principale; Mittlach (6), Breitenbach (7) et Munster (8) situées à l'Est de la principale ligne de crête; et enfin Kruth (9) et Geishouse (10) situées au Sud et Sud-Est de la crête, ces deux stations étant également sur le versant Alsacien "sous le vent".

Les Pixels_P des stations représentent donc les pixels dans lesquels les stations se trouvent sur cette carte, avec les coordonnées (i;j) du modèle MAR. Cependant, les Pixels_T des stations dont leur Pixel_P et Pixel_T diffèrent (voir Tab 3.05) sont également représentés sur cette carte sous forme de lettre en bleu :

- A= Markstein; B= Mittlach; C= Breitenbach; D= Munster; E= XL_Lac; F= Kruth; G= La Bresse.

Ce n'est donc pas la position des stations, mais l'emplacement de leur Pixel_T au sein du maillage MAR qui est représenté sur cette carte. Pour exemple, la station de Kruth possède son Pixel_T : "F" très loin d'elle, à une distance de 24.02 km. Cette grande distance crée de forts biais entre l'observation et le modèle en prenant donc le Pixel_T de cette station : pour cet exemple, MAR15 (qui correspond à la simulation MAR sans correction relative d'humidité spécifique aux frontières latérales du modèle [voir *Section 3.7*]) simule à peine 55% des précipitations totales tombées à la station de Kruth sur l'ensemble de l'année 2017, et seulement 56.2% sur l'ensemble des quatre années (2017+2018+2020+2021[01-04]). C'est pourquoi les Pixels_T sont uniquement utiles dans le cadre des comparaisons de températures, et surtout pas pour les comparaisons de précipitations.

Enfin, cette carte montre bien les stations possédant au moins un Pixel_V, car celles-ci sont situées sur les bords de leur pixel (voir *Tab 3.05*).

3.7 Liste de l'ensemble des simulations MAR utilisées au cours de l'étude

Cette sous-partie résume de façon synthétique toutes les simulations du modèle MAR qui ont été réalisées au sein de ce mémoire, afin de calibrer au mieux MAR sur les données observées en termes de températures, de précipitations et de hauteurs de neige durant les hivers 2017-2018 et 2020-2021. Un poids plus important a été donné pour les stations situées sur les crêtes vosgiennes, et notamment au CHU, qui constitue la station "clé" pour la calibration, et donc les ajustements du MAR.

Ci-dessous, un tableau synoptique résumant l'ensemble des simulations du MAR utilisées, et leurs calibrations principales (changements de variables par rapport aux simulations précédentes, etc...).

Simulation MAR	Date de sortie	Version MAR	Correction relative d'humidité spécifique aux frontières latérales du modèle	Diffusion de l'humidité (sans unité)	Seuil de température de la limite pluie/neige	Autres caractéristiques
MAR01	Août 2020	3.11.5	Aucune	15	-2°C	X
MAR02	25/02/2021	3.11.97	+5%	10	-2°C	Imposition de la conservation de la masse
MAR03	08/04/2021	3.11.98	+4%	10	2°C	Bilan hydrique rétabli
MAR09	12/05/2021	3.12.0.1	+2%	15	continu entre 2°C et -1°C	X
MAR10	12/05/2021	3.12.0.1	+2.5%	15	continu entre 2°C et -1°C	X
MAR11	12/05/2021	3.12.0.1	+3%	15	continu entre 2°C et -1°C	X
MAR12	12/05/2021	3.12.0.1	+3.5%	15	continu entre 2°C et -1°C	X
MAR13	12/05/2021	3.12.0.1	+1%	15	continu entre 2°C et -1°C	X
MAR14	16/05/2021	3.12.0.1	+1.5%	15	continu entre 2°C et -1°C	X
MAR15	16/05/2021	3.12.0.1	+0%	15	continu entre 2°C et -1°C	X
MAR16	26/05/2021	3.12.0.1	+2.25%	15	continu entre 2°C et -1°C	X
MAR17	14/06/2021	3.12.0.1	-1.5%	5	continu entre 2°C et 0°C	Baisse drastique de la diffusion de l'humidité
MAR18	23/06/2021	3.12.0.1	+2%	15	continu entre 2°C et 0°C	màj de MAR09
MAR19	23/06/2021	3.12.0.1	+1.5%	15	continu entre 2°C et 0°C	màj de MAR14

Tab 3.06 : Liste des simulations MAR utilisées et leurs caractéristiques, sans MAR04-08

Dans ce tableau figure les principaux ajustements du modèle MAR, afin d'obtenir *in fine* la meilleure calibration possible, à la fois des températures, des précipitations, ainsi que des hauteurs de neige.

En quatrième colonne, la correction relative d'humidité spécifique aux frontières latérales du modèle a été nécessaire pour l'ensemble des ajustement MAR. En effet, MAR est forcé par ERA-5, qui n'utilise pas les mêmes formules d'humidité saturante que MAR dans ses équations. Par conséquent, une masse d'air qui est considérée comme saturée pour ERA-5 peut arriver dans MAR sous forme non saturée. Cela explique l'augmentation de l'humidité spécifique entrant au sein du domaine d'intégration, qui est ici nécessaire dans le cadre de cette étude.

Le changement de la diffusion de l'humidité a également été important car cette diffusion impacte aussi bien l'advection d'humidité spécifique dans le domaine d'intégration MAR, mais aussi la perte d'humidité spécifique aux frontières du modèle par diffusion. Ce paramètre de diffusion gère donc les entrées-sorties de l'humidité spécifique au sein du domaine et a donc été réglé en fonction du correcteur d'humidité spécifique aux frontières.

Les simulations MAR04-05-06-07-08 ne figurent pas dans ce tableau, car elles n'ont rien apporté à l'étude. Cependant, certains résultats de ces simulations seront introduits en Annexes. Tous les résultats qui vont suivre ont été construits avec les 14 simulations MAR de ce tableau.

3.8 Conclusion de la méthodologie

L'ensemble de cette méthodologie a été crucial dans l'évolution du travail. Le choix des Pixels_T au départ pour les 8 premières stations, a permis, au vu des résultats qui seront analysés, à reconsidérer la méthode de comparaison, en introduisant notamment les Pixels_P avec les 14 stations représentatives du climat vosgien. Le grand nombre de simulations MAR atteste bien de la difficulté de calibrer un modèle sur la base d'observations, en particulier dans une zone montagnaise où les variations de températures, de précipitations et de hauteurs de neige sont fortes.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS DE L'ÉTUDE

4.1 Réglage des températures sur 8 stations (MAR01)

A l'aide de la programmation, les données MAR ont pu être comparées avec les données observées (OBS) au pas de temps journalier, selon la méthode énoncée.

Dans cette partie, les premiers résultats montrent les comparaisons faites entre MAR01 et les OBS pour les huit stations retenues, seulement pour les températures moyennes journalières. La comparaison des hauteurs de neige sera montrée uniquement pour le CHU dans cette partie, car l'enneigement n'a été que très peu significatif en plaine pour cet hiver 2017-2018. Les comparaisons de précipitations apparaîtront à partir de MAR02.

Ci-dessous, les résultats des comparaisons entre MAR01 et OBS pour la température moyenne journalière (TMj) sur l'ensemble de la période hivernale 2017-2018 :

4.1.1 En plaine d'Alsace

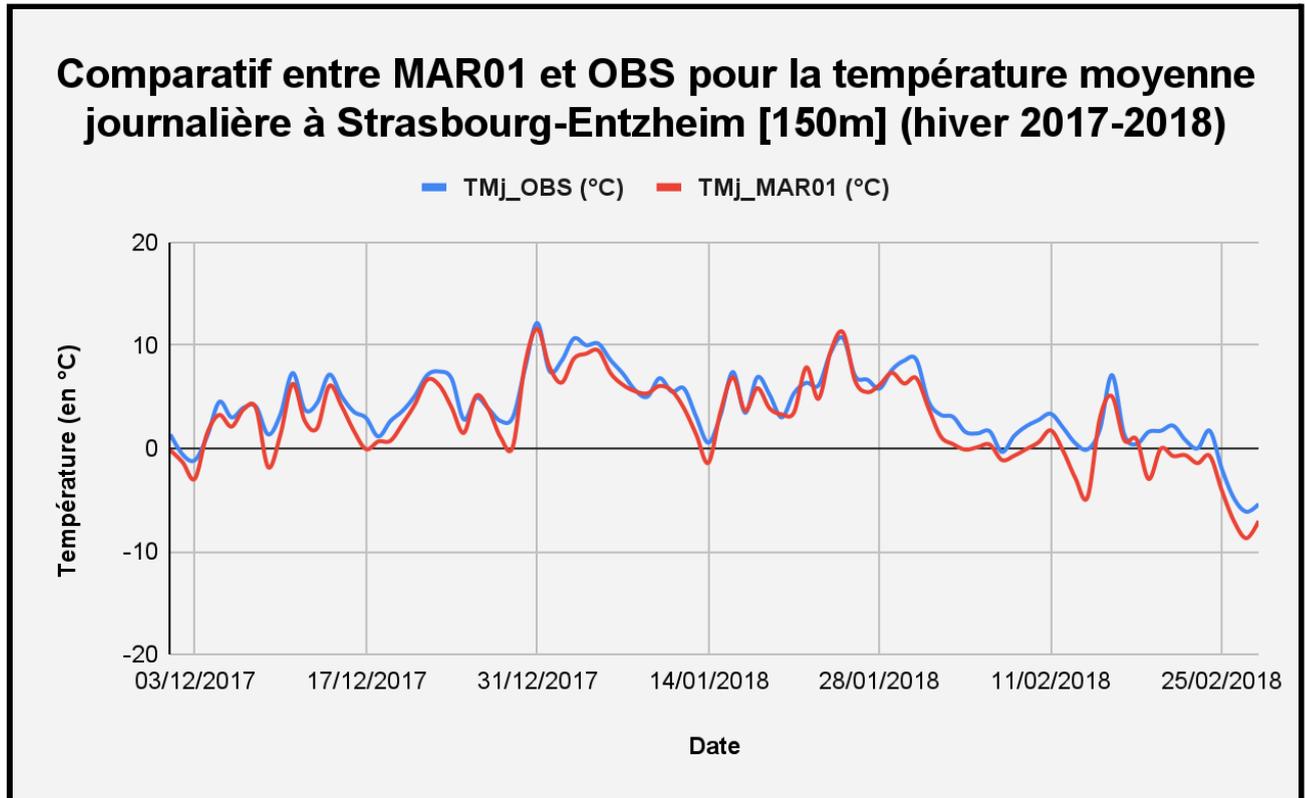


Fig 4.01 : Évolution des températures moyennes journalières TMj observées (OBS: en bleu) et simulées (MAR01: en rouge) pour la station Strasbourg-Entzheim (151 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

Régression linéaire simple des données TMj de MAR01 et OBS à Strasbourg-Entzheim [150m] (hiver 2017-2018)

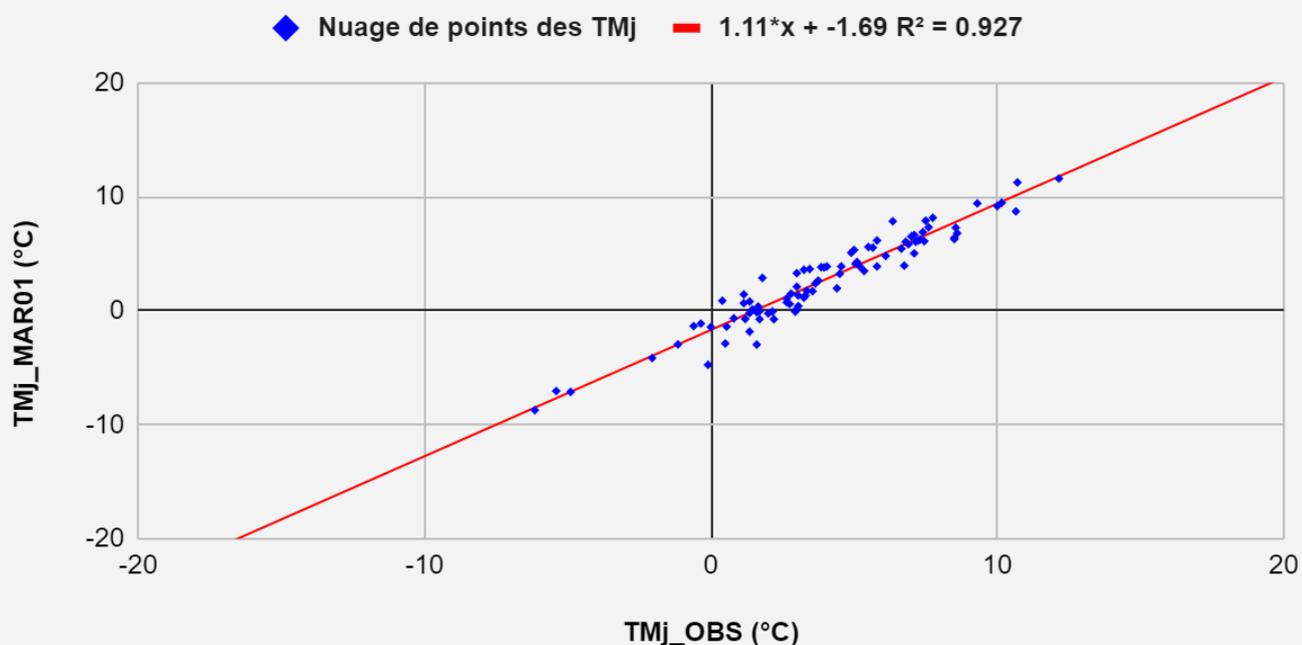


Fig 4.02 : Comparaison des températures moyennes journalières TMj simulées (MAR01) et observées (OBS) pour la station Strasbourg-Entzheim (151 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018. Droite de régression: $MAR = 1.11 \text{ OBS} - 1.69$, $R^2 = 0.927$

Comparatif entre MAR01 et OBS pour la température moyenne journalière à Kogenheim [162m] (hiver 2017-2018)

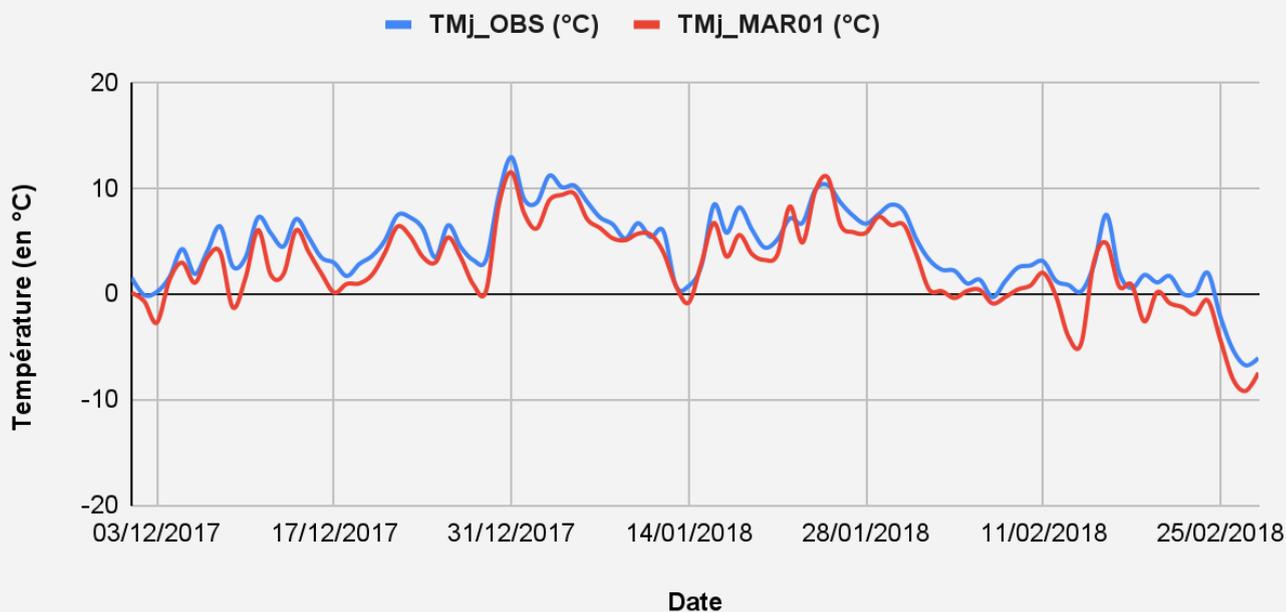


Fig 4.03 : Évolution des températures moyennes journalières *TMj* observées (OBS: en bleu) et simulées (MAR01: en rouge) pour la station Kogenheim (162 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

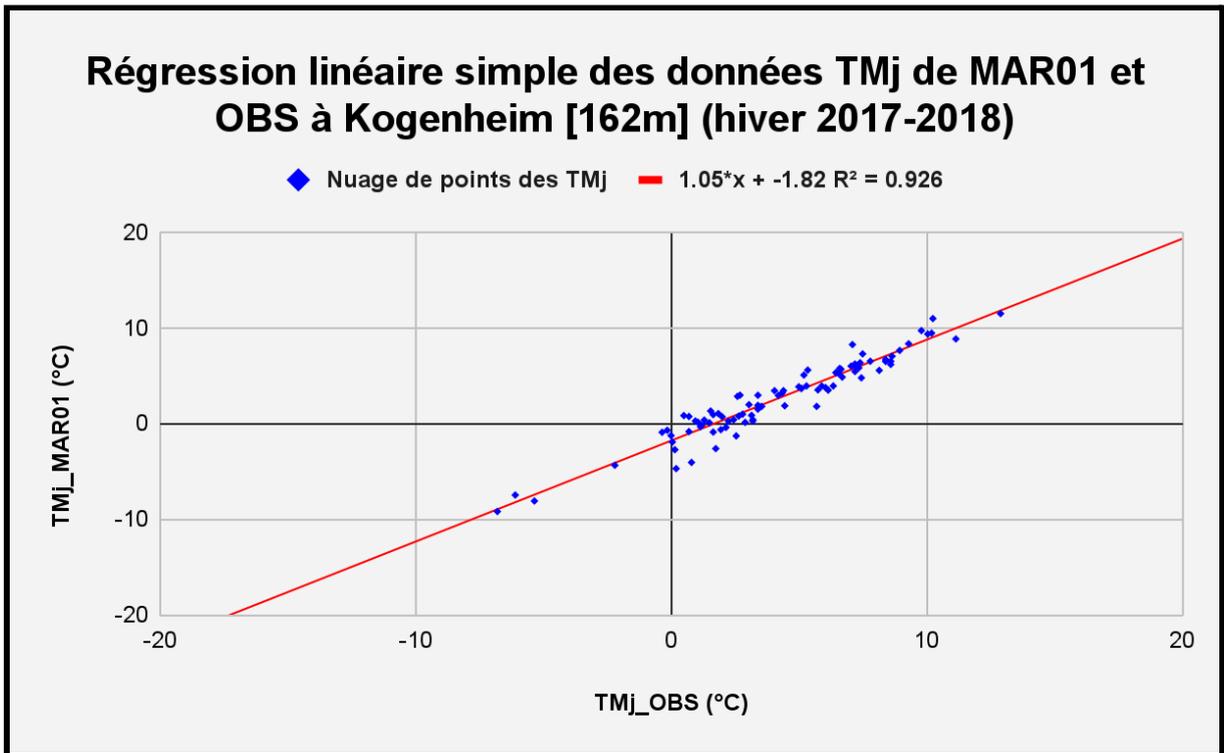


Fig 4.04 : Comparaison des températures moyennes journalières TMj simulées (MAR01) et observées (OBS) pour la station Kogenheim (162 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018.
Droite de régression: $MAR = 1.05 \text{ OBS} - 1.82$, $R^2 = 0.926$

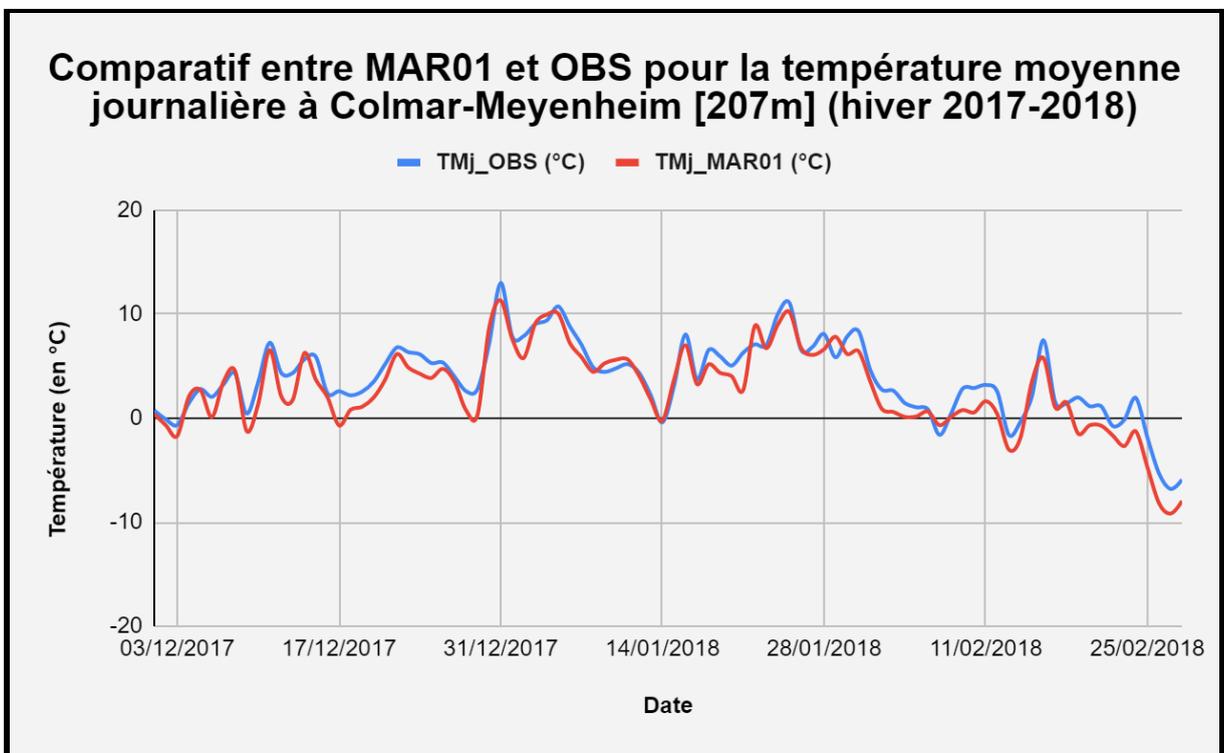


Fig 4.05 : Évolution des températures moyennes journalières TMj observées (OBS: en bleu) et simulées (MAR01: en rouge) pour la station Colmar-Meyenheim (207 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

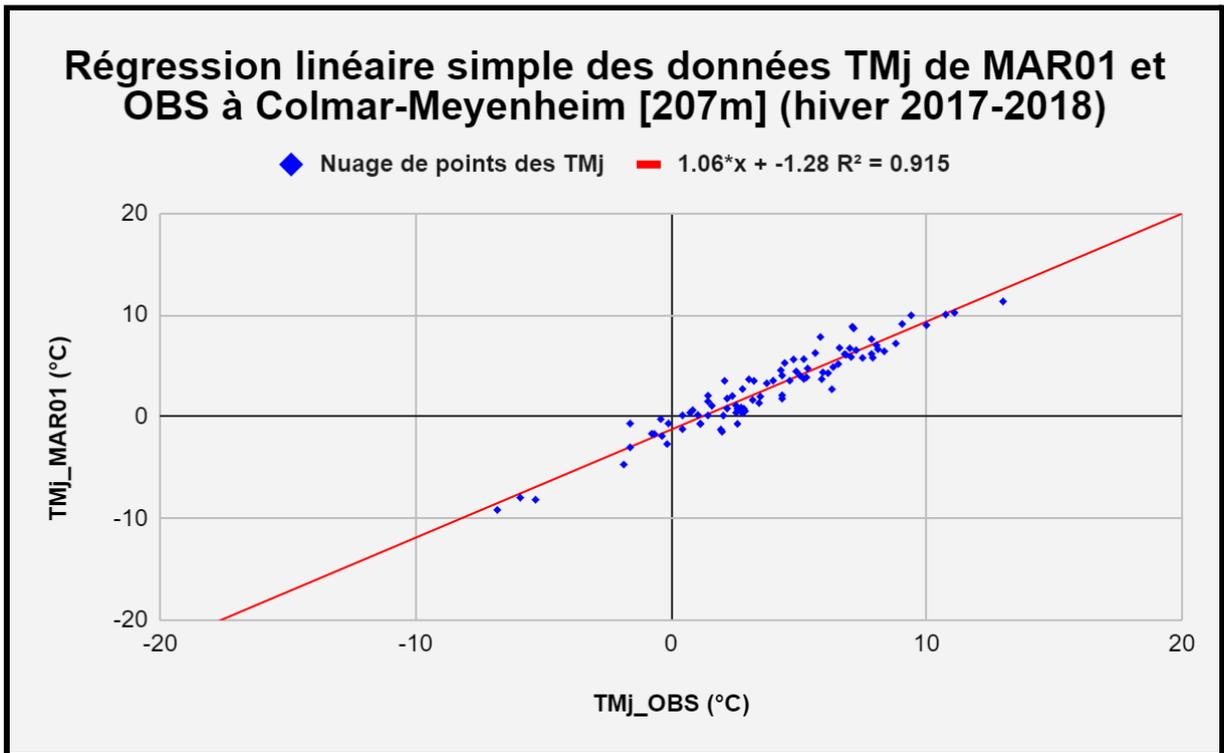


Fig 4.06 : Comparaison des températures moyennes journalières TMj simulées (MAR01) et observées (OBS) pour la station Colmar-Meyenheim (207 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018. Droite de régression: $MAR = 1.06 \text{ OBS} - 1.28$, $R^2 = 0.915$

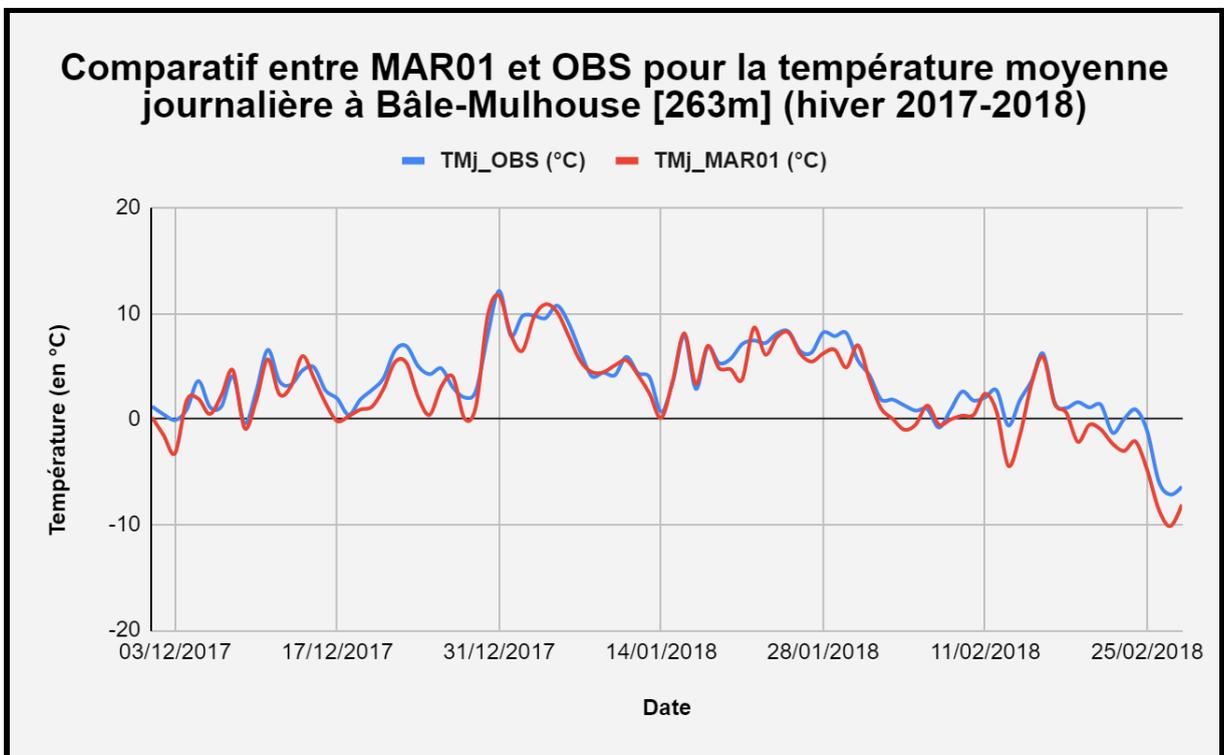


Fig 4.07 : Évolution des températures moyennes journalières TMj observées (OBS: en bleu) et simulées (MAR01: en rouge) pour la station Bâle-Mulhouse (263 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

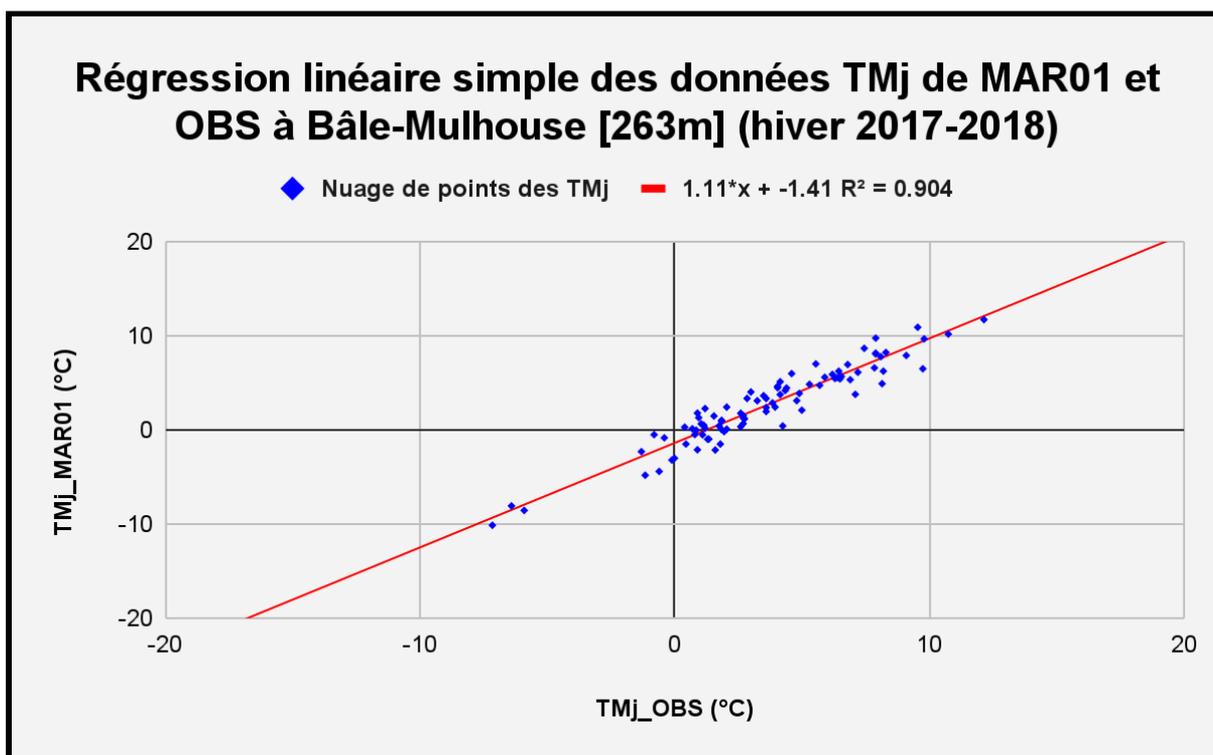


Fig 4.08 : Comparaison des températures moyennes journalières TMj simulées (MAR01) et observées (OBS) pour la station Bâle-Mulhouse (263 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018. Droite de régression: $MAR = 1.11 \text{ OBS} - 1.41$, $R^2 = 0.904$

Ces résultats montrent globalement que la tendance de températures est bien simulée par MAR01. Les coefficients de détermination (R^2) sont élevés, et dépassent 0.9 sur les quatre stations de plaine. Néanmoins, il est remarquable que MAR01 sous-estime légèrement les températures sur cet hiver, et notamment pour Kogenheim et Colmar-Meyenheim qui se situent en plaine centrale. Ces stations étant légèrement situées en contrebas par rapport aux autres stations de plaine d'Alsace, il n'est pas étonnant de voir que MAR01 est un peu trop froid, car dans les vallées et en plaine, MAR simule généralement des températures trop froides en hiver, comme l'ont démontré plusieurs études de comparaisons (Fettweis et *al.*, 2015; Ravalisola, 2019; Tassignon, 2016; Prignon, 2016; Wyard et *al.*, 2017).

Les régressions linéaires construites à partir de ces graphiques de comparaisons montrent que le modèle explique bien la distribution des données, le modèle et l'observation sont donc bien corrélés, selon les coefficients directeurs et les ordonnées à l'origine, respectivement proches de 1 et 0.

4.1.2 Dans le massif vosgien

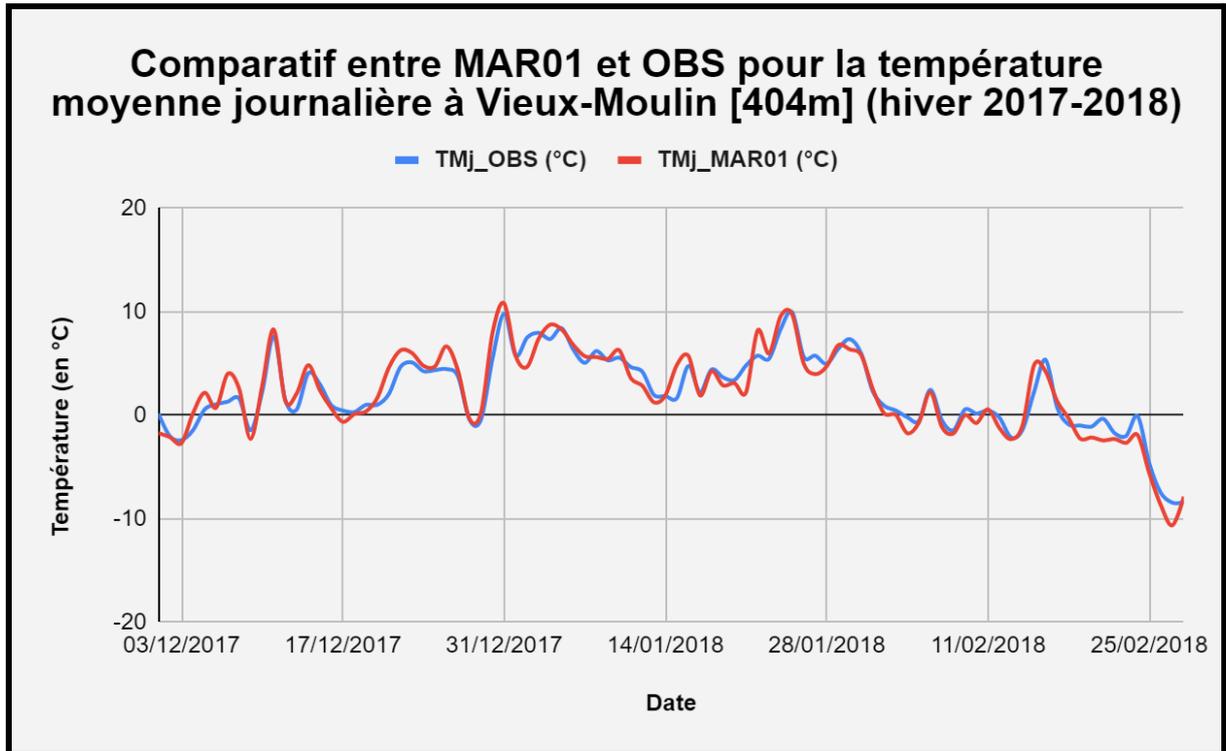


Fig 4.09 : Évolution des températures moyennes journalières TMj observées (OBS: en bleu) et simulées (MAR01: en rouge) pour la station Vieux-Moulin (404 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

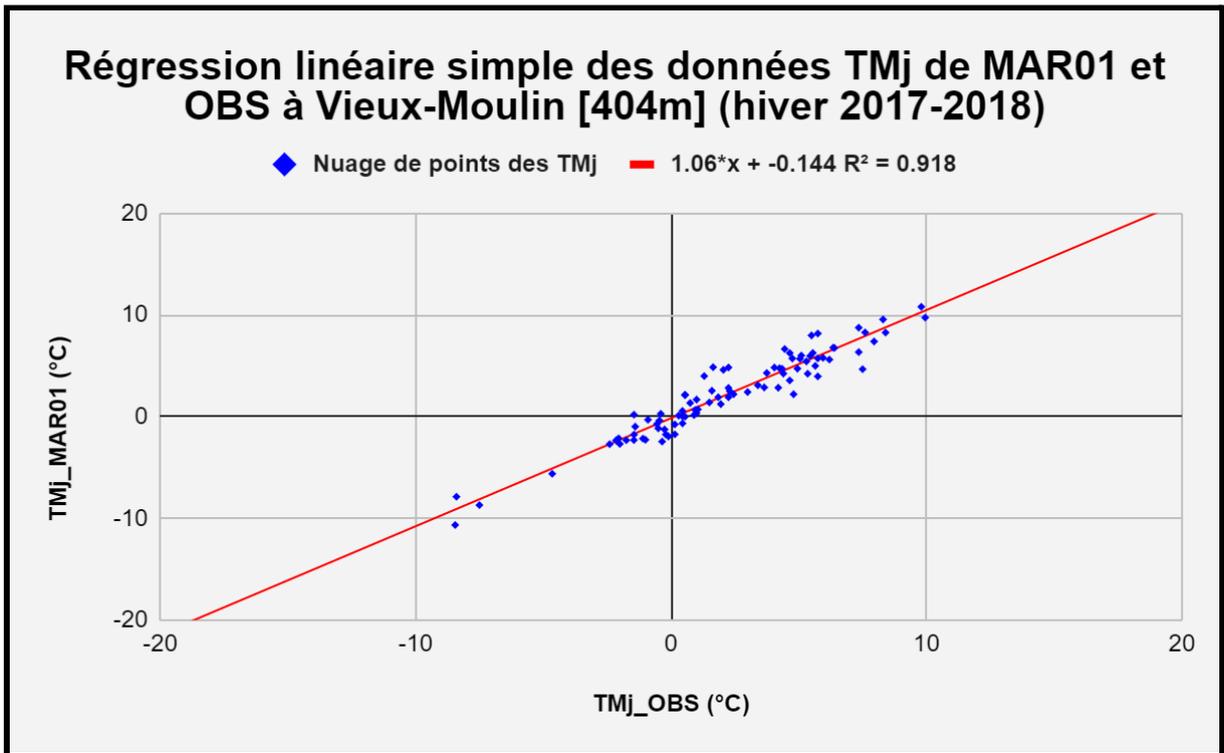


Fig 4.10 : Comparaison des températures moyennes journalières TMj simulées (MAR01) et observées (OBS) pour la station Vieux-Moulin (404 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018. Droite de régression: $MAR = 1.06 \text{ OBS} - 0.144$, $R^2 = 0.918$

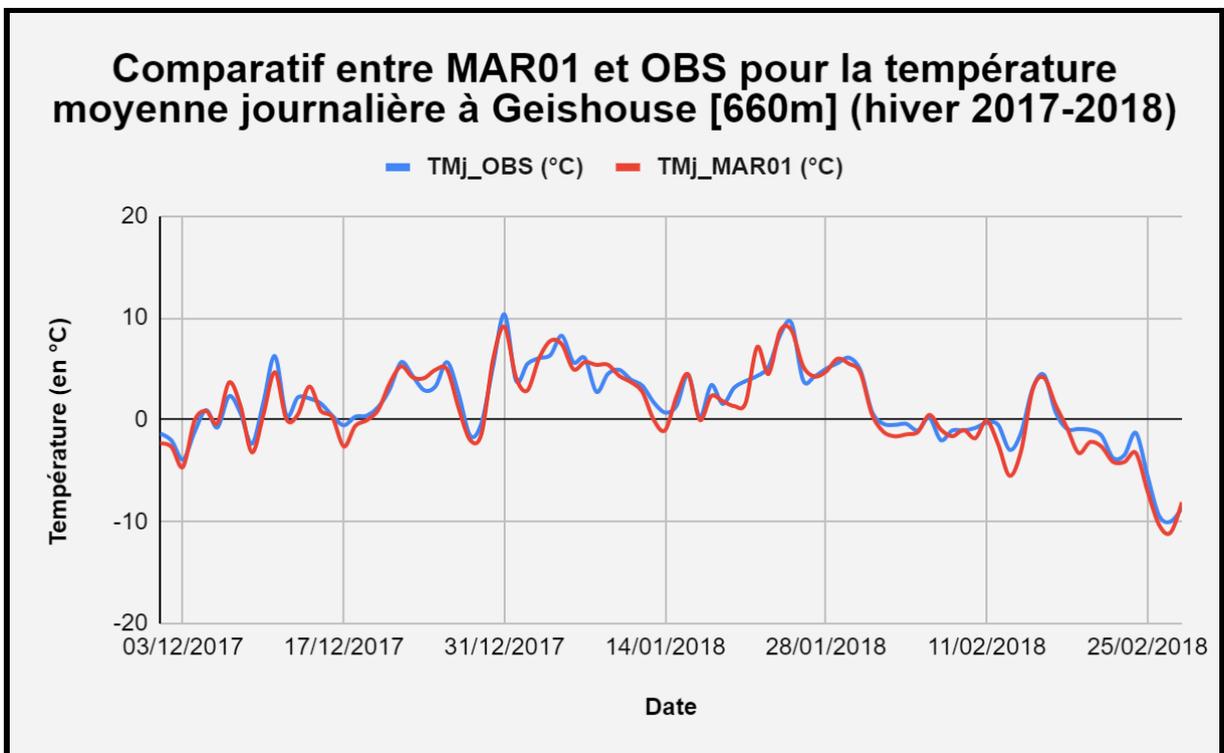


Fig 4.11 : Évolution des températures moyennes journalières TMj observées (OBS: en bleu) et simulées (MAR01: en rouge) pour la station Geishouse (660 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

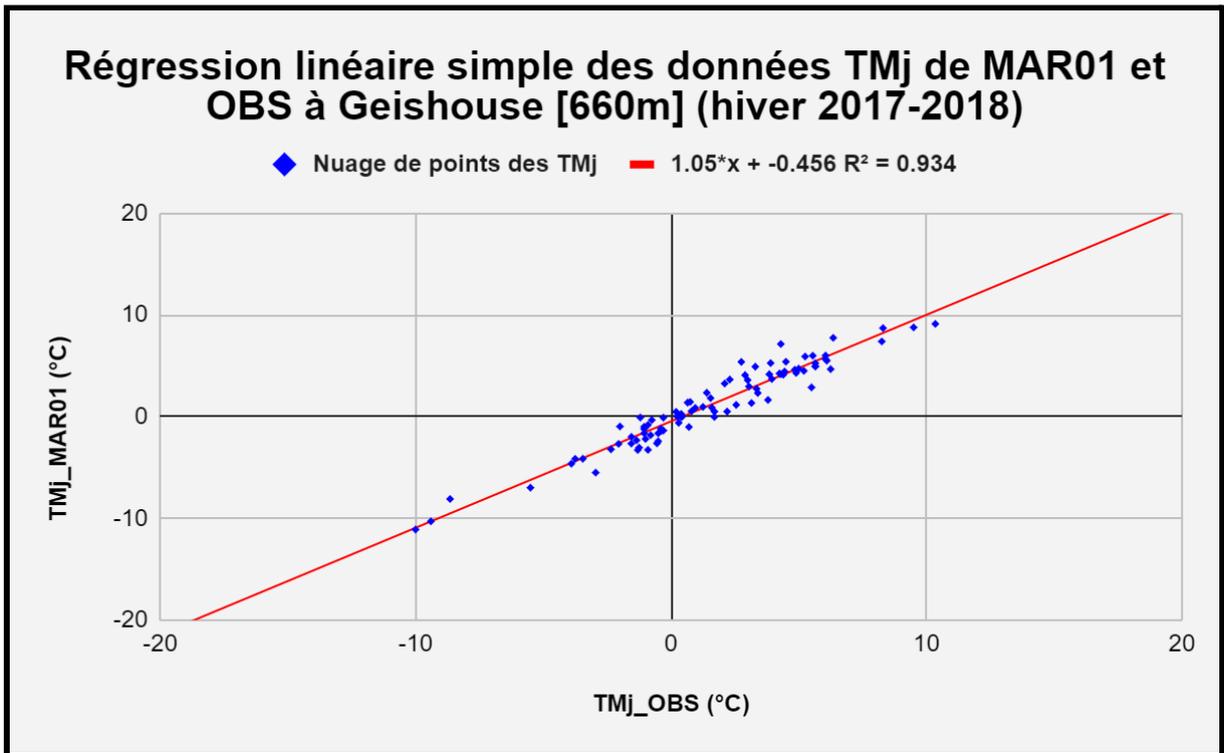


Fig 4.12 : Comparaison des températures moyennes journalières TMj simulées (MAR01) et observées (OBS) pour la station Geishouse (660 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018.
Droite de régression: $MAR = 1.05 \text{ OBS} - 0.456$, $R^2 = 0.934$

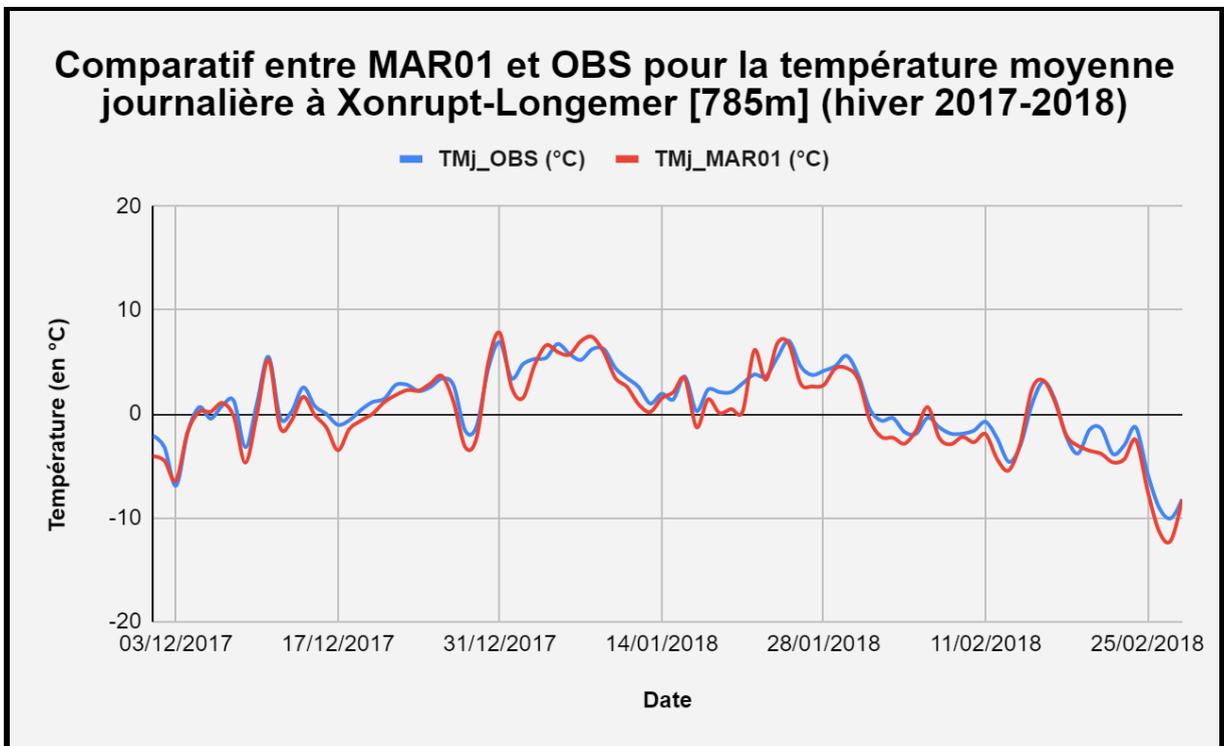


Fig 4.13 : Évolution des températures moyennes journalières TMj observées (OBS: en bleu) et simulées (MAR01: en rouge) pour la station Xonrupt-Longemer (785 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

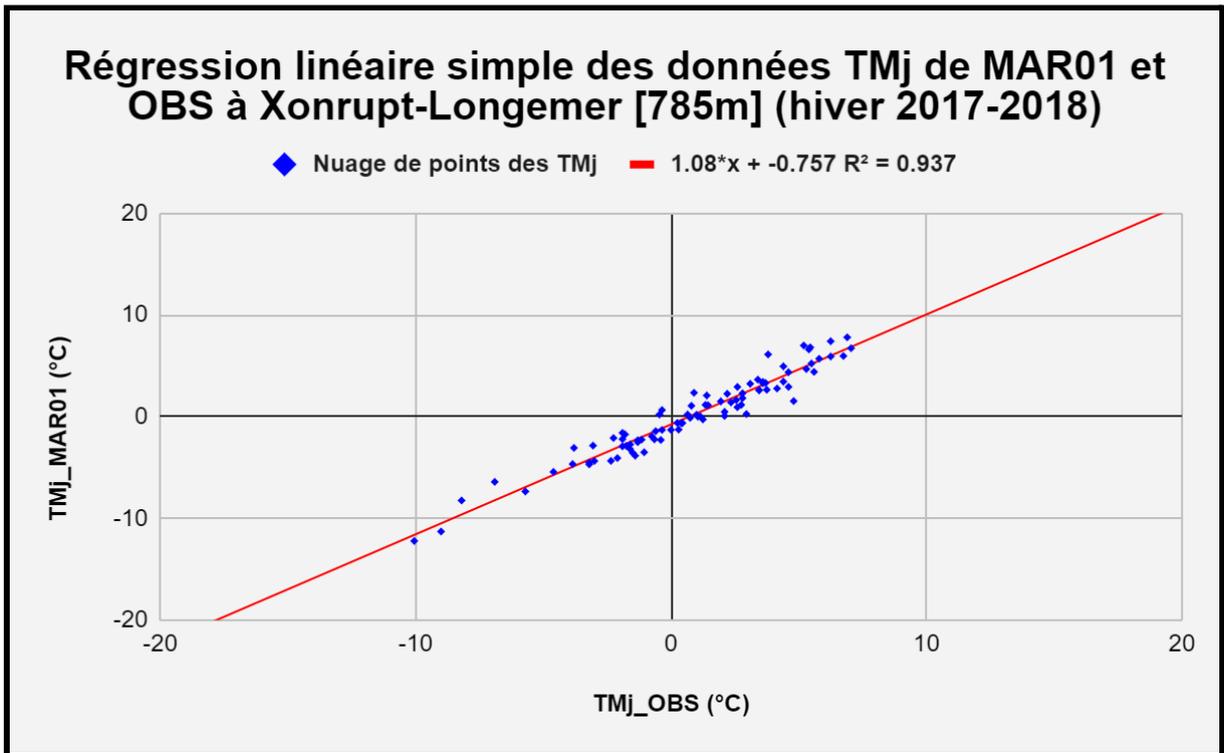


Fig 4.14 : Comparaison des températures moyennes journalières TMj simulées (MAR01) et observées (OBS) pour la station Xonrupt-Longemer (785 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018. Droite de régression: $MAR = 1.08 \text{ OBS} - 0.757$, $R^2 = 0.937$

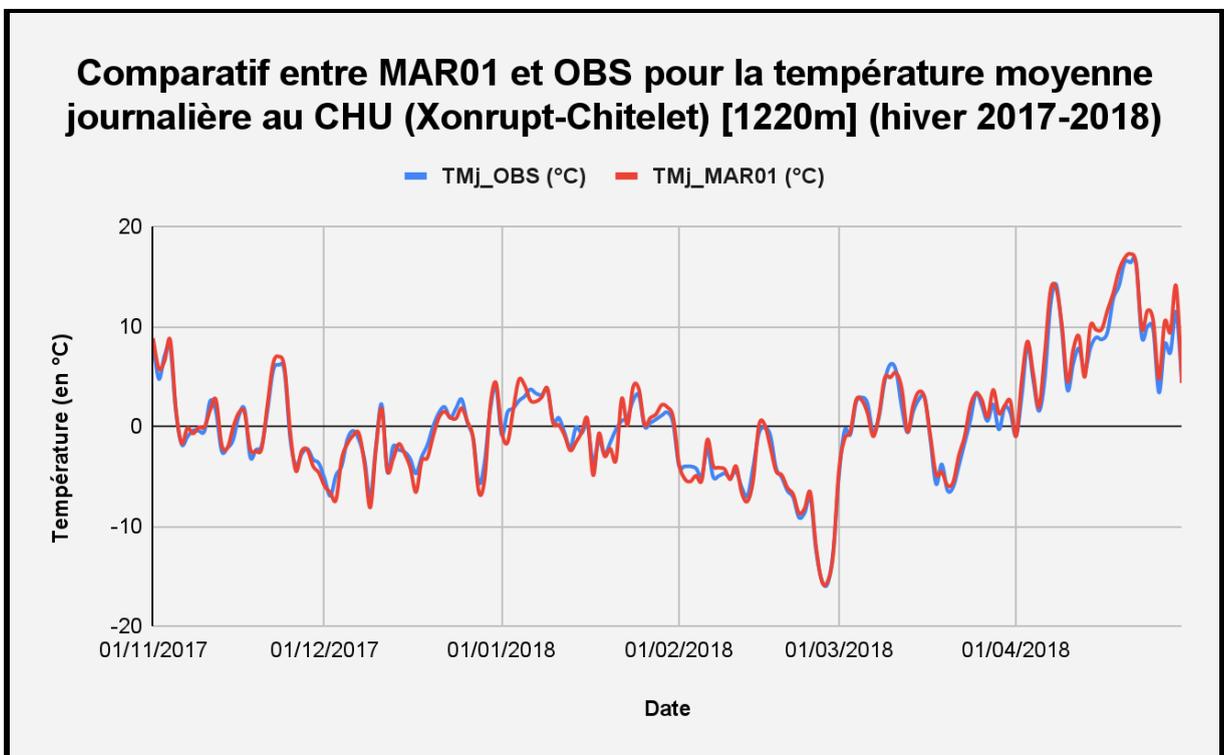


Fig 4.15 : Évolution des températures moyennes journalières TMj observées (OBS: en bleu) et simulées (MAR01: en rouge) pour la station Xonrupt-Chitelet : CHU (1220 m) dans la période 01/11/2017-30/04/2018

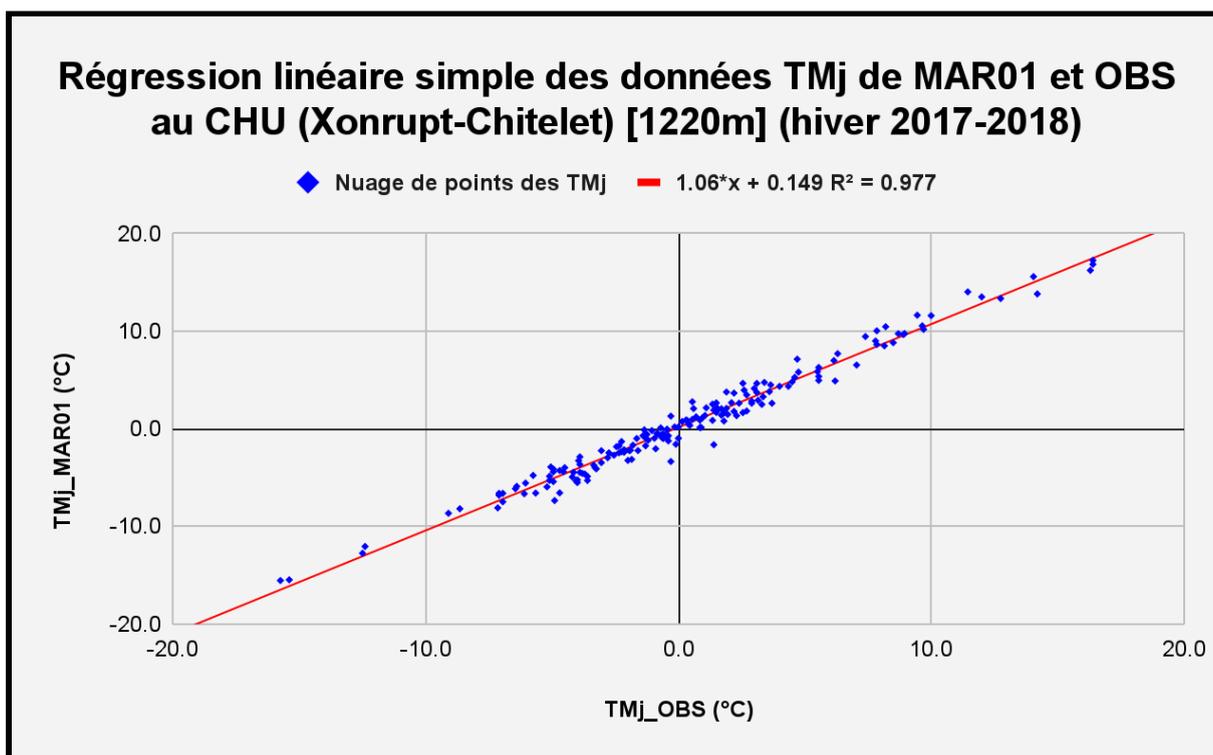


Fig 4.16 : Comparaison des températures moyennes journalières TMj simulées (MAR01) et observées (OBS) pour la station Xonrupt-Chitelet : CHU (1220 m) dans la période 01/11/2017-30/04/2018. Droite de régression: $MAR = 1.06 \text{ OBS} + 0.149$, $R^2 = 0.977$

Au sein du massif des Vosges, MAR01 donne également de bons résultats en ce qui concerne les températures. Les événements ponctuels comme les “coups de froid” sont également bien simulés, comme la vague de froid de fin février 2018 qui a sévi sur une grande partie du Nord-Est de la France (Météo-France, 2018). Les R^2 sont également tous au-dessus de 0.9 ce qui montre une bonne relation entre le modèle et la réalité.

Pour le CHU, les comparaisons de MAR01 avec les températures observées, provenant des données d’AtMO_GE, donnent de très bons résultats. Le nuage de points des TMj montrent une très bonne corrélation entre ces différentes mesures de températures, et celles simulées, avec de faibles biais ($R^2 = 0.977$). Dans ces résultats, le CHU est d’ailleurs la seule station où MAR01 surestime (très légèrement) les températures sur la période.

Pour le moment il n’existe pas de biais plus significatifs en plaine ou dans les Vosges avec ces premiers résultats. Cependant, il semblerait que les températures soient légèrement plus sous-estimées au niveau de la plaine centrale que sur le reste de la région AV.

4.1.3 Bilan de la simulation MAR01 sur les 8 stations en températures

Sur sept des huit stations retenues, MAR01 a sous-estimé les températures sur l'ensemble de la période. Le *Tableau 4.01* ci-dessous montre les biais globaux de températures pour les huit stations, pour l'ensemble de la période hivernale (1er décembre 2017 - 28 février 2018) sauf pour le CHU (1er novembre 2017 - 30 avril 2018).

Stations	Biais (MAR01-OBS) [°C]	Biais (MAR01/OBS) [%]
Strasbourg-Entzheim	-112.8	-31.5
Kogenheim	-142.6	-37.6
Colmar-Meyenheim	-93.4	-27
Bâle-Mulhouse	-91.5	-28
Vieux-Moulin	-0.1	-0.1
Geishouse	-34.6	-25
Xonrupt-Longemer	-61.8	-79
CHU	+31.5	+39
TOTAUX	-505.3	-189.2

Tab 4.01 : Tableau statistique des biais entre MAR01 et OBS pour les températures moyennes journalières, pour huit stations de la région AV.

Le tableau montre que les biais les moins forts existent pour la station de Vieux-Moulin (404 m) dans les Vosges du Nord. Les biais sont plus significatifs pour les stations de plaine d'Alsace, là où le modèle MAR sous-estime fortement les températures, notamment dans ces zones topographiques typiques de plaines et de vallées.

4.2 Mises au point des simulations MAR02-MAR03

Avec le réglage des températures pour MAR01 sur les huit stations synoptiques représentatives de la région AV, un test a été effectué au CHU pour l'hiver 2017-2018 concernant le manteau neigeux. Les hauteurs de neige simulées par MAR01 ont donc été comparées avec celles observées (voir *Fig 4.17*).

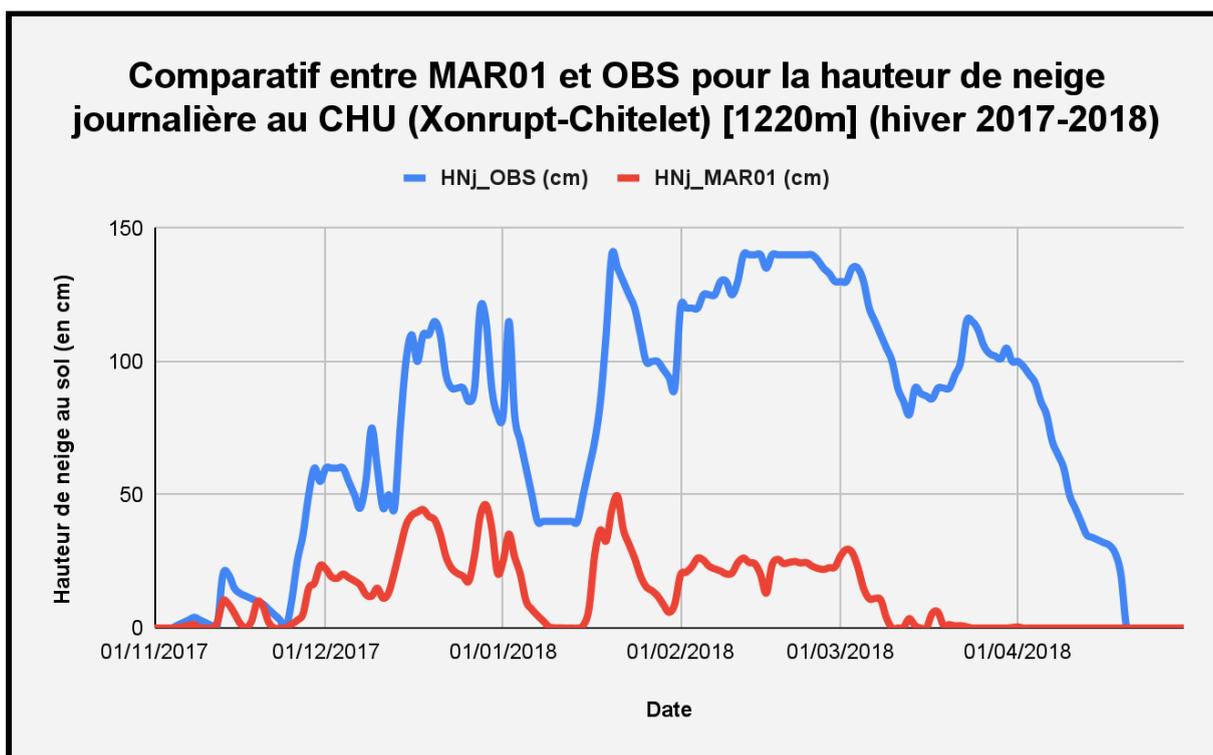


Fig 4.17 : Évolution du manteau neigeux observé (en bleu) et simulé par MAR01 (en rouge) pour la station Xonrupt-Chitelet : CHU (1220 m) dans la période 01/11/2017-30/04/2018

Le CHU constitue la station de l'étude la plus élevée du massif des Vosges. Sur cet hiver 2017-2018, les quantités de neige tombées furent assez standard, avec un manteau neigeux maximal ne dépassant pas 1m50. Il est flagrant que MAR01 sous-estime très fortement le manteau neigeux au CHU sur l'ensemble de la période. Il semblerait néanmoins que la simulation MAR01 suit les variations du manteau, lors des événements de fontes et de gains. Notamment durant le mois de janvier où se sont enchaînés une perte notable de neige suivie d'une consolidation, qui ont été simulées par MAR01.

D'autres tests ont été effectués pour le reste des huit stations sur l'enneigement avec MAR01, mais sans vrai résultat car en plaine d'Alsace, la neige était quasiment inexistante sur l'hiver 2017-2018, malgré un léger épisode de neige observé entre le 04 et le 05 février de cette saison hivernale.

A la suite des résultats de MAR01, deux principales modifications ont eu lieu au sein du modèle MAR afin de réduire la forte sous-estimation du manteau neigeux, comme déjà

rapidement énoncé dans le tableau synthétique de l'ensemble des simulations MAR (voir *Tab 3.06* dans la *Section 3.7*) :

- Imposition de la conservation de la masse d'eau au sein du modèle de sol/neige pour le bilan hydrique du manteau neigeux, afin d'éviter que de l'eau ne se perde dans le modèle SISVAT
- Augmentation relative de l'humidité spécifique aux frontières latérales du modèle de +5% par rapport à MAR01

Cette nouvelle simulation n'a pas eu de réel impact sur le manteau neigeux dans le massif vosgien, qui est resté très sous-estimé (voir *Figures 4.18 et 4.19*).

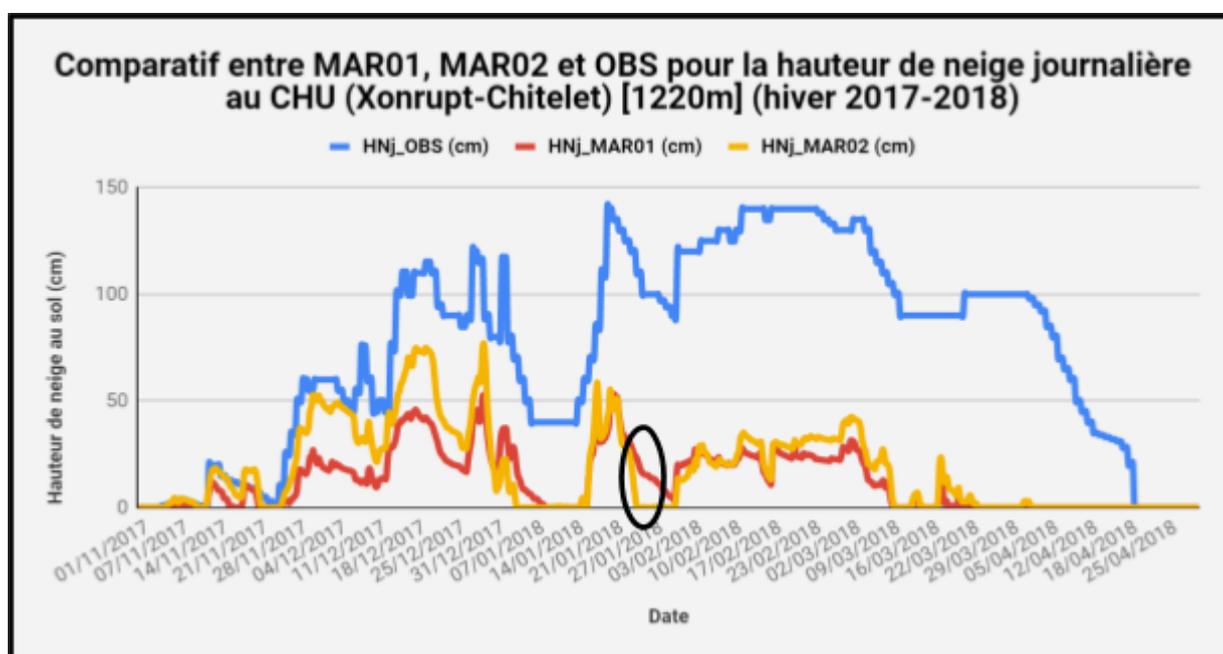


Fig 4.18 : Évolution du manteau neigeux observé (en bleu) et simulé par MAR01 (en rouge) et par MAR02 (en jaune) pour la station Xonrupt-Chitelet : CHU (1220 m) dans la période 01/11/2017-30/04/2018

La hausse relative de l'humidité spécifique aux frontières de 5% semble avoir un impact sur l'épaisseur du manteau neigeux jusqu'au début du mois de janvier. L'ovale en noir représente un événement de fonte qui a été surévalué par MAR02 par rapport à MAR01. Le manteau neigeux a donc complètement fondu dans MAR02. Il en résulte que pour la deuxième partie de l'hiver, MAR01 et MAR02 sont pratiquement confondus.

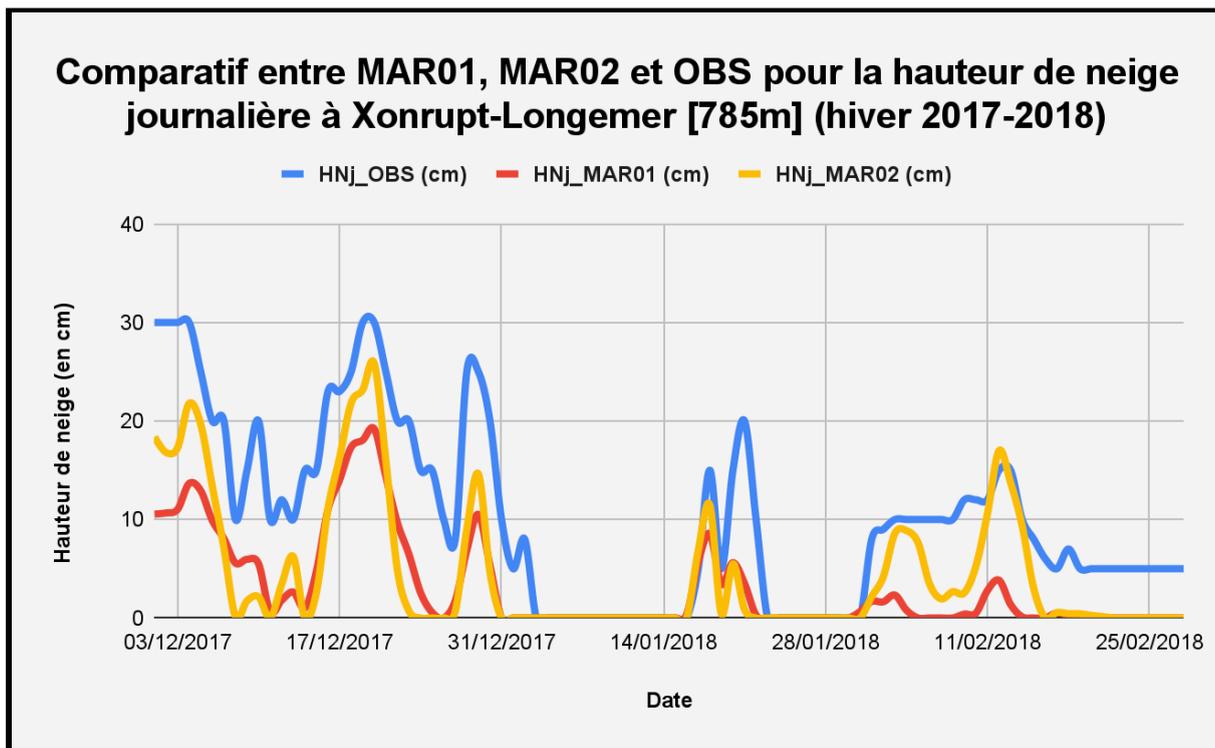


Fig 4.19 : Évolution du manteau neigeux observé (en bleu) et simulé par MAR01 (en rouge) et par MAR02 (en jaune) pour la station Xonrupt-Longemer (785 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

Les résultats de la *Figure 4.19* montrent que MAR02 sous-estime moins fortement le manteau neigeux que MAR01. Avec une hauteur de neige totale observée sur la période étudiée de 928 cm, MAR01 simule à peine 286.5 cm (soit 31% du total) alors que MAR02 simule 407.3 cm (soit 44% du total).

La comparaison des précipitations MAR02 vs OBS a également été ajoutée pour cette simulation MAR02, exemple à l'appui avec la station de Strasbourg-Entzheim (voir *Fig 4.20*).

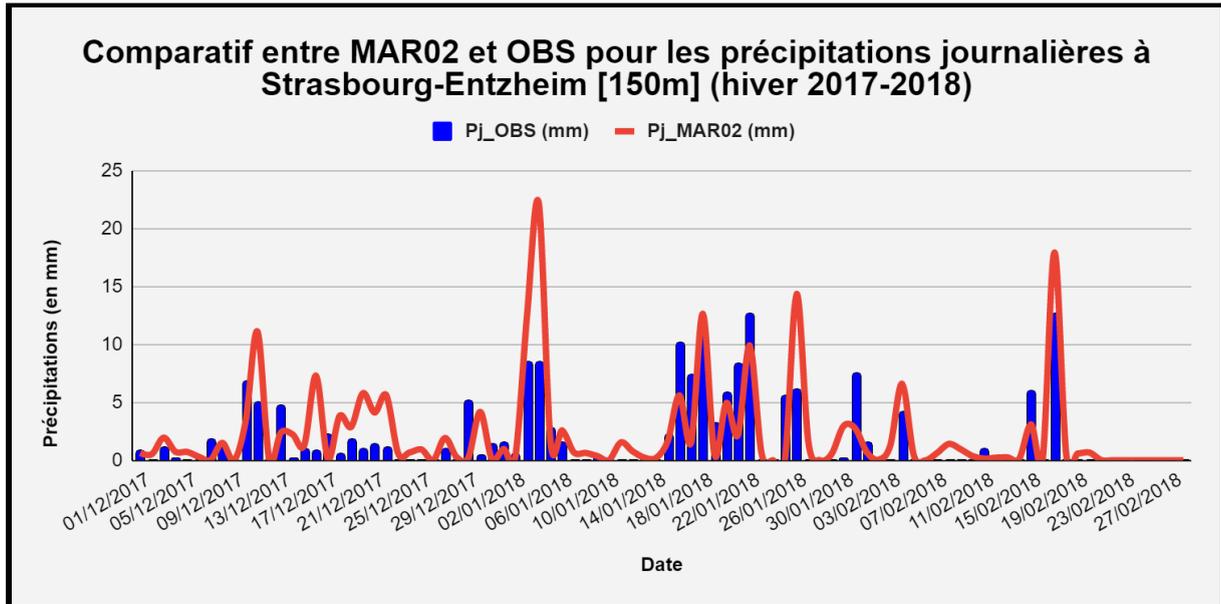


Fig 4.20 : Précipitations (fraction chutes de pluie + chutes de neige) tombées vs simulées par MAR02 au pas de temps journalier à Strasbourg-Entzheim.

A noter que sur toute la période hivernale (1er décembre 2017 - 28 février 2018) à la station de Strasbourg-Entzheim, le cumul total de précipitations observées s'établit à 170.7 mm contre 207.945 mm pour MAR02 et 137.5 mm pour MAR01. MAR02 surestime donc de 22% les précipitations observées, contre une sous-estimation de MAR01 de 19.5% ici.

Pour MAR02, les précipitations ont globalement été surestimées sur l'ensemble du domaine d'étude. Cette nouvelle simulation n'a pas eu d'impact significatif sur les températures. Le problème reste le même, une forte sous-estimation du manteau neigeux dans les Vosges. La simulation MAR03 fait donc état d'une nouvelle mise à jour, avec cette fois-ci un seuil de limite pluie/neige qui a été calé à +2°C afin de permettre à la neige de tomber plus facilement. De plus, la neige ne tient plus sur la canopée des arbres, alors que dans les précédentes versions, une partie de la neige tombée était retenue par la haute végétation. Le bilan hydrique du MAR a donc été rétabli. Enfin, l'augmentation relative de l'humidité spécifique aux frontières latérales du modèle a été abaissée à +4% au lieu de +5% (afin d'enlever la surestimation des précipitations par MAR02). Mais ce changement d'humidité aux frontières n'aura pas d'impact significatif sur cette surestimation avant le réglage complet des précipitations (qui sera vu en détails dans la *Section 4.3*).

Les comparaisons avec MAR03 concernent essentiellement le CHU, avec pour objectif de comprendre la ou les raisons pour lesquelles le manteau neigeux est fortement sous-estimé tout au long de cette période hivernale 2017-2018.

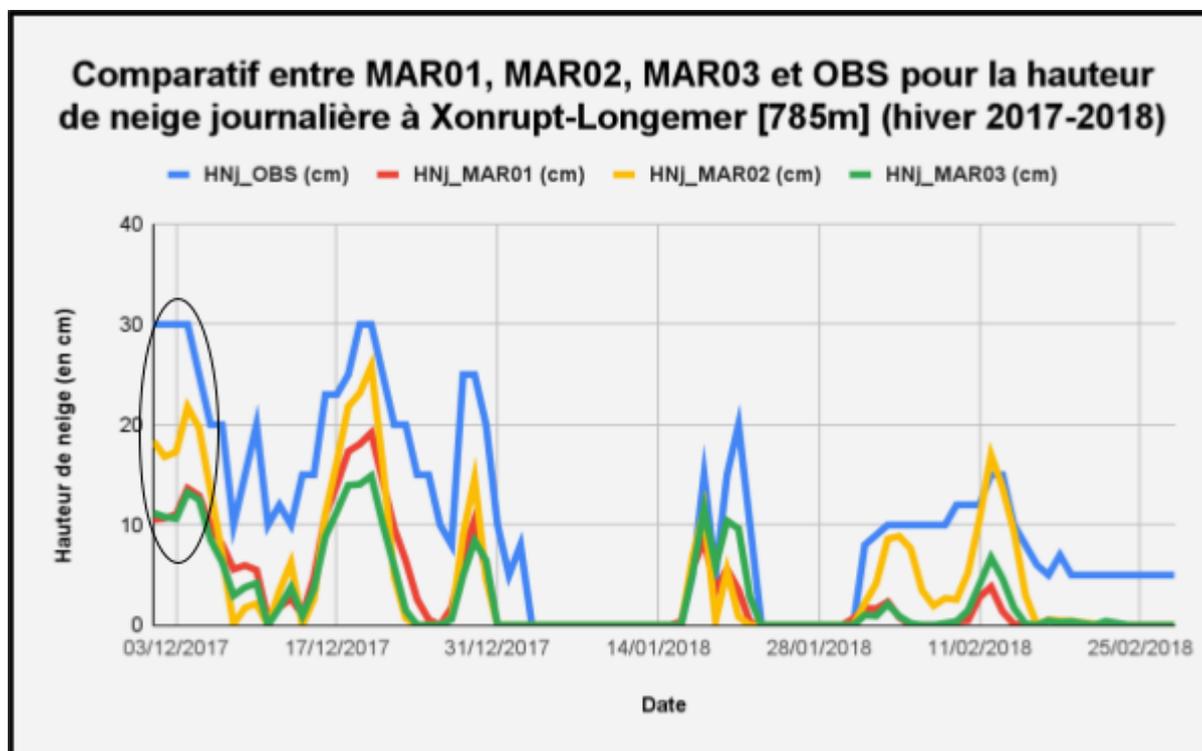


Fig 4.21 : Évolution du manteau neigeux observé (en bleu) et simulé par MAR01 (en rouge); par MAR02 (en jaune) et par MAR03 (en vert) pour la station Xonrupt-Longemer (785 m) dans la période 01/12/2017-28/02/2018

Sur cette *Figure 4.21*, il est à remarquer que les résultats de MAR03 sont très proches de ceux de MAR01. MAR(01-02-03) sous-estime sans cesse les événements neigeux qui se produisent, faisant sous-estimer l'enneigement sur l'ensemble de la saison hivernale, comme le montre l'ovale en noir début décembre.

Au CHU, c'est MAR03 qui donne les meilleurs résultats, mais les événements neigeux et de fontes restent sous-estimés, comme le montre la *Figure 4.22* ci-dessous :

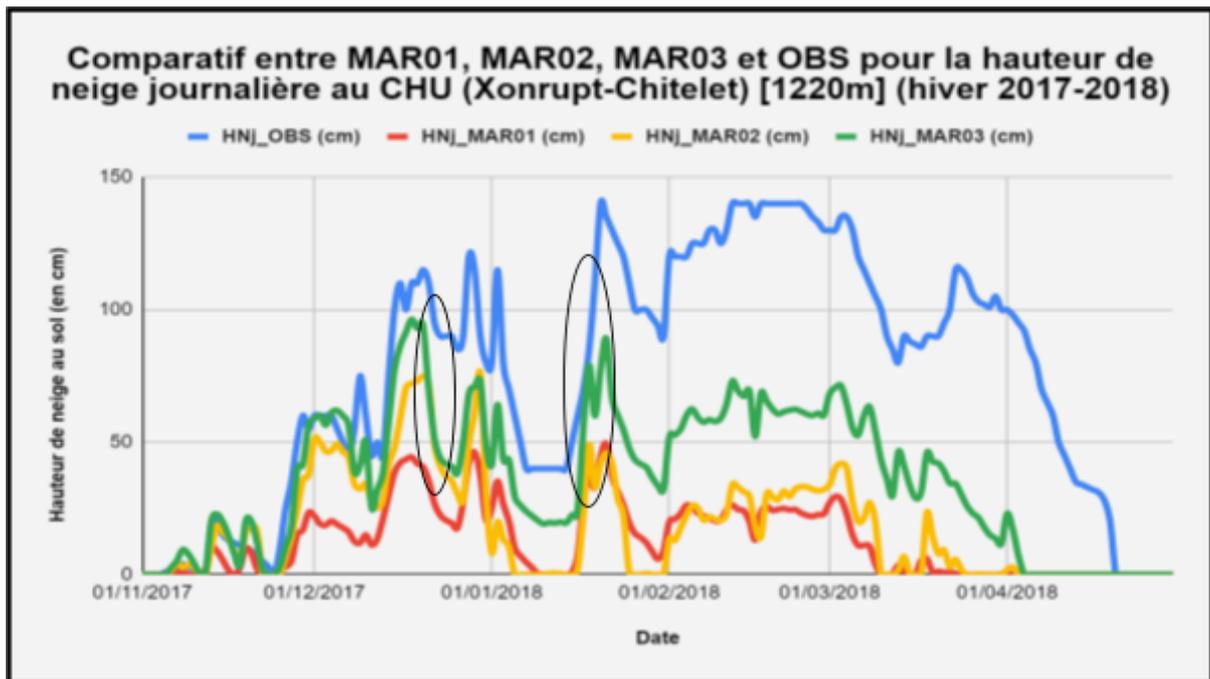


Fig 4.22 : Évolution du manteau neigeux observé (en bleu) et simulé par MAR01 (en rouge); par MAR02 (en jaune) et par MAR03 (en vert) pour la station Xonrupt-Chitelet : CHU (1220 m) dans la période 01/11/2017-30/04/2018

MAR03 suit bien la tendance lors de la formation du manteau neigeux, mais simule beaucoup trop de fonte entre le 23/12 et le 25/12, puis ne simule pas assez de neige entre le 19/01 et le 21/01, ce qui provoque une sous-estimation sur tout le reste de la période hivernale.

Pour vérifier ces anomalies provoquées par MAR03, il est essentiel de se focaliser sur les événements 23-12/25-12 et 19-01/21-01 :

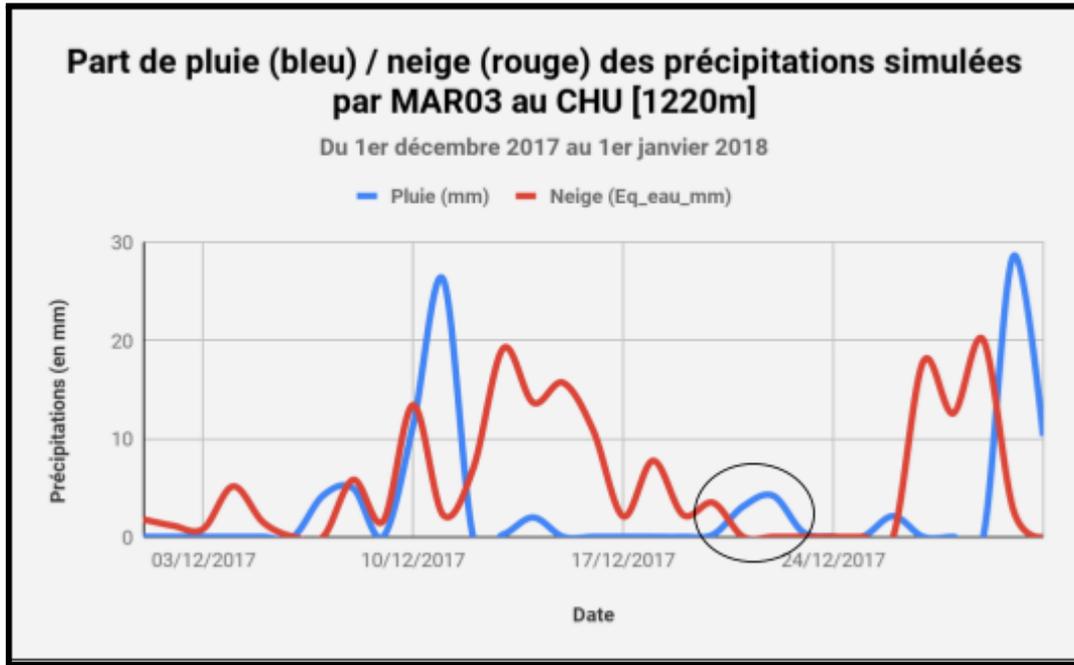


Fig 4.23 : MAR03 simule effectivement de la pluie pour cet épisode (ovale noir) plutôt que de la neige, ce qui mène à une accélération de la fonte du manteau neigeux pour cet événement

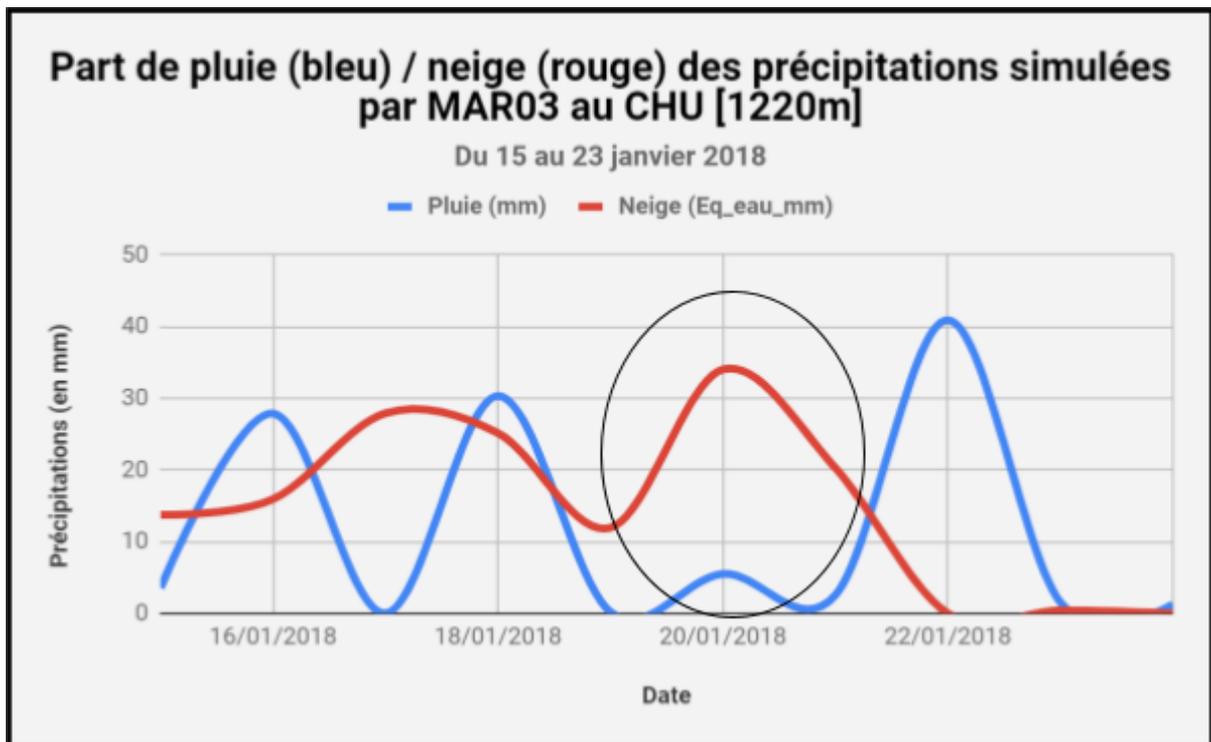


Fig 4.24 : MAR03 simule plutôt de la neige ici, le manteau neigeux simulé augmente, mais pas suffisamment.

Sur la *Figure 4.24*, la faible part de pluie vers le 20 janvier 2018 contribue à l'augmentation très faible du manteau neigeux lors de cet événement, et donc à la sous-estimation du manteau neigeux observé par MAR03.

Il est également important de regarder les températures simulées lors de ces événements :

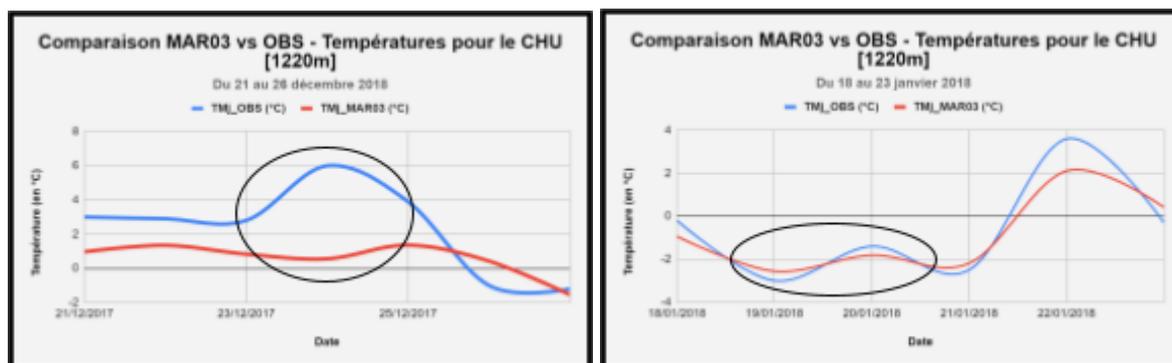


Fig 4.25 et 4.26 : Évolution des températures moyennes journalières TMj observées (en bleu) et simulées par MAR03 (en rouge) au CHU pour deux événements précis dans le temps (23-12/25-12 et 19-01/21-01)

Pour l'épisode de fonte de fin décembre 2017, MAR03 simule des températures positives en plus de la pluie simulée, ce qui mène à une fonte importante du manteau neigeux au sein du modèle MAR. Pour la reconstitution du manteau à la mi-janvier 2018, de la pluie advectée dans le MAR se présente malgré des températures négatives, le manteau neigeux ne se reconstitue donc pas assez.

Ces résultats montrent que MAR01-03 a beaucoup de difficultés pour reconstituer un manteau neigeux proche de la réalité. Ce qui semble normal car un très faible écart de température peut jouer énormément sur le type de précipitations (pluie verglaçante, neige fondue ou neige) qui peuvent tomber sur la station. Le problème avec le pixel du CHU ($i=26; j=23$) dans le modèle MAR, est que cette station correspond au pixel le plus élevé du massif des Vosges, qui se caractérise donc par un sommet unique, entouré par des altitudes plus basses que le pixel du CHU qui a été artificiellement remonté pour être à la bonne latitude. Les masses d'air passantes vont donc déverser plus de pluie que de neige dans le modèle. Cette advection de pluie crée donc des précipitations sous forme de pluie sur le CHU.

En reconstituant artificiellement le manteau neigeux en comblant les événements neigeux que MAR03 a sous-estimé, les tendances OBS et MAR03 se rapprochent significativement :

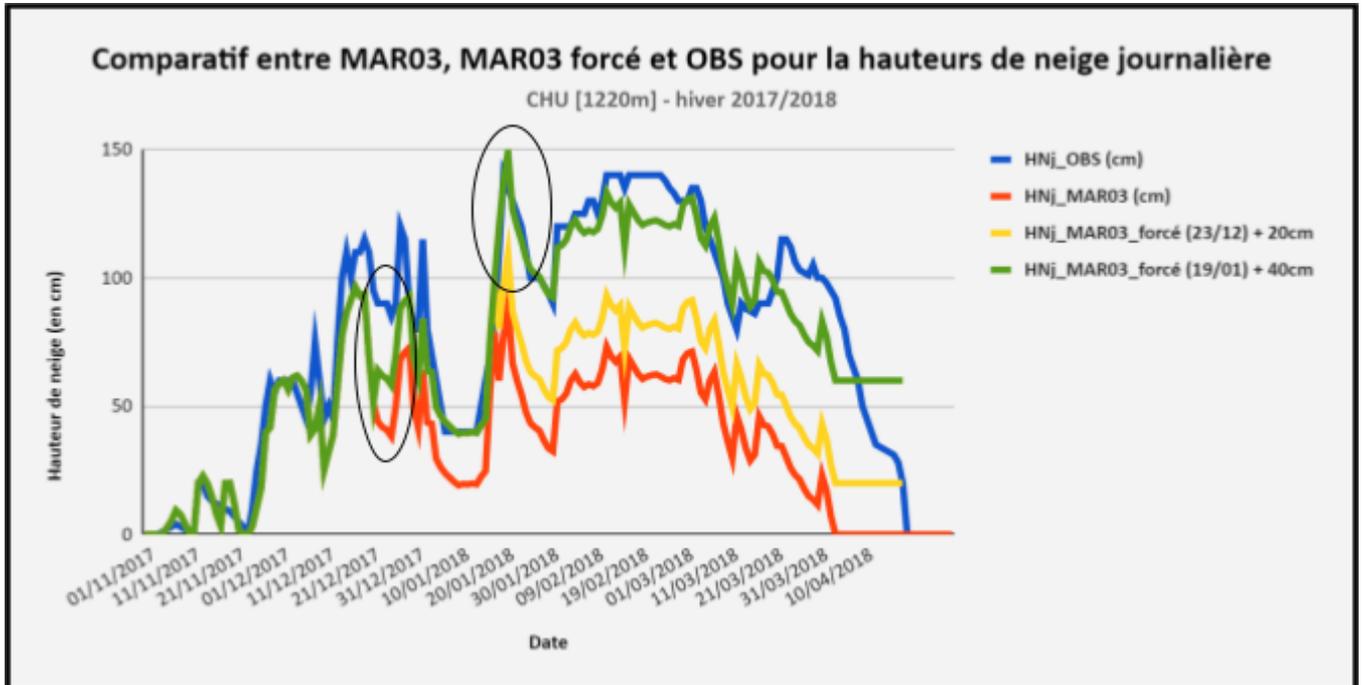


Fig 4.27 : Évolution du manteau neigeux observé (en bleu) et simulé par MAR03 (en rouge). En jaune, MAR03 où +20cm ont été rajoutés le 23/12/2018 et en vert MAR03 où +40 cm ont été rajoutés le 19/01/2018.

Sur cette Figure 4.27, le manteau neigeux a donc été artificiellement recollé lors des deux événements que MAR03 avait largement sous-estimé (23-12/25-12 et 19-01/21-01). MAR03 a ainsi été forcé avec 20 cm de plus le 23/12, lorsque l'événement de fonte a été largement surestimé par MAR03. Enfin, MAR03 a été forcé avec +40 cm de neige en plus pour le second événement, lorsque cette fois-ci, un épisode neigeux a été très sous-estimé par MAR03. En recollant le manteau neigeux avec ces deux forçages, la tendance est bien suivie par MAR03.

4.3 Réglage des précipitations avec MAR09-16 pour les 14 stations retenues

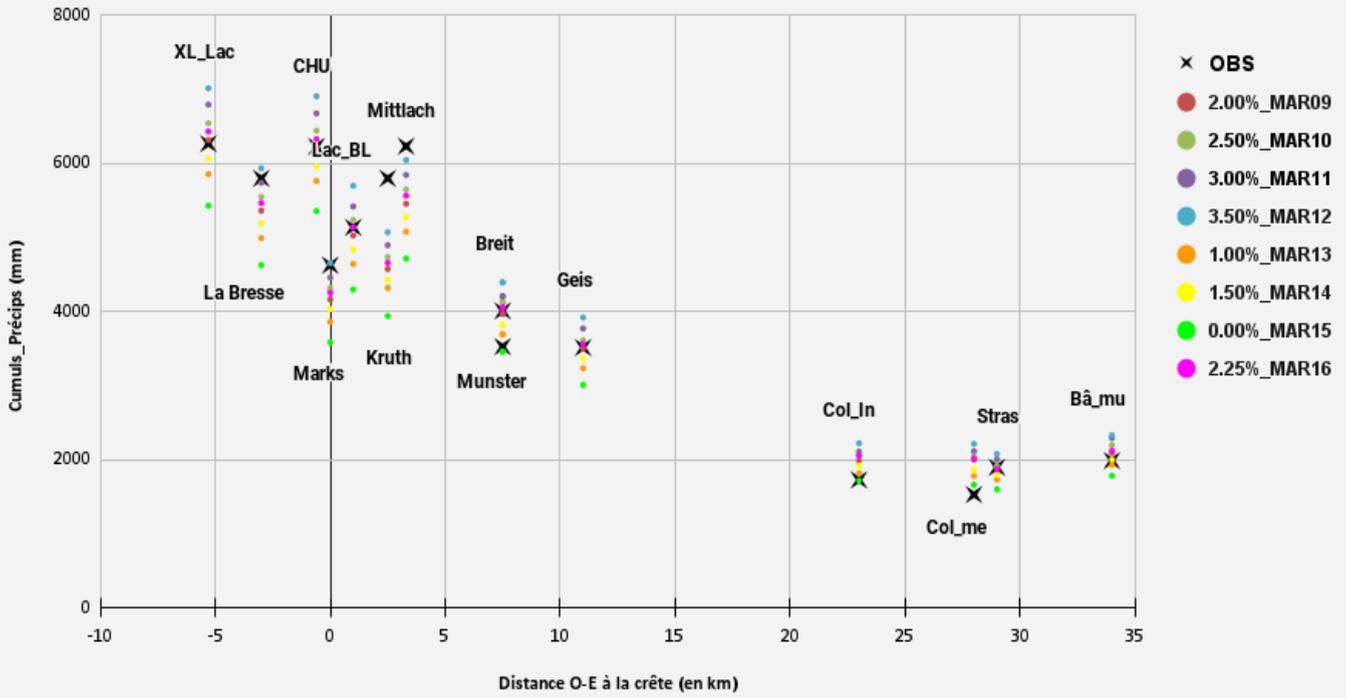
Après la correction d'une variable initiale au sein du modèle MAR, sept simulations ont été lancées avec des corrections relatives de l'humidité spécifique aux frontières latérales du modèle, augmentant progressivement de +0% à +3.5% (voir *Tab 3.6* dans la *Section 3.7*). Ces simulations ont eu pour but d'ajuster un maximum de stations vosgiennes entre les précipitations MAR et les précipitations OBS. Cet ajustement MAR des précipitations par station s'est effectué sur plusieurs périodes temporelles, ainsi que sur la base de cumuls de précipitations :

- Cumul annuel de précipitations pour chacune des 4 années 2017, 2018, 2020 et 2021 (4 mois 01-04 seulement)
- Cumul total de précipitations des 4 années 2017, 2018, 2021, 2021 (01-04)
- Cumul hivernal (novembre-avril) de précipitations pour chacun des 2 hivers 2017-18 et 2020-21.
- Cumul total de précipitations des 2 hivers 2017-18 et 2020-21 .

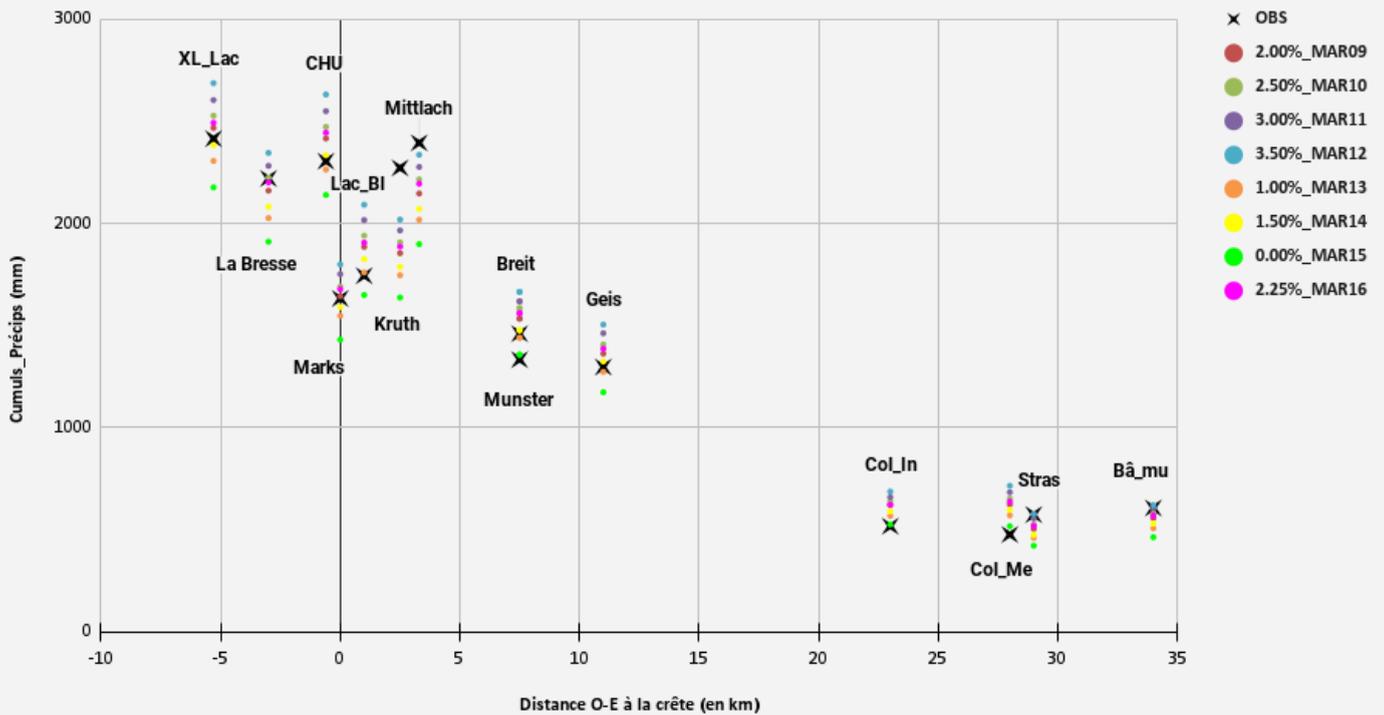
Ces nombreux cumuls doivent permettre de voir si ces sept simulations MAR collent à la réalité en termes de précipitations sur chaque partie du massif vosgien (versant Ouest - crêtes - versant Est) et ce, que ce soit en hiver ou sur l'ensemble de l'année. C'est pourquoi les résultats qui vont suivre sont représentés selon la distance Ouest-Est à la ligne de crête vosgienne, en utilisant bien évidemment les Pixels_P (pixels des stations), dans le but de voir si le modèle MAR est capable de simuler les disparités pluviométriques dues à l'influence orographique des Vosges. En d'autres termes, l'objectif est de savoir comment le modèle simule-t-il l'effet de foehn présent sur le versant alsacien.

Ci-dessous, les figures représentant les cumuls de précipitations totaux pour les périodes indiquées et les 14 stations choisies, selon leur distance à la ligne de crête vosgienne principale :

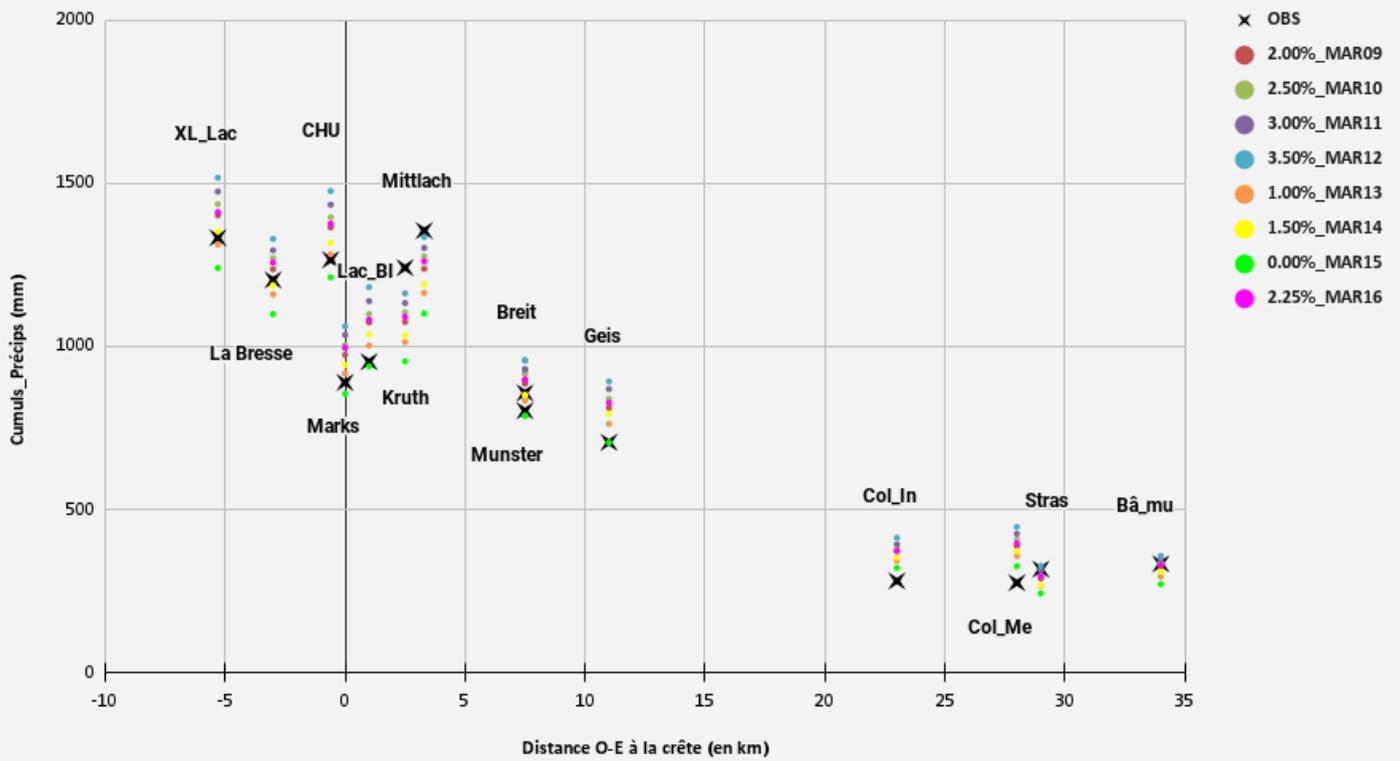
Pixels_P : Cumuls Précips (mm) 2017-2021(04) : OBS & MAR_09-16, 14 stations vs Distance O-E crête



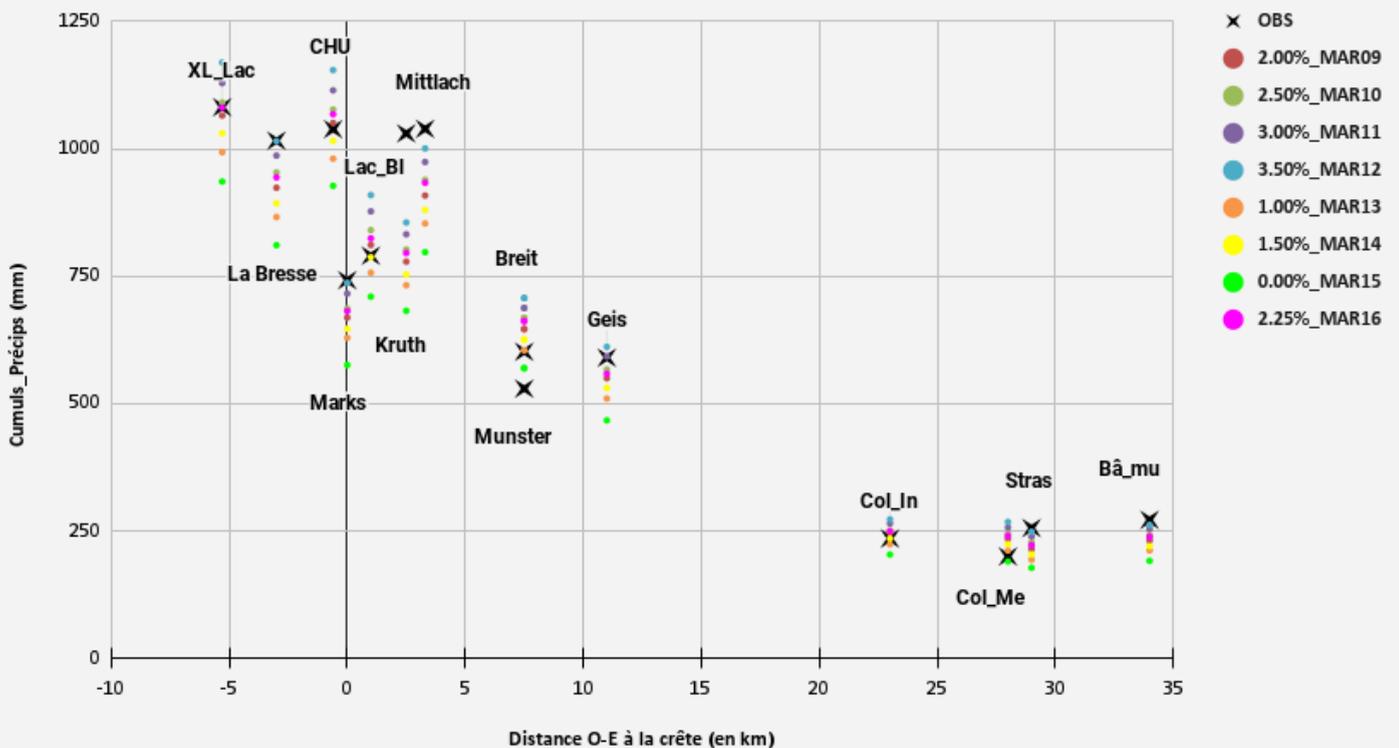
Pixels_P : Cumul P (mm) des deux hivers 2017-2018 et 2020-2021 : OBS & MAR_09-16, 14 stations vs Distance



Pixels_P : Cumul P (mm) de l'hiver 2017-2018 : OBS & MAR_09-16, 14 stations vs Distance



Pixels_P : Cumul P (mm) de l'hiver 2020-2021 : OBS & MAR_09-16, 14 stations vs Distance



La première des quatre figures montre le cumul total de précipitations sur les quatre années complètes (2017+2018+2020+2021[01-04]). Il est intéressant de voir en premier lieu si, dans la gamme de corrections faibles utilisée, les simulations MAR encadrent bien ou non les OBS. Autrement dit, est-ce que MAR15 (+0%), ne possédant pas de correction relative d'humidité spécifique aux frontières du modèle MAR, représente bien la réalité des cumuls de précipitations tombés en région AV.

Station	Biais (MAR15 [+0%] - OBS) [mm]	Biais (MAR15 [+0%] / OBS) [%]
La_Bresse	-1168.1	79.8
XL-lac	-836.5	86.6
CHU	-869.5	86
Markstein	-1040.6	77.5
Lac-blanc	-836.5	83.7
Mittlach	-1514.9	75.6
Breitenbach	-548.7	86.3
Munster	-66	98.1
Kruth	-1856.1	67.9
Geishouse	-503.1	85.6
Strasbourg-Entzheim	-296.7	84.3
Colmar-Meyenheim	131.9	108.6
Bâle-Mulhouse	-204	89.7
Colmar-Inra	-11	99.3
TOTAUX	-9619.9	86.4

Tab 4.02 : Liste des biais absolus et relatifs entre MAR15 et OBS pour les cumuls de précipitations totaux sur la période (2017+2018+2020+2021[01-04]) pour les 14 stations retenues

Le *Tableau 4.02* montre que sans correction d'humidité spécifique (+0%), le modèle MAR sous-estime les précipitations totales. MAR15 simule en moyenne, pour les 14 stations,

86.4% des précipitations totales tombées. Cependant, pour la station de Colmar-Meyenheim, les résultats montrent une surestimation de MAR15 pour ce même cumul de précipitations, unique sur ces 14 stations. L'effet de foehn très présent à cette station (comme expliqué dans le Chapitre II) réduit considérablement la pluviométrie, par rapport aux autres stations, et notamment par rapport aux stations situées sur le versant vosgien et sur les crêtes. Sur cette période étudiée du cumul total des quatre années complètes (4 mois 01-04 seulement pour 2021), la station de Colmar-Meyenheim a enregistré un total de 1531.8 mm contre 6264.7 mm à la station de XL_Lac qui est située sur le versant vosgien "au vent". La version du modèle MAR utilisée pour cette étude, sans correction d'humidité, montre donc ses limites en termes de simulation de l'effet de foehn. Pour l'autre station de Colmar (Colmar-Inra), les résultats montrent une très faible sous-estimation, presque une estimation parfaite des précipitations, due également à cet effet de foehn très présent en plaine d'Alsace.

Globalement, pour l'ensemble des simulations, les Figures ci-dessus montrent que les stations de Colmar-Meyenheim et de Colmar-Inra voient leurs cumuls de précipitations être surestimés d'au moins 5% quelque soit la période prise en compte. Cette surestimation est moins forte sur le dernier hiver 2020-2021, où un épisode neigeux notable a été observé en plaine d'Alsace entre le 14 et le 15 janvier, avec environ 30 cm de neige au sol observés à Colmar (Météo-France).

Plusieurs tendances se dessinent selon la zone topographique du massif vosgien, et selon la période retenue. Pour le cumul global des précipitations des quatre années :

- Sur le versant vosgien, les différentes simulations MAR sous-estiment légèrement les précipitations au niveau de La Bresse avec une sous-estimation 5 à 20% selon les corrections d'humidité affectées au MAR, et MAR09 (+2%) constitue la meilleure simulation pour XL_Lac avec une très légère surestimation de 0.9%.
- Pour les crêtes, la meilleure simulation qui ressort est MAR16 (+2.25%) pour le CHU et le Lac blanc avec de légères surestimation de respectivement 1.5% et 2%. Au Markstein, les précipitations sont aussi légèrement sous-estimées par l'ensemble des simulations d'environ 10% en général.

- Sur le versant alsacien, les résultats sont moins bons avec l'ensemble des simulations MAR qui sous-estime les précipitations, notamment pour Kruth. Malgré tout, MAR16 ressort encore comme le meilleur candidat ici avec quand même une sous-estimation générale de 19.7%.

Sur l'ensemble de la zone d'étude pour la période des quatre années retenues, MAR09 (+2%) et MAR16 (+2.25%) semblent être les meilleures simulations ici.

Il est important de régler MAR09-16 sur les précipitations hivernales, soit sur le cumul total des deux hivers 2017-2018 et 2020-2021, car l'objectif final de l'étude reste de caler MAR au manteau neigeux. Le tableau statistique ci-dessous montre les biais en pourcentage de précipitations pour les cumuls totaux de précipitations tombées sur ces deux hivers (du 1er novembre au 30 avril), pour les 14 stations, réparties selon leur position par rapport à la ligne de crête vosgienne (voir *Tab 4.03*) :

Station	Biais (MAR15 /OBS) %	Biais (MAR13/ OBS) %	Biais (MAR14/ OBS) %	Biais (MAR09 /OBS) %	Biais (MAR16 /OBS) %	Biais (MAR10 /OBS) %	Biais (MAR11/ OBS) %	Biais (MAR12 /OBS) %
Versant vosgien								
La Bresse	86	91.3	93.8	97.3	99.1	100.2	102.8	105.6
XL_Lac	90.1	95.5	98.7	102.2	103.2	104.7	107.8	111.3
Crêtes								
CHU	92.8	98.2	101.3	104.8	106.1	107.3	110.6	114.2
Markstein	87.7	94.8	97.4	100.7	102.8	103.6	107.3	110.3
Lac_Blanc	94.6	100.9	104.7	108.1	109.3	111.3	115.7	120.0
Versant alsacien								
Mittlach	79.3	84.3	86.5	89.6	91.6	92.5	95.1	97.6
Breitenbach	93.0	98.6	101.2	105.1	106.9	108.6	110.9	114.0
Munster	101.8	108.1	110.9	115.1	117.1	119.0	121.4	124.9
Kruth	72.0	76.9	78.6	81.6	83.0	84.0	86.5	88.9
Geishouse	90.5	98.2	102.1	105.1	106.9	108.5	112.8	116.0
Plaine d'Alsace								
Strasbourg-Entzheim	73.4	80.2	82.5	87.8	90.4	91.6	96.6	100.6
Colmar-Meyenheim	108.6	119.7	125.5	130.9	133.8	137.0	143.5	150.2
Bâle-Mulhouse	76.4	83.6	87.5	91.8	93.8	95.8	99.5	102.4
Colmar-Inra	101.7	109.9	114.1	120.3	120.5	123.6	127.6	133.0
TOTAUX	89.1	95.7	98.9	102.9	104.6	106.3	109.9	113.5

Tab 4.03 : Liste des biais relatifs en pourcentage du cumul de précipitations total pour les deux hivers étudiés (2017-2018 et 2020-2021) pour les 14 stations retenues

Pour l'ensemble de la période étudiée dont les résultats figurent dans le *Tableau 4.03*, MAR14 (+1.5%) et MAR09 (+2%) semblent très bien correspondre aux observations sur la plupart des stations. Au total, ces deux simulations donnent de très bons résultats, notamment pour les stations situées proches de crêtes. A noter qu'une forte surestimation de MAR09-16

est toujours observable pour les stations de Colmar-Meyenheim et de Colmar-Inra, dû à l'effet de foehn.

Sur ces nombreux tests de calage du modèle MAR09-16 pour les précipitations, MAR14 et MAR09 se présentent donc comme les meilleures simulations, et seront utilisées pour la simulation du manteau neigeux au CHU dans la *Section 4.4*.

Un test a néanmoins été effectué sur les Pixels_V (voir *Tab 3.05* dans la *Section 3.6*) des cinq stations situées en bordure de leur Pixel_P, avec les simulations MAR14 et MAR09 sur le cumul total des précipitations tombées pour les deux hivers étudiés (voir *Tab 4.04*) :

Station	Biais (MAR09/OBS) %	Biais (MAR14/OBS) %
La Bresse	109.6	105.8
Mittlach	97.5	94
Breitenbach	125.9	121.5
Munster (Nord)	105.2	101.5
Munster (Nord-Ouest)	140.1	135.4
Colmar-Meyenheim	138.7	132.9
TOTAUX	119.5	115.2

Tab 4.04 : Biais relatifs en pourcentage du cumul total de précipitations des deux hivers 2017-2018 et 2020-2021 entre les simulations MAR14 et MAR09 et les observations

Les 5 stations situées en bordure de leur pixel sont représentées dans ce *Tableau 4.4*, avec pour la station de Munster, les résultats des deux pixels voisins situés en bordure Nord et Nord-Ouest de la station. Ces résultats montrent une surestimation des précipitations par MAR09 et MAR14, mais en comparant avec les Pixels_P de ces mêmes stations, il est à remarquer que seul le Pixel_V au sur la bordure Nord de Munster donne de meilleurs résultats : Surestimation de MAR09 et MAR14 de respectivement 5.2% et 1.5% pour le Pixel_V au Nord de Munster contre 15.1% et 10.9% pour le Pixel_P de Munster.

Pour les quatre autres stations, le Pixel_V donne des biais plus importants que le Pixel_P (voir *Fig 4.28 et 4.29*).

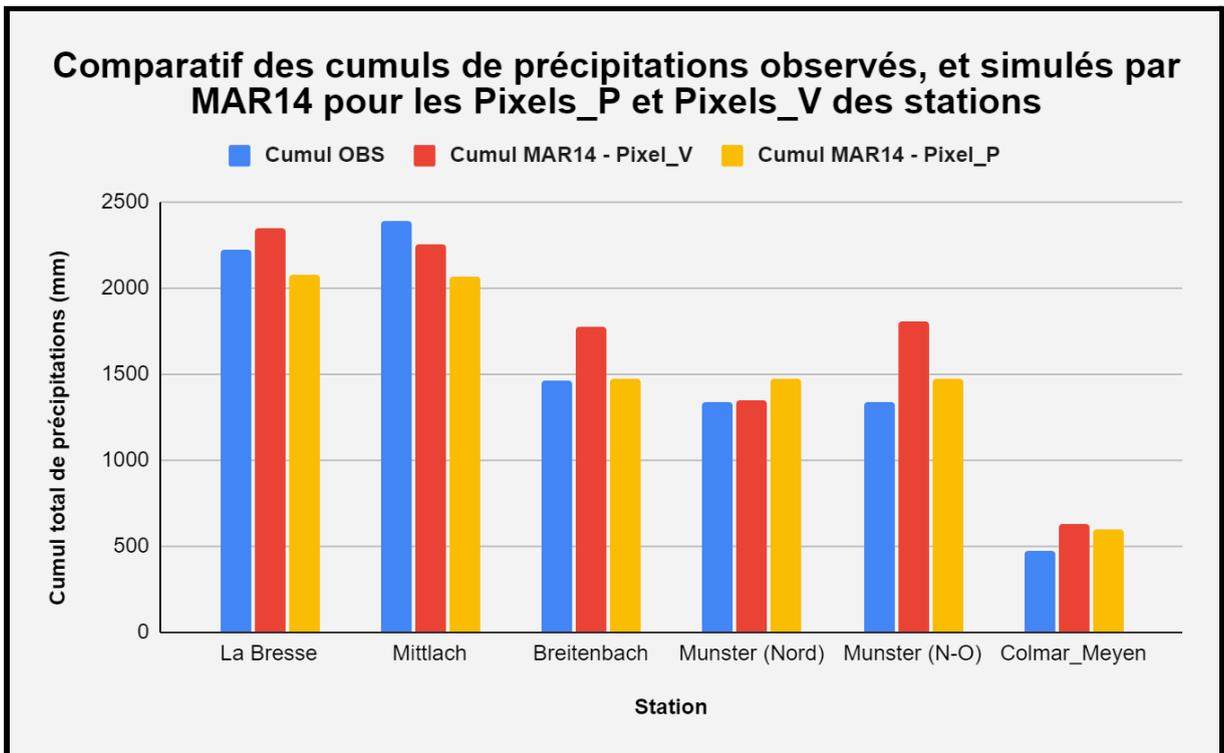
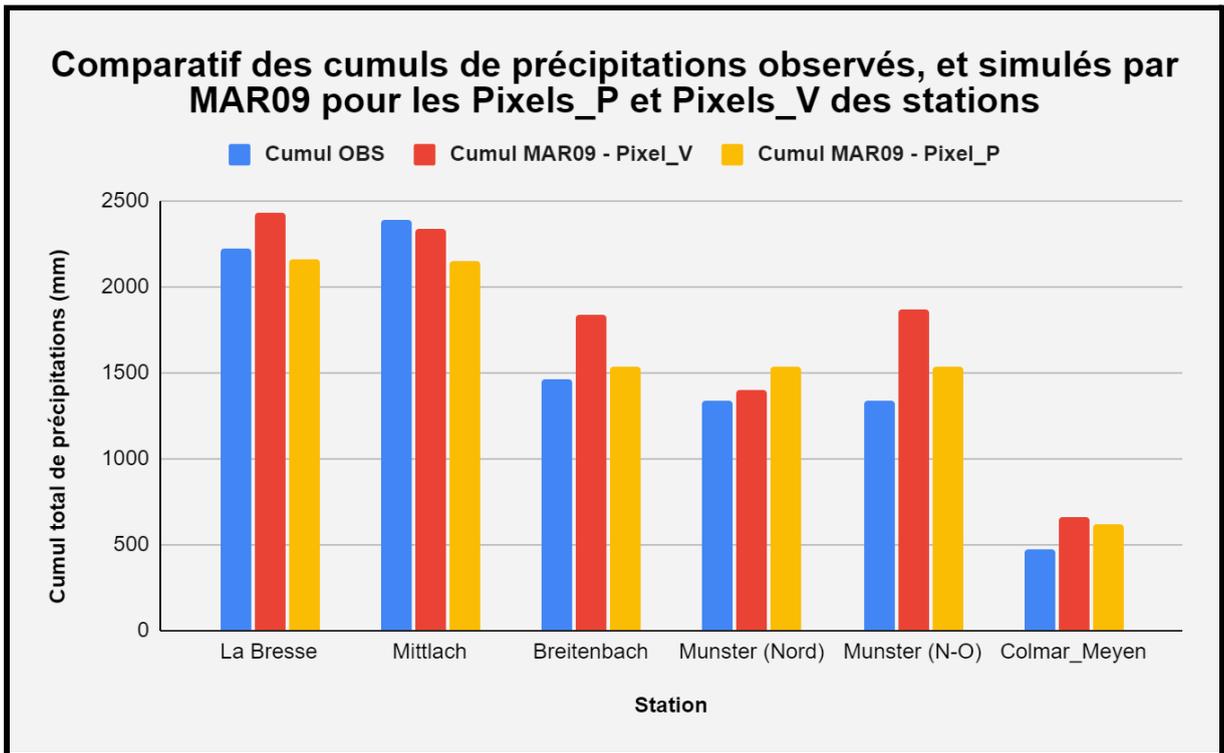


Fig 4.28 et 4.29 : Cumuls de précipitations OBS, comparés avec MAR09 et MAR14 pour les 5 stations possédant au moins un Pixel_V avec leur Pixel_P

4.4 Réglage complet en températures, précipitations et hauteurs de neige au CHU

4.4.1 Résultats des simulations MAR09 et MAR14

La calibration de MAR09-16 pour les précipitations a permis de resserrer le nombre de simulations à tester à MAR14 et MAR09 pour l'enneigement au CHU. L'enneigement dépend à la fois des températures et des précipitations. Par chance, au sein de cette étude, le Pixel_P du CHU est confondu avec le Pixel_T. Les comparaisons des températures et des précipitations ont donc pu se faire au sein du même pixel. Ci-dessous, les résultats pour les deux simulations retenues de la calibration des précipitations (MAR14 et MAR09) avec les OBS, pour les deux périodes hivernales 2017-2018 et 2020-2021 :

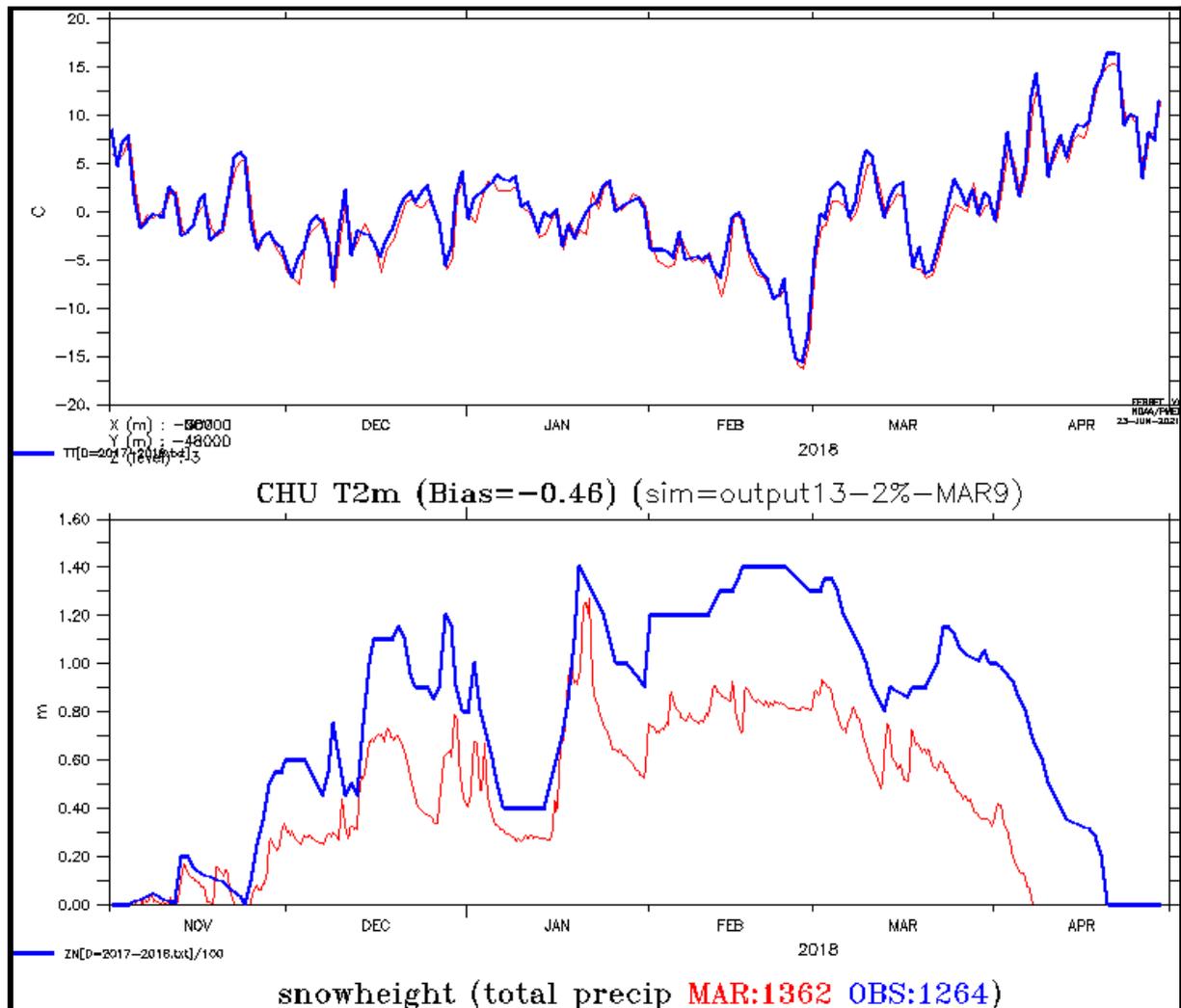


Fig 4.30 : Comparaison MAR09 vs OBS pour les températures TM_j , les hauteurs de neige HN_j et le cumul total des précipitations P_j tombées sur la période hivernale 2017-2018. En bleu les OBS et en rouge MAR09.

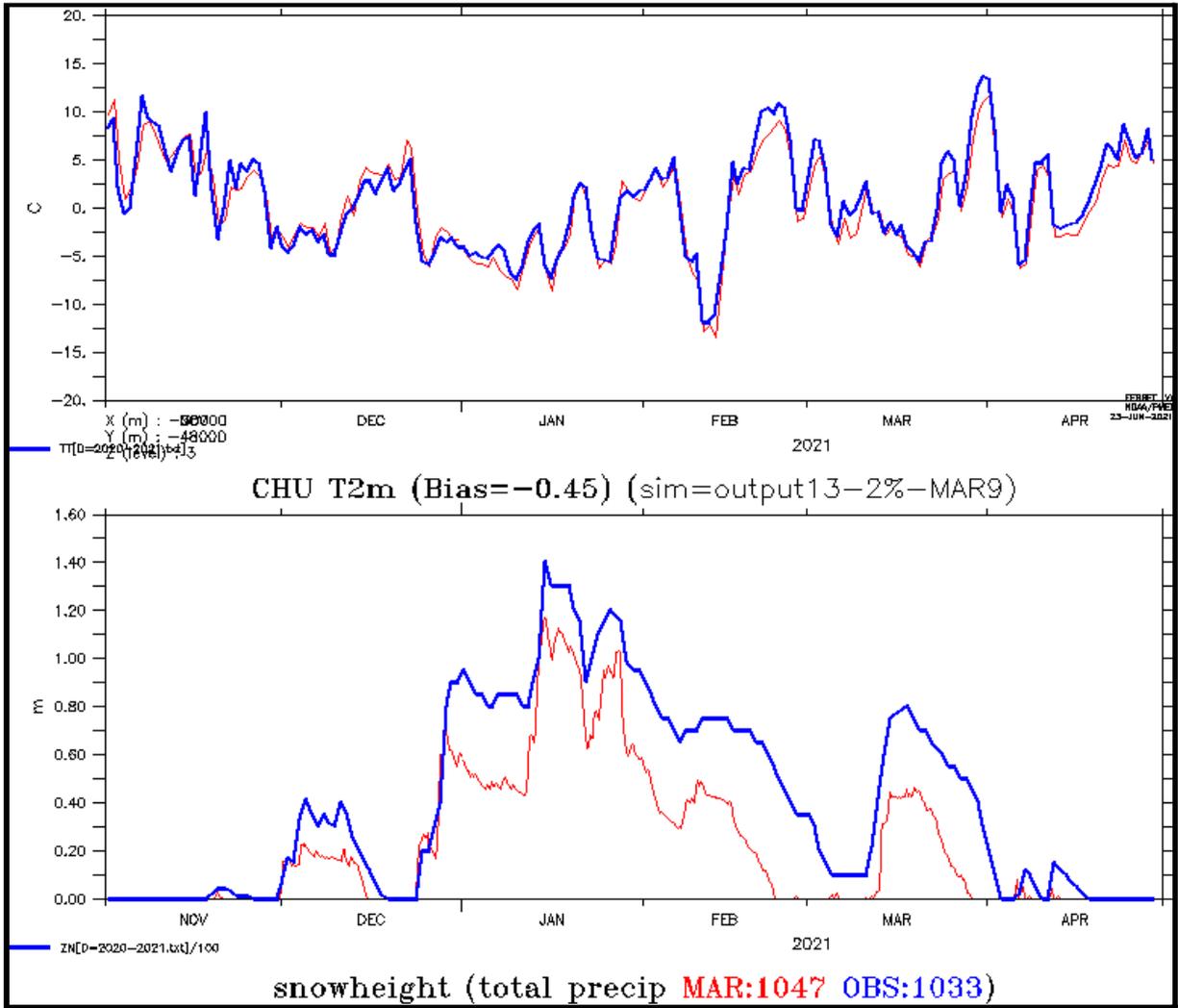


Fig 4.31 : Comparaison MAR09 vs OBS pour les températures TM_j , les hauteurs de neige HN_j et le cumul total des précipitations P_j tombées sur la période hivernale 2020-2021. En bleu les OBS et en rouge MAR09.

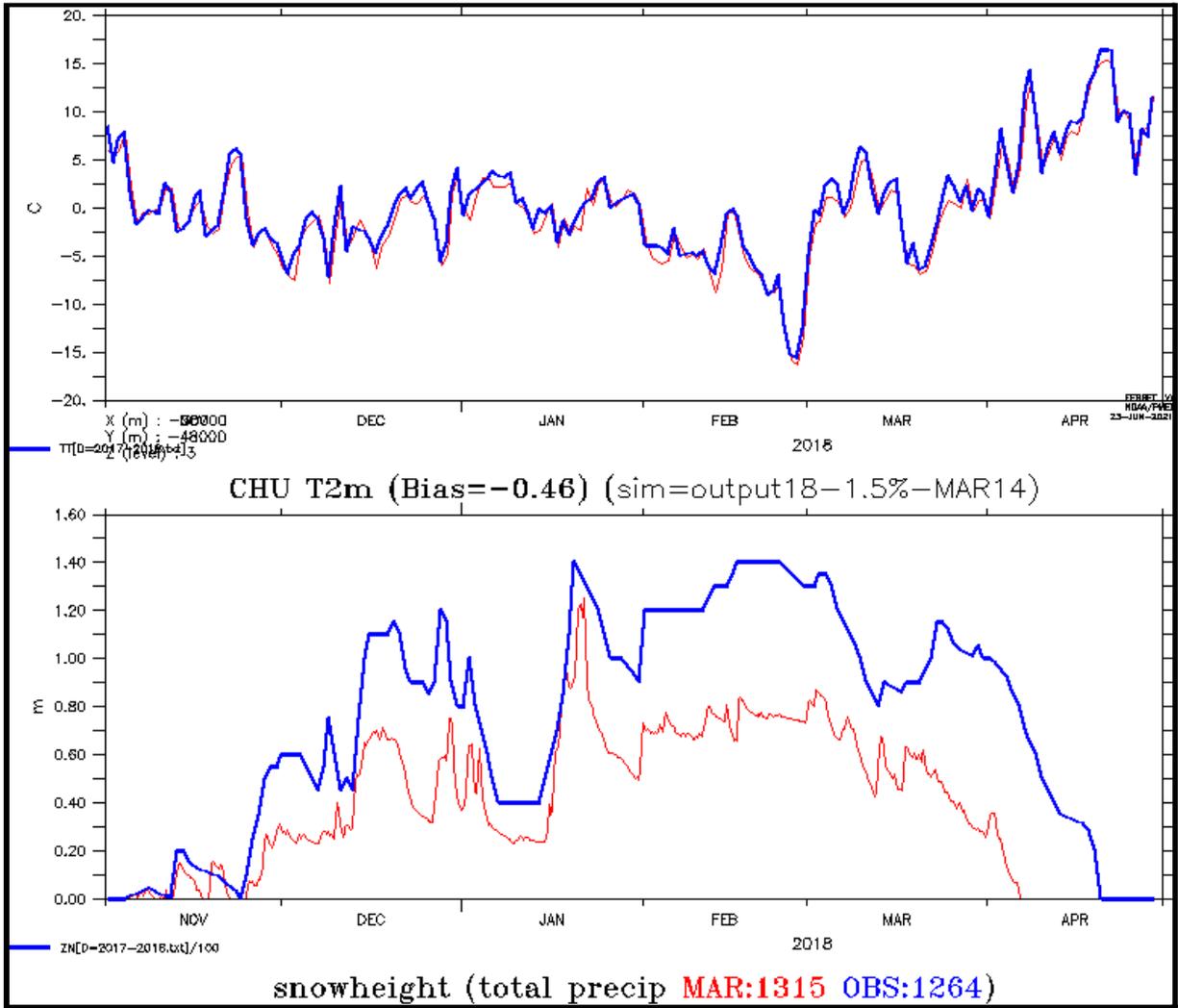


Fig 4.32 : Comparaison MAR14 vs OBS pour les températures TM_j , les hauteurs de neige HN_j et le cumul total des précipitations P_j tombées sur la période hivernale 2017-2018. En bleu les OBS et en rouge MAR14.

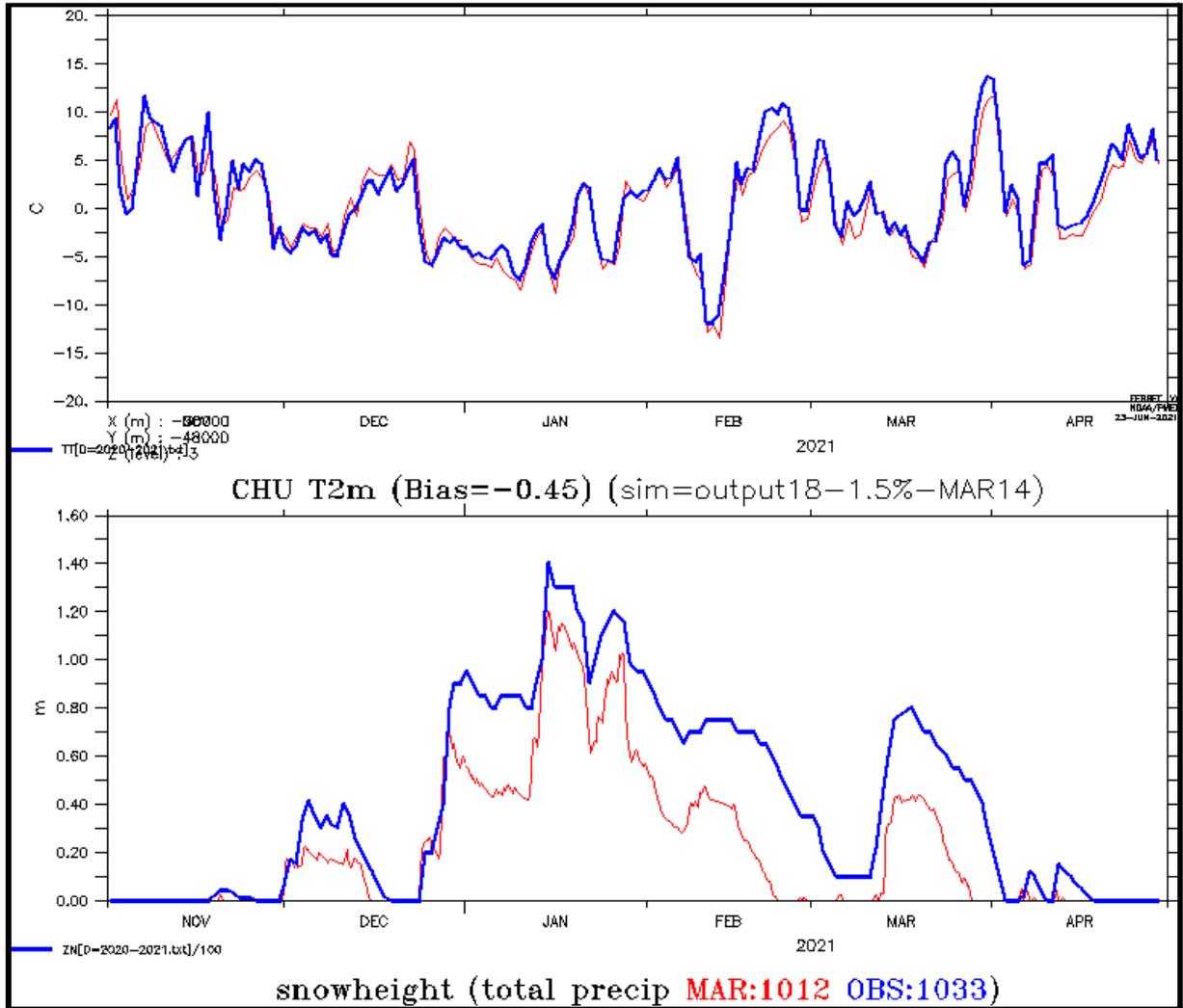


Fig 4.33 : Comparaison MAR14 vs OBS pour les températures TM_j , les hauteurs de neige HN_j et le cumul total des précipitations P_j tombées sur la période hivernale 2020-2021. En bleu les OBS et en rouge MAR14.

Voici ci-dessous le tableau synoptique global de MAR09 et MAR14 au CHU pour les biais absolus et relatifs des températures, précipitations et hauteurs de neige pour les deux hivers étudiés (voir Tab 4.05) :

Simulation MAR	Biais en T (en °C) (MAR-OBS)	Biais en T (en %) (MAR/OBS)	Biais en P (en mm) (MAR-OBS)	Biais en P (en %) (MAR/OBS)	Biais en HN (en m) (MAR-OBS)	Biais en HN (en m) (MAR/OBS)
Hiver 2017-2018						
MAR14 (+1.5%)	-84.7	4.6	51	104	-62.1	53.3
MAR09 (+2%)	-84.1	3.9	98	107.7	-55.7	58.1
Hiver 2020-2021						
MAR14 (+1.5%)	-81.5	43.9	-21	97.9	-32.7	55
MAR09 (+2%)	-80.7	44.4	14	101.3	-31.8	56.3

Tab 4.05 : Biais relatifs et absolus des cumuls totaux des températures T, précipitations P et hauteurs de neige HN pour les hivers 2017-2018 et 2020-2021

En général, d'après les *Figures 4.30-4.33* et le *Tableau 4.05*, l'hiver 2020-2021 est mieux simulé que l'hiver 2017-2018 par ces deux simulations MAR. Il est fort possible que les données observées du dernier hiver soient de meilleure qualité et que les mesures faites au CHU se soient améliorées. Pour les biais de températures, ceux-ci sont moins forts pour MAR09 que pour MAR14 malgré de très mauvais résultats, qui peuvent être expliqués par la somme totale des températures prises sur la période. En ce qui concerne les précipitations, MAR14 est meilleur que MAR09 pour l'hiver 2017-2018 mais pas pour l'hiver 2020-2021. Enfin, pour les hauteurs de neige cumulées, MAR09 est légèrement meilleur que MAR14, mais avec ces deux simulations, le manteau neigeux observé reste encore sous-estimé.

4.4.2 Introduction des trois dernières simulations (MAR17-18-19)

L'ensemble des deux simulations retenues (MAR09-14) montre toujours une sous-estimation du manteau neigeux.

Ces deux simulations choisies donnent des résultats assez proches, mais pour le manteau neigeux, c'est MAR09 qui colle le mieux au véritable manteau neigeux, notamment durant l'hiver 2017-2018, même si la sous-estimation reste forte.

Il faut donc trouver un moyen de mieux reconstituer le manteau neigeux simulé par MAR à la réalité. MAR17 est la nouvelle simulation qui a été construite de façon différente :

- Forte diminution de la diffusion de l'humidité à travers le domaine au sein du modèle, ce qui permet de baisser la correction relative de l'humidité spécifique aux frontières (-1.5%).
- En résulte une simulation plus froide que les autres (à cause de la baisse de l'humidité et donc de la nébulosité qui a un effet réchauffant).
- Enfin, le seuil de la limite pluie/neige a donc été redressé (de 0°C à +2°C au lieu de -1°C à +2°C).

Les résultats ont pu être construits de la même façon pour MAR17 que pour MAR09 et MAR14 au CHU (voir Fig 4.34 et 4.35) :

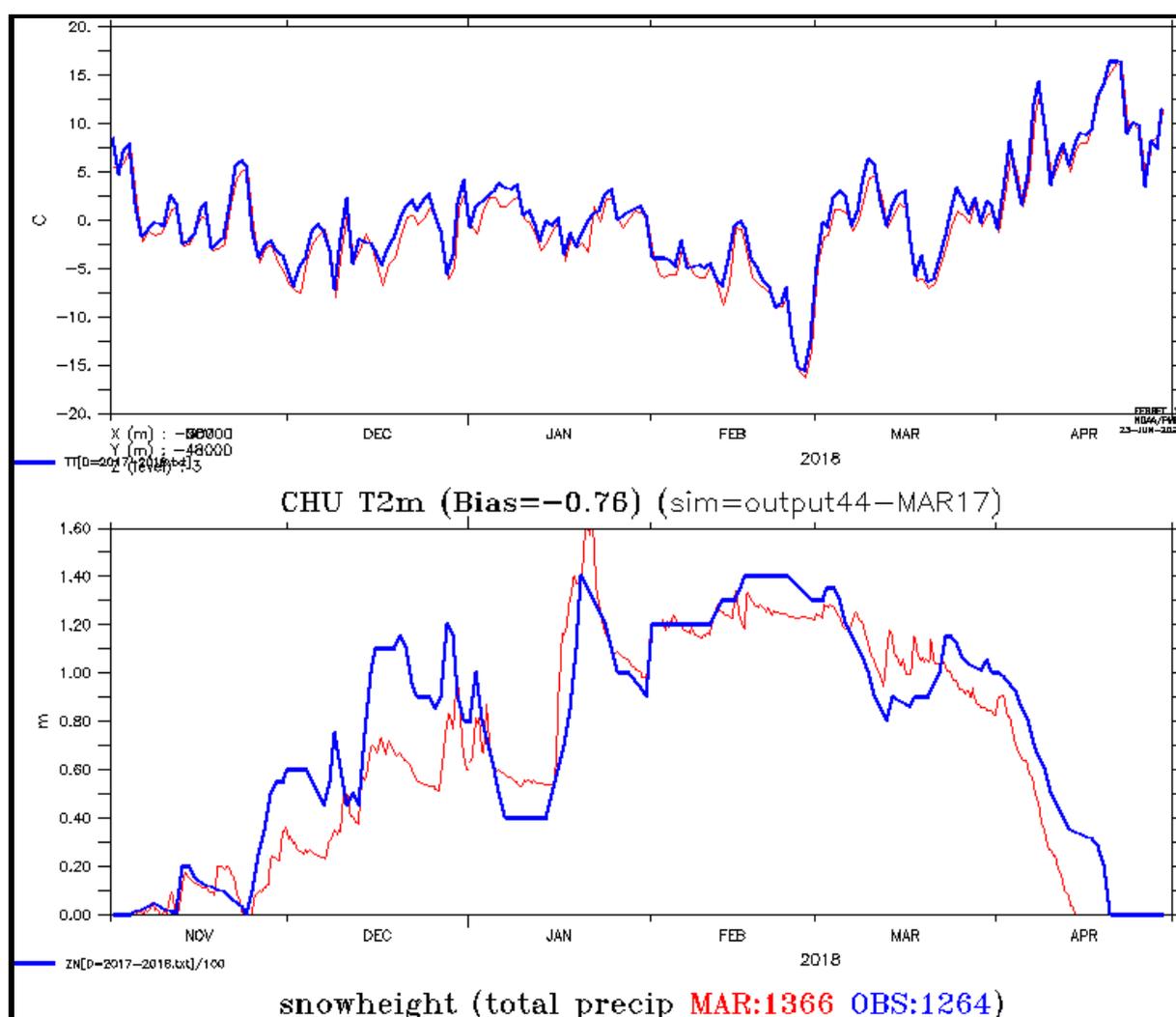


Fig 4.34 : Comparaison MAR17 vs OBS pour les températures TM_j , les hauteurs de neige HN_j et le cumul total des précipitations P_j tombées sur la période hivernale 2017-2018. En bleu les OBS et en rouge MAR17.

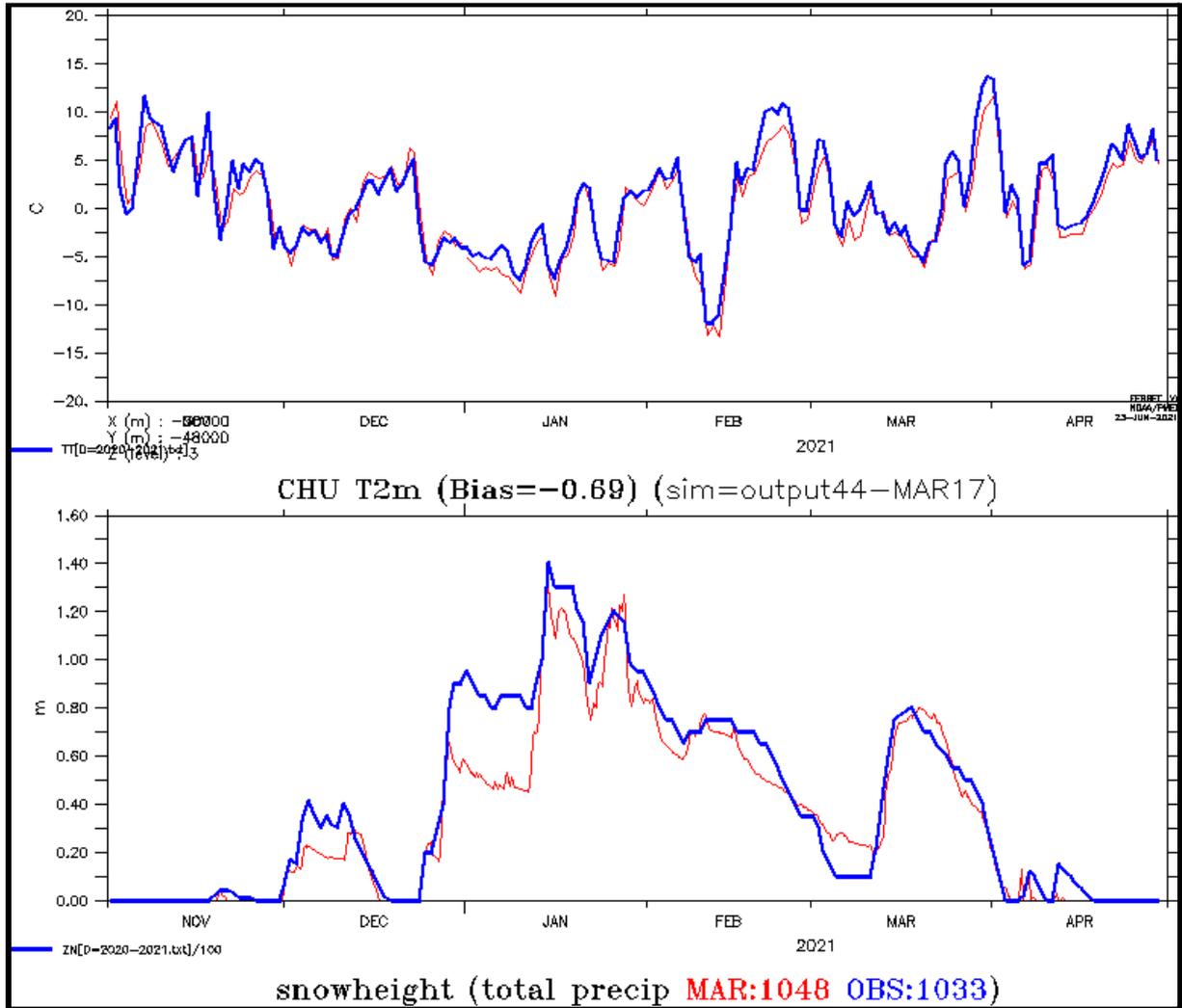


Fig 4.35 : Comparaison MAR17 vs OBS pour les températures TM_j , les hauteurs de neige HN_j et le cumul total des précipitations P_j tombées sur la période hivernale 2020-2021. En bleu les OBS et en rouge MAR17.

Les résultats de MAR17 montrent effectivement des températures plus froides, mais le manteau neigeux colle mieux à la réalité. Les biais de précipitations sont également faibles (surestimation de 15 mm par MAR17). Mais au vu des très bons résultats de calibration concernant les précipitations pour MAR09 et MAR14, ces deux simulations ont pu être améliorées sans modifier les paramètres des variables Températures et Précipitations, c'est-à-dire en modifiant seulement l'enneigement. Ces deux simulations ont donc été mises à jour, respectivement en MAR18 et en MAR19. Voici ci-dessous les résultats des hauteurs de neige obtenus pour 2017-2018 et 2020-2021 :

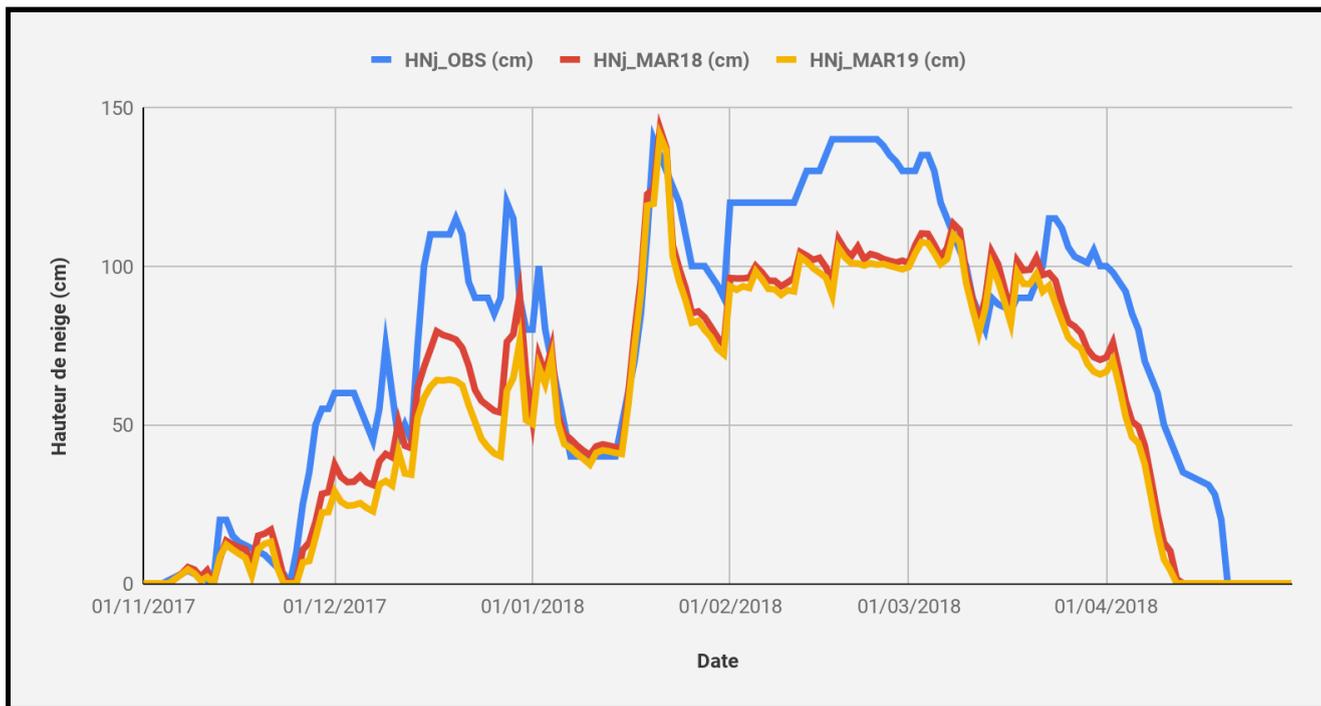


Fig 4.36 : Évolution du manteau neigeux observé (en bleu) et simulé par MAR18 (en rouge) et par MAR19 (en jaune) pour la station Xonrupt-Chitelet : CHU (1220 m) dans la période 01/11/2017-30/04/2018



Fig 4.37 : Évolution du manteau neigeux observé (en bleu) et simulé par MAR18 (en rouge) et par MAR19 (en jaune) pour la station Xonrupt-Chitelet : CHU (1220 m) dans la période 01/11/2020-30/04/2021

Les *Figures 4.36* et *4.37* permettent de constater que MAR18, qui est la m^àj de MAR09 (+2%), simule légèrement mieux le manteau neigeux observé que MAR19. Comme énoncé précédemment, ces m^àj de MAR09 et de MAR14 concernent uniquement le manteau neigeux, et n'ont pas eu d'influence sur les températures et les précipitations déjà analysées. Par conséquent, il est intéressant de vérifier les biais concernant le manteau neigeux de l'hiver 2017-2018 et de l'hiver 2020-2021 avec MAR18 et MAR19 (voir *Tab 4.06*) :

Période	Biais (en m) (MAR18-OBS)	Biais (en %) (MAR18/OBS)	Biais (en m) (MAR19-OBS)	Biais (en %) (MAR19/OBS)
Hiver 2017-2018	-27.8	79.1	-35.3	73.5
Hiver 2020-2021	-24.5	66.2	-26	64.2

Tab 4.06 : Biais absolus et relatifs entre MAR18/MAR19 et OBS pour le cumul de neige total sur les hivers 2017-2018 et 2020-2021

Ce *Tableau 4.06* montre que MAR18 représente effectivement mieux le manteau neigeux réel que MAR19 au CHU durant ces deux hivers.

Tous les résultats obtenus jusqu'ici ont donc permis de trouver la simulation MAR qui satisfait à la fois les températures, les précipitations, et les hauteurs de neige. Cette simulation choisie est donc MAR18. Il est évidemment normal que même si cette simulation permet de caler MAR sur la région AV, elle possède également ses limites et ne peut pas parfaitement coller à la réalité.

4.5 Tests de MAR18 sur deux hivers passés (1988-1989 / 1989-1990)

Vu que le choix s'est porté vers la simulation MAR18, il serait très intéressant de voir si cette simulation est capable de reconstituer des manteaux neigeux d'hivers passés. Grâce aux données de P-M. David, des données d'enneigement au CHU des hivers 1988-1989 et 1989-1990 ont pu être récoltées. Ces mesures d'enneigement ont été réalisées par l'observateur diplômé P-M. David, au sein du site du Chitelet à 1220 m d'altitude. D'après P-M. David, ces deux hivers passés furent les moins enneigés (notamment 1989-1990) depuis le début de ses relevés en 1976. Ces faibles enneigements vont permettre de voir si MAR18 peut simuler de faibles quantités de neige dans le massif vosgien.

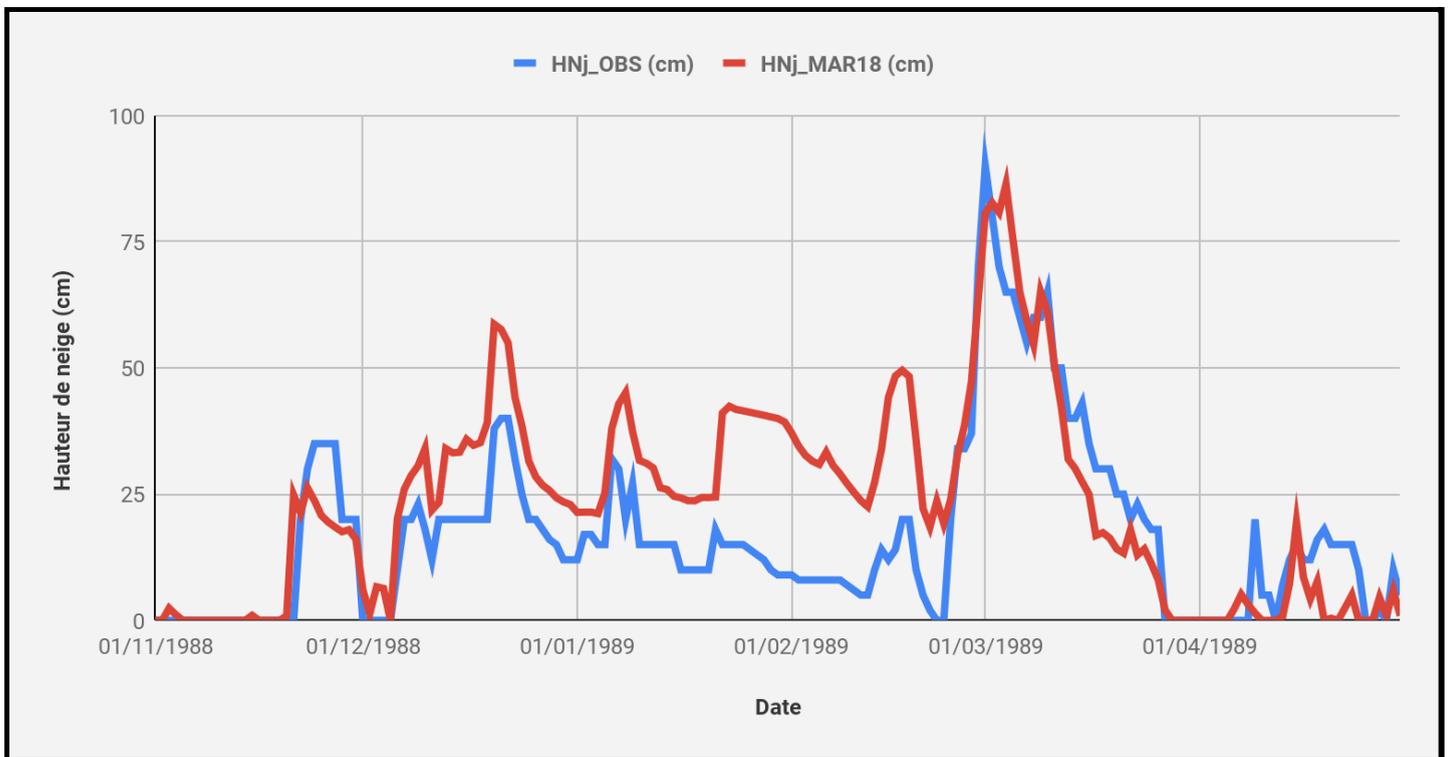


Fig 4.38 : Évolution du manteau neigeux observé (en bleu) et simulé par MAR18 (en rouge) pour la station Xonrupt-Chitelet : CHU (1220 m) dans la période 01/11/1988-30/04/1989

La *Figure 4.38* ci-dessus montre des résultats très intéressants. MAR18 surestime le manteau neigeux de cet hiver 1988-1989, peu neigeux, par rapport aux observations. Ces résultats sont surprenants, car sur l'ensemble des simulations MAR testées sur les hivers 2017-2018 et 2020-2021, le manteau neigeux n'a cessé d'être sous-estimé par MAR.

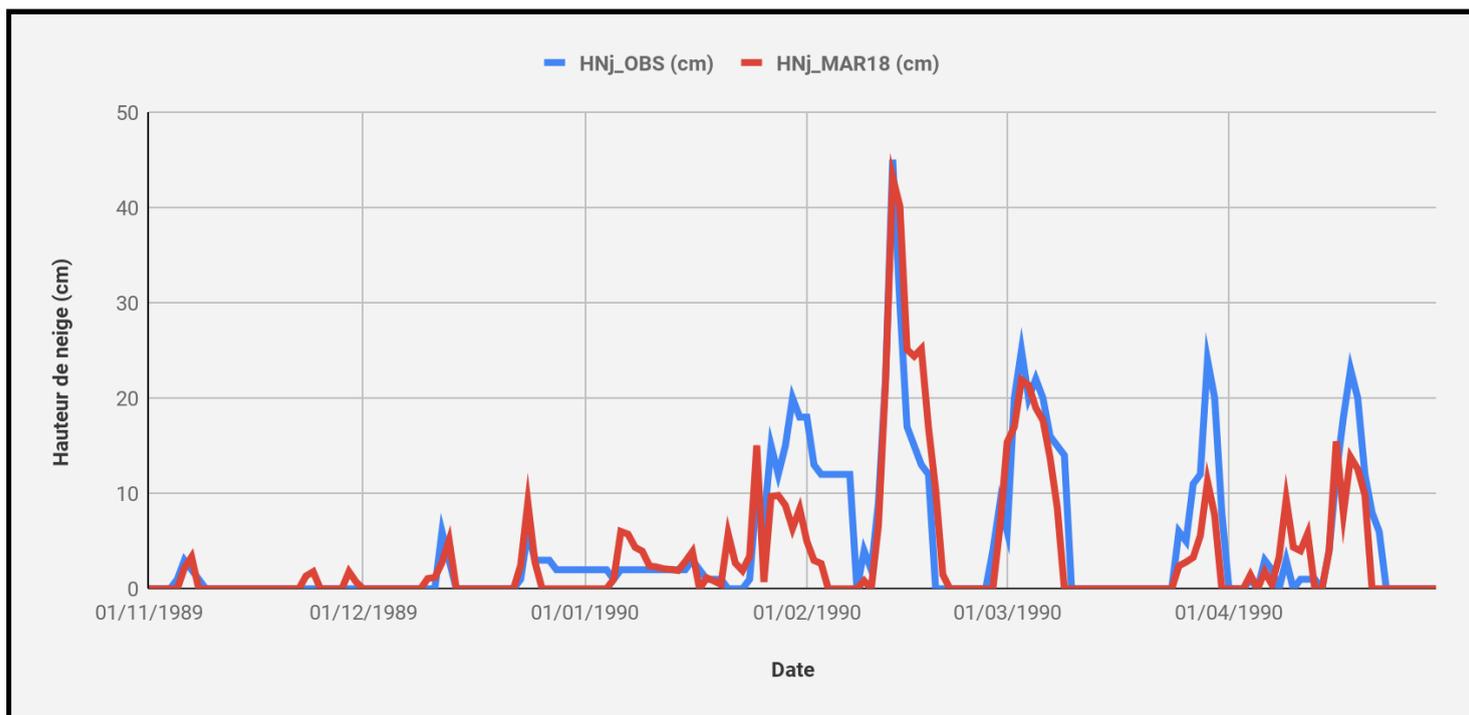


Fig 4.39 : Évolution du manteau neigeux observé (en bleu) et simulé par MAR18 (en rouge) pour la station Xonrupt-Chitelet : CHU (1220 m) dans la période 01/11/1989-30/04/1990

La Figure 4.39 montre que cet hiver 1989-1990 a été exceptionnellement peu enneigé, avec une épaisseur maximale du manteau à seulement 43 cm le 13 février 1990. Cependant, MAR18 a globalement bien simulé les variations du manteau neigeux, avec une parfaite similitude entre MAR18 et OBS pour l'épisode du 13 février 1990, malgré une faible sous-estimation globale (voir Tab 4.07) :

Période	Cumul HNj OBS (en cm)	Cumul HNj MAR18 (en cm)	Biais (en cm) (MAR18-OBS)	Biais (en %) (MAR18/OBS)
Saison 1988-1989	30.4	41.7	11.3	137
Saison 1989-1990	8.1	6.4	-1.7	79

Tab 4.07 : Biais absolus et relatifs entre MAR18 et OBS pour le cumul de neige total sur les hivers 1988-1989 et 1989-1990

Ce Tableau 4.07 montre que l'hiver 1989-1990 reste le mieux simulé par MAR18, mais ces résultats sont à relativiser au vu des très faibles quantités neigeuses tombées au cours de cet hiver.

CHAPITRE V

CONCLUSION GÉNÉRALE

5.1 Discussion des résultats

Cette section a pour objectif de discuter de l'ensemble des résultats montrés au cours de cette étude. Les résultats des comparaisons se sont divisés en plusieurs parties :

- Les résultats des comparaisons MAR vs OBS en termes de températures
- Les résultats des comparaisons MAR vs OBS en termes de précipitations
- Les résultats des comparaisons MAR vs OBS en termes de hauteurs de neige

En termes de températures, les résultats ont montré que sur l'ensemble des résultats obtenus, le modèle MAR tend à sous-estimer ces températures et à être plus froid en hiver, notamment lorsque la topographie du site et les conditions météorologiques anticycloniques permettent de bloquer l'air froid dans les basses couches, c'est-à-dire dans les vallées et dans la plaine, comme l'ont déjà montré d'autres études similaires (Fettweis et *al.*, 2015; Wyard et *al.*, 2017). La station du CHU est d'ailleurs la seule station où MAR surestime les températures, sur les 8 stations étudiées. Globalement, les différentes simulations MAR ont été proches de la réalité au niveau des températures. Le choix des Pixels_T du maillage du modèle MAR s'est vu être un succès comme attendu, au lieu d'avoir choisi l'emplacement exact des stations au sein du maillage MAR (Pixels_P), qui aurait bien entendu donné des mauvais résultats.

En termes de précipitations, le choix des Pixels_P a été crucial pour caler MAR09-16 sur les cumuls observés. Mais sans aucune correction relative d'humidité spécifique aux frontières latérales du modèle, les résultats ont montré des biais significatifs faisant état d'une sous-estimation importante par MAR, sauf pour la plaine centrale alsacienne subissant un fort effet de foehn (notamment pour Colmar). Grâce à la prise en compte de la répartition réelle des précipitations selon la ligne de crête vosgienne principale afin de construire les résultats

de comparaisons en précipitations, les biais ont clairement montré que MAR sous-estimait beaucoup plus les précipitations sur le versant Ouest vosgien (“au vent”) que sur le versant Est alsacien (“sous le vent”), notamment pour les stations de Munster ou de Geishouse, protégées par la crête, et donc possédants des cumuls de précipitations réels plus faibles que sur le versant Ouest. Par conséquent, le modèle n’ayant pas pu modéliser avec précision ces effets de vallées et de foehn, ne simule pas beaucoup moins de précipitations sur ce versant Est, et s’est donc recollé aux observations. Néanmoins, les résultats des comparaisons pour la station de Kruth se sont vus être complètement sous-estimés par les 8 simulations MAR (MAR09-16). Par chance, le CHU possédait le même Pixel pour P et T, facilitant grandement les résultats.

Ces éléments de discussions permettent de constater les limites du modèle MAR en ce qui concerne la simulation des disparités pluviométriques dues à l’influence orographique des Vosges, et donnent donc une certaine réponse à une des problématiques posées lors de l’introduction de ce mémoire : *“Quelle est la capacité du modèle MAR à simuler les disparités pluviométriques dues à l’influence orographique ?”*

Il est évident qu’une simulation MAR ne pouvait pas coller aux observations pour chacune des stations vosgiennes et alsaciennes, car les disparités furent trop grandes, en termes de précipitations, mais également de températures.

Enfin, pour les résultats des comparaisons MAR vs OBS pour les hauteurs de neige, cette étude a mis en lumière le fait que les premières simulations MAR n’arrivaient pas à bien simuler le manteau neigeux, notamment pour le CHU. C’est-à-dire que sans modifier des paramètres et des réglages au sein du modèle, l’enneigement a été très mal simulé contrairement aux premiers résultats qu’avaient donné les comparaisons pour les températures et les précipitations. La problématique du début de l’étude concernant le manteau neigeux peut donc être (en partie) répondue : *“Comment le modèle MAR simule-t-il l’évolution passée et actuelle de l’enneigement au sein du massif des Vosges ?”*.

Cependant, même pour des données observées, il est très difficile d’évaluer avec exactitude le manteau neigeux sur une surface, qui peut varier sur de très courtes distances au sol. L’enneigement est donc une donnée très variable, elle dépend de l’observateur, mais également du lieu de l’observation : la station peut être située sur une pente, ou protégée par de la végétation, ou encore exposée au vent ce qui peut provoquer une ablation éolienne de la

neige. Dans le cadre de cette étude, la plupart des stations ont été vérifiées sur le terrain, et ont été considérées comme de très bonnes stations. Le paramètre de densité de la neige devait également être pris en compte au cours de cette étude, mais il a été vérifié que les changements en densité de la neige au sein du modèle MAR ont été très négligeables.

De manière générale, les événements météorologiques extrêmes et/ou brefs dans le temps ont été bien simulés par MAR au cours des périodes étudiées. La vague de froid qui a sévi dans le Nord-Est de la France fin février 2018 a été modélisée de manière très juste par le modèle. Les épisodes neigeux intenses ont également été bien simulés par MAR, notamment l'épisode du 13 février 1990 qui a apporté plus de 40 cm en très peu de temps au CHU, et qui a été parfaitement simulé par le modèle. Une autre problématique posée lors de l'introduction peut donc être répondue (de manière relative à l'étude) : *“Le modèle MAR peut-il simuler de façon précise des événements météorologiques extrêmes ? Brefs dans le temps ?”*.

Finalement, les résultats de cette étude ont été pertinents. Aussi bien pour le modèle MAR lui-même qui a pu être amélioré, et adapté à la région AV. Ces comparaisons ont également pu montrer l'importance des données météorologiques observées et de leur disponibilité dans le cadre de ce mémoire. La validation de ces données a été une étape très importante dans la construction de ce travail. La pertinence du travail s'établit aussi dans l'appréhension de problèmes relatifs à ce genre d'études. Néanmoins, ce travail s'apparente à une étude préliminaire qui pourrait servir à une étude approfondie de l'enneigement au sein du massif des Vosges et/ou de la disparité pluviométrique due à l'influence orographique des crêtes vosgiennes.

A la réponse de la problématique générale du mémoire (*“Comment le modèle MAR simule-t-il la variabilité climatique temporelle (journalière) et spatiale (de l'ordre de 5km) dans la région des Vosges ?”*), le modèle MAR a beaucoup apporté au sein de cette région AV, et grâce aux nombreux ajustements du modèle, une représentation cohérente du climat alsacien et vosgien a pu être construite.

5.2 Perspectives

Cette étude globale constitue un point de départ pour une étude qui pourrait être plus approfondie par la suite. En effet, ce mémoire s'est concentré sur la calibration du modèle MAR en termes de températures, de précipitations et de hauteurs de neige, mais aurait pu se concentrer sur un seul de ces trois paramètres, afin de l'approfondir un maximum. Les données d'enneigement au CHU disponibles pour l'étude grâce à P-M. David et *al.* pourraient faire l'objet d'autres études centrées sur l'enneigement. Ce travail ne constitue donc qu'une étude préliminaire et assez superficielle, malgré que le modèle MAR ait trouvé une bonne calibration afin de donner de bons résultats globaux.

Il serait également très intéressant d'étudier différentes tendances avec MAR18 sur l'enneigement au CHU pour une période longue, voire pour étudier en détails l'hiver très enneigé de 2005-2006 où le manteau neigeux avait atteint plus de 3 m en mars 2006. Des projections futures d'ici 2100 seraient aussi très intéressantes à discuter au vu des bons résultats de MAR18. Cette simulation pourrait donner une idée concrète des conséquences du réchauffement climatique sur l'enneigement moyen du massif vosgien, afin de pourquoi pas effectuer des préventions pour le grand public et pour les stations de sports d'hiver.

D'intéressantes perspectives peuvent donc être mises en œuvre à la suite de cette étude, notamment en ce qui concerne l'enneigement. Des études complémentaires, se concentrant exclusivement sur les précipitations pourraient également permettre de mieux appréhender l'effet de foehn présent en plaine d'Alsace, et plus généralement la répartition pluviométrique sur la région AV par un MCR.

5.3 Conclusion

Pour conclure, ce mémoire a eu pour ambition de tester et de valider le modèle MAR sur l'Alsace et les Vosges, qui ne faisaient jusqu'ici pas l'objet de comparaisons en profondeur avec l'aide d'un MCR.

En se demandant si MAR pouvait simuler avec soin les variabilités climatiques existantes, notamment en période hivernale, cette étude de comparaison s'est en premier lieu concentrée sur le réglage des températures sur 8 stations synoptiques réparties équitablement sur l'ensemble du domaine.

Par la suite, le modèle a été réglé sur les précipitations selon 14 stations réparties selon les différents topoclimats du massif vosgien et de la plaine d'Alsace.

Enfin, les hauteurs de neige de la station du CHU ont été analysées en profondeur afin de caler le modèle sur le manteau neigeux observé.

Les résultats de ce mémoire vont permettre par la suite d'effectuer des recherches plus approfondies sur le manteau neigeux au sein du massif vosgien. Des études portant donc sur l'évolution des manteau neigeux et sur la calibration du modèle MAR à plus long terme que ce soit dans le massif des Vosges ou dans un autre massif, seraient importantes dans un contexte où les conséquences du réchauffement climatique affectent de plus en plus nos sociétés.

BIBLIOGRAPHIE

- Ambroise, B., Perrin, J. L., & Reutenauer, D. (1995). Multicriterion validation of a semidistributed conceptual model of the water cycle in the Fecht Catchment (Vosges Massif, France). *Water Resources Research*, 31(6), 1467-1481.
- Andreoli, R., Rosique, T., Schmidt, M., & Carozza, J. M. (2006). La dernière phase glaciaire du haut bassin de la Fecht (Vosges, France): dynamique de l'englacement et chronologie relative de la déglaciation. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 12(1), 23-36.
- Becker, M. (1989). The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of northeastern France. *Canadian journal of forest research*, 19(9), 1110-1117.
- Becker, M., & Schipfer, R. (1982). Influence relative du climat et du sol sur les potentialités forestières en moyenne montagne. Exemple des sapinières à fétuque (*Festuca silvatica* Vill.) dans les Vosges alsaciennes. In *Annales des sciences forestières* (Vol. 39, No. 1, pp. 1-32). EDP Sciences.
- Berrisford, P., Kållberg, P., Kobayashi, S., Dee, D., Uppala, S., Simmons, A. J., ... & Sato, H. (2011). Atmospheric conservation properties in ERA-Interim. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(659), 1381-1399.
- Casimir, M. (1976). Les sports d'hiver dans les Vosges: une solution contre la mort blanche?. *Revue de géographie alpine*, 64(4), 561-572.
- Clivaz, C., Gonseth, C., & Matasci, C. (2015). *Tourisme d'hiver: le défi climatique*. PPUR Presses polytechniques.
- Douguédroit, A., & De Saintignon, M. F. (1984). Les gradients de températures et de précipitations en montagne. *Revue de géographie alpine*, 72(2), 225-240.

- Drogue, G., & François, D. (2014, July). Quel référentiel pluviométrique pour débiaiser les sorties de modèles climatiques? Apport de l'information hydrologique pour spatialiser les précipitations journalières à échelle fine. In *Climat: système & interactions* (pp. 119-124).
- Fallmann, J., Wagner, S., & Emeis, S. (2017). High resolution climate projections to assess the future vulnerability of European urban areas to climatological extreme events. *Theoretical and Applied Climatology*, 127(3-4), 667-683.
- Feldmann, H., Schädler, G., Panitz, H. J., & Kottmeier, C. (2013). Near future changes of extreme precipitation over complex terrain in Central Europe derived from high resolution RCM ensemble simulations. *International Journal of Climatology*, 33(8), 1964-1977.
- Gallée, H., & Schayes, G. (1994). Development of a three-dimensional meso- γ primitive equation model: katabatic winds simulation in the area of Terra Nova Bay, Antarctica. *Monthly Weather Review*, 122(4), 671-685.
- GÉRARD, J. A., & Ambroise, B. (1995, January). Topographie et précipitation locale: approche trigonométrique. In *Annales de Géographie* (Vol. 104, No. 581/582, pp. 173-177). Armand Colin.
- Hoinka, K. P. (1985). What is a foehn clearance?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 66(9), 1123-1132.
- Humbert, J. (1982). La répartition spatiale des précipitations dans le bassin versant de la Petite Fecht à Sultzeren (Hautes-Vosges). Premiers résultats.
- Humbert, J. (1986). Estimation et rôle de la fonte nivale dans l'écoulement de crue des rivières des Hautes-Vosges (bassin de la Fecht, Haut-Rhin). *Revue géographique de l'Est*, 26(1), 27-56.

- Khodayar, S., & Schädler, G. (2013). The impact of soil moisture variability on seasonal convective precipitation simulations. Part II: sensitivity to land-surface models and prescribed soil type distributions. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(4), 507-526.
- Kleinn, J., Frei, C., Gurtz, J., Lüthi, D., Vidale, P. L., & Schär, C. (2005). Hydrologic simulations in the Rhine basin driven by a regional climate model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D4).
- Laborde, J. P. (1982). Cartographie automatique des caractéristiques pluviométriques: Prise en compte des relations pluviométrie-morphométrie. *La Houille Blanche*, (4), 331-338.
- Lefort, A. (1957). Les variations des régimes pluviométriques saisonniers dans les Vosges de 1851 à 1930. *Revue de Géographie Alpine*, 45(1), 127-134.
- Marand, C. (1992). Obstacles orographiques et champ des précipitations sur le Massif Vosgien. *Revue Géographique de l'Est*, 32(1), 11-24.
- Marand, C., & Zumstein, J. F. (1988). La notion d'altitude lissée: une mise au point nécessaire. *Revue Géographique de l'Est*, 28(1), 39-46.
- Minářová, J. (2013). Climatology of precipitation in the Vosges Mountain range area. *Auc Geographica*, 48(2), 51-60.
- Minářová, J., Müller, M., Clappier, A., & Kašpar, M. (2018). Comparison of extreme precipitation characteristics between the Ore Mountains and the Vosges Mountains (Europe). *Theoretical and Applied Climatology*, 133(3), 1249-1268.
- Saab, A. E., Rolin, C., & Villouvier, V. (1981). A Mesoscale Numerical Model of Atmospheric Flow Over the Alsace Plain. In *Air Pollution Modeling and Its Application I* (pp. 213-222). Springer, Boston, MA.

- Strandberg, G., Brandefelt, J., Kjellström, M. E., & Smith, B. (2011). High-resolution regional simulation of last glacial maximum climate in Europe. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 63(1), 107-125.
- Tricart, J. (1975, March). Les Vosges et la plaine d'Alsace vues du satellite ERTS-1. In *Annales de Géographie* (pp. 129-173). Armand Colin.
- Wahl, L., Planchon, O., & David, P. M. (2007). Névés, corniches et risque d'avalanche dans les Hautes-Vosges. En hommage à Laurent Wahl, décédé le 18 décembre 2008. *Revue Géographique de l'Est*, 47(4).
- Weisrock, A. (1999). Un précurseur de la géomorphologie: Henri Hogard (1808-1880) et la glaciation des Vosges. *Revue Géographique de l'Est*, 39(1).
- Wyard, C., Scholzen, C., Fettweis, X., Van Campenhout, J., & François, L. (2017). Decrease in climatic conditions favouring floods in the south-east of Belgium over 1959–2010 using the regional climate model MAR. *International Journal of Climatology*, 37(5), 2782-2796.

ANNEXES

Dans ces annexes figurent les tableaux des simulations échouées MAR04-07, qui n'ont donc rien apporté à l'étude, ainsi que les données brutes des cumuls de précipitations des 14 stations étudiées OBS vs MAR09-16 (Pixels_P) :

Annexe 1 : Tableau représentant le cumul total des Pj tombées du 1er décembre 2017 au 28 février 2018 ainsi que les biais, pour les 8 stations retenues (sauf le CHU), en comparaison avec MAR04/05. Les stations de Strasbourg-Entzheim (dans une moindre mesure), de Colmar-Meyenheim et de Geishouse qui sont situées à l'abri des vents dominants affichent une grande surestimation du MAR en termes de précipitations. Ces résultats montrent bien que le MAR possède ses limites dans l'appréhension des phénomènes météo locaux, ici l'effet de foehn.

	OBS (mm)	MAR04/05 [+4%] (mm)	Biais (mm)
Stras-Entz (150m)	170.7	234.1	63.4
Kogenheim (162m)	203.7	218.7	15.0
Colmar-Mey (207m)	156.6	316.0	159.4
Bâle-Mulhouse (263m)	206.8	219.8	13.0
Vieux-moulin (404m)	420.8	421.5	0.7
Geishouse (660m)	395.2	632.6	237.4
Xonrupt-Long (785m)	841.2	840.1	-1.1

Annexe 2 : Tableau représentant le cumul total des Pj tombées du 1er décembre 2017 au 28 février 2018 ainsi que les biais, pour les 3 stations situées à l'abri des vents dominants, en comparaison avec MAR06/07. Pour MAR06, les biais sont plus importants que pour MAR07. Pour la station de Colmar-Meyenheim, les précipitations sont à chaque fois surestimées, c'est à cet endroit que l'effet de foehn est le plus fort.

	OBS (mm)	MAR06 [+2%] (mm)	Biais (mm)	MAR07 [+3%] (mm)	Biais (mm)
Stras-Entz (150m)	170.7	161.5	-9.2	177.2	6.5
Colmar-Mey (207m)	156.6	170.5	13.9	186.3	29.7
Geishouse (660m)	395.2	355.4	-39.8	382.1	-13.1

Annexe 3 : Tableau des cumuls des précipitations observées des quatre années étudiées + cumul total de ces quatre années, pour 14 stations.

Station	Coordonnées stations (lon, lat)		Distance O-E à crête	Pan2017 - OBS (mm)	Pan2018 - OBS (mm)	Pan2020 - OBS (mm)	Pan2021(01-04) - OBS (mm)	CumP_2017-2021
La_Bresse_772m	48.0076	6.9415	-3	1715.6	1614	1796.9	670.4	5796.9
XL-lac_745m	48.0685	6.9485	-5.3	1872.3	1761.4	1910.1	720.9	6264.7
CHU_1220m	48.0516	7.0083	-0.6	1874.6	1785.9	1882	684.3	6226.8
Markstein_1184m	47.9230	7.0316	0	1292.6	1349.5	1495	487.8	4624.9
Lac-blanc_1073m	48.1358	7.1038	1	1510.8	1493.5	1571.6	559.4	5135.3
Mittlach_549m	48.0053	7.0293	3.3	1741.8	1898.8	1878.2	711.8	6230.6
Breitenbach_449m	48.0213	7.1036	7.5	1076.6	1384.4	1110.2	438.3	4009.5
Munster_408m	48.0471	7.1173	7.5	920.7	1319.3	906.6	380.2	3526.8
Kruth_512m	47.9441	6.955	2.5	1680.9	1584.5	1796.6	734.7	5796.7
Geishouse_618m	47.8753	7.0568	11	1027.5	924.3	1157	405.6	3514.4
Strasbourg-Entz_146m	48.55	7.63	29	604.7	586	507.6	200.8	1899.1
Colmar-Mey_208m	47.93	7.41	28	488.2	474.6	422.5	146.5	1531.8
Bale-Mulh_265m	47.61	7.51	34	609.1	616.7	557.4	206.1	1989.3
Colmar-Inra_202m	48.06	7.33	23	468.5	588.7	499	173.5	1729.7
								58276.5

Annexe 4 : Tableau des cumuls des précipitations simulées par MAR16 des quatre années étudiées + cumul total de ces quatre années.

Pan2017 - MAR16 (mm)	Pan2018 -MAR16 (mm)	Pan2020 -MAR16 (mm)	Pan2021(01-04) -MAR16 (mm)	CumP_2017-2021(04)-MAR16 (mm)
1546	1690	1650	579.3	5465.3
1889	1917	1963	661.2	6430.2
1838	1903	1923	662.1	6326.1
1131	1413	1270	441.3	4255.3
1490	1591	1522	534.4	5137.4
1552	1719	1710	583.6	5564.6
1091	1318	1210	436	4055
1091	1318	1210	436	4055
1277	1492	1390	498.3	4657.3
924.3	1206	1074	356.9	3561.2
535.6	680.6	524.4	133.4	1874
572.3	732.4	542.6	170	2017.3
642.5	748.9	578.6	151.6	2121.6
555.7	754.6	564.7	179.1	2054.1
				57574.432

Annexe 5 : Tableau des cumuls des précipitations simulées par MAR09 des quatre années étudiées + cumul total de ces quatre années.

Pan2017 - MAR9 (mm)	Pan2018 -MAR9 (mm)	Pan2020 -MAR9 (mm)	Pan2021(01-04) -MAR9 (mm)	CumP_2017-2021(04)-MAR9 (mm)
1509	1677	1607	569.1	5362.1
1841	1915	1908	649.4	6313.4
1793	1884	1878	649.8	6204.8
1104	1388	1238	434.1	4164.1
1458	1556	1488	522.9	5024.9
1522	1698	1664	570	5454
1068	1302	1174	426.2	3970.2
1068	1302	1174	426.2	3970.2
1245	1483	1365	480.3	4573.3
910.3	1184	1052	353	3499.3
525	651.2	522.2	130.4	1828.8
575.5	737.8	523.1	166.2	2002.6
638.9	728.6	580.6	147	2095.1
543.8	730	537.3	175	1986.1
				56448.888

Annexe 6 : Tableau des cumuls des précipitations simulées par MAR10 des quatre années étudiées + cumul total de ces quatre années.

Pan2017 - MAR10	Pan2018 -MAR10	Pan2020 -MAR10	Pan2021(01-04) -MAR10 (mm)	CumP_2017-2021(04)-MAR10 (mm)
1575	1705	1682	585.3	5547.3
1919	1958	1996	665.7	6538.7
1866	1939	1969	666.6	6440.6
1156	1423	1298	441.5	4318.5
1499	1623	1571	544.6	5237.6
1580	1733	1746	588.2	5647.2
1111	1341	1238	438.5	4128.5
1111	1341	1238	438.5	4128.5
1292	1536	1398	509.5	4735.5
946.6	1212	1093	361.4	3613
547.6	701.2	533.4	135.8	1918
583.4	744.1	543.4	171.6	2042.5
680.9	754.7	608.5	153.8	2197.9
574.4	751.4	565.3	176.4	2067.5
				58561.281

Annexe 7 : Tableau des cumuls des précipitations simulées par MAR11 des quatre années étudiées + cumul total de ces quatre années.

Pan2017 - MAR11	Pan2018 -MAR11	Pan2020 -MAR11	Pan2021(01-04) -MAR11 (n	CumP_2017-2021(04)-MAR11 (n
1627	1749	1758	603.6	5737.6
1999	2021	2086	686.2	6792.2
1937	1993	2056	686.8	6672.8
1180	1462	1356	461	4459
1565	1652	1631	569.9	5417.9
1633	1770	1831	607.7	5841.7
1136	1342	1278	450	4206
1136	1342	1278	450	4206
1312	1589	1476	518.4	4895.4
985.7	1263	1147	375.9	3771.6
576.3	722.8	566.4	141.7	2007.2
613.3	772.3	551.7	178.5	2115.8
707.5	777.8	648.5	160.4	2294.2
578.9	773.2	573	185.7	2110.8
				60528.234

Annexe 8 : Tableau des cumuls des précipitations simulées par MAR12 des quatre années étudiées + cumul total de ces quatre années.

Pan2017 - MAR12 (mm)	Pan2018 -MAR12 (m	Pan2020 -MAR12 (mm)	Pan2021(01-04) -MAR12 (mm)	CumP_2017-2021(04)-MAR12 (f
1688	1809	1814	621.3	5932.3
2076	2073	2155	708.2	7012.2
2024	2058	2112	710.6	6904.6
1246	1531	1401	474.5	4652.5
1660	1757	1691	589.2	5697.2
1701	1841	1879	623.1	6044.1
1198	1411	1324	461.2	4394.2
1198	1411	1324	461.2	4394.2
1412	1622	1508	529.3	5071.3
1022	1325	1186	387.6	3920.6
584.5	748	601.7	146.4	2080.6
645.9	803.3	579.5	185.7	2214.4
726.6	801	638.4	164.8	2330.8
600.3	818.3	611.2	193.3	2223.1
				62872.127

Annexe 9 : Tableau des cumuls des précipitations simulées par MAR13 des quatre années étudiées + cumul total de ces quatre années.

Pan2017 - MAR13 (mm)	Pan2018 -MAR13 (mm)	Pan2020 -MAR13 (mm)	Pan2021(01-04) -MAR13 (mm)	CumP_2017-2021(04)-MAR
1386	1568	1503	534.7	4991.7
1683	1790	1774	608	5855
1640	1772	1744	606.3	5762.3
1020	1280	1151	409.1	3860.1
1324	1460	1369	488.4	4641.4
1391	1592	1556	538.8	5077.8
993	1215	1085	400.5	3693.5
993	1215	1085	400.5	3693.5
1156	1423	1298	442.4	4319.4
842.6	1102	959.1	330.9	3234.6
501.7	631.2	484.3	118.7	1735.9
513.2	654.1	462.5	153.5	1783.3
607.1	664.2	523.7	135.5	1930.5
505.3	672.6	479.8	160.1	1817.8
				52396.827

Annexe 10 : Tableau des cumuls des précipitations simulées par MAR14 des quatre années étudiées + cumul total de ces quatre années.

Pan2017 - MAR14 (mm)	Pan2018 -MAR14 (mm)	Pan2020 -MAR14 (mm)	Pan2021(01-04) -MAR14 (mm)	CumP_2017-2021(04)-MAR
1451	1622	1571	549.8	5193.8
1765	1824	1847	628.9	6064.9
1711	1802	1817	628.9	5958.9
1059	1339	1217	418.7	4033.7
1394	1502	1432	508.5	4836.5
1455	1640	1630	551.9	5276.9
1024	1240	1144	411.2	3819.2
1024	1240	1144	411.2	3819.2
1180	1462	1336	450.9	4428.9
873.9	1140	1011	342.3	3367.2
501.9	666.3	505.8	125.4	1799.4
548.5	670.2	495.7	159.7	1874.1
617.6	694.7	549.6	140.6	2002.5
525.3	699.7	527.4	167.5	1919.9
				54395.104

Annexe 11 : Tableau des cumuls des précipitations simulées par MAR15 des quatre années étudiées + cumul total de ces quatre années.

Pan2017 - MAR15 (mm)	Pan2018 -MAR15 (mm)	Pan2020 -MAR15 (mm)	Pan2021(01-04) -MAR15 (m	CumP_2017-2021(04)-MAR15 (mm)
1284	1463	1377	504.8	4628.8
1555	1680	1616	577.2	5428.2
1518	1659	1601	579.3	5357.3
957	1198	1055	374.3	3584.3
1236	1365	1235	462.8	4298.8
1296	1485	1428	506.7	4715.7
934	1135	1012	379.8	3460.8
934	1135	1012	379.8	3460.8
1022	1325	1186	407.5	3940.5
791	1022	894.5	303.8	3011.3
459	581.4	453.1	108.9	1602.4
487.6	618.5	417.4	140.2	1663.7
560.6	624.8	474.2	125.7	1785.3
484.5	627.1	458	149.1	1718.7
				48656.623