

# ÉTUDE DE L'ÉVOLUTION DE L'ENNEIGEMENT DANS LES HAUTES FAGNES (BELGIQUE) AU COURS DES CINQUANTE DERNIÈRES ANNÉES À L'AIDE DU MODÈLE CLIMATIQUE RÉGIONAL MAR

WYARD C.<sup>(1)</sup>, FETTWEIS X.<sup>(1)</sup>, ERPICUM M.<sup>(1)</sup>

(1) Laboratoire de Climatologie et de Topoclimatologie, Université de Liège, Quartier Village 4, Clos Mercator 3, 4000 Liège, Belgique [Coraline.Wyard@ulg.ac.be]

**Résumé** – Le « Modèle Atmosphérique Régional » MAR est un modèle régional du climat initialement développé pour étudier les calottes polaires. Dans le cadre de cette recherche, le modèle MAR a été adapté à la Belgique dans le but d'étudier l'évolution de l'enneigement dans les Hautes Fagnes (est de la Belgique), une région couverte de neige de un à deux mois par an en moyenne. En guise de validation, nous avons comparé, avec succès, les hauteurs de neige journalières simulées par le modèle MAR avec des observations de hauteurs de neige en 2008-2013 basées sur des images de snowcam et sur des mesures effectuées par un capteur laser. Nous avons ensuite forcé le modèle MAR avec les ERA-Interim à partir de 1958 pour étudier l'évolution de l'enneigement au cours des cinquante dernières années au sommet de la Belgique. Les résultats ne montrent aucune tendance significative malgré le réchauffement global.

**Mots-clés** : Europe, Belgique, Hautes Fagnes, enneigement, modélisation, MAR.

**Abstract** – Snow cover evolution during the last fifty years in the Hautes Fagnes (Belgium) using the regional climate MAR model. The “Modèle Atmosphérique Régionale” MAR is a regional climate model originally developed to study the polar ice sheets. In this study, the MAR model has been adapted to Belgium in order to study the snow cover evolution of the Hautes Fagnes (east of Belgium), a region covered by snow on average one to two months per year. As validation, we have successfully compared MAR based daily snow heights with snowcam-based and/or laser sensor-based observations over the period 2008-2013. Then, the model has been forced by ERA-Interim since 1958 to study the snow cover evolution during the last fifty years at the summit of Belgium. The results show no significant trend despite global warming.

**Keywords** : Europe, Belgium, Hautes Fagnes, snow cover, modelling, MAR.

## Introduction

La région des Hautes Fagnes est située à l'est de la Belgique au sommet du massif ardennais entre 600 et 700 m d'altitude. Les Hautes Fagnes constituent le premier obstacle que rencontrent les masses d'air venant de l'ouest de sorte qu'elles bénéficient d'un microclimat caractérisé par d'abondantes précipitations (en moyenne 1400 mm/an) et des hivers anormalement rigoureux compte tenu de la faible altitude de cette région. Ces caractéristiques climatiques permettent à cette région d'abriter un écosystème remarquable (landes et tourbières), et de connaître un enneigement de un à deux mois par an en moyenne malgré une forte variabilité interannuelle (Vlassis, 1989 ; Erpicum *et al.*, 1991). Par ailleurs, la fonte subite de ce manteau neigeux associée à des épisodes de pluie est souvent responsable d'inondations que subit le pays en hiver. Cette étude vise ainsi à déterminer si des tendances affectent l'enneigement des Hautes Fagnes au cours des cinquante dernières années.

Comme l'observation continue de l'épaisseur du manteau neigeux est très récente dans les Hautes Fagnes (elle n'a débuté qu'en 2001 avec l'installation d'un capteur laser par l'Institut Royal Météorologique (IRM) à la station scientifique du Mont Rigi, complétée par l'installation d'une snowcam en 2009), nous avons utilisé le modèle régional du climat MAR (pour « Modèle Atmosphérique Régional ») pour reconstituer l'évolution de l'enneigement à partir des années 1960. Les modèles régionaux sont en effet reconnus pour leur habilité à représenter des phénomènes climatiques à haute résolution spatiale et temporelle sur des espaces limités.

Après une brève description du modèle MAR et des simulations réalisées avec ce modèle dans la Section 1, la Section 2 expose d'une part la validation du MAR sur la période 2008-2013, et d'autre part, l'analyse des tendances de l'enneigement au cours de la période 1958-2013 basée sur les sorties du MAR, dans les Hautes Fagnes et en Belgique. La dernière section expose finalement les conclusions et perspectives de cette étude.

## 1. Données

### 1.1. Le modèle MAR

Le modèle MAR est un modèle régional du climat initialement développé pour les régions polaires afin d'étudier le bilan de masse en surface des calottes glaciaires. Il est actuellement développé au Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement de Grenoble et au Laboratoire de Climatologie et de Topoclimatologie de l'Université de Liège où il a récemment été adapté à la Belgique. Le modèle MAR est couplé au schéma de transfert entre la surface et l'atmosphère SISVAT (Soil Ice Snow Vegetation Atmosphere Transfer) (Gallée et Schayes, 1994). La partie neige-glace de SISVAT est le modèle de neige CROCUS (Brun *et al.*, 1992) du Centre d'Etude de la Neige. Le couplage MAR-SISVAT permet la prise en compte dans les simulations des interactions entre l'atmosphère et la couverture du sol comme la végétation et l'accumulation de neige.

Dans le cadre de cette recherche, le MAR a été utilisé à 5 km de résolution et forcé avec les réanalyses ERA-Interim (1958-2013) de l'ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts). La couverture et le type de végétation de la Belgique sont prescrits dans le MAR à partir de la base de données CORINE (Coordination de l'information sur l'environnement).

### 1.2. Observations

Afin de valider le MAR sur le territoire belge, nous avons utilisé des observations extraites des codes SYNOP émis par vingt stations synoptiques réparties sur l'ensemble de la zone d'étude (Figure 1). Nous disposons ainsi d'observations horaires entre 2008 et 2013 que nous avons transformées en moyennes journalières. Nous avons utilisé des observations de moyennes journalières de température à 2m du sol, de pression réelle de surface ainsi que des cumuls journaliers de précipitations.

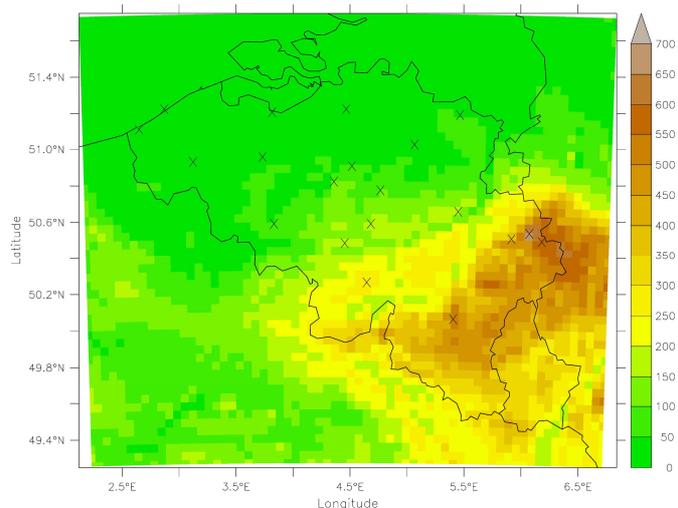
Pour la validation du MAR sur les Hautes Fagnes, nous avons eu recours aux épaisseurs de neige mesurées par un capteur laser et une snowcam installés à la station du Mont Rigi. Nous avons alors comparé les valeurs d'épaisseur de neige mesurées grâce à ces deux méthodes pour finalement conclure qu'elles étaient similaires et donc comparables.

## 2. Résultats

### 2.1. Validation sur le période 2008-2013

#### 2.1.1. Température, pression de surface et précipitations en Belgique

Pour chacune des vingt stations du réseau d'observations belge (montrées sur la Figure 1), nous avons calculé le coefficient de détermination, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le biais moyen entre les moyennes journalières de température, de pression de surface et les



**Figure 1.** Topographie de la Belgique (m) utilisée par le MAR à 5km de résolution et localisation (croix noires) des stations d'observations.

cumuls de précipitations observées et simulées par le modèle MAR entre 2008 et 2013. Nous avons en outre calculé l'écart-type des observations journalières. Le Tableau 1 reprend ces statistiques moyennées sur l'ensemble des stations.

Les coefficients de détermination supérieurs à 0.7 et les écarts quadratiques moyens (RMSE) inférieurs aux écart-types des moyennes journalières de température et de pression de surface indiquent que le MAR parvient à reproduire correctement la variabilité climatique journalière sur le territoire belge. Cependant, le coefficient de détermination entre les cumuls journaliers de précipitations observés et simulés est médiocre malgré un écart quadratique moyen (RMSE) inférieur à l'écart-type et un biais moyen de quelques pourcents de sorte que l'on en conclut que des améliorations dans le MAR doivent encore être réalisées afin d'améliorer la simulation des précipitations.

**Tableau 1.** Coefficients de détermination( $R^2$ ), écarts quadratiques moyens (RMSE), et biais moyens entre les variables observées et simulées (moyennes journalières de température, de pression de surface et cumuls journaliers de précipitations) et écart-type des variables observées, en 20 stations du réseau d'observations belge, puis moyennés sur l'ensemble du réseau pour la période 2008-2013.

	2008-2013	$R^2$	RMSE	Biais moyens	$\sigma$	Validation
<b>Température moyenne journalière (°C)</b>		0.98	1.34	0.32	6.50	<b>V</b>
<b>Pression de surface moyenne journalière (hPa)</b>		0.98	2.05	1.06	9.27	<b>V</b>
<b>Cumuls journaliers de précipitations (mm/jour)</b>		0.31	3.96 (84.6%)	-0.11 (-4.8 %)	4.68	<b>X</b>

### 2.1.2. Enneigement dans les Hautes Fagnes

Afin de s'assurer que le MAR était capable de simuler les variations journalières de la hauteur de neige dans les Hautes Fagnes, nous avons utilisé les mesures réalisées au Mont Rigi par le capteur laser entre 2008 et 2013. Contrairement aux observations de hauteur de neige basées sur les images de la snowcam du Mont Rigi, le capteur laser offre l'avantage de mesurer la hauteur de neige de façon automatisée et continue, même de nuit, ce qui permet une comparaison avec les hauteurs de neige modélisées par le MAR calculées à 00h TU.

Le Tableau 2 montre les coefficients de détermination, les écarts quadratiques moyens (RMSE) et les biais moyens entre les épaisseurs de neige journalières observées et simulées pour chaque hiver de la période de validation ainsi que pour l'ensemble de la période de validation 2008-2013. Nous entendons par « hiver » la période s'étendant de début novembre à fin mars car c'est durant cette période que l'enneigement du sol dans les Hautes Fagnes peut persister plus d'un jour. La hauteur moyenne du manteau neigeux observée ainsi que l'écart-type sont aussi rapportés dans le Tableau 2.

**Tableau 2.** Coefficients de détermination( $R^2$ ), écarts quadratiques moyens (RMSE), et biais moyens entre les épaisseurs de neige observées et simulées, et écart-type des épaisseurs de neige observées, pour chaque hiver (de début novembre à fin mars) de la période 2008-2013.

Épaisseur de neige (cm/jour)	$R^2$	RMSE	Biais moyens	Épaisseur de neige moyenne	$\sigma$
<b>2008-2009</b>	0.37	10.75	-6.72	8.93	10.20
<b>2009-2010</b>	0.79	10.50	-5.14	10.85	15.70
<b>2010-2011</b>	0.96	5.80	-2.00	13.34	22.13
<b>2011-2012</b>	0.86	1.96	-0.10	1.72	5.22
<b>2012-2013</b>	0.67	6.27	-2.80	7.52	9.85
<b>2008-2013</b>	0.73	7.06	-3.35	8.47	12.62

Avec un biais moyen et un écart quadratique moyen nettement inférieurs à la variabilité journalière mesurée ici par l'écart-type, on peut conclure à l'habilité du MAR à simuler la variation journalière de l'épaisseur du manteau neigeux dans les Hautes Fagnes. Néanmoins, comme pour les précipitations, le coefficient de détermination n'est pas satisfaisant certains hivers (problèmes d'instrumentation ou d'enneigements éphémères à vérifier).

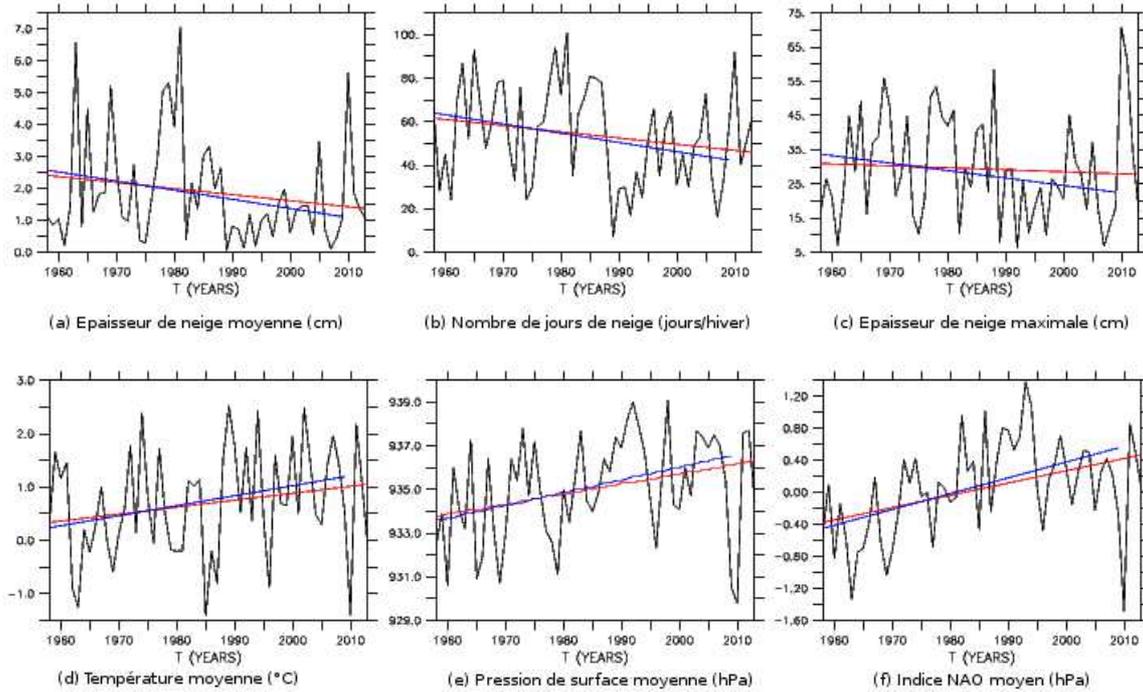
## **2.2. Tendances de l'enneigement au cours de la période 1958-2013**

Afin d'étudier l'évolution de l'enneigement dans les Hautes Fagnes, nous avons calculé les tendances sur tous les hivers des périodes 1958-2009 et 1958-2013, de l'épaisseur moyenne du manteau neigeux, du nombre de jours de neige au sol par hiver (de novembre à mars), de l'épaisseur de neige maximale, de la température moyenne, de la pression de surface moyenne (Figure 2(a)-(e)). Nous considérons qu'un jour est un jour de neige au sol lorsque l'épaisseur du manteau neigeux à minuit est égale ou supérieure à 1 cm. Nous avons par ailleurs calculé les tendances de l'indice NAO (« North Atlantic Oscillation ») en hiver sur les deux mêmes périodes (Figure 2(f)). L'indice NAO mesure la différence de pression entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande et donne ainsi une indication des types de circulation atmosphérique influençant le temps en Europe (Bardossy & Caspary, 1990 ; Cassou, 2008 ; Kuttel *et al.*, 2010). Nous avons ensuite déterminé si ces tendances étaient significatives en calculant la marge d'incertitude pour l'intervalle de confiance à 95 % de Snedecor (Tableau 3).

Les tendances de l'enneigement et de la température moyenne de l'hiver pour la période 1958-2013 ne sont pas significatives (Tableau 3) alors que la tendance de la température moyenne annuelle pour la même période est significative ( $\sim +0.02$  °C/an,  $\sim +1$  °C/56ans). Par contre, les tendances calculées pour la période 1958-2009 (ne considérant pas les récents hivers très froids et très neigeux comme celui de 2010-2011) sont significatives pour le nombre de jour de neige par hiver (diminution) et la température moyenne en hiver (augmentation) (Tableau 3 et Figure 2). Nos résultats montrent ainsi la nécessité d'utiliser des séries temporelles les plus longues possibles dans le calcul des tendances car suivant la période choisie, les tendances sont significatives ou non.

Les tendances de la pression de surface moyenne en hiver et de l'indice NAO en hiver sont significatives quelle que soit la période de temps considérée (Tableau 3) et montrent une tendance à une augmentation de la pression de surface et à des valeurs d'indice NAO de plus en plus positives (Figure 2) en accord avec la littérature (Bardossy & Caspary, 1990 ; Kuttel *et al.*, 2010). Des valeurs de NAO de plus en plus positives en hiver correspondent à un renforcement de la circulation zonale avec pour impacts des températures plus douces et des hivers plus pluvieux en Belgique. Cependant, nos résultats ne confirment pas ce renforcement de la circulation zonale en hiver étant donné que la tendance à une diminution de l'enneigement est non-significative de même que celle à une augmentation des températures hivernales. Nous suspectons de ce fait l'existence de changements récents dans la circulation atmosphérique hivernale en Europe qui auraient amorti la diminution de l'enneigement.

Une analyse de la tendance de l'enneigement étendue à l'ensemble du pays montre les mêmes résultats qu'au Mont Rigi c'est-à-dire des tendances non-significatives pour la période 1958-2013 à une diminution de l'enneigement et à une augmentation de température. Seule la tendance à une augmentation de la pression de surface moyenne en hiver est significative.



**Figure 2.** Tendances au Mont Rigi pour chaque hiver (de début novembre à fin mars) des périodes 1958-2009 (en bleu) et 1958-2013 (en rouge) de (a) l'épaisseur moyenne du manteau neigeux (cm), (b) nombre de jours de neige au sol (jours/hiver), (c) épaisseur maximale du manteau neigeux (cm), (d) température moyenne (°C), (e) pression de surface moyenne (hPa) et (f) valeur moyenne de l'indice NAO (hPa).

**Tableau 3.** Tendances, marges d'incertitude et significativité au Mont Rigi pour les hivers des périodes 1958-2009 (en bleu) et 1958-2013 (en rouge) de l'épaisseur de neige moyenne, du nombre de jours de neige, épaisseur de neige maximale, température moyenne, pression de surface moyenne et indice NAO moyen. La significativité est testée au niveau de 95 % selon le test de Snedecor.

	Tendance	Marge d'incertitude	Significativité
Épaisseur de neige moyenne (cm)	-0.019	0.027	X
	-0.029	0.030	X
Nombre de jours de neige (jours/hiver)	-0.29	0.36	X
	-0.42	0.40	V
Épaisseur de neige maximale (cm)	-0.058	0.25	X
	-0.22	0.25	X
Température moyenne (°C)	0.013	0.016	X
	0.019	0.017	V
Pression de surface moyenne (hPa)	0.046	0.037	V
	0.058	0.038	V
Indice NAO moyen (hPa)	0.015	0.009	V
	0.020	0.009	V

### Conclusions et perspectives

Les résultats montrent une tendance à une diminution de l'enneigement en Belgique et à une augmentation des températures en hiver. Cependant, ces tendances sont non-significatives sur la période 1958-2013 alors qu'elles sont significatives sur la période 1958-2009 et que l'augmentation de la température moyenne annuelle est significative sur la période 1958-2013.

Nos résultats illustrent ainsi l'importance de considérer des séries temporelles les plus longues possibles dans l'étude des tendances. Par ailleurs, les résultats montrent des tendances significatives à une augmentation de la pression de surface en hiver et à des valeurs de l'indice NAO de plus en plus positives. Nous suspectons ainsi l'existence de changements récents dans la circulation atmosphérique hivernale en Europe qui auraient amorti une diminution de l'enneigement en Belgique résultant du réchauffement global.

Plusieurs pistes existent pour affiner notre analyse :

1) Améliorer la modélisation par le MAR des totaux journaliers de précipitations dans le but de déterminer si des tendances plus robustes existent dans les changements de précipitations liquides et neigeuses.

2) Calculer les tendances sur des périodes de temps plus longues en forçant le modèle MAR avec les réanalyses ERA-20C à partir de 1900.

3) Déterminer les éventuels changements survenus dans la circulation hivernale en Europe en analysant l'évolution de cette circulation de 1958 jusqu'à nos jours à l'aide d'une classification des types de circulation atmosphérique.

4) Forcer un modèle hydrologique des bassins versants des rivières de Haute Belgique avec les sorties du MAR dans le but de déterminer si des tendances existent dans la récurrence des inondations en Belgique dues à la fonte rapide du manteau neigeux conjuguée à des événements pluvieux.

5) Réaliser des projections futures à l'aide du modèle MAR afin de déterminer quels changements pourraient affecter le climat belge et l'enneigement des Hautes Fagnes sachant que des études menées sur d'autres massifs montagneux en Europe tels que le Massif de la Forêt Noire (Schönbein & Schneider, 2003 ; Sauter *et al.*, 2010) ou encore les Alpes (Beniston, 2012) projettent une diminution voire même une disparition de l'enneigement aux altitudes moyennes au cours du XXI<sup>e</sup> siècle.

## Références bibliographiques

- Beniston M., 2012 : Is snow in the Alps receding or disappearing?. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, **3**(4), 349-358.
- Bardossy A., Caspary H. J., 1990 : Detection of climate change in Europe by analyzing European atmospheric circulation patterns from 1881 to 1989. *Theoretical and Applied Climatology*, **42**(3), 155-167.
- Brun E., David P., Sudul M., Brunot G., 1992 : A numerical model to simulate snowcover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, **38**, 13-22.
- Cassou C., 2008 : Intraseasonal interaction between the Madden-Julian oscillation and the North Atlantic oscillation. *Nature*, **455**(7212), 523-527.
- Ercpicum M., Mabilille G., Vlassis P., 1991 : Variabilité spatiale et temporelle de l'enneigement du sol en Belgique. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **4**, 267-273.
- Gallée H., Schayes G., 1994 : Development of a three-dimensional meso- $\gamma$  primitive equations model. *Monthly Weather Review*, **122**, 671-685.
- Küttel M., Luterbacher J., Wanner H., 2011 : Multidecadal changes in winter circulation-climate relationship in Europe: frequency variations, within-type modifications, and long-term trends. *Climate Dynamics*, **36**(5-6), 957-972.
- Sauter T., Weizenkamp B., Schneider C., 2010 : Spatio-temporal prediction of snow cover in the Black Forest mountain range using remote sensing and a recurrent neural network. *International Journal of Climatology*, **30**(15), 2330-2341.
- Schönbein J., Schneider C., 2003 : Snow cover variability in the Black Forest region as an example of a German low mountain range under the influence of climate change. In *EGS-AGU-EUG Joint Assembly*, **1**, 5993.
- Vlassis P., 1989 : *Contribution à l'étude de la neige en Belgique*. Inédit. 191p.

