

MODÉLISATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE INCIDENT EN PRÉSENCE DE BROUILLARD OU DE STRATUS BAS : ÉVALUATION ET COMPARAISON DES PERFORMANCES DES MODÈLES CLIMATIQUES RÉGIONAUX WRF-ARW ET MAR

BEAUMET J. ⁽¹⁾, DOUTRELOUP S. ⁽¹⁾, FETTWEIS X. ⁽¹⁾ & ERPICUM M. ⁽¹⁾

(1) Université de Liège, Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie. Bâtiment B11, 3, Clos Mercator, 4000 Liège, Belgique [julien.beaumet@ulg.ac.be ; S.Doutreloup@ulg.ac.be ; Xavier.Fettweis@ulg.ac.be ; Michel.Erpicum@ulg.ac.be]

Résumé – La modélisation du rayonnement solaire par temps de brouillard à l'aide de modèles climatiques régionaux représente un défi important en raison de la complexité et de la diversité des processus à prendre en compte. La comparaison entre la modélisation du rayonnement solaire global avec le modèle WRF-ARW et les observations montre une légère sous-estimation probablement en raison d'une mauvaise modélisation de la turbulence dans les basses couches de l'atmosphère entraînant la surestimation de l'épaisseur des brouillards et stratus bas. La même comparaison avec les simulations réalisées avec le modèle MAR montre une légère surestimation et un accord (R^2) relativement meilleur avec les observations.

Mots-clés : Rayonnement solaire global, modèle climatique régional, brouillard, WRF-ARW, MAR, Belgique.

Abstract – *Modelling of incoming solar irradiance during fog and low stratus occurrence: evaluation and comparison of WRF-ARW and MAR regional climate model performances.* The modelling of fogs and low stratus using regional climate models is extremely challenging regarding the number and the complexity of processes that need to be taken into account. The comparison between modelled global solar irradiance using WRF-ARW and observations shows an underestimation likely due to poor modelling of turbulence in lower atmosphere causing an overestimation of low stratus thickness. The same experiment using MAR model simulations shows an overestimation of irradiances and a slightly better agreement (R^2) with observations.

Keywords: Solar irradiance, regional climate model, fogs, low stratus, WRF-ARW, MAR model, Belgium.

Introduction

La modélisation des brouillards et des nuages bas de type stratus présente un défi important pour les modèles numériques du climat. Des erreurs dans la modélisation de ces nuages peuvent engendrer des erreurs très importantes dans la modélisation du rayonnement solaire incident au niveau du sol et de ce fait compromettre l'évaluation de l'énergie solaire disponible et la fiabilité des différentes applications qui en découlent. La modélisation des brouillards et stratus bas est ardue du fait de la complexité et de la diversité des phénomènes engendrant la formation et la dissipation de ces nuages. Une mauvaise modélisation des flux radiatifs visibles ou infrarouges, des propriétés des surfaces et de la végétation (Davin *et al.*, 2012), de la turbulence dans les basses couches de l'atmosphère ainsi qu'une mauvaise prise en compte des effets du relief sont des erreurs fréquentes dans les modèles climatiques régionaux qui peuvent mener à une mauvaise modélisation de la formation/dissipation des stratus bas ainsi que de leur épaisseur optique. Pour évaluer la capacité de ces modèles à modéliser ce type de nébulosité, une comparaison entre le rayonnement solaire incident modélisé et celui mesuré *in-situ* lors de l'apparition de ce type de nuages peut s'avérer très intéressante. Ce résumé étendu se focalise sur les performances de la modélisation du rayonnement solaire global des deux modèles climatiques régionaux : le Modèle Atmosphérique Régional (MAR) et le Weather Research & Forecasting model (WRF-ARW) au cours d'une période de 20 jours de novembre 2013 durant lesquels brouillards et stratus bas furent très fréquents en Belgique.

1. Méthodologie : modèles atmosphériques régionaux

1.1. Modèle atmosphérique régional WRF-ARW

Le modèle atmosphérique régional WRF-ARW est open-source et très largement utilisé dans la communauté des modélisateurs du climat (Skamarock *et al.*, 2008). Ce modèle est utilisé ici dans sa version non-hydrostatique avec une résolution horizontale de 5 kilomètres et

une résolution temporelle de 15 minutes. Le domaine utilisé ici est centré sur la Belgique et est imbriqué au sein d'un plus grand domaine de 15 kilomètres de résolution. Lors des différentes modélisations réalisées pour cette étude, le modèle régional WRF a été forcé toute les 3 heures par les données archivées du modèle global de prévision Global Forecast System (GFS). Trois simulations différentes ont été réalisées en utilisant différentes combinaisons parmi les schémas standards disponibles pour la représentation de la microphysique des nuages, de la couche atmosphérique de surface, de la surface et de la convection (Skamarock *et al.*, 2008).

1.2. Modèle atmosphérique régional MAR

Le Modèle Atmosphérique Régional (MAR) a été jusqu'ici essentiellement employé dans la recherche sur les régions polaires (Gallée et Schayes., 1994), notamment pour l'étude des bilans de masse en surface des calottes glaciaires (Fettweis *et al.*, 2013). Récemment, une version du modèle MAR adaptée à la prévision de la température, du vent et du rayonnement solaire en Belgique a été développée au sein du Laboratoire de Climatologie de l'Université de Liège. Le modèle MAR étant, à l'heure actuelle, toujours uniquement hydrostatique, la résolution horizontale utilisée dans nos simulations est de 10 kilomètres. La résolution temporelle est également de 15 minutes. Le MAR est ici également forcé aux frontières par le modèle global GFS tel que pratiqué au Laboratoire de Climatologie (ULg) pour réaliser des prévisions météorologiques. Dans les différentes modélisations réalisées dans cette analyse, des corrections ont été apportées au niveau de l'humidité advectée aux frontières du modèle ainsi que via quelques modifications dans le schéma radiatif : les différentes simulations présentées ici (MAR sim1, sim2, sim3, sim4) correspondent respectivement à des augmentations de +0%, +10%, +20% et +30% du contenu en eau des nuages (eau liquide et glace) dans le schéma radiatif du MAR.

1.3. Observations in-situ

Les stations d'observation de Daussoulx et du Sart-Tilman sont situées en Moyenne Belgique (Figure 1). Ce sont des stations de plateau situées à quelques kilomètres de la vallée de la Meuse respectivement à 195 et 210 mètres d'altitude. La station de Daussoulx (50.52°N ; 4.88°E) est équipée d'un pyranomètre 2AP (tracker), le rayonnement solaire y est mesuré toutes les 30 secondes. La station du Sart-Tilman (50.56°N ; 5.56°E) est équipée d'un pyranomètre Kipp & Zonen CM 121 et l'enregistrement du rayonnement solaire y est effectué toutes les 15 secondes. Le rayonnement solaire est ensuite moyenné aux deux stations au pas de temps de 15 minutes.

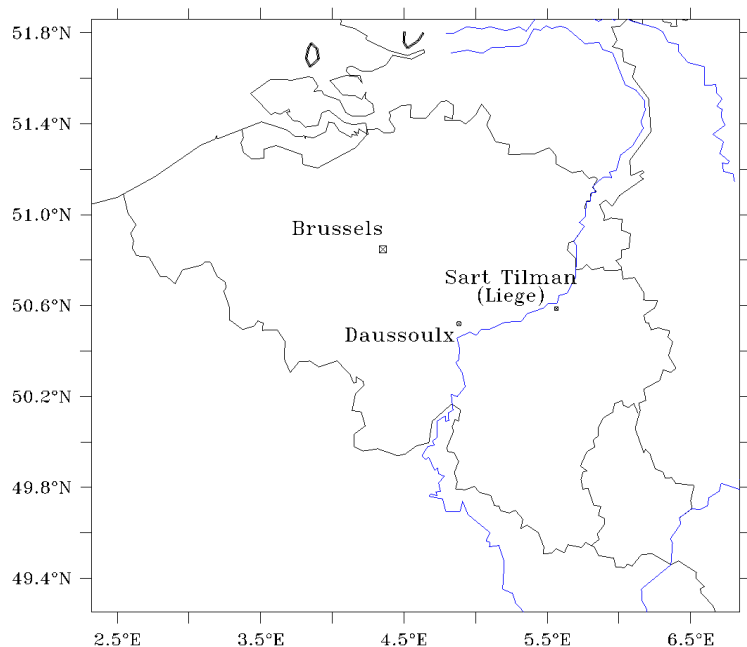


Figure 1. Localisation des stations de mesure de rayonnement solaire.

2. Résultats

2.1. Épisode de brouillards et nuages bas persistants en novembre 2013

2.1.1. Contexte météorologique

Le mois de novembre 2013 a été caractérisé par un très faible ensoleillement en Belgique et seulement 28,9 heures d'ensoleillement ont été enregistrées à l'Institut Royal de Météorologie à Uccle (normale : 66,3 h). Si la première décade fut largement dominée par un flux dépressionnaire d'ouest, les deuxième et troisième décades furent dominées par un temps anticyclonique accompagné de masses d'air d'origine maritime, ce qui favorisa la formation et la persistance de brouillards et stratus bas. Cette période anticyclonique fut néanmoins interrompue par le passage de dépressions comme celle du 14 novembre et celles du 18 au 22 novembre avec le passage d'une dépression se déplaçant de la Mer du Nord vers le Golfe de Gênes engendrant un flux de nord à nord-est et une advection d'air maritime polaire.

2.1.2. Modélisation du rayonnement solaire : résultats

Le rayonnement solaire incident modélisé par le MAR et par WRF-ARW est comparé avec les mesures *in-situ* des stations de Sart-Tilman et de Daussoulx au pas de temps de 15 minutes sur la période du 11 au 30 novembre 2013. Pour chaque simulation et pour chaque station, l'erreur quadratique moyenne normalisée (nRMSE), le biais normalisé (nBIAIS) et le coefficient de détermination (R^2) ont été calculés et sont présentés dans le Tableau 1. Pour les deux modèles, les statistiques de la moyenne des simulations ont également été calculées. Dans ce tableau, on peut constater des résultats meilleurs pour le MAR par rapport à WRF, en particulier pour le coefficient de détermination. On remarque en revanche que le MAR surestime le rayonnement solaire global, tandis que WRF-ARW le sous-estime. Enfin, il est intéressant de mettre en évidence l'intérêt de réaliser plusieurs simulations et puis de s'intéresser à la moyenne de celles-ci lorsque l'on modélise le rayonnement solaire global à un pas de temps aussi petit que 15 minutes. En effet, la moyenne des différentes simulations possède en général de meilleures statistiques en termes de RMSE et de R^2 que chacune des simulations à partir desquelles elle a été calculée.

Tableau 1. Erreur quadratique moyenne normalisée (nRMSE), biais normalisé (nBIAIS) et coefficient de détermination (R^2) pour la modélisation du rayonnement solaire global incident au pas de temps de 15 minutes au cours de la période 11-30 novembre 2013, pour différentes simulations réalisées à l'aide des modèles MAR et WRF-ARW pour les stations de Liège Sart-Tilman (ST) et de Daussoulx (DAU).

Simulations	nRMSE(%)		nBIAIS(%)		R^2	
	ST	DAU	ST	DAU	ST	DAU
WRF Sim1	19	21,6	1,8	-0,4	0,41	0,37
WRF Sim2	16	18,7	-5,2	-5,2	0,42	0,4
WRF Sim3	15,9	16	-7,5	-7,4	0,43	0,57
Moyenne WRF	14,8	15,9	-3,6	-4,4	0,47	0,52
MAR Sim1	16	18,6	7,6	7,4	0,53	0,47
MAR Sim2	15,7	16,6	6,8	4,9	0,58	0,54
MAR Sim3	15,4	16,4	6	4,1	0,58	0,54
MAR Sim4	15,1	16,2	5,1	3,3	0,57	0,54
Moyenne MAR	14,5	15,5	6,4	4,9	0,61	0,57

3. Discussion

Un focus sur la période du 22 au 24 novembre 2013 permet de mettre en évidence les différents artefacts présents dans les deux modèles et de discuter des surestimations ou sous-estimations dans la modélisation du rayonnement solaire en présence de brouillards et stratus bas. En présence de ces nuages, WRF-ARW tend à sous-estimer le rayonnement solaire incident. Au cours de la période étudiée, cela est clairement observable pour les 12, 13, 18, 19, 22, 24, 28 et 29 novembre. Sur la Figure 2, on peut observer plus en détail la sous-estimation du rayonnement solaire global pour les 22 et 24 novembre 2013. Cet artefact de sous-estimation du rayonnement solaire global, qui signifie une surestimation de l'épaisseur du brouillard ou des stratus bas par le modèle WRF-ARW par temps de brouillard a déjà été décrit dans la littérature (Román-Cascón *et al.*, 2012). Ces auteurs attribuent cette surestimation de l'épaisseur du brouillard et des nuages bas à un excès de turbulence dans les basses couches de l'atmosphère (Román-Cascón *et al.*, 2014). Cet artefact peut entraîner une forte surestimation de l'épaisseur de la couche de brouillard, et donc de son épaisseur optique, avec pour les cas les plus extrêmes, une modélisation d'un rayonnement solaire global quasi nul comme pour le 22 novembre 2013 à Liège (Figure 2).

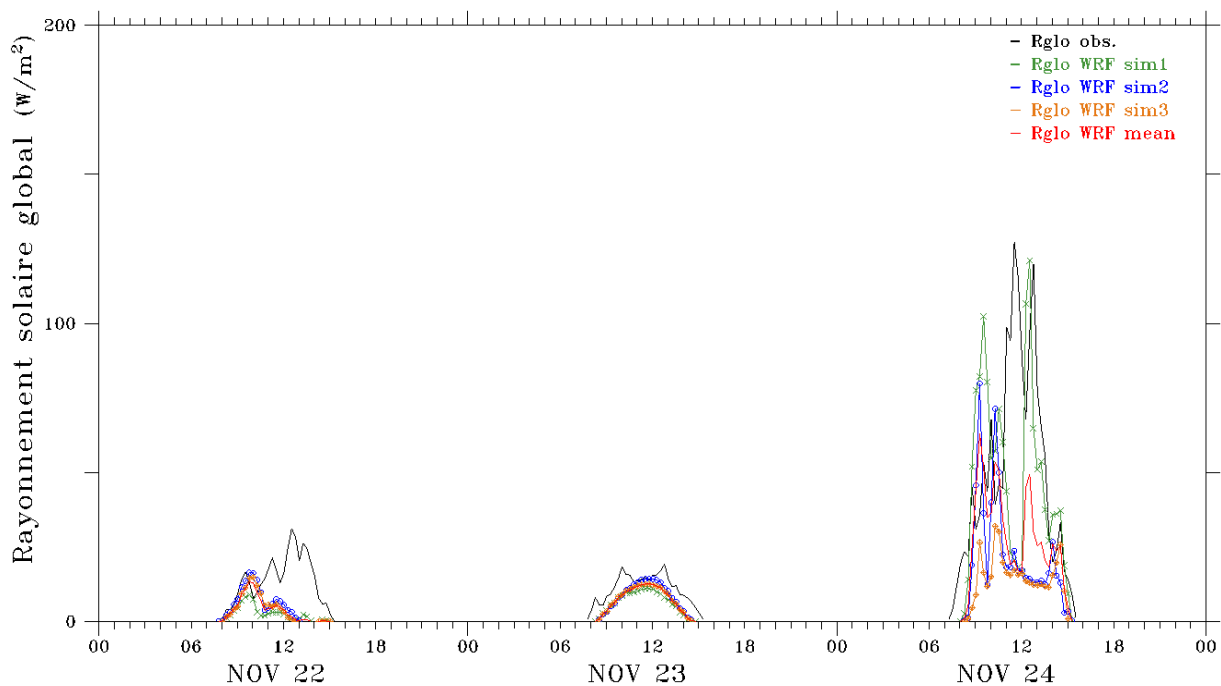


Figure 2. Rayonnement solaire global incident à la station du Sart-Tilman du 22 au 24 novembre 2013. Les traits fins avec symboles représentent les différentes simulations WRF, le trait rouge épais représente la moyenne des simulations et le trait épais noir, les observations.

À l'inverse, et en dépit de l'augmentation de l'humidité advectée aux bords du domaine dans les différentes simulations, le modèle MAR tend à surestimer le rayonnement solaire incident pour la période étudiée (Figure 3). Cette constatation permet de remettre en question le fait d'augmenter au-delà d'une certaine limite l'humidité advectée aux frontières du domaine, étant donné qu'une partie importante de celle-ci est certainement éliminée sous forme de précipitations. Une meilleure représentation de la nébulosité par le MAR, en particulier dans les basses couches de l'atmosphère, devrait donc plutôt se faire via des modifications de la modélisation des processus de surface, de la microphysique des nuages, ou encore via une augmentation de la résolution verticale du modèle. En effet, pour des journées comme les 22 et 23 novembre, on peut constater que malgré le fait que le MAR modélise la présence de stratus bas, il y a un excès de rayonnement solaire global par rapport

à ce qui est observé, ce qui implique donc que l'épaisseur optique de ces nuages est sous-estimée. La cause de cette sous-estimation de l'épaisseur optique pourrait être soit une sous-estimation de l'épaisseur de la couche de stratus bas, soit une sous-estimation de son contenu en eau, soit encore une paramétrisation du modèle trop favorable à la formation de nuages de glace qui possèdent une absorption moindre dans le spectre visible. L'identification de cette cause nécessiterait encore de comparer les profils verticaux d'humidité relative dans le MAR, les contenus en eau sous forme liquide et sous forme de glace et les épaisseurs optiques des nuages modélisés avec des observations *in-situ* (ex : sondages aérologiques) ou avec des observations satellitaires de ces mêmes variables pour Liège ou un autre point du domaine. Il est malheureusement peu aisé d'obtenir de telles données.

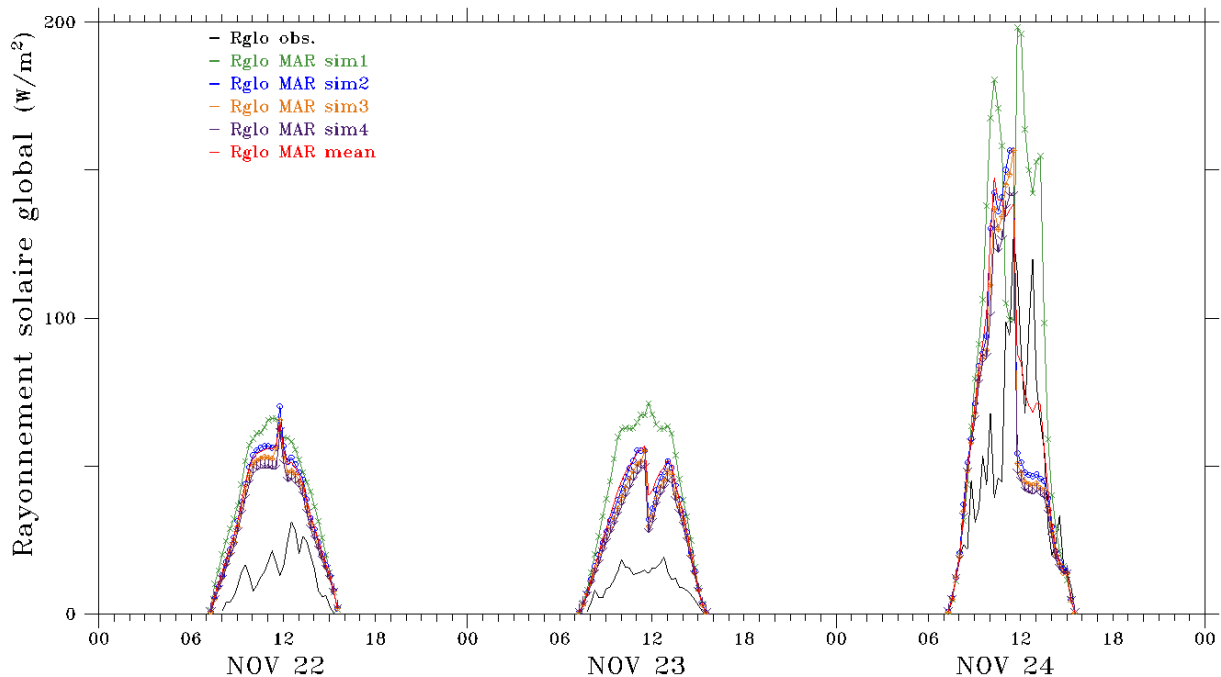


Figure 3. Rayonnement solaire global incident à la station du Sart-Tilman du 22 au 24 novembre 2013. Les traits fins avec symboles représentent les différentes simulations MAR, le trait rouge épais représente la moyenne des simulations et le trait épais noir, les observations.

Conclusion et perspectives

Cette étude a permis de mettre en évidence la complexité de la modélisation du rayonnement solaire global en présence de stratus bas ou de brouillard. À l'aide de deux modèles climatiques régionaux différents, nous avons constaté que les artefacts peuvent être d'origines très différentes et engendrer des biais opposés. Pour WRF-ARW, il s'agit d'une sous-estimation du rayonnement solaire vraisemblablement en raison d'une trop forte turbulence engendrant une trop forte épaisseur des stratus bas et une trop lente dissipation de ces derniers. Pour MAR, une surestimation du rayonnement solaire incident en présence de nuages bas a été constatée. Celle-ci vient d'une sous-estimation de l'épaisseur optique des nuages dont la cause précise reste à déterminer, ce qui nécessiterait l'acquisition de données *in-situ* rares et de bonne qualité ainsi que des recherches plus importantes. Ce travail démontre également la nécessité d'effectuer plusieurs modélisations avec le même modèle (malgré le coût en termes de temps de calcul), en utilisant des schémas physiques ou des paramétrisations différentes, et d'étudier la moyenne ou la médiane de ces simulations afin de réduire l'incertitude sur la modélisation. La poursuite de ces recherches devrait intégrer à la comparaison des résultats des modèles MAR et WRF-ARW, les résultats du modèle allemand COSMO-DE pour le même épisode de novembre 2013. Le test de nouvelles paramétrisations

pour le modèle MAR et l'étude d'autres épisodes de brouillard et de stratus bas devront également être mis en œuvre.

Références bibliographiques

Davin E.L., Seneviratne S.I., 2012 : Role of land surface processes and diffuse/direct radiation partitioning in simulating the European climate. *Biogeosciences*, **9**, 1695-1707, doi:10.5194/bg-9-1695-2012.

Fettweis X., Franco B., Tedesco M., van Angelen J.H., Lenaerts J.T.M., van den Broeke M.R., Gallée H., 2013 : Estimating the Greenland ice sheet surface mass balance contribution to future sea level rise using the regional atmospheric climate model MAR. *The Cryosphere*, **7**, 469-489.

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.

Román-Cascón C., Yagüe C., Sastre M., Maqueda G., Salamanca F., Viana, S., 2012 : Observations and WRF simulations of fog events at the Spanish Northern Plateau. *Adv. Sci. Res.*, **8**, 11-18, doi:10.5194/asr-8-11-2012.

Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D. M., Duda M. G., Powers J. G., 2008 : A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Technical note-475+ STR, 113 p.

Autres communications scientifiques

Román-Cascón C., Steeneveld G-J., Yagüe C., Sastre M., Maqueda G., 2014 : Radiation fog : WRF and LES experiments. Communication orale à la conférence annuelle EMS-ECAC 2014, 6-10 octobre 2014, Prague, République Tchèque.