



Soutenance de thèse CNRM :

Evaluation et amélioration des prévisions météorologiques de rayonnement solaire pour la production d'énergie solaire

Par Marie-Adèle Magnaldo (GMME/PHY-NH)

Lundi 11 décembre 2023 à 14h*

Salle Joël Noilhan (bâtiment Navier)

Météopôle, 42 avenue G. Coriolis, 31057 Toulouse Cedex 01

Lien BJ : <https://bluejeans.com/568029304/7652>

Membres du jury :

Hélène Chepfer, Rapporteur

Cyril Morcrette, Rapporteur

Martial Haeffelin, Rapporteur

Najda Villefranque, Examinatrice

Yves-Marie Saint-Drenan, Examineur

Jean-Pierre Chaboureau, Examineur

Quentin Libois, Directeur de thèse

Christine Lac, Co-Directrice de thèse

Sébastien Riette, Invité

* sous réserve de l'autorisation de soutenance

Résumé

Dans le contexte actuel de changement climatique et de transition énergétique, la part d'énergie solaire dans la production électrique augmente significativement. Prévoir la production d'énergie solaire constitue à la fois un enjeu pour faciliter son intégration dans le réseau électrique et assurer sa stabilité, et un défi du fait de sa grande variabilité spatio-temporelle et de sa forte dépendance aux conditions météorologiques. Dans ce contexte, les prévisions de rayonnement solaire à la surface (SWD) que peuvent fournir les modèles de prévision numérique du temps (PNT) jouent un rôle central.

Cependant, les performances des modèles de PNT en termes de rayonnement solaire n'ont été que rarement évaluées, et très rarement sur de grands domaines et de longues périodes. Pourtant, quantifier les performances des modèles de PNT est d'autant plus important qu'elles demeurent limitées. De plus, évaluer de manière détaillée les différentes sources d'erreurs des prévisions de SWD, qui sont multiples et complexes, est essentiel en vue d'améliorer les modèles. Ce travail de thèse répond à ces enjeux en deux temps. Tout d'abord en développant une méthodologie d'évaluation des performances des modèles de PNT à résolution kilométrique pour le SWD, qui est appliquée au modèle opérationnel de Météo-France AROME, pour le SWD, sur tout le domaine de la France métropolitaine ainsi que sur un site hautement instrumenté, pour l'année 2020. Ensuite en proposant des pistes d'amélioration du modèle AROME.

Plus précisément, les prévisions horaires d'AROME sur la France métropolitaine sont évaluées à partir de mesures *in situ* de SWD provenant du réseau de 168 pyranomètres de Météo-France. Des produits nuageux dérivés d'observations de satellites géostationnaires permettent par ailleurs de classifier les situations nuageuses à haute fréquence et sur tout le territoire. L'analyse de ces observations montre que les situations contribuant le plus aux erreurs de SWD correspondent aux ciels nuageux dans le modèle et dans les observations. Ces situations sont très fréquentes et associées à un biais annuel positif marqué. Les situations de nuages manqués et de nuages prévus à tort sont relativement rares, donc peu impactantes, tandis que le biais en ciel clair bien prévu est faible. Le biais positif en conditions nuageuses semble être principalement lié à des erreurs d'épaisseur optique. Des erreurs de fraction nuageuse ne sont pas à exclure, mais sont difficiles à évaluer. Pour les ciels couverts dans le modèle, les nuages hauts sont associés à un biais positif de SWD tandis que les nuages de couche limite sont associés à un biais négatif.

Une analyse détaillée sur le site du SIRTÀ, où sont également disponibles des observations de fraction nuageuse et de contenu en eau liquide, permet d'aller plus loin. Il apparaît que le biais négatif de SWD associé aux nuages de couche limite n'est pas seulement dû à une surestimation de la fraction nuageuse modélisée par AROME, mais aussi à une surestimation du contenu intégré en eau liquide (LWP). Le biais positif de SWD pour les nuages hauts et géométriquement épais est quant à lui relié à un LWP trop faible, possiblement dû à une sous-estimation du contenu total en eau nuageuse ou de l'eau liquide surfondue.

Partant de ces constats, de nouvelles simulations AROME ont été produites sur deux mois, incluant des modifications des schémas radiatif et microphysique. Des améliorations des prévisions de SWD apparaissent lorsque le contenu en neige est pris en compte dans le schéma radiatif. Par ailleurs, diminuer la concentration de gouttelettes améliore le SWD pour les nuages bas. Enfin, le SWD présente une forte sensibilité au facteur d'hétérogénéité sous-maille des nuages. Il conviendra d'approfondir ces différentes pistes lors de futurs travaux, dans l'objectif d'obtenir une version d'AROME optimisée pour la prévision de production d'énergie solaire.

Abstract

In the current context of global change and energy transition, the share of solar energy in electricity production is increasing significantly. Forecasting solar energy production is both an issue in terms of facilitating its integration into the electric grid and ensuring its stability, and a challenge because of its high spatio-temporal variability and its strong dependence on meteorological conditions. In this context, forecasts of surface shortwave downward radiation (SWD) produced by numerical weather prediction (NWP) models are an essential element.

However, the performance of NWP models in terms of solar radiation has rarely been evaluated, and very rarely over large areas and long periods. Quantifying the performance of NWP models is all the more important given that they remain limited. Furthermore, a detailed assessment of the various sources of error in SWD forecasts, which are multiple and complex, enables progress to be made in improving the models. This thesis responds to these challenges in two stages. Firstly by developing a methodology for evaluating the performance of high resolution NWP models for SWD, which is applied to Météo-France's operational SWD model AROME, over the whole of mainland France and at a highly instrumented site, for the year 2020. Secondly, by suggesting possible improvements to the AROME model.

More specifically, the AROME hourly forecasts for mainland France are initially based on SWD measurements from the network of 168 pyranometers operated by Météo-France. Cloud products derived from geostationary satellite observations have also been used to classify high-frequency cloud situations across country. Analysis of these observations show that the situations contributing most to the SWD errors correspond to cloudy skies in the model and in the observations. These situations are very frequent situations and characterised by a significant positive annual bias. Missed cloudy situations and erroneously predicted clouds are relatively rare, so have a smaller impact, while the bias for well-predicted clear sky conditions is small. The positive bias in cloudy conditions seems to be mainly due to errors in the cloud optical thickness. Cloud fraction errors cannot be excluded, but are difficult to assess. In overcast conditions in the model, high clouds are associated with a positive SWD bias while low clouds are associated with a negative bias.

A detailed analysis on the highly instrumented SIRTAs site, where observations of cloud fraction and liquid water path (LWP) are also available, provides further details. It appears that the negative bias of SWD for boundary layer clouds is not only due to an overestimation of the modelled cloud fraction, but also to an overestimation of the LWP. The positive bias of SWD for high and geometrically thick clouds is associated with an underestimation of the LWP, possibly due to an underestimation of the total cloud water content or of the supercooled liquid water.

Based on these findings, new AROME simulations were produced over two months, including modifications to the radiative and microphysical schemes. Improvements in SWD forecasts appear when the snow content is included in the radiative scheme. In addition, reducing droplet concentration improves the SWD for low clouds. Finally, SWD is very sensitive to the subgrid cloud heterogeneity factor. These various issues should be explored in future work with the aim of obtaining a version of AROME optimised for forecasting solar energy production.