

MICROPHYSIQUE DES NUAGES ET RAYONNEMENT SOLAIRE : COMPARAISON DES MESURES *IN SITU* AU MONT RIGI EN HAUTE BELGIQUE ET DES DONNÉES *CLOUD PHYSICAL PROPERTIES* (CPP) OBTENUES À PARTIR DES IMAGES METEOSAT-9

BEAUMET J. ⁽¹⁾, CLERBAUX N. ⁽²⁾, CORNET Y. ⁽³⁾, FETTWEIS X. ⁽¹⁾, ERPICUM M. ⁽¹⁾

(1) Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie, Université de Liège, 2 allée du 6 Août (B11), 4000 Liège, Belgique [julien.beaumont@ulg.ac.be ; michel.erpicum@ulg.ac.be ; xavier.fettweis@ulg.ac.be]

(2) Remote Sensing from Space, Royal Meteorologic Institute of Belgium, 3 avenue Circulaire, 1180 Bruxelles, Belgique [nicolas.clerbaux@meteo.be]

(3) Télédétection et photogrammétrie, Unité de Géomatique, Université de Liège, 17 allée du 6 Août (B5), 4000 Liège, Belgique [ycornet@ulg.ac.be]

Résumé – Le rayonnement solaire global mesuré au mont Rigi a été comparé à l'épaisseur optique des nuages (COT) estimée à l'aide des données SEVIRI. Une relation logarithmique avec un coefficient de détermination d'environ 0,5 a été trouvée. Ce résultat plutôt faible peut en grande partie s'expliquer par un nombre limité de cas où subsistent des erreurs de positionnement ou par des interactions plus complexes entre nébulosité et rayonnement. De plus, l'incertitude sur l'estimation de l'épaisseur optique des nuages à l'aide des données SEVIRI pour les nuages optiquement plus épais n'est pas négligeable.

Mots-clés : instrument SEVIRI, données CPP, télédétection, rayonnement solaire, nébulosité, Belgique.

Abstract – *Clouds microphysical and solar irradiance: comparison of in-situ measurement at Mont Rigi and Cloud Physical Properties (CPP) data obtained from METOSAT-9 images.* Global solar irradiance measured at Mont Rigi station was compared to cloud optical thickness (COT) estimated from SEVIRI data. A logarithmic relationship with a coefficient of determination of ≈ 0.5 was found. These results are mainly explained by a limited number of case where location errors remain or by more complex interaction between solar irradiance and cloudiness. Moreover, uncertainties on cloud optical thickness retrieval for optically thicker clouds with SEVIRI data should not be neglected.

Keywords: SEVIRI instrument, CPP data, remote sensing, solar irradiance, cloudiness, Belgium.

Introduction

L'utilisation grandissante de l'énergie solaire en Europe rend le suivi du rayonnement solaire incident au niveau du sol de plus en plus nécessaire. Dans le cadre d'un suivi en temps réel ou de prévisions à très court terme (quelques heures), l'apport des satellites météorologiques géostationnaires tels que METEOSAT est considérable. La fréquence d'acquisition des images (quinze minutes), les surfaces couvertes et la quantité d'information qui peut être dérivée des différents canaux de l'instrument SEVIRI embarqué à bord des satellites METEOSAT Seconde Génération (MSG) en font un outil incontournable. Le but de cette étude est de mettre en évidence les relations entre le rayonnement solaire incident au niveau du sol et les propriétés microphysiques et optiques des nuages estimées par imagerie satellitaire. L'intérêt de cette étude est de mettre en évidence la validité de la relation entre propriété optique des nuages et rayonnement incident au niveau du sol, tout en permettant une validation originale de la qualité des estimations des propriétés des nuages à partir des données MSG. Une fois validées, ces données pourraient également servir à la validation de la modélisation des nuages à l'aide de modèles numériques. Pour y parvenir, les données de la microphysique des nuages fournies par l'algorithme Cloud Physical Properties (CPP) et les mesures de rayonnement solaire global incident au niveau du sol effectuées à la station météorologique du Mont Rigi en Haute Belgique ont été utilisées.

1. Données

1.1. Données satellitaires

Le radiomètre SEVIRI installé à bord des satellites METEOSAT Seconde Génération effectue un scan complet d'environ 40 % de la surface terrestre toutes les quinze minutes. La

résolution de l'instrument à l'équateur est de 3 km. L'instrument enregistre le signal électromagnétique dans douze canaux. L'information issue de ces différents canaux permet l'estimation de nombreuses variables météorologiques, parmi lesquelles les propriétés physiques et optiques des nuages. L'algorithme Cloud Physical Properties, mis au point à l'Institut météorologique néerlandais (KNMI) dans le cadre des activités EUMETSAT, se base sur une méthode bi-spectrale utilisant les radiances mesurées dans un canal visible (0,6 μm) et dans un canal proche infrarouge (1,6 μm) et sur des tables calculées au préalable à partir d'un modèle de transfert radiatif, Doubling Adding KNMI RTM, pour estimer l'épaisseur optique des nuages ainsi que la taille moyenne des particules (rayon effectif) nuageuses (Roebeling *et al.*, 2008). L'obtention de ces deux quantités permet ensuite d'estimer le contenu en eau condensée (Cloud Water Path, en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) du nuage. L'utilisation des radiances d'autres canaux, notamment l'infrarouge thermique (10,8 μm) permet l'estimation d'autres paramètres tels que la phase, la température du sommet du nuage... Les données CPP pour les années 2010 et 2011 ont été obtenues en exécutant la version 2.3 de l'algorithme et en utilisant les données METEOSAT-9 archivées à l'Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM-KMI). Les données CPP ont été générées pour une zone couvrant une large partie de l'Europe de l'Ouest à partir des données SEVIRI issues du huitième segment. Le satellite METEOSAT se trouvant dans le plan de l'équateur, la résolution des images pour des latitudes telles que celle de la Belgique est d'environ 5 km.

1.2. Données in situ de la station du Mont Rigi, en Haute-Belgique

La station météorologique du Mont-Rigi (50°30'40''N ; 6°04'40''E) se situe à 674 m d'altitude, dans une zone où l'affectation du sol est dominée par des forêts et tourbières. La station météorologique de l'Institut Royal de Météorologie (IRM) et de l'Université de Liège est insérée au sein d'une station scientifique cogérée avec le Département Nature et Forêt de la Région Wallonne. De nombreuses variables météorologiques y sont mesurées et enregistrées toutes les dix minutes. Pour cette étude, nous avons essentiellement utilisé les mesures de rayonnement solaire global incident acquises par un pyranomètre CNR1 de marque Kipp & Zonen.

2. Méthode

2.1. Extraction des données CPP

Différents traitements ont été nécessaires avant d'extraire les données CPP afin de limiter au maximum les décalages temporels et spatiaux entre les données satellitaires et les données *in situ*. Parmi les possibles sources de décalage figure la parallaxe. Le satellite METEOSAT se situant dans le plan de l'équateur, la position apparente des nuages les plus élevés peut être déviée jusqu'à 20 km vers le nord par rapport à la position réelle du nuage. La parallaxe dans la direction est-ouest est généralement négligeable étant donné que METEOSAT-9 se trouve dans un plan méridien proche de celui de la Belgique. Une correction de la distorsion géométrique engendrée par la parallaxe a donc été appliquée. Celle-ci se base sur une estimation de la hauteur du nuage (H) à partir de la température de son sommet (CTT) obtenue à partir des radiances dans l'infrarouge thermique (10,8 μm) :

$$H = (CTT - T_{\text{moy}}) / 5.5$$

où T_{moy} est la température moyenne mensuelle et 5.5, le gradient adiabatique saturé en $^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Cette méthode se base donc sur une hypothèse d'un profil atmosphérique standard. Une fois la hauteur du nuage estimée, la position réelle du nuage peut être estimée, la position du satellite METEOSAT-9 étant connue (Beaumont, 2012). Après correction de la parallaxe, une interpolation bilinéaire fonction de la distance sur les quatre pixels METEOSAT les plus

proches de la station a été opérée afin de lisser les valeurs extrêmes avant d'extraire les valeurs de propriétés physiques et optiques des nuages utilisées dans la comparaison.

2.2. Données in situ et indice de rayonnement global relatif

Les données de la station météorologique du mont Rigi enregistrées toutes les 10 minutes ont été retravaillées pour obtenir un set de données au pas de temps de 15 minutes. La construction d'un indice de rayonnement solaire global relatif a nécessité le calcul du rayonnement global incident maximum attendu par ciel clair. Celui-ci a été calculé à l'aide du modèle numérique régional WRF-ARW (v3.3) à la résolution spatiale de 5 km et temporelle de 15 minutes. Les valeurs de rayonnement maximum attendu pour le pixel contenant la station du mont Rigi ont été extraites pour les années 2010 et 2011. Cet indice est ensuite obtenu par calcul du rapport, normalisé entre 0 et 100, entre le rayonnement solaire global mesuré et le rayonnement solaire global attendu modélisé par ciel clair. Cet indice se justifie afin d'étudier les interactions de la nébulosité avec le rayonnement solaire incident en s'affranchissant des variations de rayonnement fonction des cycles journalier et saisonnier.

3. Résultats

La mise en évidence des relations entre le rayonnement solaire *via* l'indice de rayonnement global relatif construit et les propriétés des nuages estimées par imagerie satellitaire s'est faite *via* la construction de diagrammes de dispersion. Différents résultats ont été considérés afin de rejeter les données de mauvaise qualité. Premièrement, Roebeling *et al.* (2008) et Beaumet *et al.* (2014) ont démontré que la qualité de l'estimation des propriétés des nuages avec la méthode CPP décroît rapidement lorsque l'angle solaire zénithal (Z) est supérieur à 60° en raison de l'incertitude des mesures de radiance avec l'instrument SEVIRI pour ce type de conditions. Toutes données acquises, lorsque ces conditions se présentaient ($Z > 60^\circ$), ont donc été rejetées de l'analyse. Ensuite, ces mêmes études ont montré que les estimations des propriétés des nuages avec l'instrument SEVIRI sont moins fiables pour les nuages optiquement plus épais. Roebeling *et al.* (2008) ont montré que l'instrument SEVIRI sature pour des nuages dont le contenu en eau (CWP) est supérieur à 700 g.m^{-2} . Pour ces raisons, ces nuages ont été rejetés de l'analyse ainsi que ceux présentant des épaisseurs optiques supérieures à 70 en raison de l'incertitude venant des erreurs de mesures radiométriques de l'instrument SEVIRI pour ces nuages, d'après Cattani *et al.* (2007). Les données satellitaires et *in situ* ont été moyennées sur une heure, et des diagrammes de dispersion ont été construits. Pour un modèle logarithmique ($SW_{\text{ind}} = -18,18 \ln(\text{COT}) + 79,119$), le coefficient de détermination (R^2) présente une valeur de 0,48 pour un échantillon de 816 points. Cette assez faible valeur de R^2 est cependant largement expliquée par un nombre limité de points s'écartant fortement du modèle. Les 10 % de points (82) présentant les résidus les plus importants par rapport à l'estimation de la variable SW_{ind} ont donc été retirés de l'échantillon. Cela a permis de construire un nouveau modèle (Fig. 1) avec un R^2 de 0,69. La figure 1 présente cette relation entre le COT des nuages de glace et SW_{ind} . Le même diagramme de dispersion a été construit pour mettre en évidence la relation entre le COT des nuages d'eau liquide et SW_{ind} . L'échantillon contient 1 629 points. Le modèle logarithmique obtenu ($SW_{\text{ind}} = -14,03 \ln(\text{COT}) + 78,939$) présente un coefficient de détermination de 0,47. À nouveau, un nombre limité de points expliquent cette faible valeur de R^2 . En excluant 10 % des points présentant les résidus les plus importants selon l'axe Y (163), on obtient alors un coefficient de détermination de 0,66 pour le nouveau modèle ($SW_{\text{ind}} = -16 \ln(\text{COT}) + 81,442$). Le diagramme de dispersion et le modèle pour les nuages d'eau liquide sont présentés dans la figure 2.

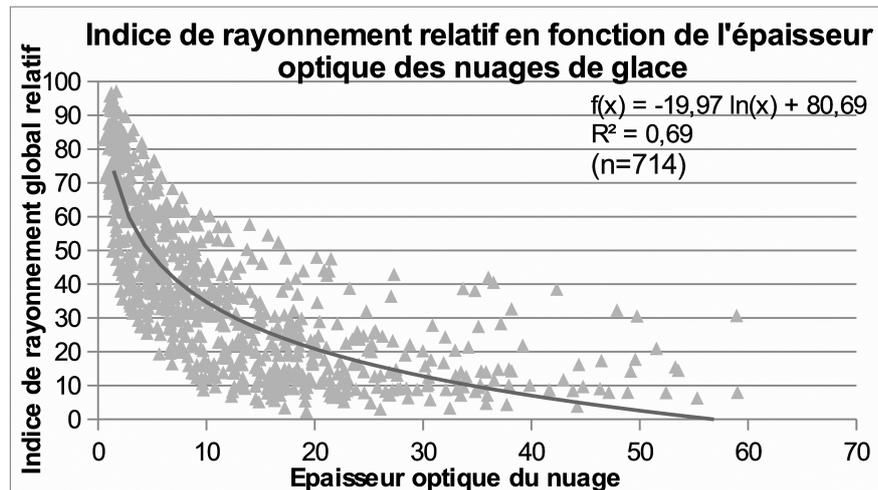


Figure 1 : Indice de rayonnement solaire global incident relatif en fonction de l'épaisseur optique des nuages de glace

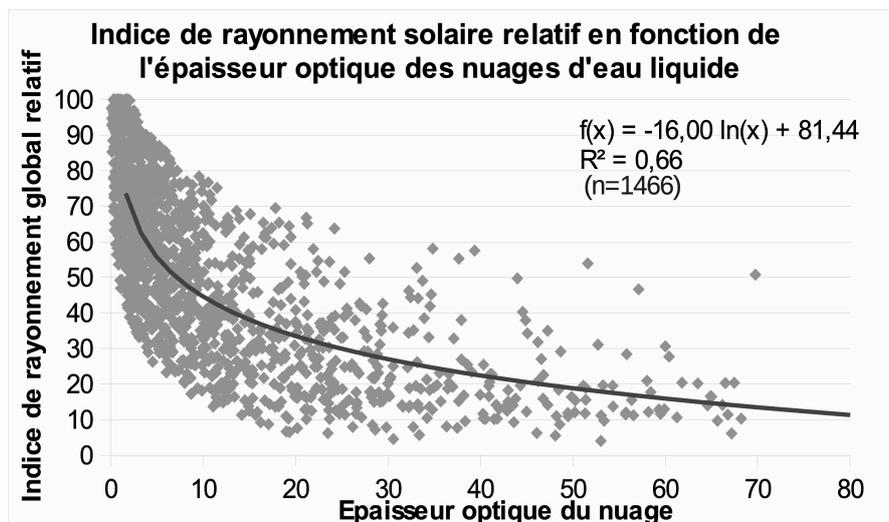


Figure 2 : Indice de rayonnement solaire global incident relatif en fonction de l'épaisseur optique des nuages d'eau liquide

4. Discussion

4.1. Erreurs de positionnement et problèmes de représentativité spatiale ou temporelle

Plusieurs phénomènes peuvent être sources d'erreurs sur le positionnement des nuages et donc altérer la corrélation entre les mesures *in situ* et les données issues de l'imagerie satellitaire, surtout au pas de temps de 15 minutes. Revenons tout d'abord sur l'hypothèse de profil atmosphérique constant selon l'altitude posée pour effectuer la correction de parallaxe. Les températures en altitude peuvent varier fréquemment de 10°C autour de cette moyenne mensuelle. Cela engendre une erreur altimétrique sur la hauteur du nuage de près de 2 km ; ce qui donne une erreur planimétrique d'environ 3,5 km ($2 \times \tan(60^\circ)$) étant donné l'angle de vue de 60° de METEOSAT aux latitudes de la Belgique. Dans le cas d'une importante advection d'air froid en période hivernale, l'écart à la moyenne dans les températures d'altitude peut atteindre 20°C, ce qui engendrerait une erreur planimétrique de près de 7 km. L'ordre de grandeur des erreurs pouvant subsister après correction de la parallaxe justifie l'application d'une interpolation bilinéaire sur quatre pixels avant d'exploiter les données CPP. Les effets de ces différences d'échelles temporelles sont atténués par le changement d'échelle et la

comparaison des moyennes horaires. En revanche, le fait de disposer d'une seule mesure ponctuelle de rayonnement engendre un problème de représentativité spatiale lorsque l'on compare ces données *in situ* aux données satellitaires à 5 km de résolution. Cela est d'autant plus problématique lorsque l'on considère une variable telle que le rayonnement qui présente une très forte variabilité spatiotemporelle.

4.2. Erreurs liées aux incertitudes sur les mesures et à la modélisation du rayonnement

L'essentiel des incertitudes liées à la précision des instruments vient des mesures satellitaires. Schmetz *et al.* (2002) ont reporté une erreur radiométrique de l'instrument SEVIRI égale à $5,3 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$. Cattani *et al.* (2007) ont montré, après propagation des erreurs, que cela correspond à une erreur d'environ 5 % sur l'estimation des réflectances. L'incertitude sur la mesure de la réflectance augmente pour les nuages optiquement plus épais. L'erreur sur le calcul de l'épaisseur optique est déjà d'environ 16 % pour les nuages ayant une épaisseur optique d'environ 30. L'effet de ces propagation d'erreurs sur l'estimation de l'épaisseur optique des nuages devient donc très contraignant pour les nuages ayant une épaisseur optique supérieure à 70, d'où l'exclusion de ces cas dans nos comparaisons. Au vu des sources d'erreurs énumérées, on peut considérer comme négligeables les erreurs liées aux incertitudes de mesures du pyranomètre utilisé. Néanmoins, des erreurs peuvent provenir de la modélisation du rayonnement et des variations interjournalières de la transmittance de l'atmosphère.

La figure 3 montre la distribution de l'indice de rayonnement solaire relatif en cas d'absence de nuages dans les données CPP. Hormis les quelques 46/616 cas où l'indice est inférieur à 70, ce qui correspond à une mauvaise détection des nuages par l'algorithme, on constate que l'indice de rayonnement relatif varie pour la plupart des cas entre 80 et 100. Dury *et al.* (2008) ont démontré que la transmittance de l'atmosphère au mont Rigi peut diminuer en journée en été.

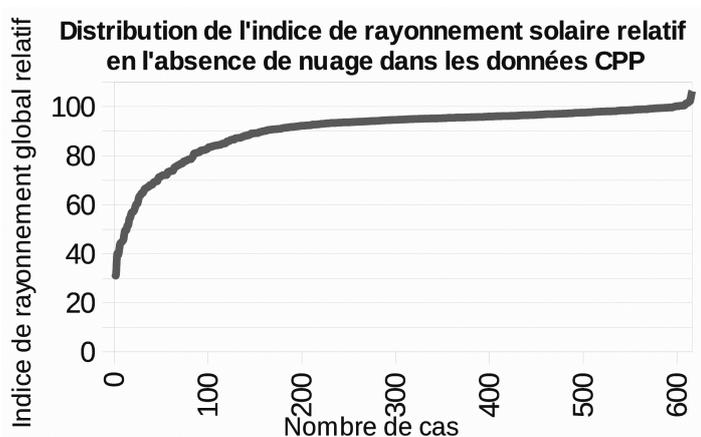


Figure 3 : Distribution de l'indice de rayonnement global relatif en cas d'absence de nuage (Clear Sky) dans les données CPP

En effet, l'évapotranspiration dans ces zones de tourbières peut devenir importante lors de la saison végétative. La transmittance de l'atmosphère peut donc diminuer significativement en raison du contenu important de l'atmosphère en vapeur d'eau dans les basses couches (Dury *et al.*, 2008). Au vu de la distribution de l'indice de rayonnement relatif calculé par ciel clair au mont Rigi, il est très probable que le rayonnement maximum attendu calculé à l'aide du modèle WRF soit quelque peu surestimé. Cela peut largement s'expliquer par un schéma de surface utilisé dans le modèle incapable de reproduire l'évapotranspiration importante dans cette zone avec une affectation du sol particulière. De plus, il est assez probable que le modèle sous-estime légèrement l'atténuation du rayonnement par les aérosols et autres polluants en Belgique.

4.3. Interactions complexes entre nébulosité et rayonnement

Dans le cas d'une nébulosité variable (ex : nuages convectifs), la corrélation entre le rayonnement solaire incident au niveau d'une station et l'épaisseur optique du nuage se trouvant à la verticale dans le pixel de 5 km correspondant peut fortement diminuer. En effet, le rayonnement incident au niveau d'une station est déterminé par l'état de la nébulosité dans un rayon plus large que celui de 5 km. Lorsque le COT des nuages présente une forte variabilité spatiale, ce phénomène pourrait avoir une importance considérable. Il serait donc probablement préférable d'utiliser le COT moyen des nuages se trouvant dans un rayon de trois ou quatre pixels autour de la station. Cependant, le problème peut rapidement se complexifier car il faudrait alors donner plus de poids aux nuages se situant dans la direction apparente du soleil.

Conclusion

Le modèle logarithmique construit pour estimer le rayonnement solaire incident à la station du mont Rigi à partir de l'épaisseur optique des nuages estimée à partir des données SEVIRI explique une part relativement limitée de la variance ($R^2 \approx 0,5$). Néanmoins, un nombre restreint de points explique ces résultats, et une part plus importante de la variance ($R^2 \approx 0,7$) peut être déterminée en retirant 10 % des points présentant les résidus les plus importants. Une caractérisation de l'écart-type du rayonnement solaire et de l'épaisseur optique des nuages pour ces 10 % de points les plus erratiques devrait cependant être entreprise afin de justifier ce choix. Les résultats peuvent en grande partie s'expliquer par des erreurs résiduelles sur le positionnement des nuages et par des problèmes de représentativité spatiale liés à l'utilisation d'une seule mesure ponctuelle de rayonnement ainsi que par l'imprécision sur l'estimation de l'épaisseur optique des nuages plus épais avec l'instrument SEVIRI. L'étude a, en outre, mis en évidence les différents problèmes de localisation qui peuvent survenir lorsque l'on utilise des données sur les nuages issues de satellites géostationnaires et propose des solutions qui permettent en partie de les résoudre. Enfin, la construction d'un modèle plus complexe prenant en compte l'épaisseur optique des nuages des pixels voisins de la station permettrait sans doute d'améliorer les résultats. La construction d'un tel modèle et la résolution des problèmes de positionnement résiduels se présentent donc comme la suite logique de ces recherches.

Références bibliographiques

- Beaumont J., 2012: *Validation over Belgium and potential application of a Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) retrieved rainfall data set over seven years with the Cloud Physical Properties (CPP) algorithm*. Mémoire présenté pour l'obtention d'une Maîtrise à l'Université de Liège, 91 p. <http://hdl.handle.net/2268/158787>
- Beaumont J., Clerbaux N., Fettweis X., Erpicum M., 2014: Rainfall retrieval using Spinning Enhanced Visible Imager (SEVIRI-MSG) and Cloud Physical Properties (CPP) algorithm: Validation over Belgium and applications. *Bull. Soc. Géog. de Liège*, **61** (accepté).
- Cattani E., Melani S., Levizzani V., Costa J.M., 2007: The retrieval of cloud top properties using VIS-IR channels. In *Measuring precipitation from space, EURAINSAT and the future*, Springer, 79-95.
- Dury M., Gignion S., Erpicum M., 2008 : Estimation de la transparence de l'atmosphère par ciel clair à la station scientifique des Hautes-Fagnes (SSHF), Mont Rigi, Belgique. Comparaison avec la station d'Uccle-Bruxelles (IRM). *Bull. Soc. Géog. de Liège*, **51**, 5-16.
- Roebeling R., Deneke H., Feijt A., 2008: Validation of Cloud Liquid Water Path Retrievals from SEVIRI using one year of CloudNet Observations. *Journal of applied Meteorology and Climatology*, **47**, 206-222.
- Schmetz J., Pili P., Tjemkes S., Just D., Kerkmann J., Rota S., Ratier R., 2002: An introduction to METEOSAT Second Generation (MSG). *Bulletin of American Society*, **83(7)**, 977-992.