

## RECONSTRUCTION DE L'ÉVOLUTION DU RAYONNEMENT SOLAIRE REÇU EN SURFACE EN EUROPE OCCIDENTALE SUR LA PÉRIODE 1900-2014 À L'AIDE DU MODÈLE ATMOSPHÉRIQUE RÉGIONAL MAR

WYARD C.<sup>1</sup>, BELLEFLAMME A.<sup>1</sup>, DOUTRELOUP S.<sup>1</sup>, ERPICUM M.<sup>1</sup>, FETTWEIS X.<sup>1</sup>

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

**Résumé** – De nombreuses études ont montré que le rayonnement solaire avait subi de grandes variations au cours de la deuxième moitié du 20<sup>e</sup> siècle en raison de la variation de la nébulosité et de la quantité d'aérosols dans l'atmosphère. Quant à son évolution antérieure, elle est très difficile à retracer étant donné la rareté des observations avant 1950. Des simulations couvrant les années 1900-2014 ont ainsi été réalisées sur la Belgique à l'aide du Modèle Atmosphérique Régional MAR à une résolution spatiale de 5 km afin de reconstruire l'évolution du rayonnement solaire. Le modèle a été forcé à ses frontières par quatre réanalyses : les ERA-interim (1979-2014) complétées par les ERA40 (1958-1978), les NCEP/NCAR-v1 (1948-2014), les ERA-20C (1900-2010) et les 20CRV2C (1900-2010). Cette étude montre que les réanalyses peuvent générer des tendances divergentes alors qu'elles assimilent des observations et sont supposées représenter exactement le même climat.

**Mots-Clés** : Belgique, rayonnement solaire, nuages, modèle climatique régional

**Abstract - Reconstruction of the 1900-2014 surface solar radiation evolution in Western Europe using the regional climate model MAR.** Many studies show that the surface solar radiation has undergone large variations over the second half of the 20th century as a result of variations in cloud cover and aerosol loading in the atmosphere. However, it is difficult to build strong conclusions before the 1950s because of the observations scarcity. The evolution of the surface solar radiation has been reconstructed over 1900-2014 using the regional model MAR (« Modèle Atmosphérique Régional ») in Belgium. Boundary conditions were provided by four reanalysis products : the ERA-interim (1979-2014) completed by the ERA40 (1958-1978), the NCEP/NCAR-v1 (1948-2014), the ERA-20C (1900-2010) and the 20CRV2C (1900-2010). Results show that the reanalyses can generate divergent trends while they assimilate observations and are supposed to represent the same climate.

**Keywords** : Belgium, solar radiation, clouds, regional climate model

### Introduction

Le rayonnement solaire reçu à la surface de la Terre (SSR) régit un grand nombre de processus qui permettent à la vie d'exister sur notre planète. Des variations de ce rayonnement peuvent avoir des impacts sur ces processus et affecter notre environnement (Wild, 2009). D'autre part, dans un monde de plus en plus demandeur de sources d'énergie non-émettrices de carbone, on a vu, au cours de cette dernière décennie, l'implantation d'un nombre croissant de centrales solaires et de panneaux photovoltaïques. Cependant, leur rendement dépend, entre autre, du rayonnement solaire perçu de sorte qu'il est crucial de connaître sa variation pour leur développement et leur gestion (Jerez *et al.*, 2015).

Des variations significatives de SSR ont été observées dans le passé. La période 1950-1980 a ainsi connu une diminution globale de SSR tandis qu'une récupération partielle a pu être observée par la suite en Europe et en Amérique du Nord (Wild, 2009 ; De Bock *et al.*, 2014). Ces variations ont été attribuées à des fluctuations de la nébulosité combinées à des variations de la quantité d'aérosols présents dans l'atmosphère. Les nuages bas et les nuages moyens ont en effet un pouvoir réfléchissant sur le rayonnement solaire tandis que les aérosols capturent et/ou réfléchissent le rayonnement solaire (effet direct). En outre, les aérosols peuvent modifier les propriétés des nuages (effet indirect) en changeant le nombre de noyaux de condensation ce qui affecte leur albédo et leur durée de vie. Étant donné la complexité de ces phénomènes et le manque d'observations robustes, il est ainsi très difficile de quantifier la part de chacun de ces facteurs dans la variation du SSR (Wild, 2009).

La période 1930-1950 aurait connu plus de SSR que la période qui l'a suivie en Europe (Wild, 2009). Cependant, la rareté des observations avant 1950 ne permet pas d'établir de conclusion robuste ni d'en établir les causes.

Ainsi, les modèles climatiques peuvent s'avérer être des outils utiles pour simuler les variations passées et futures du SSR de même que pour en quantifier les causes. Plus particulièrement, les modèles climatiques régionaux permettent d'effectuer des simulations à hautes résolutions spatiales sur des régions bien précises. Par exemple, de par leur haute résolution spatiale, ils permettent la modélisation de phénomènes complexes et spatialement restreints tels que la formation des nuages, leurs propriétés optiques et leurs interactions avec le rayonnement solaire.

Dans cette étude, nous étudierons les variations du SSR en Belgique au cours de la période 1900-2014 en utilisant le Modèle Atmosphérique Régional (MAR) forcé par diverses réanalyses. Nous nous focaliserons sur le rôle potentiel des nuages dans ces variations.

Après une brève description des simulations réalisées avec MAR, les résultats de la comparaison du MAR avec des observations seront exposés. Les tendances seront ensuite analysées et critiquées avant de conclure.

## 1. Simulations climatiques et données d'évaluation

Les simulations climatiques ont été réalisées en utilisant la version 3.7 du MAR. Par rapport à la version 3.6 utilisée par Wyard *et al.* (2016), la version 3.7 réduit les biais de températures de 20% et simule plus de nuages. Cependant, les quantités d'aérosols atmosphériques y sont constantes de sorte que l'effet direct et indirect des aérosols sur le rayonnement solaire n'est pas pris en compte. C'est pourquoi, nous nous focaliserons uniquement sur l'influence de la nébulosité sur le SSR. Dans cette étude, MAR a été forcé à ses frontières par quatre réanalyses différentes : les ERA-interim (1979-2014) (Dee *et al.*, 2011) complétées par les ERA40 (1958-1978) (Uppala *et al.*, 2005), les NCEP/NCAR-v1 (1948-2014) (Kalnay *et al.*, 1996), les ERA-20C (1900-2010) (Poli *et al.*, 2016), les 20CRV2C (1900-2010) (Compo *et al.*, 2011). Les deux dernières réanalyses sont des produits très récents qui ont jusqu'à présent été peu utilisés dans la littérature. Cette étude permettra ainsi d'évaluer leur fiabilité.

Les mesures de SSR nécessaires à l'évaluation du MAR proviennent de la Global Energy Balance Archive (GEBA) (Gilgen *et al.*, 1998). La plus longue série temporelle à notre disposition est celle d'Uccle (50.80°N ; 4.36°E) et couvre la période 1966-2007. Des observations de nébulosité provenant de Belgocontrol pour la station de Bierset (50.63°N ; 5.45°E) ont également été utilisées. La période commune la plus longue à ces deux sets d'observations s'étend de 1966 à 2007. C'est pour cette raison que cette période a été retenue comme période d'évaluation.

## 2. Résultats et discussion

### 2.1. Évaluation des SSR simulées par MAR et par les réanalyses

Une évaluation complète des températures, précipitations et hauteurs de neige modélisées par MAR est présentée dans Wyard *et al.* (2016). Dans cette étude, nous évaluons le SSR et la nébulosité simulés par MAR forcé par les ERA40/ERA-interim (appelé MAR-ERA par la suite), par MAR forcé par les NCEP/NCAR-v1 (MAR-NCEP1), par MAR forcé par les ERA-20C (MAR-ERA-20C), par MAR forcé par les 20CRV2C (MAR-20CRV2C). Nous évaluons aussi le SSR et la nébulosité modélisés par les réanalyses brutes. Les variables modélisées ont

été comparées aux mesures de SSR de Uccle et aux observations de nébulosité de Bierset, réalisées au cours de la période 1966-2007.

Les résultats montrent que le SSR modélisé par MAR a de meilleurs coefficients de détermination ( $R^2$ ) et des biais moyens annuels (BM) bien plus réduits que ceux issus des réanalyses brutes (Tableau 1). Les  $R^2$  du MAR oscillent entre 20 % (MAR-NCEP1) et 51 % (MAR-ERA) tandis que ceux des réanalyses brutes présentent des  $R^2$  allant de 0.03 % à 33 %. Les BM du MAR vont de  $+0.2 \text{ W m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  (MAR-NCEP1) à  $+4.9 \text{ W m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  (MAR-ERA) alors que les BM des réanalyses brutes vont de  $+34.4 \text{ W m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  (20CRV2C) à  $+68.8 \text{ W m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  (NCEP/NCAR-v1). Ces biais sont constants dans le temps.

Tableau 1: Comparaison entre le SSR modélisé par le MAR et les réanalyses avec des mesures couvrant la période 1966-2007 : coefficient de détermination ( $R^2$ ), écarts moyens quadratiques (RMSE), biais moyen annuel (BM), écart-type ( $\sigma$ ), moyenne annuelle.

	$R^2$ (%)	RMSE ( $\text{W m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ )	BM ( $\text{W m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ )	$\sigma$ ( $\text{W m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ )	Moyenne annuelle ( $\text{W m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ )
<b>OBS</b>	-	-	-	7.0	111.1
<b>MAR-ERA</b>	51	6.9	+4.9	5.4	116
<b>MAR-NCEP1</b>	20	7.7	+0.2	7.7	111.3
<b>MAR-ERA-20C</b>	45	6.3	+3.6	4.4	114.7
<b>MAR-20CRV2C</b>	43	5.5	+1.7	4.8	112.9
<b>ERA40/ERA-interim</b>	0.03	38.8	+55.4	39.6	166.5
<b>NCEP/NCAR-v1</b>	18	6.8	+68.8	5.3	179.9
<b>ERA-20C</b>	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
<b>20CRV2C</b>	33	11.0	+34.4	6.2	145.6

En ce qui concerne la nébulosité (statistiques non montrées ici), les  $R^2$  ne présentent pas de différences entre MAR et les réanalyses brutes, n'atteignant que 50 % pour MAR-ERA-20C et ERA-20C. Les BM sont dans tous les cas légèrement positifs et atteignent les  $+13.4 \%$  pour MAR-NCEP1. Comme souligné par plusieurs études, ces biais dans la nébulosité pourraient provenir de la difficulté rencontrée par les modèles à simuler la couverture nuageuse notamment les nuages convectifs (Träger-Chatterjee *et al.*, 2010 ; Wyard *et al.*, 2016). En outre, la fiabilité des observations de nébulosité est aussi discutable étant donné qu'elles sont soumises à la subjectivité de l'observateur humain scrutant le ciel depuis le sol (Wild, 2009).

Les biais de SSR sont probablement dus aux difficultés qu'ont les modèles à simuler la nébulosité, ses propriétés et ses interactions avec le rayonnement solaire. Enfin, une partie des biais est sûrement imputable à la non-prise en compte des aérosols dans le modèle.

## 2.2. Variations de SSR et de la couverture nuageuse simulés par MAR

Les variations décadales de SSR ont été mises en évidence en filtrant les SSR modélisés par MAR à l'aide d'un filtre gaussien de 11 ans (Figure 1(d)). Afin de mettre en relation les variations de SSR et de nébulosité, les fractions de nuages à trois niveaux d'altitudes (850 hPa, 700 hPa et 500 hPa correspondant aux nuages bas (LCC), moyens (MCC) et hauts (HCC)) ont également été filtrées (Figure 1 (a)-(b)-(c)).

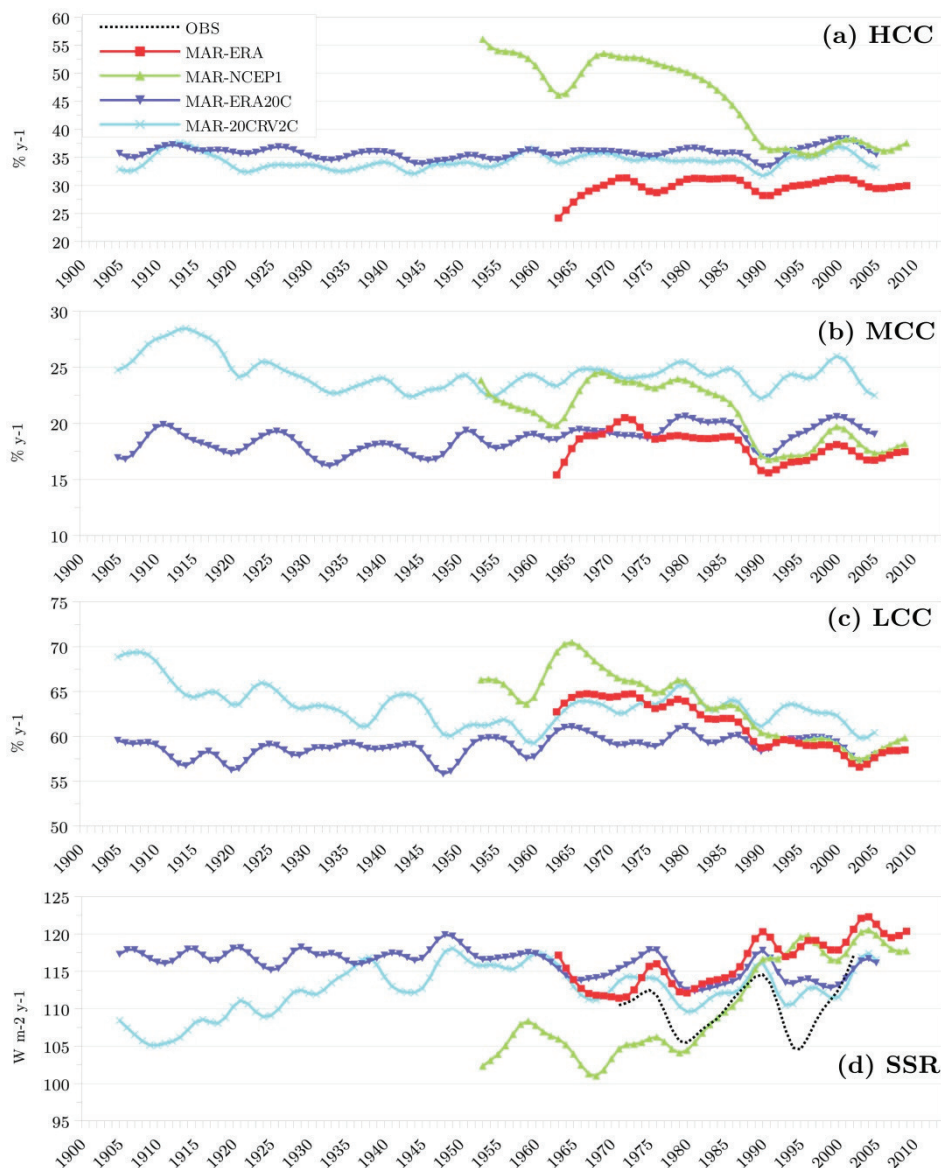


Figure 1. Évolution au cours de la période 1900-2014 des séries temporelles filtrées à l'aide d'un filtre gaussien de 11 ans de (a) la couverture de nuages hauts (HCC), (b) la couverture de nuages moyens (MCC), (c) la couverture de nuages bas (LCC), (d) le rayonnement solaire incident à la surface (SSR), modélisés par MAR.

MAR-ERA et MAR-NCEP1 montrent une tendance à des SSR stables entre les 1960s et les 1980s (Figure 1(d)) ce qui coïncide avec la période de diminution globale de SSR décrite dans la littérature. L'IRM (2015) a mis en évidence une diminution significative du SSR à Uccle, de l'ordre de -6.3 % au cours de la période 1951-1984. Ils attribuent cette tendance à une augmentation soutenue des émissions d'aérosols anthropogéniques dans l'atmosphère. Or, nos résultats ne montrent pas cette diminution de SSR étant donné qu'on ne tient pas compte de l'effet direct et indirect des aérosols sur le rayonnement solaire. Cependant, nos résultats montrent une diminution de la couverture naturelle de nuages bas tandis que la couverture de

nuages moyens est stable (Figure 1(b)-(c)). Ceci confirme que le facteur dominant ayant causé la diminution observée du SSR au cours de cette période est l'augmentation des émissions d'aérosols.

MAR-ERA et MAR-NCEP1 montrent aussi une tendance à une augmentation de SSR à partir des 1980s ce qui coïncide avec la période de récupération partielle de SSR observée dans certaines parties du monde dont la Belgique. De Bock *et al.* (2014) et IRM (2015) ont en effet mis en évidence une augmentation significative de SSR à Uccle de l'ordre de  $+4 \pm 1$  % par décennie. Parallèlement, ils ont aussi mis en évidence une diminution significative de la profondeur optique des aérosols à Uccle entre 1985 et 2014 de l'ordre de  $-8 \pm 5$  % par décennie avec une stabilisation après 2002. Cette diminution découle probablement de la diminution des émissions de carbones noirs et sulfurés après 1989 (date d'entrée en vigueur du protocole de Montréal). Nos résultats montrent une diminution de la couverture naturelle de nuages bas et de nuages moyens au cours de la même période ce qui corrobore l'étude d'Eastman et Warren (2013) qui a aussi mis en évidence une diminution de la nébulosité en Europe de l'Ouest entre 1971 et 2009. Ceci suggère donc que la période de récupération de SSR observée en Belgique résulte de la combinaison de la diminution des émissions d'aérosols et de celle de la couverture des nuages bas et moyens. Toutefois, après 2002, la diminution de la nébulosité serait devenue le facteur dominant. Matteos *et al.* 2014 ont tiré des conclusions similaires en Espagne.

Enfin, ni MAR-ERA20C ni MAR-20CRV2C ne montrent les tendances décrites ci-dessus, que ce soit dans le SSR ou dans les nuages. Cela peut s'expliquer par le fait que seules les pressions de surface et les vents sont assimilés dans les réanalyses ERA-20C et 20CRV2C.

### **2.3. Origine des changements de couverture nuageuse simulés par le MAR**

Pour expliquer les tendances dans la couverture des trois types de nuages (bas, moyens et haut) du MAR mises en évidence au point 2.2, nous avons analysé le comportement des températures, de l'humidité spécifique et relative dans les réanalyses brutes de forçage aux trois niveaux d'altitudes correspondant aux différents étages des nuages dans le MAR (graphiques non-montrés ici). Cette analyse montre une diminution de l'humidité relative de l'air ce qui aurait inhibé la formation de nuages. Cependant, les résultats montrent que cette diminution de l'humidité relative n'est pas due à une diminution de l'humidité spécifique de l'air mais une augmentation de la température de l'air aux différents niveaux de la troposphère.

## **Conclusion**

Le but de cette étude était d'étudier l'évolution du SSR en Belgique au cours de la période 1900-2014. Pour ce faire, des simulations ont été réalisées avec le modèle MAR version 3.7 forcé à ses frontières par quatre réanalyses : les ERA-interim (1979-2014) complétées par les ERA40 (1958-1978), les NCEP/NCAR-V1 (1948-2014), les ERA-20C (1900-2010) et les 20CRV2C (1900-2010). Comme MAR ne tient pas compte des aérosols, seul l'effet des nuages sur le SSR a été investigué.

La comparaison des SSR modélisés par MAR et par les réanalyses brutes à des mesures de SSR réalisées à Uccle au cours de la période 1966-2007 a montré que MAR fournit de bien meilleurs résultats que les réanalyses. Les biais subsistants dans les SSR modélisés par MAR ont été attribués à une mauvaise représentation des nuages (notamment les nuages convectifs) et de leurs propriétés mais aussi à la non-prise en compte des aérosols. L'analyse des tendances de SSR et des fractions de nuages bas, moyens et hauts, lissés avec un filtre gaussien de 11 ans, a mis en évidence que seuls MAR-ERA et MAR-NCEP1 étaient capables de simuler les grandes tendances observées dans le SSR. MAR-ERA-20C et MAR-20CRV2C n'ont montré aucune de ces tendances sans doute parce que les réanalyses ERA-20C et

20CRV2C n'assimilent que la pression de surface et le vent. Ainsi, nous n'avons pas pu mettre en évidence des tendances robustes avant les 1950s. Les résultats ont aussi montré qu'en Belgique, l'augmentation de SSR à partir des 1980s mais surtout à partir des 2000s pouvait être en grande partie expliquée par une diminution de la couverture de nuages bas et moyens. Après une analyse des températures, humidité spécifique et relative de l'air à différents niveaux de la troposphère dans les réanalyses de forçage, nous expliquons cette diminution de la nébulosité par une diminution de l'humidité relative engendrée par un réchauffement de la troposphère.

## Bibliographie

Compo G.P *et al.*, 2011 : The Twentieth Century Reanalysis Project. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137(654)**, 1-28. doi:10.1002/qj.776.

De Bock V *et al.*, 2014 : Relations between erythemal UV dose, global solar radiation, total ozone column and aerosol optical depth at Uccle, Belgium. *Atmos. Chem. Phys.*, **14(22)**, 12251-12270. doi:10.5194/acp-14-12251-2014.

Dee D.P *et al.*, 2011 : The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137(656)**, 553-597. doi:10.1002/qj.828.

Eastman R and Warren S G, 2013 : A 39-yr survey of cloud changes from land stations worldwide 1971-2009: Long-term trends, relation to aerosols, and expansion of the tropical belt. *J. Clim.*, **26(4)**, 1286-1303. doi:10.1175/JCLI-D-12-00280.1.

Gilgen H, Wild M, and Ohmura A, 1998 : Means and trends of shortwave irradiance at the surface estimated from global energy balance archive data. *J. Clim.*, **11(8)**, 2042-2061. doi:10.1175/1520-0442-11.8.2042.

IRM, 2015 : Vigilancia Climatique. Edité par D. Gellens, Institut Royal Météorologique de Belgique, Bruxelles.

Jerez S *et al.*, 2015 : The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. *Nature communications*, **6**. doi:10.1038/ncomms10014.

Kalnay E *et al.*, 1996 : The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **77(3)**, 437-471. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.\*

Mateos D *et al.*, 2014 : Quantifying the respective roles of aerosols and clouds in the strong brightening since the early 2000s over the Iberian Peninsula. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, 10382-10393. doi:10.1002/2014JD022076.

Poli P *et al.*, 2016 : ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century. *J. Clim.*, **29(11)**, 4083-4097. doi:10.1175/JCLI-D-15-0556.1.

Träger-Chatterjee C *et al.*, 2010 : Evaluation of ERA-40 and ERA-interim re-analysis incoming surface shortwave radiation datasets with mesoscale remote sensing data. *Meteorol. Zeitschrift*, **19(6)**, 631-640. doi:10.1127/0941-2948/2010/0466.

Uppala S.M *et al.*, 2005 : The ERA-40 re-analysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **131(612)**, 2961-3012. doi:10.1256/qj.04.176.

Wild M., 2009 : Global dimming and brightening: A review. *J. Geophys. Res.*, **114**, D00D16. doi:10.1029/2008JD011470.

Wyard C., Scholzen C., Fettweis X., Van Campenhout J., and François L., 2016 : Decrease in climatic conditions favouring floods in the south-east of Belgium over 1959-2010 using the regional climate model MAR. *Int. J. Climatol.* doi:10.1002/joc.4879.