

## ÉVALUATION DE LA CAPACITÉ DU MODÈLE ATMOSPHÉRIQUE RÉGIONAL (MAR) À SIMULER LA SAISON DES PLUIES EN AFRIQUE INTERTROPICALE

DOUTRELOUP S. <sup>(1)</sup>, WYARD C. <sup>(1)</sup>, BELLEFLAMME A. <sup>(1)</sup>, FRANCOIS L. <sup>(2)</sup>,  
FETTWEIS X. <sup>(1)</sup>, ERPICUM M. <sup>(1)</sup>

<sup>1</sup>*Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie (LCT), Université de Liège, 3, Clos Mercator, 4000 Liège, Belgique [s.doutreloup@ulg.ac.be]*

<sup>2</sup>*Unité de Modélisation du Climat et des Cycles Biogéochimiques (UMCCB), Département Astrophysique Géophysique et Océanographie, Université de Liège, Belgique*

**Résumé** – *En Afrique intertropicale, le climat est essentiellement caractérisé par les quantités de précipitations et leur régime annuel. Ces précipitations et leur évolution au cours de la période 1970-1999 ont été modélisées à l'aide du Modèle Atmosphérique Régional (MAR), développé à l'ULg, en le forçant par les réanalyses NCEP1 ainsi que par les sorties de trois modèles globaux (GCM) de la base de données CMIP5. Ces simulations ont ensuite été comparées aux observations maillées du Climate Research Unit (CRU). Il ressort de nos investigations que la simulation du modèle MAR forcé par les réanalyses NCEP1 parvient à mieux reproduire les lames d'eau et leur régime annuel dans les régions semi-arides qu'en régions équatoriales. En revanche, les simulations du MAR forcé par les sorties des GCM sont peu voire très peu satisfaisantes sur l'ensemble du domaine intertropical tant au niveau des quantités que de la saisonnalité des précipitations.*

**Mots-clés** : *Précipitations, régime des pluies, Modèle Atmosphérique Régional, zone intertropicale, Afrique*

**Abstract** : *Evaluation of model “Modèle Atmosphérique Régional” (MAR) capacity to simulate rainfall season in Intertropical Africa.*

*In Intertropical Africa, climate is essentially characterized by the amount of precipitation and its annual regime. These precipitations and their evolution during the period 1970-1999 are simulated thanks to the Regional Atmospheric Model (MAR), developed at the ULg, and forced by the NCEP1 reanalyses and by the outputs of three global models (GCM) of the CMIP5 database. These MAR simulations are compared to the gridded data of the Climate Research Unit (CRU). It is clear from our investigations that the simulation of the MAR model forced by the NCEP1 reanalyses is better reproducing the quantities as well as the annual rainfall regime in the semi-arid regions than in equatorial regions. On the other hand, simulations of the MAR forced by the outputs of the GCMs are globally unsatisfactory throughout the intertropical domain in terms of quantities as well as the seasonality of precipitation.*

**Keywords** : *precipitations, rainfall season, climate model, Intertropical Africa*

### Introduction

Le projet AFRIFORD, financé par la politique scientifique fédérale belge, a pour mission de comprendre la manière dont les changements climatiques du passé lointain (Holocène moyen et dernier maximum glaciaire) ont modifié la distribution et la composition des forêts tropicales d'Afrique Centrale. C'est dans ce cadre que le Laboratoire de Climatologie et de Topoclimatologie de l'Université de Liège (LCT) est chargé de simuler le climat sur l'Afrique intertropicale, d'abord sur la période récente (1970-1999), ensuite sur les périodes passées, c'est-à-dire il y a environ 6 000 ans (Holocène moyen) et 21 000 ans (dernier maximum glaciaire).

Les simulations réalisées dans le cadre de cette recherche ont été effectuées à l'aide du Modèle Atmosphérique Régional (MAR) développé par le LCT dans le but d'étudier les régions polaires (Fettweis *et al.*, 2016) ou encore les chutes de neige dans des régions plus tempérées (Wyard *et al.*, 2016). Le modèle MAR a également déjà été utilisé avec succès par Gallée *et al.* (2004) pour simuler le climat de l'Afrique de l'Ouest et plus particulièrement la saisonnalité des pluies.

La saisonnalité des pluies en Afrique intertropicale est directement liée au déplacement de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) formée par de la convection d'air provenant des tropiques. La ZCIT fluctue de part et d'autre de l'équateur géographique, et se retrouve en

moyenne à sa position la plus septentrionale le 21 juin et à sa position la plus méridionale le 21 décembre. De nombreux cumulonimbus sont présents au sein de la ZCIT et apportent souvent des averses intenses. La quantité de précipitations observée à une station dépend donc de la position de cette station sur le trajet de la ZCIT : de manière schématique, plus on s'éloigne de l'équateur plus la saison des pluies sera courte et la quantité de précipitations observée annuellement sera faible ; au contraire, plus on se rapproche de l'équateur, plus les précipitations seront présentes tout au long de l'année avec cependant des maxima observés lors des passages saisonniers de la ZCIT.

L'objectif de cette étude est donc de vérifier dans quelle mesure le MAR parvient à simuler cette saisonnalité des pluies en fonction de l'éloignement à l'équateur uniquement sur la période de référence récente qui s'étend pour notre étude de 1970 à 1999.

## 1. Description des modèles et données d'observations

Le MAR est un modèle régional climatique. Pour fonctionner, il a besoin d'être forcé aux frontières de son domaine d'intégration par des sorties d'un modèle global (GCM pour General Circulation Model) dont les réanalyses. Quatre GCMs ont été utilisés comme forçage, leur descriptif est repris au tableau 1. Il s'agit des réanalyses NCEP-NCAR1, et de trois GCMs provenant de la base de données CMIP5, à savoir les modèles CNRM-CM5, FGOALS-g2 et MRI-CGCM3.

Pour être utilisables par le MAR, les GCMs doivent respecter certaines contraintes. Ils doivent obligatoirement livrer les composantes U et V du vent, la température et l'humidité de l'air sur un minimum de 10 niveaux verticaux, la pression de surface, les températures de surface de la mer et des continents, et enfin, ces variables doivent être disponibles au pas de temps de 6 heures. Afin de respecter ces critères sur la période récente et sur les deux périodes du passé lointain, seulement 3 GCMs de la base de données CMIP5 ont pu être retenus. Nous nous limiterons donc également à ces 3 GCMs pour la période récente.

Tableau 1. Caractéristiques des GCMs utilisés pour forcer le MAR

Modèle	Résolution horizontale	Résolution verticale	Références
NCEP-NCAR1 (appelé ci-après NCEP1)	2.5°x2.5°	28 niveaux	Kalnay & <i>al.</i> , 1996
CNRM-CM5 (appelé ci-après CNRM)	1.4° x 1.4°	31 niveaux	Volodioire & <i>al.</i> , 2011
FGOALS-g2 (appelé ci-après FGOALS)	2.8° x 2.8°	26 niveaux	Li & <i>al.</i> , 2013
MRI-CGCM3 (appelé ci-après MRI)	1.12° x 1.12°	48 niveaux	Yukimoto & <i>al.</i> , 2012

Le domaine couvert par les simulations du MAR s'étend du tropique du Cancer au tropique du Capricorne et de 30°W à 60°E (figure 1). Sa résolution horizontale est de 50 km, il contient 186 x 122 pixels horizontaux et 25 niveaux verticaux.

De manière générale, le continent africain est peu pourvu en stations d'observations synoptiques. Cependant, afin d'évaluer la qualité des simulations du MAR, nous utilisons les données d'observations maillées du Climate Research Unit (CRU), disponibles à la résolution horizontale de 0.5° (Harris *et al.*, 2014) sur la période 1970-1999. Outre que cette résolution correspond approximativement à la résolution du MAR, l'utilisation de données d'observations maillées permet également une comparaison plus aisée entre les simulations du MAR car elle est continue spatialement et temporellement. Il faut cependant être conscient

que les données du CRU ne sont pas exemptes de défauts étant donné la faiblesse des réseaux de mesures dans cette partie de la planète.

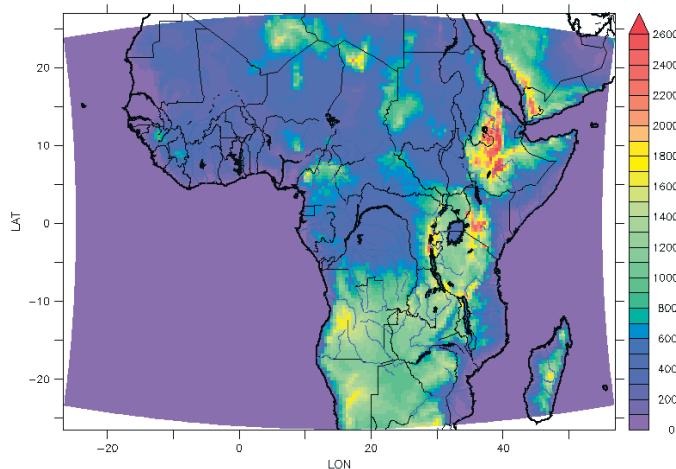


Figure 1. Domaine d'étude et topographie (en couleur et en mètre) du MAR

## 2. Résultats et discussions

Afin de vérifier la répartition des précipitations modélisées en Afrique intertropicale, quatre zones climatiques spécifiques ont été sélectionnées (figure 2) à l'intérieur desquelles les quantités de précipitations observées et simulées sont intégrées : la zone Z1 est centrée sur le bassin du Congo, Z2 est centrée sur la République Centrafricaine, Z3 est située le long de la côte du Ghana et de la Côte d'Ivoire, et enfin Z4, située plus au nord que Z3, est centrée sur le Burkina Faso.

Contrairement aux analyses réalisées sur des stations ponctuelles, le recours à ces zones témoins permet de s'affranchir en partie des défauts locaux liés au manque de données d'observation dans le CRU étant donné que ces zones agrègent les précipitations de plusieurs stations météorologiques. Notons également que ces zones possèdent volontairement une plus longue extension longitudinale que latitudinale afin de mieux tenir compte du passage de la ZCIT.

Pour chaque zone, les cumuls moyens mensuels de précipitations simulés sur la période 1970-1999 par les différents modèles sont comparés avec les valeurs fournies par le CRU. La capacité de chaque modèle à simuler à la fois la variabilité annuelle mais aussi les quantités moyennes mensuelles des précipitations ont ensuite été analysées graphiquement.

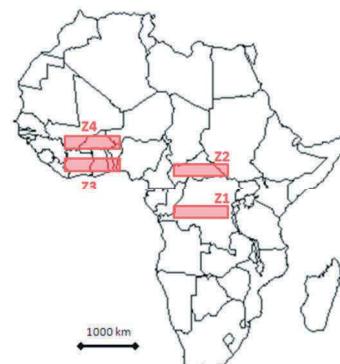


Figure 2. Localisation des 4 zones témoins

## 2.1. Zone 1 : le bassin du Congo

Les données du CRU (figure 3) montrent que cette région reçoit des précipitations toute l'année, avec un premier minimum de 80 mm en janvier et un second de 90 mm en juillet. Les mois d'avril-mai et octobre indiquent un maximum chacun, respectivement de 160 mm et 230 mm, correspondant aux deux passages de la ZCIT.

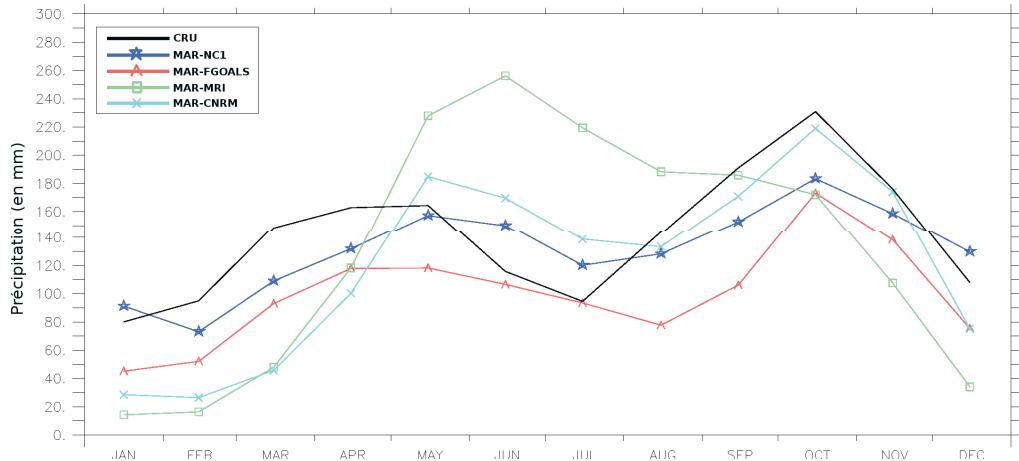


Figure 3. Cumuls moyens mensuels de précipitations sur la période 1970-1999 dans la zone 1 (bassin du Congo). La courbe noire représente les données du CRU, la courbe bleu celles du MAR-NCEP1, la courbe rouge celles du MAR-FGOALS, la courbe verte celles du MAR-MRI et la courbe cyan celles du MAR-CNRM.

Les précipitations modélisées par le MAR-NCEP2, le MAR-FGOALS et le MAR-CNRM reproduisent de manière satisfaisante la variation annuelle des précipitations fournies par les données CRU si ce n'est que ces précipitations modélisées sont légèrement décalées dans le temps pour le premier pic de précipitations qui se produit en avril-mai dans le CRU alors qu'il se situe plutôt en mai-juin pour ces trois modèles. Le second pic apparaît au mois d'octobre aussi bien dans le CRU que dans ces trois simulations. Cependant, les précipitations modélisées par le MAR sous-estiment de manière générale les valeurs mensuelles du CRU.

Le MAR-MRI ne permet pas de représenter la variabilité annuelle ni les valeurs mensuelles du CRU dans cette zone géographique. Il semblerait même que cette simulation ne détecte pas le deuxième passage de la ZCIT.

## 2.2. Zone 2 : la République Centrafricaine

Durant les mois de novembre à mars, les cumuls moyens mensuels de précipitations fournis par le CRU (figure 4) sont relativement faibles, la saison des pluies durant d'avril à octobre, avec un maximum durant le mois d'août.

Le MAR-NCEP1, comme le MAR-CNRM, représentent relativement bien la variabilité annuelle des précipitations régionales malgré des cumuls moyens mensuels de précipitations qui diffèrent de ceux du CRU : 1040 mm/an pour MAR-NCEP1 et 1330 mm/an pour MAR-CNRM contre 1430 mm/an pour le CRU.

Le MAR-MRI et le MAR-FGOALS ne parviennent pas à simuler cette variabilité annuelle des précipitations. La première simulation débute la saison des pluies au mois de mai et simule un pic de précipitations au mois de septembre (ce qui n'apparaît pas dans les données CRU), la deuxième fournit des cumuls moyens mensuels de précipitations très largement sous-estimés (MAR-FGOALS fournit seulement 500 mm/an en moyenne contre 1430 mm/an pour le CRU), tout en simulant un pic de précipitations au mois d'octobre.

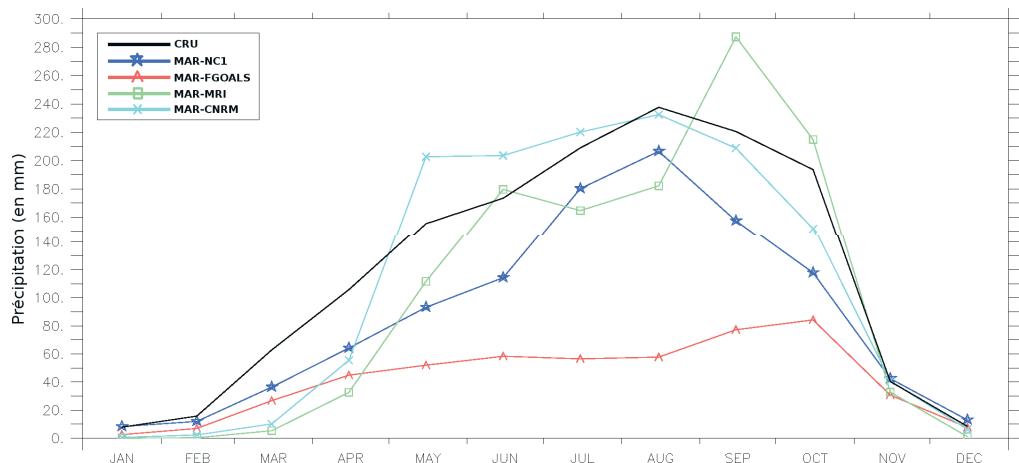


Figure 4. Cumuls moyens mensuels de précipitations sur la période 1970-1999 dans la zone 2 (République Centrafricaine). La courbe noire représente les données du CRU, la courbe bleu celles du MAR-NCEP1, la courbe rouge celles du MAR-FGOALS, la courbe verte celles du MAR-MRI et la courbe cyan celles du MAR-CNRM.

### 2.3. Zone 3 : la Côte d'Ivoire et le Ghana

Comme pour la Z2, d'après les cumuls moyens mensuels de précipitations du CRU (figure 5), la saison des pluies commence progressivement de février à mars, puis s'établit clairement en avril pour se terminer en octobre, alors que la saison sèche débute en novembre et se termine en février. Le pic de précipitation se produit en août, moment du passage de la ZCIT sur la région. La répartition moyenne annuelle des précipitations dans cette zone est relativement semblable à celle de la Z2 car ces deux zones sont situées à même latitude mais la Z3 obtient ~ 400 mm de cumuls annuels de précipitations en moins par rapport à Z2.

Le MAR-NCEP1 simule presque parfaitement la variabilité annuelle des précipitations, ainsi que les cumuls moyens mensuels, bien qu'il y ait une surestimation durant les mois de juin à septembre.

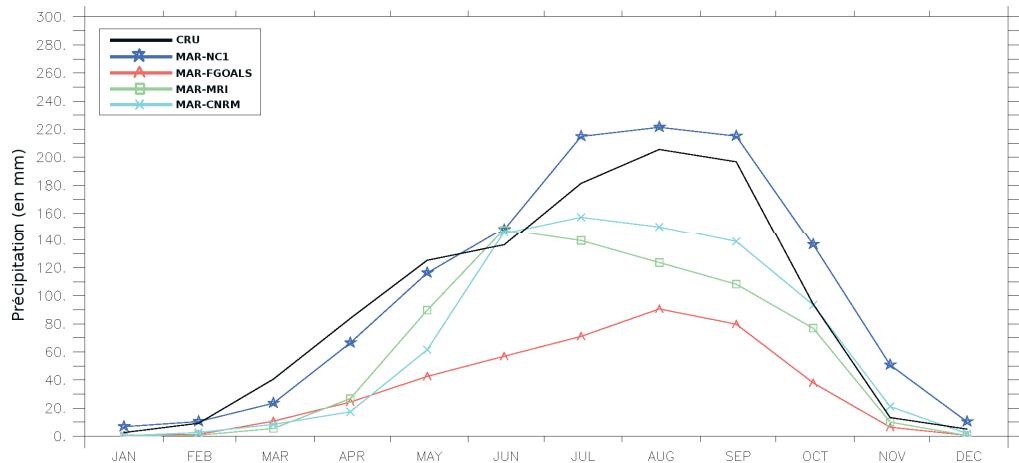


Figure 5. Cumuls moyens mensuels de précipitations sur la période 1970-1999 dans la zone 3 (Côte d'Ivoire et Ghana). La courbe noire représente les données du CRU, la courbe bleu celles du MAR-NCEP1, la courbe rouge celles du MAR-FGOALS, la courbe verte celles du MAR-MRI et la courbe cyan celles du MAR-CNRM.

En revanche, le démarrage de la saison des pluies est plus tardif pour les autres simulations où les précipitations n'augmentent qu'à partir d'avril. Le MAR-CNRM et le MAR-FGOALS indiquent bien des maxima de précipitations respectivement en juillet et août en sous estimant

toutefois les valeurs par rapport au CRU. Le MAR-MRI simule un pic de précipitations en juin et une lente décroissance jusqu'en octobre ce qui ne correspond pas à l'évolution annuelle des précipitations du CRU.

#### 2.4. Zone 4 : le Burkina Faso

Dans cette zone (figure 6), la saison des pluies est beaucoup plus courte et s'étale de mai-juin à septembre, puisqu'elle se trouve plus au nord où la ZCIT n'intervient que brièvement durant l'année. Le pic de précipitations se produit en août. Seul le MAR-NCEP1 permet de simuler la variation annuelle des précipitations bien qu'il sous-estime les cumuls moyens mensuels.

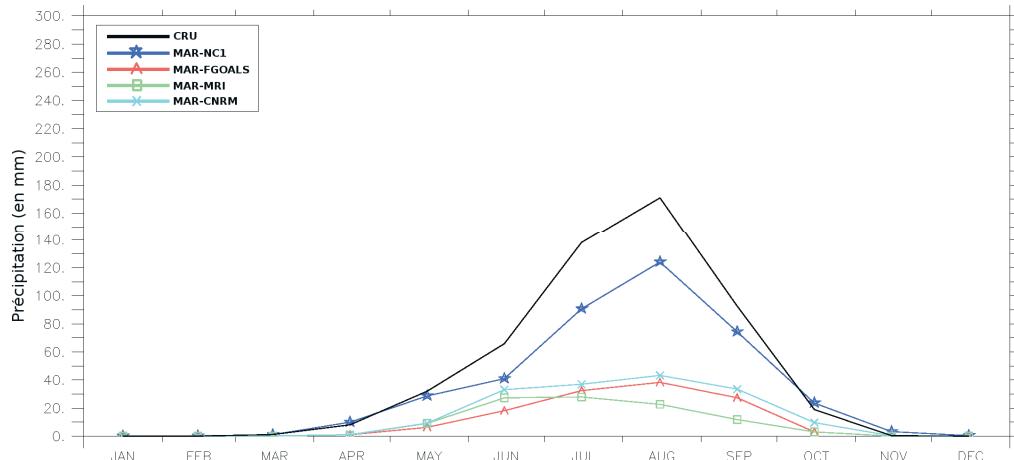


Figure 6. Cumuls moyens mensuels de précipitations sur la période 1970-1999 dans la zone 4 (Burkina Faso). La courbe noire représente les données du CRU, la courbe bleu celles du MAR-NCEP1, la courbe rouge celles du MAR-FGOALS, la courbe verte celles du MAR-MRI et la courbe cyan celles du MAR-CNRM.

Les trois autres simulations indiquent une certaine variabilité saisonnière, mais les quantités pluviométriques moyennes mensuelles sont très largement sous-estimées par rapport à celles du CRU.

#### Conclusion et perspectives

Il ressort que le MAR-NCEP1 parvient à simuler de manière satisfaisante la variabilité annuelle et les quantités mensuelles de précipitations alors que les trois autres simulations ne parviennent pas à reproduire soit la variabilité annuelle, soit les quantités mensuelles, voire les deux à la fois. Le modèle global NCEP1 étant un modèle de réanalyses, il assimile en partie des observations, il est donc logique qu'il soit meilleur que les autres GCMs qui ne sont pas « forcés » par des observations excepté les concentrations en gaz à effet de serre, ozone, ...

Le MAR-NCEP1 simule mieux les climats semi-arides (Z3 et Z4) que le climat équatorial ou tropical humide (Z1 et Z2). Cette différence de qualité de simulations est vraisemblablement influencée par deux raisons différentes. La première serait liée à la variabilité annuelle des précipitations en climat équatorial qui est moins marquée qu'en climat semi-aride, ce qui est plus difficile à modéliser. La deuxième serait liée au fait que sa végétation ombrophile joue un rôle plus important dans le climat des régions équatoriales, notamment en évapotranspirant une part significative de vapeur d'eau condensable dans les nuages, ce qui favorise l'apparition de précipitations, voire même auto-entretient ces précipitations. Des recherches futures chercheront à déterminer la sensibilité du MAR face à des changements de végétation.

## Remerciements

Cette recherche a pu être menée dans le cadre du projet AFRIFORD financé par le programme « Belgian Research Action through Interdisciplinary Networks (BRAIN-be) » du service public de programmation de la Politique Scientifique Fédérale que nous tenons à remercier plus particulièrement.

## Bibliographie

- Dee, D. P., Uppala, S., Simmons, A., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S., Hersbach, H., Hólm, E., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A., Monge-Sanz, B., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., Vitart, F., 2011 : The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Q.J.R. Meteorological Society*, 137: 553–597. doi: 10.1002/qj.828.
- Fettweis X., Box J. E., Agosta C., Amory C., Kittel C., Gallée H., 2016: Reconstructions of the 1900–2015 Greenland ice sheet surface mass balance using the regional climate MAR model. *The Cryosphere Discuss.*, doi:10.5194/tc-2016-268.
- Gallée H., Moufouma-Okia W., Bechtold P., Brasseur O., Dupays I., Marbaix P., Messager C., Ramel R., Lebel T., 2004 : A high-resolution simulation of a West African rainy season using a regional climate model, *J. Geophys. Res.*, 109, D05108, doi:10.1029/2003JD004020.
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H., 2014 : Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, **34**: 623–642. doi:10.1002/joc.3711.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R. 1996 : The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-470.
- Li L., Lin P., Yu P., & al., 2013 The flexible global ocean-atmosphere-land system model, grid-point version 2 : FGOALS-g2, *Advances in Atmospheric Sciences*, **30** :543, doi :10.1007/s00376-012-2140-6.
- Volodko, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Méria, D. & al., 2013 : The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation, *Climate Dynamics*, **40**: 2091. doi:10.1007/s00382-011-1259-y.
- Wyard C., Scholzen C., Fettweis X., Van Campenhout J., François L., 2016 : Decrease in climatic conditions favouring floods in the south-east of Belgium over 1959-2010 using the regional climate model MAR, *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.4879.
- Yukimoto S., Adachi Y., Hosaka M., Sakami T., Yoshimura H., Hirabara M., & al., 2012 : A new global climate model of the Meteorological Research Institute : MRI-CGCM3, model description and basic performance, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90A, p.23-64, doi:10.2151/jmsj.2012-A02.