

Incertitudes sur les données climatiques en Afrique: intercomparaison de divers jeux de données

Auteur : Prignon, Maxime

Promoteur(s) : Fettweis, Xavier; Agosta, Cécile

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences géographiques, orientation climatologie, à finalité approfondie

Année académique : 2015-2016

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/1596>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative" (BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Université de Liège
Faculté des sciences
Département de géographie

**INCERTITUDES SUR LES DONNÉES CLIMATIQUES EN
AFRIQUE**
Intercomparaison de divers jeux de données

Mémoire présenté par
Maxime PRIGNON
En vue de l'obtention du titre de
Master en sciences géographiques
orientation climatologie

Membres du jury
Xavier FETTWEIS (Promoteur)
Cécile AGOSTA (Promoteur)
Roland BILLEN

Année académique 2015-1016

Remerciements

Tout d'abord, je voudrais remercier mes promoteurs Xavier Fettweiss et Cécile Agosta de m'avoir permis de poursuivre cette recherche. Sans leur patience inépuisable et leurs conseils, ce travail n'aurait pu aboutir.

Je tiens également à remercier Michel Erpicum pour la passion qu'il m'a transmise tout au long de cette formation ainsi que pour les corrections apportées à ce travail.

Ensuite, je remercie d'ores et déjà le futur lecteur de ce travail: Roland Billen.

Enfin, je tiens à remercier mes proches pour leur soutien incomensurable et pour leur contribution à parfaire ce travail.

Résumé

Alors que l’Afrique connaît aujourd’hui des enjeux importants face au changement climatique qui s’y profile, le manque de données in situ empêche une compréhension complète de son climat. Face à cette problématique, les modèles climatiques globaux (GCM) et les modèles climatiques régionaux (RCM) constituent une solution. Cependant, lorsqu’il s’agit d’évaluer ces modèles, les recherches reviennent fréquemment à la source du problème : l’inexistence d’une source de données climatiques robuste. Face à ce constat, notre recherche a pour objectif de comparer les sources principales de données climatiques disponibles en Afrique. Nous avons ainsi inclus une banque de données in situ, différents jeux de données d’observation maillées (CRU, UDEL et GPCC), des réanalyses (ERA-Interim et NCEP) et, enfin, des RCM. Parmi ces derniers figure, en plus de plusieurs RCM ayant participé au projet CORDEX, le Modèle Atmosphérique Régional (MAR). En premier lieu, une évaluation croisée des sources de données in situ et des réanalyses a été réalisée. Les différents RCM ont, ensuite, été évalués selon diverses climatologies. Enfin, la valeur ajoutée du MAR par rapport aux réanalyses a également été évaluée. Nos résultats montrent que les données d’observation maillées sont relativement proches l’une de l’autre. Les réanalyses affichent des différences plus importantes entre elles et les ERA-Interim sont les plus proches des observations. Au niveau des RCM, nous avons montré la variabilité importante qui existait entre eux alors que ces modèles sont censés représenter le même climat. MAR est globalement inclus dans la variabilité des modèles mais présente tout de même des biais singuliers : une sous-estimation (-2°C à -4°C) généralisée des températures aux latitudes du Sahara et une mauvaise représentation de la saisonnalité des pluies en diverses régions. Dans sa version actuelle et avec une résolution de 50 km, MAR ne peut ajouter une réelle valeur aux ERA-Interim. Cette étude confirme donc la problématique ici introduite mais ne peut y apporter une réelle solution directe. En lieu et place, notre recherche permet de mieux maîtriser cette problématique en précisant les forces et faiblesses des sources principales de données climatiques en Afrique.

Abstract

While Africa is now facing important challenges concerning climate changes, the scarcity of in situ data prevents a complete comprehension of its climate. In regards to this issue, global climate models (GCM) and regional climate models (RCM) can be useful. However, the issue still remains when it comes to evaluating these models. Taking this context into account, our research aims to undertake an intercomparaison of the main climatic data sources available in Africa. An unpublished data set, several gridded observation data sets (CRU, UDEL and GPCC), reanalyses (ERA-Interim et NCEP) as well as RCM were thus included. The RCM come from the CORDEX project and the RCM MAR (Modèle Atmosphérique Régional) has been added too. We first conducted a cross-evaluation of the observation data sets and the reanalyses. Then we evaluated the RCM under different time scales. Finally, the added value by MAR to the reanalyses has also been evaluated. The results showed that the gridded observation data sets are broadly similar. The reanalyses show more uncertainties and the ERA-Interim are closer to the observations. Concerning the RCM, we emphasised the large variability between the models despite the fact that they should represent the same climate. MAR is mainly included in this variability but still exhibits singular biases: a large cold bias (-2°C to -4°C) around the Sahara latitudes and a poor representation of the precipitations climatology in some regions. In its current state and with a 50 Km resolution, MAR does not seem to bring an added value to the ERA-Interim. In conclusion, our study confirms the issue presented here but can't solve it. Instead, our research helps to have a better understanding of these issues by pointing out the strengths and weaknesses of the main climate data sources in Africa.

Table des matières

Liste des acronymes	8
1. Introduction	9
2. Contexte général.....	11
2.1. Zone d'étude : le continent africain	11
2.1.1. Topographie	11
2.1.2. Climat	12
3. Etat de l'art	15
3.1. Incertitudes sur les données in situ en Afrique	15
3.2. Modèles de circulation générale et modèles climatiques régionaux	15
3.3. Le projet CORDEX en Afrique	16
3.3.1. Finalités et résultats	17
3.4. Le Modèle Atmosphérique Régional.....	19
3.4.1. Résultats en Afrique	20
3.5. Conclusions	20
4. Objectifs	21
5. Données et méthodologie	22
5.1. Données in situ	22
5.1.1. Données in situ inédites.....	22
5.1.2. Données d'observation maillée	23
5.2. Traitements des données in situ.....	24
5.3. Réanalyses	24
5.4. Modélisation climatique régionale	25
5.5. MAR	25

5.6. Modèles CORDEX	29
5.7. Intercomparaison	30
5.7.1. Critique des données in situ et réanalyses	30
5.7.2. Evaluation des résultats du MAR	30
5.7.3. Comparaison des RCM	32
5.7.4. Valeur ajoutée	32
6. Résultats	33
6.1. Evaluation des données d'observation	33
6.1.1. Représentativité spatiale	33
6.1.2. Comparaison des différents jeux de données	34
6.1.3. Conclusions	37
6.2. Evaluation du MAR	38
6.2.1. Comportement moyen	38
6.2.2. Saisonnalité	39
6.2.3. Variabilité interannuelle	44
6.2.4. Conclusions	46
6.3. Modèles CORDEX	50
6.3.1. Comportement moyen	50
6.3.2. Climatologie annuelle	52
6.3.3. Variabilité interannuelle	54
6.4. Analyse de la valeur ajoutée par MAR aux réanalyses	56
6.4.1. Conclusions	58
7. Discussion et limites	59
7.1. Critique des données d'observation et réanalyses	59

7.2. Conclusions et limites de l'intercomparaison.....	60
8. Conclusion et perspectives :	62
8.1. Synthèse.....	62
8.2. Incertitudes sur les données climatiques en Afrique	63
8.3. Perspectives	63
Références	65
Autres références	69
Annexes	70

Liste des acronymes

CORDEX	Coordinated Regional climate Downscaling Experiment
CRU	Climatic Research Unit
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
GCM	Modèle Climatique Global (Global Climate Model)
GEWEX	Global Energy and Water Cycle Exchanges Project
GPCC	Global Precipitation Climatology Centre
JAS	Eté boréal (Juillet, Aout, Septembre)
JEA	Jet d'Est Africain
JFM	Hiver boréal (Janvier, Février, Mars)
MAR	Modèle Atmosphérique Régional
MOA	Mousson Ouest-Africaine
MODIS	MOderate Resolution Imaging Spectrometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NOAA	National Oceanographic and Atmospheric Administration
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
RCM	Modèle Climatique Régional (Regional Climate Model)
SISVAT	Soil Ice Snow Vegetation Atmosphere Transfer
SST	Température de Surface de l'océan ou de la mer (Sea Surface Temperature)
UDEL	Université de Delaware
ZCIT	Zone de Convergence InterTropicale

1. Introduction

L'Afrique est l'un des continents les plus vulnérables au changement climatique. Notamment à cause de l'importance des impacts projetés et de la faible capacité de l'Afrique à s'adapter aux changements (IPCC, 2014). Le changement climatique pourrait donc s'y ressentir tant du point de vue naturel qu'humain. Par exemple, des modifications du régime de précipitation des régions semi-arides pourraient accroître encore les tensions sociales relatives à la disponibilité en eau. Ajoutons à ce sujet que selon l'IPCC (2014), l'agriculture uniquement irriguée par les pluies devrait être réduite jusqu'à 50% dans certains pays (Sahel) d'ici 2020.

Malgré ces enjeux climatiques importants, un problème récurrent survient lorsque l'on s'attache à étudier le climat en Afrique : la disponibilité des données *in situ*. Il est en effet souvent difficile de se procurer des données d'observation affichant des séries temporelles et une représentativité spatiale suffisantes pour l'observation de phénomènes climatiques locaux ou régionaux (Love *et al.*, 2004). En 2004, 1152 stations du réseau World Weather Watch de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) étaient disponibles en Afrique : Cela représentait une station pour 26 000 Km², soit 8 fois moins que le minimum recommandé par l'OMM (Washington et Brue, 2004).

Face à cette problématique, la communauté scientifique s'efforce de développer des modèles climatiques capables de simuler ces données manquantes. Les modèles climatiques globaux (GCM) peuvent simuler les grands traits du climat africain mais présentent trop de lacunes pour une étude régionale. C'est pourquoi les modèles climatiques régionaux (RCM), avec leur représentation physique plus détaillée et une résolution spatiale plus fine, sont maintenant indispensables à l'étude du climat africain. Comme l'indique l'IPCC (2014), la modélisation régionale représente aujourd'hui un réel défi face au changement climatique. D'ailleurs, les modèles hydrologiques et de cultures, qui serviront à évaluer l'impact des changements climatiques, ont besoin d'une résolution plus fine que ce que proposent les GCM (IPCC, 2014).

C'est dans cette optique que s'inscrit le projet CORDEX (Coordinated Regional climate Downscaling Experiment). Ce projet a pour but « *de faire progresser et de coordonner la science et l'application de la modélisation régionale grâce à des partenariats mondiaux* »¹. Pour atteindre ce but, des domaines d'intégrations précis sont définis. Ainsi il

¹ <http://cordex.org/>, consulté en aout 2016.

est possible d'obtenir un large ensemble de RCM ayant été appliqués sur la même région et donc de faciliter l'intercomparaison des résultats.

Notre étude viendra donc s'inscrire dans cette problématique. Nous tenterons d'apporter de nouveaux éléments dans la critique des principaux types de données climatiques disponibles en Afrique. Pour ce faire, nous inclurons une banque de données inédites, différentes données d'observation maillées, des réanalyses ainsi que des RCM. Parmi ces derniers figurera, en plus de plusieurs RCM ayant participé au projet CORDEX, le Modèle Atmosphérique Régional (MAR).

La rédaction de la présente recherche se divise en plusieurs chapitres. Dans le chapitre 2 sera introduit le contexte général de la recherche. Une revue de la littérature sera proposée au chapitre 3. Nous définirons des objectifs précis dans le chapitre 4. Le chapitre 5 présentera les données utilisées et la méthodologie employée afin d'atteindre nos objectifs. Au chapitre 6 et 7 nos résultats y seront, respectivement, présentés et discutés. Enfin, le chapitre 8 conclura la recherche et les perspectives sont dessinées.

2. Contexte général

2.1. Zone d'étude : le continent africain²

2.1.1. Topographie

L'Afrique couvre plus de 30 millions de Km² et représente ainsi le deuxième continent de par sa taille (Griffiths, 2004). A l'échelle du continent, il a la forme d'un grand plateau avec un trait de côte remarquablement lisse. Si l'on regarde attentivement sa topographie, on remarquera cependant que deux grandes régions peuvent être identifiées (Figure 2-1). La

première, au nord de l'équateur en excluant les hauts plateaux éthiopiens, est composée d'altitudes relativement basses avec un relief monotone, exception faite pour les massifs de l'Atlas, du Hoggar et du Tibesti. La deuxième région, au sud de l'équateur en excluant le bassin du Congo, est composée de hauts plateaux (2000-3000 mètres d'altitude) avec quelques reliefs accentués tels que le Kilimandjaro, le mont Kenya ou le Rwenzori (Griffiths, 2004, UNEP, 2008). Cette région présente une particularité topographique et géologique : la vallée du grand rift. En cet endroit se séparent les plaques africaine et somalienne formant ainsi une large et profonde vallée. Le rift

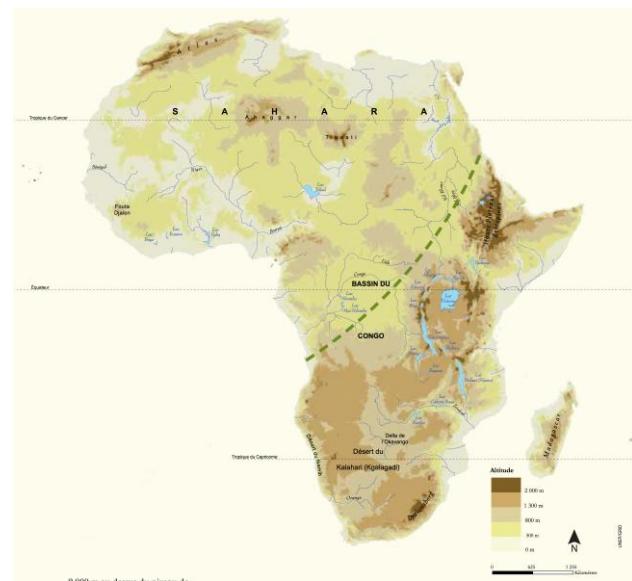


Figure 2-1 : Topographie de l'Afrique (UNEP, 2008). La ligne verte représente la limite entre les deux grandes régions

dans son ensemble s'étend de la mer Rouge à Djibouti (Ethiopie) jusqu'au Sud du Mozambique. Il est séparable en deux branches Ouest et Est. Dans sa branche Est, il affiche des dénivélés remarquables atteignant 1500 mètres. C'est dans cette vallée que les grands lacs de l'Afrique de l'Est se retrouvent, hormis le lac Victoria. Citons notamment le Tanganyika, le lac Malawi et le lac Turkana qui représentent les plus grands lacs du rift (Stock, 2004).

² Une carte politique de l'Afrique est placée en Annexe 1 pour que le lecteur puisse se repérer

2.1.2. Climat

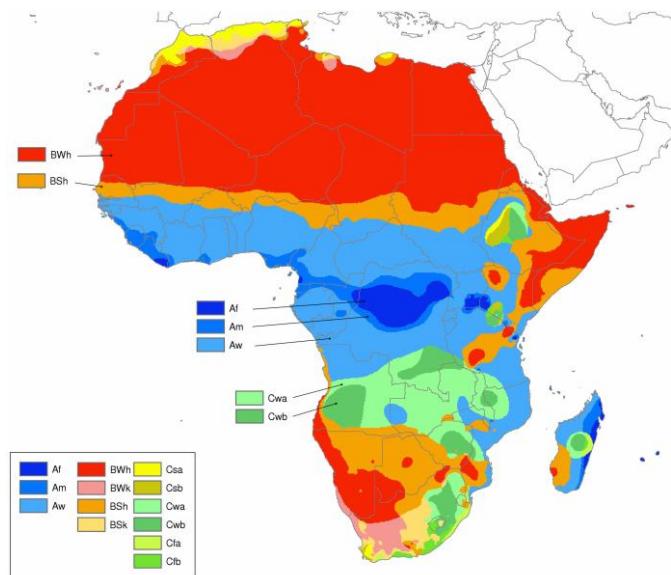


Figure 2-2 : Climats relevés en Afrique selon la classification de Peel *et al.* (2007). Af, Am et Aw représentent les divers climats tropicaux. BWh et BSh les climats arides. Cwa et Cwb les climats tempérés.

l'amplitude annuelle augmente en fonction de l'éloignement à l'équateur.

2.1.2.1. Mécanismes climatiques

Pour expliquer la saisonnalité des précipitations en Afrique tropicale, il faut se référer à la circulation atmosphérique générale et, plus précisément, aux cellules méridiennes de Hadley. La convergence de ces deux cellules provoque une zone de forte convection appelée zone de convergence intertropicale (ZCIT). La position de celle-ci varie en latitude au cours de l'année avec le déplacement méridien des cellules de Hadley qui suivent le maximum d'insolation (Leduc-Leballeur, 2012) et induit ainsi une saisonnalité dans le régime des précipitations.

La mousson Ouest-africaine³

La mousson Ouest-africaine a une influence importante dans notre zone d'étude et est fréquemment étudiée dans les articles qui seront cités dans l'état de l'art (chapitre 3), c'est pourquoi il est également important de décrire ce phénomène climatique.

³ Depuis Leduc-Leballeur (2012).

Le continent africain s'étend entre les latitudes 37°N et 34°S et est donc quasiment centré sur l'équateur. On retrouve, par ce fait, une symétrie Nord/Sud au niveau des principaux types de climats. En effet, en s'éloignant de l'équateur vers les pôles, on observe pratiquement la même succession de climats de part et d'autre de l'équateur (Figure 2-2). Pour la plupart de l'Afrique, la saisonnalité se retrouve principalement au niveau du régime des précipitations. C'est d'ailleurs ce dernier qui y permet la différenciation des climats (Peel *et al.*, 2007). Quant aux températures,

« *Le phénomène de mousson est associé au renversement saisonnier des vents dans la basse atmosphère qui pousse les précipitations vers le continent* » (Leduc-Leballeur, 2012). Un climat de mousson sera ainsi caractérisé par deux saisons, l'une très pluvieuse, l'autre sèche. L'opposition de deux types de vents dominants, l'un provenant du continent, l'autre de l'océan, en est aussi une caractéristique principale.

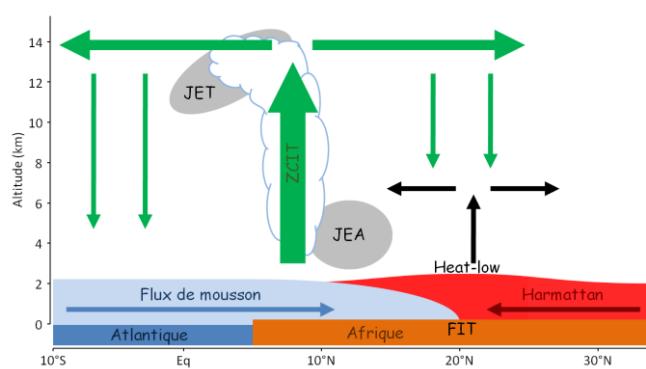


Figure 2-3 : Coupe méridienne schématique de la mousson Ouest-africaine. Depuis Leduc-Leballeur (2012)

réchauffe rapidement alors que les eaux du golfe de Guinée voient leur température se refroidir via le phénomène d'upwelling. En raison de ce contraste de température, les alizés provenant de l'anticyclone de Sainte-Hélène traversent l'équateur et changent ainsi de direction -Sud-Est vers Sud-Ouest- sous l'action de la force de Coriolis. Ces vents humides sont alors opposés aux vents chauds et secs provenant du Sahara (harmattan). La zone d'opposition de ces masses d'air est appelée front intertropical. Le sur-échauffement de la surface du Sahara permet alors la convergence entre l'air humide et frais de mousson et l'air chaud et sec de l'harmattan. De par ce contraste important de température engendre un vent d'Est, appelé jet d'Est africain (JEA). A l'image du courant jet à nos latitudes, des ondes se développent le long du JEA et favorisent l'activité convective au Sud des creux ainsi formés. Il faut également noter que la majorité de l'humidité nécessaire aux précipitations n'est en fait pas apportée par les vents de mousson mais plutôt par le recyclage au sol de l'humidité fournie par les précipitations (Lafore *et al.*, 2012).

La mousson Ouest-africaine (MOA) débute en mai et se termine au mois de novembre avec un maximum d'activité durant l'été boréal. Elle est principalement causée par le gradient de température entre la surface de l'océan Atlantique dans le golfe de Guinée et la surface terrestre de l'Afrique de l'Ouest. En effet, avec l'arrivée du printemps boréal, la surface continentale de l'Afrique de l'Ouest

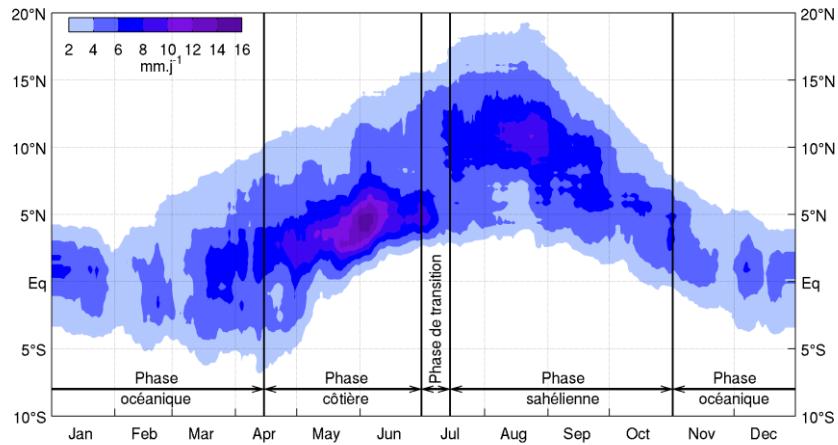


Figure 2-4 : « Précipitations moyennes entre 10° Ouest et 10° Est de 2000 à 2009. ». Leduc-Leballeur (2012)

Bien que la MOA soit aujourd’hui maîtrisée dans son ensemble, il reste néanmoins quelques questions à élucider. Par exemple, à la fin du mois de juin, la ZCIT fait un saut abrupt de 5°N à 10°N (phase de transition à la Figure 2-4 ; Le Barbé *et al.*, 2002 ; Sultan et Janicot, 2000, 2003). Le manque d’observations dans la région ne facilitant pas la tâche (Karbou *et al.*, 2012), les causes de cet évènement ne sont pas encore toutes identifiées et bon nombre d’études sont attachées à ce sujet. C’est pourquoi différents projets ont vu le jour ces dernières années. Citons comme exemple les projets *West African monsoon modelling and evaluation* (WAMME ; Druyan *et al.*, 2010) et *African multidisciplinary monsoon analysis* (AMMA ; Redelsperger *et al.*, 2006). Ces derniers s’efforcent de progresser dans l’acquisition et la modélisation de données climatiques pour mieux étudier la MOA (Dosio et Panitz, 2016).

3. Etat de l'art

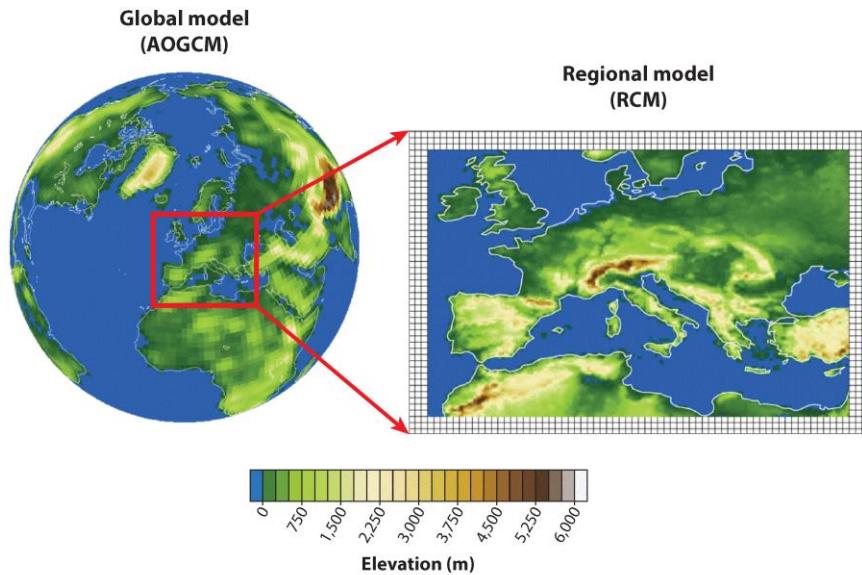
3.1. Incertitudes sur les données in situ en Afrique

Nous avons déjà mentionné au chapitre 1 la difficulté d'obtenir des données avec une bonne représentativité spatiale en Afrique. Cependant, certaines institutions (CRU, UDEL, GPCC, TRMM, ..., cf. 5.1.2.) proposent aujourd'hui des données d'observation à l'échelle du continent. Ces données sont produites via une assimilation de différentes sources de données in situ suivie d'une interpolation sur une grille régulière. Le nombre de stations utilisées et les techniques d'interpolation pour produire ces données maillées varient d'une institution à l'autre. De plus, des données satellitaires peuvent également être assimilées en plus des stations au sol (TRMM et GPCP par exemple). De ce fait, des différences significatives peuvent exister entre les différentes données maillées disponibles (Nikulin *et al.*, 2012 ; Sylla *et al.*, 2013 ; Dosio *et al.*, 2015). Dosio *et al.* (2015) ont évalué les différences qui existaient entre ces dernières. Ils ont montré que les données TRMM et GPCP affichaient des biais relatifs allant jusque 50%. Les différences entre les données qui ne comportent que des stations au sol sont plus faibles (globalement ces données utilisent les mêmes stations) et résulteraient des techniques d'interpolation différentes et du nombre de stations dans les régions mal représentées. De plus les différences sont encore plus importantes si l'on utilise des statistiques plus poussées comme la fréquence, l'intensité et la durée des pluies (Sylla *et al.*, 2013).

3.2. Modèles de circulation générale et modèles climatiques régionaux

Il existe deux grands types de modèles climatiques. Les modèles de circulation générale (GCM ou modèles globaux) et les modèles climatiques régionaux (RCM). Les premiers offrent la possibilité de simuler le climat de la planète entière alors que les deuxièmes ne simulent qu'une partie du globe. Les GCM sont grandement utilisés dans l'étude du changement climatique et permettent ainsi de faire des projections climatiques sur plusieurs centaines d'années avec différents scénarios d'émission (IPCC, 2014). Bien qu'utiles dans ce type d'applications, ils n'offrent pas la possibilité d'étudier correctement les climats régionaux. En effet, leur résolution temporelle et spatiale (de l'ordre de la centaine de kilomètres) grossières ne permettent pas de prendre en compte les phénomènes de petites échelles comme les nuages convectifs, les brises de mer ou encore les effets locaux de la topographie (Trzaska et Schnarr, 2014 ; Xu *et al.*, 2015). Par exemple, en Afrique, les GCM peuvent représenter correctement la tendance des précipitations lors de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle mais affichent tout de même des difficultés à simuler des phénomènes complexes comme la MOA (Laprise *et al.*, 2013). Les RCM, avec leur résolution bien plus

fine (10 Km), sont quant à eux capables de résoudre les phénomènes négligés ou fortement paramétrés par les GCM.



AR Giorgi F, Gutowski Jr WJ. 2015.
Annu. Rev. Environ. Resour. 40:467–90

Figure 3-1: Vue schématique de la technique de régionalisation. On peut noter l'amélioration de la représentation du relief et du trait de côte par le RCM. Depuis Giorgi et Gutowski (2015)

Un RCM doit être forcé à chaque pas de temps, c'est-à-dire qu'il faut fournir humidité, température et vents (direction et vitesse) aux frontières de son domaine d'intégration. Pour obtenir ces données de forçage, il est nécessaire d'utiliser les sorties d'un modèle de plus grande échelle et donc le plus couramment d'un GCM. Ainsi on part de la résolution grossière des GCM pour produire des résultats à la résolution plus fine des RCM (Figure 3-1). Au final, les RCM permettront de prendre en compte les phénomènes de méso-échelles et de corriger certains biais des GCM.

3.3. Le projet CORDEX en Afrique

Au lancement du projet CORDEX, il fut décidé de ne commencer qu'avec une seule région afin de tester les méthodes mises en place. L'Afrique fut alors désignée pour lancer le projet. Deux raisons principales ont justifié ce choix (Giorgi *et al.*, 2009) : (1) La vulnérabilité importante de l'Afrique face au changement climatique. En effet, des secteurs comme l'agriculture, la gestion de l'eau ou la santé publique sont aujourd'hui très sensibles au climat en Afrique. Les épisodes de sécheresse au Sahel dans les années 70 et 80 illustrent très bien ce fait ; et (2) le manque, à l'époque, de simulations du climat en Afrique réalisées par des RCM.

En regroupant ainsi un grand ensemble de simulations conduites par différents RCM sur même domaine d'intégration, il est possible premièrement, de comparer les sorties des différents RCM entre elles et deuxièmement, de faciliter les analyses du climat en Afrique.

Le projet étant maintenant lancé depuis quelques années, plusieurs institutions ont fourni les résultats de leur modèle (cf. Tableau 5).

3.3.1. Finalités et résultats

Comme expliqué au point 3.2., les résultats, obtenus grâce aux RCM, ont pour objectif de pallier le manque de données d'observation en Afrique, pourtant essentielles à la compréhension des particularités du climat. Bien entendu, avant d'utiliser ces simulations, il faudra les évaluer dans la région d'intérêt de l'étude. Une dizaine d'articles proposent ainsi une évaluation des modèles CORDEX⁴.

Ajoutons qu'un protocole a été mis en place dans la foulée du projet CORDEX. Ce dernier a pour but d'apporter plus d'informations sur le changement climatique grâce aux RCM (Giorgi et Gutowski Jr., 2015).

La première étape de ce protocole requiert un forçage des RCM par les réanalyses ERA-Interim (plus de détails seront apportés au sujet des réanalyses dans le chapitre 5). Il s'agit alors de valider les modèles sur des périodes historiques pour évaluer leurs capacités à reproduire le climat avec des conditions aux frontières « parfaites » (Giorgi et Gutowski Jr., 2015). En effet, les réanalyses sont, en principe, exemptes d'erreurs importantes pour les variables de forçage et représentent donc certainement le type de données le plus fiable pour cet usage. En procédant ainsi, il est alors possible d'évaluer les erreurs internes ou la valeur ajoutée des RCM par rapport aux réanalyses. Nikulin *et al.* (2012) ont évalué les premiers résultats des modèles CORDEX en Afrique. Pour ce faire, ils ont proposé une validation de la climatologie des précipitations uniquement. Tout en évaluant séparément chaque modèle, les auteurs ont également étudié comment se comportait la moyenne de tous les modèles (autrement dit l' « ensemble »). Ils ont ainsi constaté que tous les modèles sont capables de reproduire la distribution spatiale moyenne des précipitations en fonction des saisons. Les caractéristiques principales du cycle annuel moyen sont également correctement représentées par les modèles, malgré des biais significatifs en fonction de la région, de la saison et du modèle considéré (Figure 3-2). Une validation de la représentation de la MOA par les RCM a

⁴ La liste des articles est placée à l'annexe 2. Cette liste se justifie, car les articles évaluant les modèles CORDEX ont été utilisés pour établir notre méthodologie.

également été proposée. Il en ressort que la plupart des modèles parviennent à représenter les maxima de précipitations en mai-juin et aout pour, respectivement, le golfe de Guinée et le Sahel. De plus, la majorité des RCM sont capables de représenter, bien que pas toujours dans les temps, l'avancée rapide des précipitations vers le Sahel à la fin du moins de juin. Enfin, il ressort de cette étude que l'ensemble des modèles produit de meilleurs résultats que les RCM pris individuellement. Cette dernière constatation a également été relevée dans d'autres études (Endris *et al.*, 2013 ; Gboganiyi *et al.*, 2014 ; Kalognomou *et al.*, 2013 ; Kim *et al.*, 2014 ; Klutse *et al.*, 2016 ; Laprise *et al.*, 2013). Tous avancent la même explication: la compensation ou l'annulation des biais entre les différents RCM utilisés.

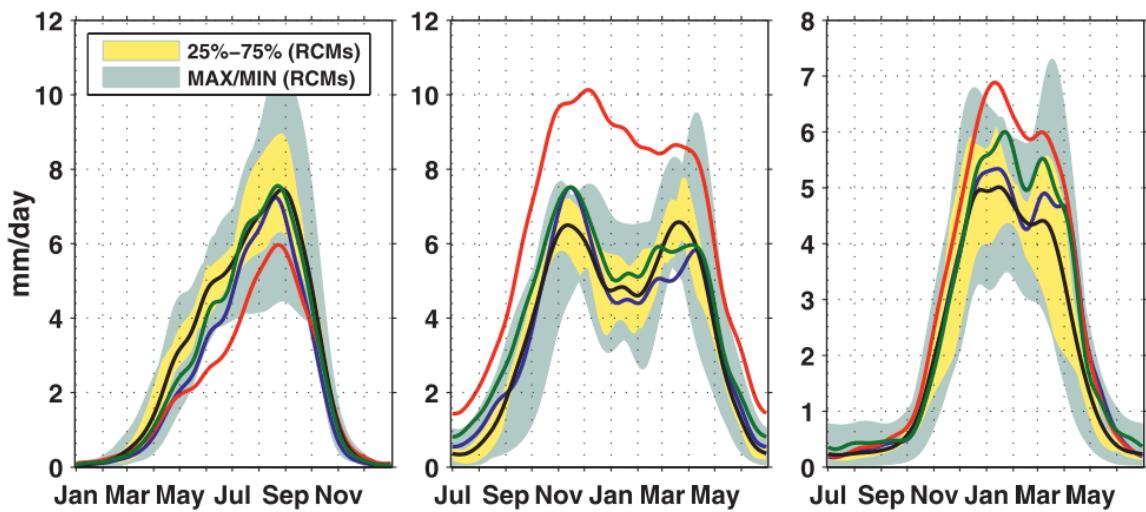


Figure 3-2: Cycle annuel des précipitations (filtré avec une moyenne glissante de 50 jours) pour (de gauche à droite) le Nord de l'Afrique de l'Ouest, le Sud du centre de l'Afrique et l'Est de l'Afrique. Les courbes vertes et bleues représentent les observations. La courbe rouge représente les réanalyses ERA-Interim. La zone grise montre l'étendue des différents RCM. Depuis Nikulin *et al.* (2012).

Kim *et al.* (2014) ont ensuite effectué une évaluation plus complète des mêmes modèles CORDEX. Celle-ci a été réalisée pour les précipitations, la température de l'air à la surface et la nébulosité. Leurs conclusions vont dans le même sens que l'étude précédente: le cycle annuel moyen et la répartition spatiale sont correctement représentés par les RCM au niveau des précipitations et des températures. La qualité des résultats dépend une nouvelle fois des régions et du modèle considéré. Par exemple, l'ensemble des modèles affichent de larges biais de précipitations dans les zones arides. De plus les modèles se comportent mieux en dehors des tropiques que dans la zone intertropicale. Cela montre, selon les auteurs, « *la difficulté de représenter correctement le cycle hydrologique et la végétation ainsi que leur interaction dans les tropiques* ». Concernant la nébulosité, la validation est moins aisée. Pour évaluer la nébulosité représentée par les modèles CORDEX, les auteurs ont utilisé des données d'observation au sol et des données satellitaires du Moderate Resolution Imaging

Spectrometer (MODIS). Ayant mis en évidence les différences importantes entre ces deux jeux de données, les auteurs n'ont pas réellement su tirer de conclusions face à la nébulosité simulée par les RCM. Cela fait apparaître ici encore combien la problématique des données climatiques en Afrique est complexe.

La deuxième étape du protocole consiste en l'évaluation de la capacité des GCM à reproduire les grands traits du climat présent. Par là, on entend la circulation générale mais aussi régionale ainsi que la reproduction de phénomènes importants comme la mousson. A la troisième étape, il s'agit de forcer des RCM avec les GCM retenus à la suite de l'étape précédente sur des périodes historiques. Enfin, dans le but d'étudier le changement climatique à l'échelle régionale, les simulations sont réalisées sur des périodes futures. Différentes études ont ainsi proposé une évaluation de GCM et de RCM forcés par ceux-ci (Buontempo *et al.*, 2015 ; Dosio et Panitz, 2016 ; Dosio *et al.*, 2015 ; Laprise *et al.*, 2013 ; Mariotti *et al.*, 2014). Il ressort de ces recherches que les GCM peuvent représenter correctement le cycle des températures et précipitations à l'échelle du continent. Cependant, une sous-estimation ou surestimation est possible en fonction du modèle utilisé. La tâche est plus compliquée pour les GCM quand l'évaluation se limite à une région. Par exemple, dans l'étude de Dosio et Panitz (2016), le GCM utilisé n'a pas été capable de représenter la saisonnalité des précipitations en Afrique du Nord. Enfin, connaissant les différents biais des GCM employés, il est alors possible d'évaluer si les RCM sont capables de les corriger ou d'y ajouter de l'information. Toujours selon les mêmes études, il semblerait que les RCM ne sont pas forcément capables de corriger les biais importants des GCM mais peuvent tout de même y ajouter de l'information grâce à leur résolution plus fine. Ainsi les RCM arrivent à mieux représenter les événements extrêmes que les GCM. Dosio *et al.* (2015) ont relevé à ce sujet que les RCM pouvaient au contraire renforcer les erreurs des GCM lorsqu'une erreur propre au RCM s'ajoute à un biais déjà présent dans le GCM.

3.4. Le Modèle Atmosphérique Régional

Le modèle MAR est initialement destiné aux régions polaires où il obtient d'excellents résultats (Fettweis *et al.*, 2012 ; Franco *et al.*, 2012 ; Navari *et al.*, 2016). Il y est largement appliqué afin d'étudier le bilan de masse en surface des calottes de glace. MAR est également appliqué sur des régions montagneuses (Brasseur *et al.*, 2002 ; Scholzen, 2015). Son usage permet alors, par exemple, d'étudier les raisons de la disparition progressive d'un glacier (Scholzen, 2015). Ajoutons que d'autres études ont également fait usage du MAR dans des régions plus tempérées comme la Belgique (Brasseur *et al.*, 2001 ; Wyard *et al.*, 2015). Enfin MAR a déjà été appliqué plusieurs fois en Afrique. Cependant, toutes les études

relevées se sont limitées à l’Ouest de l’Afrique, et ce notamment pour étudier la MOA (Gallée *et al.*, 2004 ; Kouassi *et al.*, 2010 ; Messager *et al.*, 2004 ; Ramel *et al.*, 2006).

3.4.1. Résultats en Afrique

Ces études ont permis de montrer que MAR peut simuler correctement les caractéristiques principales de la saisonnalité des précipitations, et donc l’avancée de la MOA, bien qu’il y ait une mauvaise estimation de l’intensité des pluies. En effet, cette dernière est soit surestimée (Gallée *et al.*, 2004 ; Messager *et al.*, 2004) soit sous-estimée (Ramel *et al.*, 2006 ; Kouassi *et al.*, 2010). Cependant ces études n’ont pas évalué les autres variables climatiques essentielles telles que la température, la pression atmosphérique ou encore l’humidité de l’air. Gallée *et al.* (2004) ont tout de même proposé une brève évaluation de quelques variables thermodynamiques. Ils en concluent que MAR simule « *raisonnablement bien* » les caractéristiques principales de l’atmosphère de l’Afrique de l’Ouest bien que le modèle soit trop froid dans certaines régions.

3.5. Conclusions

Nous avons pu montrer les incertitudes qui existaient dans les données d’observation disponibles en Afrique. L’évaluation de RCM en Afrique est donc complexifiée par ce manque de données de référence. Au sujet de la modélisation climatique régionale, nous avons mis en évidence que celle-ci produisait des résultats encourageants en Afrique. Cependant, la qualité des modèles varie de manière importante en fonction de la région d’évaluation, de la variable considérée et du forçage de grande échelle. Les lacunes mises en évidence devront donc être prises en considération lorsque ces RCM seront utilisés pour une application précise. De plus, il semblerait que, par compensation des erreurs, la moyenne de l’ensemble des modèles se comporte mieux que les modèles pris individuellement. C’est pourquoi il est aujourd’hui indispensable d’augmenter le nombre de RCM applicables en Afrique.

4. Objectifs

A la suite de l'état de l'art qui a été mené à la section précédente, les objectifs de cette étude peuvent maintenant être définis précisément.

Comme présentée à l'introduction, la problématique est la suivante : alors que l'Afrique constitue une des régions les plus vulnérables à la variabilité climatique, les observations manquent cruellement afin d'étudier les particularités de son climat. Deux solutions se proposent face à cette difficulté :

- Optimiser au mieux le réseau d'observations à l'aide de réanalyses et de données satellitaires, sachant que le réseau d'observations *in situ* est très peu dense, voire manquant dans certains pays.
- Améliorer la modélisation climatique régionale afin de pallier directement le manque de données d'observation de qualité.

A propos de cette deuxième solution, nous avons pu relever que tous les modèles CORDEX émettent des résultats satisfaisants sur le continent africain. C'est-à-dire qu'ils sont capables de représenter dans les grands traits le cycle annuel moyen des températures et précipitations et de simuler des phénomènes complexes comme la MOA. Cependant il a également été noté que ces modèles présentaient tout de même de nombreux biais non négligeables quand l'analyse se faisait de manière plus régionale. Ajoutons que MAR a, de manière similaire, fourni des résultats satisfaisants mais que son application ne s'est limitée qu'à l'Afrique de l'Ouest. De plus, MAR est en évolution permanente depuis sa dernière utilisation en Afrique (2012 avec l'étude de Kouassi *et al.*).

Il est, de plus, évident que dans la suite de cette recherche, nous ne pourrons pas ignorer la problématique de la fiabilité des observations *in situ* en Afrique.

Cette étude va donc s'axer finalement sur l'intercomparaison des principales sources de données climatiques en Afrique, qu'elles soient basés sur des observations de terrain ou sur des modèles. Les principaux types de données seront alors les observations, où plusieurs sources pourront être comparées, les réanalyses et enfin les modèles climatiques régionaux. Pour ces derniers, nous appliquerons donc MAR sur le domaine CORDEX Afrique afin de comparer ses résultats avec les autres modèles CORDEX.

5. Données et méthodologie

Dans cette section est exposé le fil conducteur de la méthodologie mise en place afin de répondre aux objectifs définis à la section précédente. Le chapitre commencera par la description et la comparaison des principales sources de données climatiques. Ensuite viendra une description détaillée du MAR et des simulations qui seront réalisées. Le chapitre se terminera par la présentation des différents traitements qui seront mis en œuvre afin de réaliser la comparaison des jeux de données.

5.1. Données in situ

Plusieurs données in situ, ou autrement dit d'observation, seront comparées dans le cadre de cette recherche.

5.1.1. Données in situ inédites

Pour cette étude, nous avons en notre possession une banque de données d'observation inédites. Cette dernière provient d'une collection importante de données d'observation au sol réalisée par Robert Morel. Ces observations proviennent d'environ 1460 stations dont la répartition spatiale est représentée à la Figure 5-1. Les variables disponibles sont la vitesse et la direction du vent, l'évapotranspiration, l'humidité relative, l'insolation, les précipitations, la pression de surface, la température, la tension de vapeur et la visibilité. Enfin ajoutons que ce sont les précipitations qui proposent le plus d'observations par rapport aux autres variables.

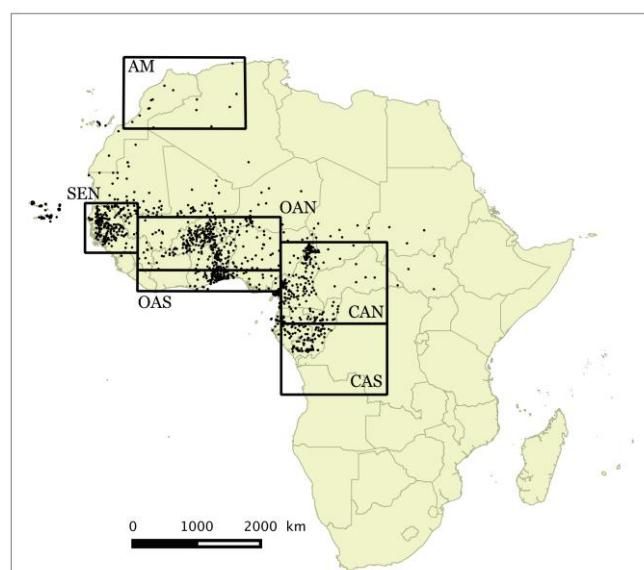


Figure 5-1 : Répartition spatiale des stations de la banque de données inédite. Les différentes sous-régions d'évaluation sont également représentées (section 5.7.2.2.). AM : Algérie/Maroc, SEN : Sénégal, OAN et OAS : Ouest de l'Afrique Nord et Sud, CAN et CAS : centre de l'Afrique Nord et Sud

5.1.2. Données d'observation maillée

L'utilisation de ce type de données sera double : d'une part, elles permettront de réaliser une évaluation des données inédites, d'autre part, elles viendront compléter ces dernières pour l'évaluation du MAR et des autres modèles régionaux. En effet, les données inédites n'affichent pas une représentativité spatiale suffisante pour être utilisées seules (Figure 5-1). Ces observations supplémentaires proviennent de différentes institutions : le Climatic Research Unit (CRU ; Harris et al. 2013), l'université de Delaware (UDEL ; Matsuura et Willmott, 2012) et le Global Precipitation Climatology Centre (GPCC ; Schneider et al., 2011). Les CRU, UDEL et GPCC sont des données d'observation provenant de stations au sol qui sont ensuite interpolées sur une grille régulière de 0.5 degrés de résolution. Les données assimilées et les méthodes d'interpolation varient en fonction de l'institution et c'est notamment pour cela que différents jeux de données ont été choisis. Ajoutons que l'idée de départ est d'exploiter au mieux les données inédites. Pour ce faire, la répartition temporelle du nombre d'observations inédites disponibles a été inspectée. Le choix de la période d'évaluation s'est alors porté sur les 11 années allant de 1990 à 2000. En raison du peu d'observations disponibles pour les années après 2000, il n'a malheureusement pas été possible d'utiliser des jeux de données mêlant données d'observation au sol classiques et données satellitaires comme les GPCP (Global Precipitation Climatology Project ; Adler et al., 2003) ou les TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission ; Huffman et al., 2007).

Donnée	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Variables	Référence
Données inédites	Ponctuelle	Journalière	Précipitation Température Pression au sol	Robert Morel
CRU	0.5° x 0.5°	Mensuelle	Précipitation Température	Harris et al. 2013
GPCC	0.5° x 0.5°	Mensuelle	Précipitation	Schneider et al., 2011
UDEL	0.5° x 0.5°	Mensuelle	Précipitation Température	Matsuura et Willmott, 2012

Tableau 1: Récapitulatif des données in situ

5.2. Traitements des données in situ

Lors de l'utilisation des données d'observation inédites, un filtrage des valeurs aberrantes a été appliqué. Pour qu'une valeur soit gardée, il faut que la différence entre celle-ci et la moyenne des observations à la station soit inférieure à trois fois la valeur de l'écart-type des observations à la station. Ce filtrage est appliqué trois fois à une même série temporelle. Les précipitations variant fortement durant l'année, le filtrage ne leur a pas été appliqué.

Enfin, lors de la construction des séries temporelles, une attention particulière a été accordée au nombre d'observations disponibles. Pour la comparaison avec les données maillées, la résolution temporelle des données inédites doit passer de journalière à mensuelle. Pour qu'une moyenne (température et pression de surface) ou une somme (précipitations) mensuelle soit calculée, il doit y avoir 21 jours d'observations disponibles pour le mois. Ensuite lors du calcul des statistiques, la série temporelle doit au moins s'étaler sur trois ans.

5.3. Réanalyses

Les réanalyses représentent également une source importante de données climatiques pour l'Afrique. Nous avons donc décidé de les inclure dans notre intercomparaison. Les réanalyses permettent, comme leur nom l'indique, de produire une analyse du climat à un instant t . Pour ce faire, les données météorologiques provenant de différentes sources (stations au sol, satellites, etc.) sont assimilées pour ensuite être re-modélisées par un modèle de prévision. Ces réanalyses permettent alors de reproduire le climat à l'échelle du globe pour plusieurs décennies. Ajoutons que la qualité des réanalyses, en une région, dépend donc de la disponibilité des observations lors de l'assimilation. Trois réanalyses seront utilisées dans le cadre de cette recherche (Tableau 2).

Réanalyses	Institut	Résolution	Référence
NCEP/NCAR 1	NCEP	2.5°	Kalnay et al. (1996)
NCEP II	NCEP	2.5°	
ERA-Interim	ECMWF	1°	Dee et al. (2011)

Tableau 2: Description des réanalyses. Utilisées dans cette étude NCEP/NCAR pour National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Resear. ECMWF pour European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

5.4. Modélisation climatique régionale

5.5. MAR

Pour rappel, les applications et résultats du MAR ont déjà été discutés au point 3.4.1.

Une description complète du MAR est disponible dans Gallée et Schayes (1994). MAR est un RCM composé d'un module atmosphérique à 3 dimensions couplé avec un schéma de transfert entre le sol et l'atmosphère à une dimension (Soil Ice Snow Vegetation Atmosphere Transfer ou SISVAT ; De Ridder et Gallée, 1998). La coordonnée verticale est donnée par la pression normalisée sigma (σ) :

$$\sigma = \frac{p - p_t}{p_s - p_t}$$

p étant la pression au niveau considéré, p_s pression la pression de surface et p_t la pression constante au sommet (Fettweis, 2006).

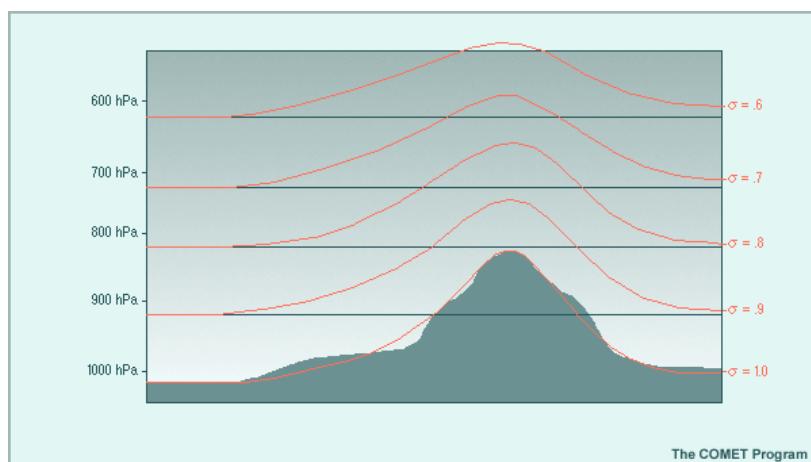


Figure 5-2 : Exemple de coordonnée σ . Depuis <http://www.met.tamu.edu/class/metr452/models/2001/vertres.html>

Ce type de coordonnée est utile car, comme on peut le voir à la Figure 5-2, il permet une prise en compte de la topographie.

Le schéma radiatif solaire provient de Fouquart et Bonnel (1980) et celui des longues longueurs d'onde de Morcrette (2002). Le cycle hydrologique comprend un modèle de la microphysique des nuages avec équations de conservation des différentes particules des nuages (Gallée, 1995). La partie atmosphérique du modèle est adaptée aux régions tropicales grâce au schéma d'ajustement convectif de Bechtold et al. (2001) (Gallée et al., 2004). Enfin, les flux verticaux aux alentours de la couche limite planétaire sont paramétrés selon le modèle de turbulence de Duynkerke (1988).

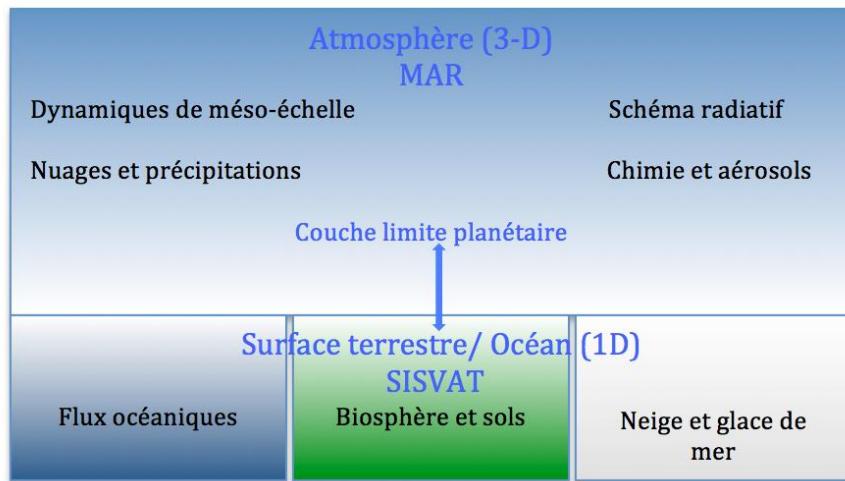


Figure 5-3: Couplage MAR/SISVAT. Depuis Fettweis (2006).

SISVAT⁵ est un modèle vertical à une dimension. Il est couplé à l'atmosphère à travers des échanges de rayonnements, de turbulence et de flux de chaleur sensible et latente. Il inclut des modules de végétation (De Ridder et Schayes, 1997), de neige (Gallée et al., 2001) et de glace (Lefebvre et al., 2003). Comme Gallée et al. (2004) le précisent, il a déjà été validé sur la région du Sahel (Derive et al., 2003 a et b). Comme pratiquement seul le module de végétation sera utilisé, celui-ci seul sera décrit ici. Le potentiel hydrique du sol et la conductivité hydraulique sont définis selon Clapp et Hornberger (1978). L'albédo du sol varie en fonction de l'humidité du sol selon McCumber et Pielke (1981) et l'albédo du sol sec est prescrit en fonction du type de sol. La couverture de végétation est obtenue via le produit GlobCover V.2.2 Land Cover (trouver référence).

5.5.1. Simulations

5.5.1.1. Choix du forçage

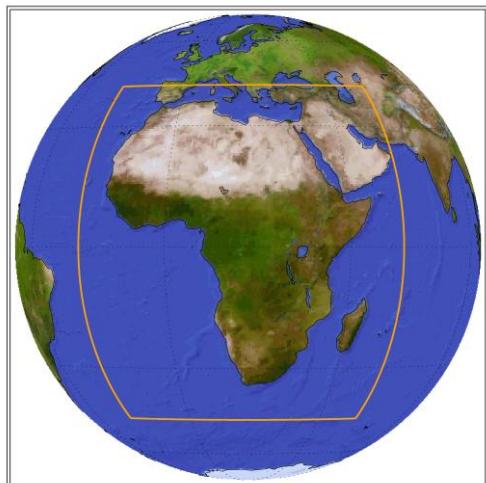
Comme il s'agit de la première application du MAR sur le domaine CORDEX Afrique, il a été choisi d'utiliser les réanalyses comme forçage. En effet, elles sont considérées comme des conditions « parfaites » aux frontières (cf. 3.3.1.). Dès lors, comme dit précédemment au chapitre 2, ce forçage permettra de se focaliser sur les erreurs internes du MAR. En effet, un forçage par un GCM pourrait parasiter les résultats par les biais du GCM. On suppose en effet ici que les réanalyses présentent moins de biais que les GCM. Comme pour l'intercomparaison, les réanalyses utilisées sont les NCEP/NCAR I et les ERA-

⁵ La description de SISVAT est reprise du travail de Gallée et al. (2004)

Interim. Ces deux simulations différentes (MAR-NCEP et MAR-ERA) permettront de déterminer quel forçage produit les meilleurs résultats.

5.5.1.2. Domaine d'intégration

Le domaine d'intégration est défini par CORDEX⁶. Le Tableau 3 reprend toutes les informations concernant le domaine tel que défini par CORDEX et la Figure 5-4 le situe dans l'espace.



Centre	17.60 Est ; 1.32 Sud
Etendue en longitude	24.64 Ouest - 60.28 Est
Etendue en latitude	42.24 Nord - 45.76 Sud
Résolution	0.44° ≈ 50Km

Tableau 3: Récapitulatif du domaine CORDEX Afrique

Figure 5-4 : Domaine CORDEX Afrique. Depuis la source mentionnée en bas de page

Les ERA-Interim que nous avons à disposition sont recoupées automatiquement en fonction des continents lors de leurs rapatriements sur les serveurs du laboratoire. Ce traitement automatique génère malencontreusement des sorties trop courtes pour pouvoir être utilisées comme forçage sur le domaine CORDEX Afrique. En d'autres termes, le domaine CORDEX est légèrement plus grand, en latitude, que les fichiers ERA-Interim qui sont disponibles. Ainsi il a été décidé de modifier légèrement le domaine d'intégration :

⁶ Plus d'informations sur

http://cordex.org/index.php?option=com_content&view=article&id=103&Itemid=489, consulté en aout 2016.

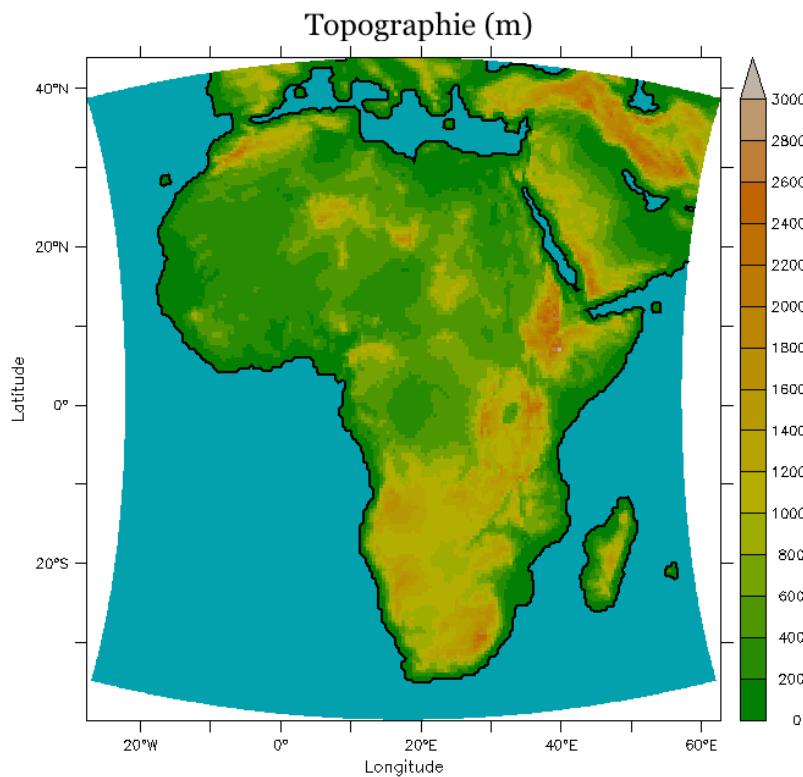


Figure 5-5 : Domaine d'intégration

Centre	17.60 Est ; 1.32 Sud
Etendue en longitude	27.65 Ouest – 62.85 Est
Etendue en latitude	43.85 Nord – 39.82 Sud
Résolution	50Km

Tableau 4: Récapitulatif du domaine d'intégration

5.5.2. Configuration du MAR

Dans le but de calibrer au mieux MAR, plusieurs simulations tests ont été réalisées. L'analyse de biais principaux ainsi produits permet de mettre en place des modifications afin de les corriger au mieux.

Les premiers biais relevés montraient une sous-estimation importante des températures dans les régions désertiques (Sahara et péninsule arabique).

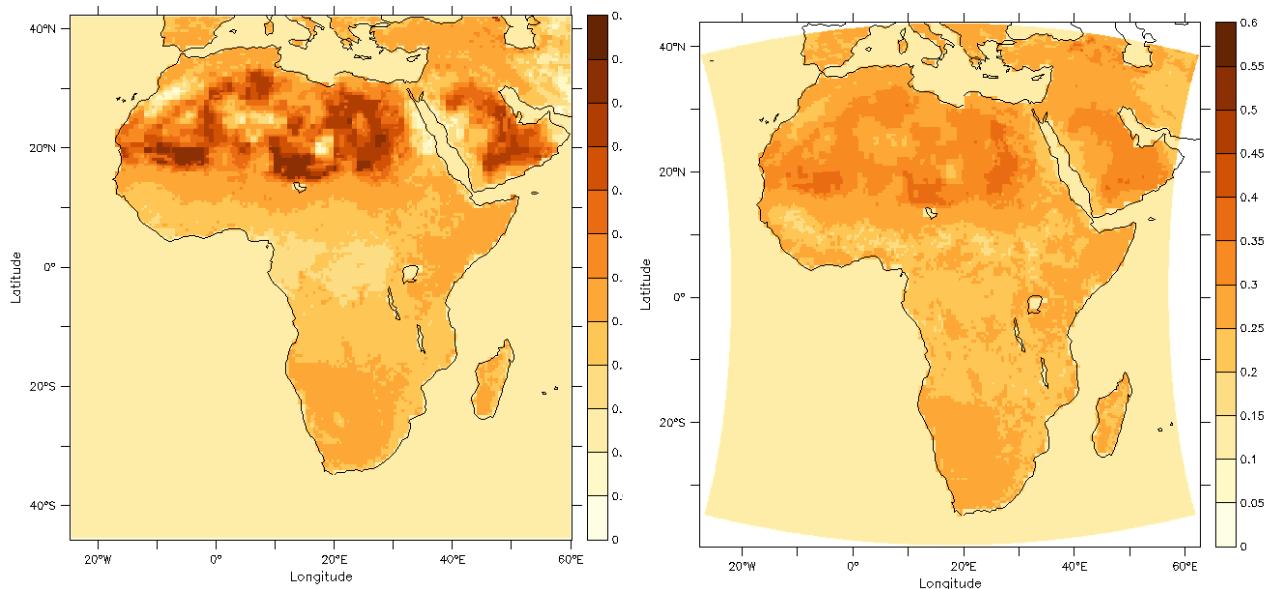


Figure 5-6 : Albédo avant (gauche) et après (droite) modification

Après investigation, il a été remarqué que l’albédo du sol était bien trop élevé en ces régions (Figure 5-6). Pour le diminuer, la correction de l’albédo en fonction de l’humidité du sol de McCumber et Pielke (1981) a été modifié et la formule suivante a été implantée dans le code du MAR afin de réduire les valeurs extrêmes de l’albédo :

$$\text{alb\acute{e}do} = \text{alb\acute{e}do} + (0.3 - \text{alb\acute{e}do})/2$$

Des valeurs plus proches de la réalité ont alors été ainsi produites. En effet, le Sahara et la péninsule arabique affichaient un albédo allant jusque 0.6 dans la première simulation. Après correction, l’albédo de ces mêmes régions ne se limitait plus qu’à 0.4 (Figure 5-6).

Des biais importants étaient également repérables au niveau des précipitations, MAR en simulait systématiquement trop. L’intervalle de temps entre deux appels de la routine de convection profonde a alors été augmenté.

5.6. Modèles CORDEX

En plus des différentes données d’observation, des réanalyses et du MAR, nous comparerons également les résultats des RCM ayant été appliqué sur le domaine CORDEX Afrique. Sept modèles ont ainsi été ajoutés à notre banc de comparaison (Tableau 5).

RCM	Institutions	Version
CCLM	CCLM Community	4.8.17
CRCM	Université du Québec, Canada	5
HIRHAM	Danmarks Meteorologiske Institut, Danemark	5
HadGEM3	Met Office, Royaume-Uni	/
RACMO	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, Pays-Bas	2.2
RCA	Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, Suède	4
REMO	Max-Plank-Institut für Meteorologie	2009

Tableau 5 : Modèles CORDEX repris pour l'étude

5.7. Intercomparaison

5.7.1. Critique des données in situ et réanalyses

Comme aucune donnée d'observation n'est parfaite, il se doit d'établir une critique pour connaître les faiblesses des différents jeux de données utilisés ici. Le problème est souvent le même dans ce genre d'exercice (et ce principalement pour l'Afrique) : le manque d'une référence pour une critique objective des observations. Les données inédites seront donc comparées aux données maillées (CRU, UDEL, GPCC) et aux réanalyses. Dans une première analyse (non présentée dans les résultats), les stations qui montraient un trop grand désaccord avec les données maillées et les réanalyses ont été rejetées. Si les données maillées affichent une bonne cohérence avec les données inédites, elles pourront être utilisées pour l'évaluation du MAR et des modèles CORDEX sur tout le domaine d'intégration.

5.7.2. Evaluation des résultats du MAR

Il s'agit de la première application du MAR sur l'intégralité de l'Afrique, dès lors une évaluation des ses résultats est requise.

5.7.2.1. Evaluation sommaire

Dans un premier temps, une évaluation du MAR assez sommaire sera proposée. Cette évaluation nous donnera une appréciation sur le comportement général du MAR sans entrer trop profondément dans les détails. Pour les températures un biais moyen mensuel sera calculé alors que pour les précipitations, il sera calculé en fonction des sommes annuelles.

5.7.2.2. Evaluation de la saisonnalité reproduite par MAR

Comme dit précédemment, la saisonnalité reproduite par MAR sera également évaluée.

Dans un premier temps, la méthode du point précédent sera appliquée ici mais en ne comptant que les mois de janvier, février et mars (JFM) pour l'hiver boréal et les mois de juin, juillet et aout (JJA) pour l'été boréal.

Deuxièmement, différentes régions d'évaluation ont été établies (Figure 5-1). Elles ont été définies selon plusieurs articles traitant des modèles CORDEX (Endris et al., 2013 ; Hernández-Díaz et al., 2013 ; Laprise et al., 2013 ; Panitz et al., 2014 ; Dosio et al., 2015 ; Dosio et Panitz, 2016). Certaines régions ont légèrement été modifiées afin de prendre en compte le plus de stations possible. Ces sous-régions d'évaluation permettront de pallier le problème que pose la variation de la saisonnalité en fonction de la latitude. En effet, comme nous l'avons fait remarquer à l'état de l'art, le continent africain s'étale longuement en longitude. Il en résulte que la durée et le positionnement des saisons dans l'année varie fortement au sein de notre domaine d'intégration. La région CAS (voir Figure 5-1) a finalement été rejetée, car le nombre d'observations n'y était pas suffisant. Au sein de chaque région sera réalisée une climatologie des deux variables à évaluer (température et précipitations). Pour produire la comparaison la plus objective possible, seuls les pixels⁷ représentés par au moins une station seront comptés dans la moyenne de la sous-région d'évaluation.

5.7.2.3. Evaluation de la variabilité interannuelle reproduite par MAR

La variabilité interannuelle est un point essentiel du climat en Afrique, comme l'attestent les années de sécheresses pouvant survenir dans des régions comme le Sahel. Il est dès lors primordial pour un modèle climatique de capturer correctement cette variabilité s'il

⁷ Il s'agit ici des pixels des modèles et données d'observations maillées.

veut s'avérer utile dans une étude du climat africain (étude du changement climatique en effectuant des projections par exemple).

Pour calculer la variabilité interannuelle, nous utiliserons la formule suivante :

$$Var. \text{ int.} = \frac{X - \bar{X}}{\text{écart type } (X)}$$

X étant la moyenne (température) ou la somme (précipitations) annuelle, \bar{X} étant la moyenne des valeurs annuelles des observations. La variabilité interannuelle calculée ici est donc standardisée par l'écart-type des observations. Une valeur supérieure à 1 (ou inférieure à -1) sera alors considérée comme significative. Dans le cas contraire, cette valeur ne peut être discernée du bruit des mesures (Fettweis, comm. pers., 2016).

5.7.3. Comparaison des RCM

La méthodologie de l'évaluation du MAR sera également appliquée aux différents modèles CORDEX afin d'établir une critique de la modélisation régionale en Afrique. Ce point permettra également d'affuter l'évaluation du MAR. En effet, la comparaison permettra de voir si MAR produit des résultats acceptables par rapport aux autres RCM.

5.7.4. Valeur ajoutée

La modélisation régionale est généralement plus couteuse en temps de calcul que la modélisation globale. Dès lors elle doit pouvoir apporter une information supplémentaire à cette dernière pour pouvoir se justifier. Dans notre cas, nous avons utilisé deux réanalyses comme conditions limites aux frontières. Nous évaluerons donc si MAR est capable d'apporter une information plus fine que les réanalyses. Pour ce faire nous comparerons les biais des réanalyses aux biais du MAR. Nous proposerons également une valeur chiffrée à l'aide la formule suivante (Dosio et al. 2015) :

$$VA = \frac{(X_{rea} - X_{obs})^2 - (X_{MAR} - X_{obs})^2}{\max((X_{rea} - X_{obs})^2, (X_{MAR} - X_{obs})^2)}$$

Ainsi la valeur sera positive dans le cas où l'erreur des réanalyses est plus grande que l'erreur du MAR. La normalisation par le maximum des deux erreurs permet d'avoir des valeurs comprises entre 1 et -1.

6. Résultats

La présentation des résultats suivra, point par point, la méthodologie présentée au chapitre précédent. En premier lieu est proposé la comparaison des différentes données d'observation disponibles. Ensuite viendra l'évaluation du MAR et des différents modèles CORDEX selon différentes climatologies. Enfin les valeurs absolues des températures et précipitations des observations sont placées aux Annexes 3 et 4.

6.1. Evaluation des données d'observation

6.1.1. Représentativité spatiale

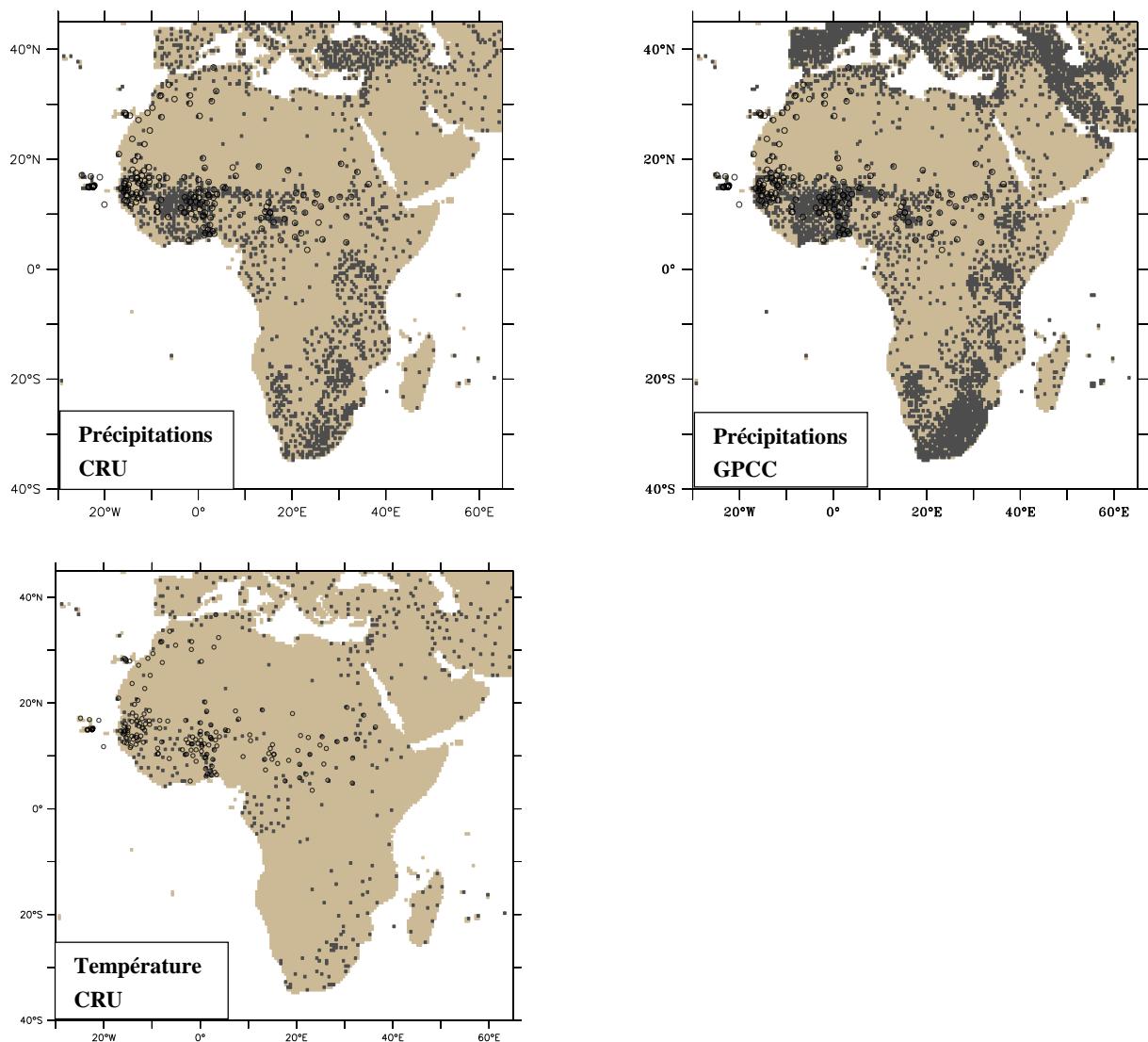


Figure 6-1: Répartition spatiale des stations des données inédites (cercles) et des différentes données maillées (pixels gris) en fonction de la variable sur la période 1990-2000.

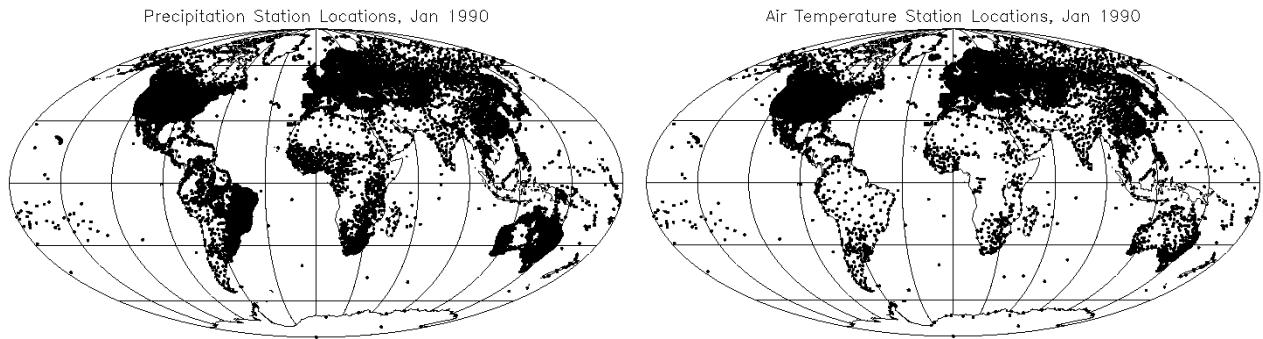
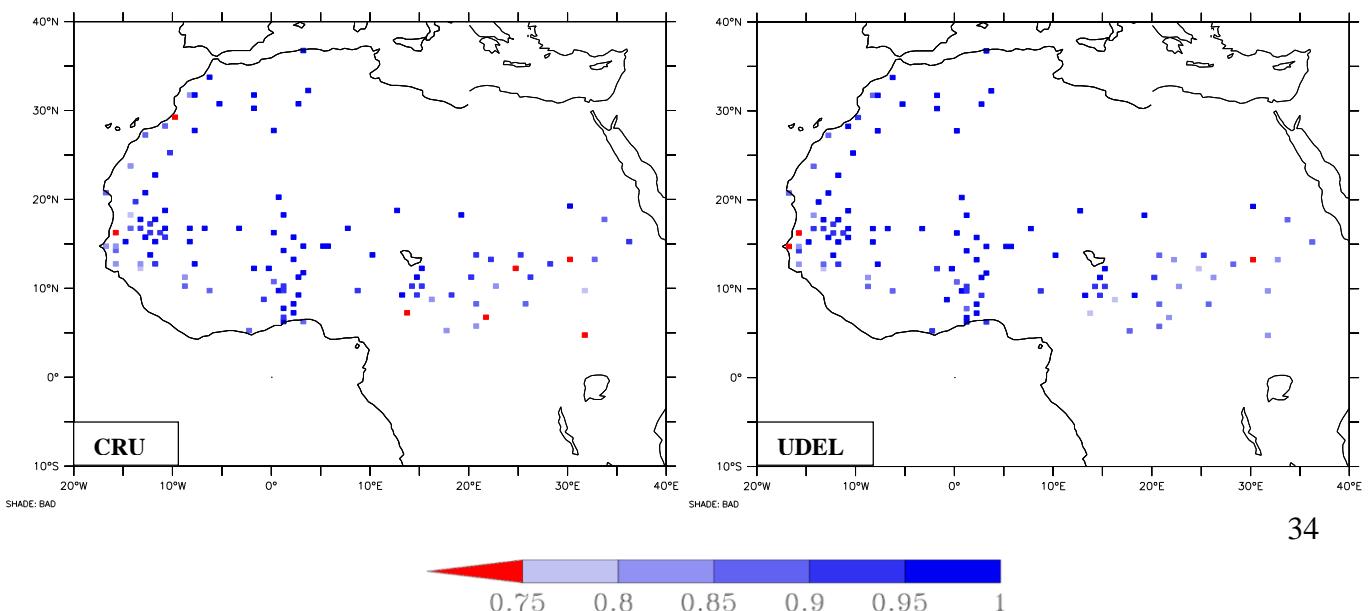


Figure 6-2 : Répartition spatiale des stations des données UDEL pour les précipitations (gauche) et les températures (droite).

Le nombre de stations varie en fonction du jeu de données et de la variable considérée (Figure 6-1 et Figure 6-2). En effet, les stations mesurant les précipitations sont plus nombreuses quel que soit le jeu de données utilisé. Notons que les données du GPCC comportent plus de stations que les autres sources. On remarquera également que, si le nombre de stations varie en fonction de la source considérée, la répartition spatiale reste, quant à elle, globalement la même. Enfin, il est intéressant de noter que les stations des données inédites sont, en plusieurs endroits, presque parfaitement superposées à celles des données maillées.

6.1.2. Comparaison des différents jeux de données

Pour comparer les différentes sources de données entre elles, nous avons décidé d'utiliser les stations des données inédites comme référence. Une comparaison est alors faite par rapport aux quatre pixels des données maillées les plus proches des stations inédites. Une moyenne pondérée par la distance entre la station et les pixels relevés est alors calculée. Le biais moyen mensuel (Figure 6-4) et la corrélation (Figure 6-3 et Figure 6-5) entre les données inédites (passées en moyennes mensuelles, cf. 5.2.) et les différentes données maillées ont ensuite été calculés.



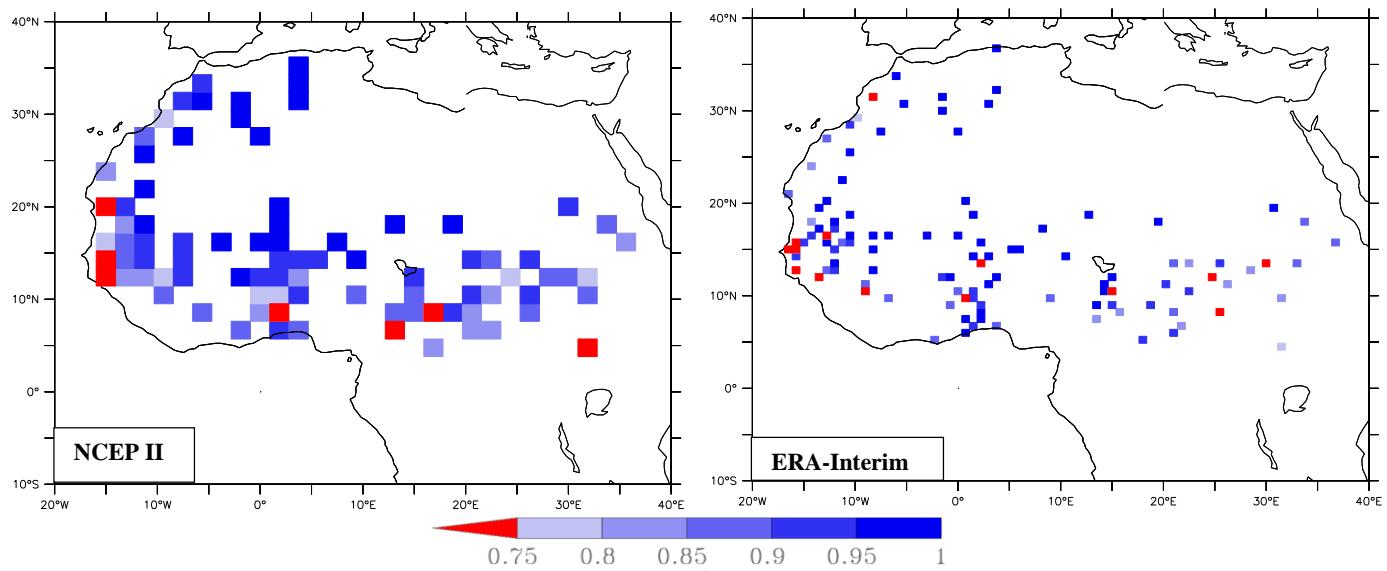


Figure 6-3 : Corrélation des températures mensuelles entre les données maillées (page précédente), les réanalyses et

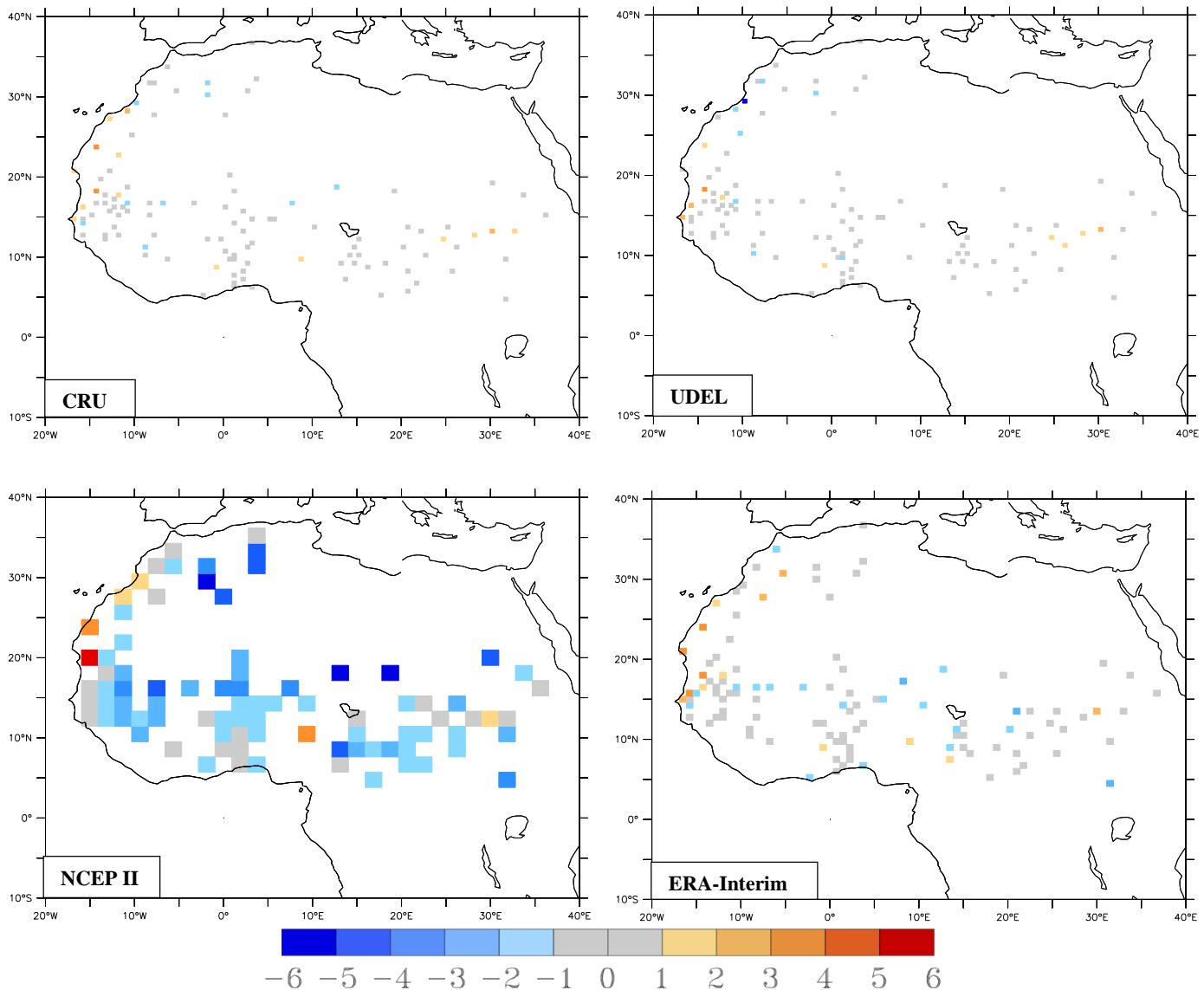


Figure 6-4 : Biais moyens des températures mensuelles ($^{\circ}\text{C}/\text{mois}$) entre les réanalyses, les données d'observations maillées et les stations (données maillées - données indépendantes) pour la période 1990-2000.

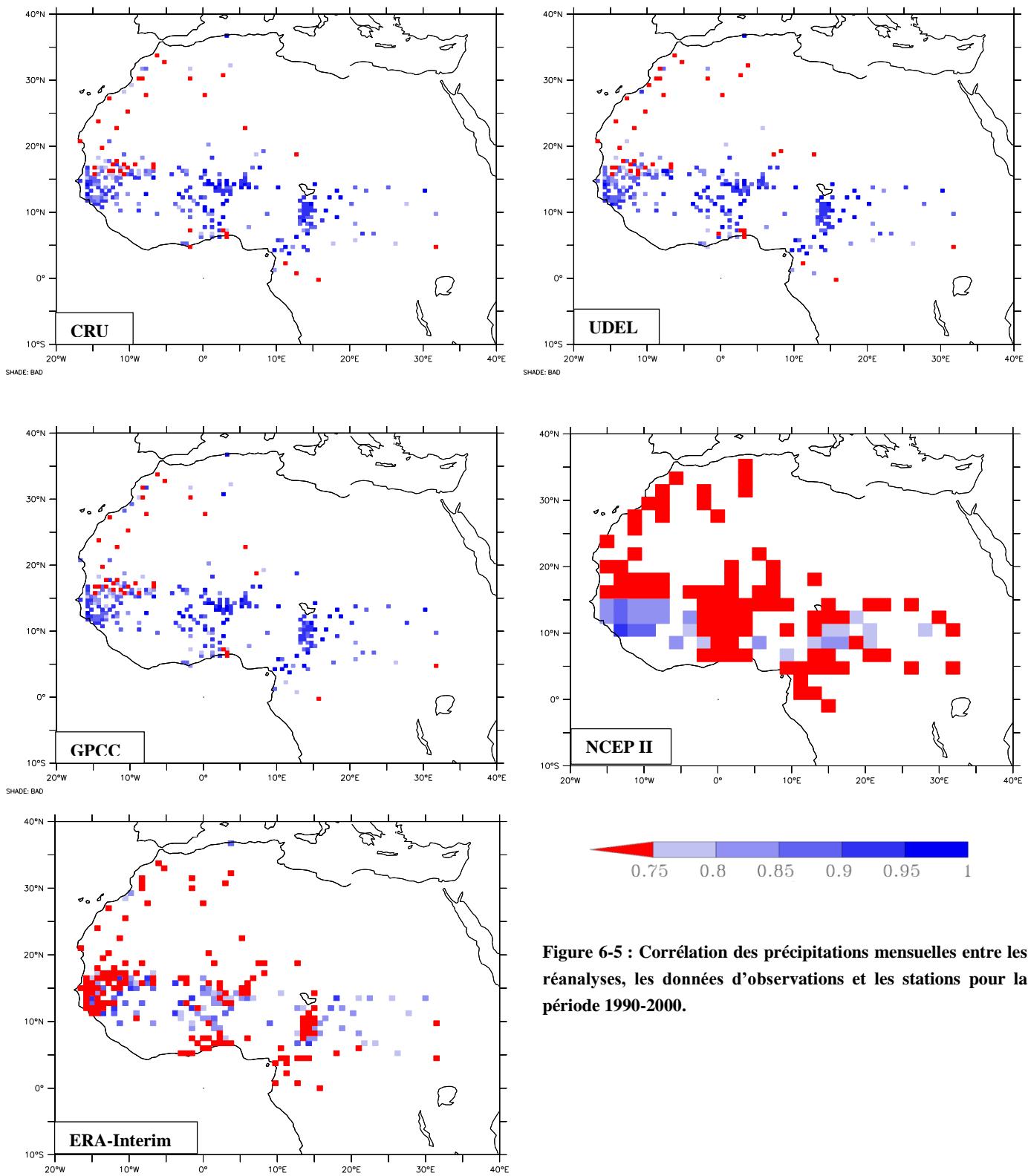


Figure 6-5 : Corrélation des précipitations mensuelles entre les réanalyses, les données d'observations et les stations pour la période 1990-2000.

Au niveau des températures, nous pouvons noter une corrélation significative (>0.75) entre la majorité des stations et les différentes sources de données (Figure 6-3). Les données d'observation maillées (CRU et UDEL) affichent toutefois de meilleurs résultats que les réanalyses. Même constatation pour les biais moyens, ceux-ci sont en effet plus faibles lorsque l'on compare les stations aux données d'observation maillées. De plus, les biais des données CRU et UDEL sont, pour la majorité des stations, compris entre -1°C et 1°C (Figure 6-4).

Les précipitations reproduites par les réanalyses ne semblent pas conformes à ce qui est réellement observé. Les corrélations sont de fait non significatives pour la plupart des stations. Les ERA-Interim montrent des résultats légèrement plus satisfaisants que les NCEP mais restent peu fiables. Par contre les données d'observation maillées (CRU, UDEL et GPCC) sont très bien corrélées à la majorité des stations.

6.1.3. Conclusions

Ces premiers résultats nous apportent des éléments concrets pour la critique de trois types de données différents : les données in situ provenant de nos stations, les données in situ ayant subi une série de traitements pour pouvoir être interpolées sur une grille et enfin les réanalyses, données hybrides entre observation et modélisation. En prenant les données inédites comme référence, les données in situ maillées montrent les meilleurs résultats. En effet, les précipitations des réanalyses sont assez mal reproduites (non-assimilées dans les réanalyses) alors que les températures (assimilées dans les réanalyses) sont bonnes.

L'excellente cohérence qui existe entre nos données in situ et les données d'observation maillées, qui offre une meilleure couverture spatio-temporelle que nos données inédites, va nous permettre d'utiliser ces dernières comme référence pour l'évaluation du MAR et des modèles CORDEX. Il ne semble pas exister de grandes différences entre les données CRU, UDEL et GPCC (Annexes 5 et 6). Dès lors, il sera difficile de prendre une mauvaise décision lors de la sélection d'une référence. Vu le nombre d'observations plus important et les résultats légèrement meilleurs des GPCC, ce jeu de données a été retenu pour l'évaluation des précipitations. Concernant les températures, le choix aurait pu se porter aussi bien sur les CRU que les UDEL. Cependant, les résultats, quelque peu meilleurs, des données UDEL face à nos données de stations permettent de trancher et de retenir cette source de données pour la suite.

6.2. Evaluation du MAR

6.2.1. Comportement moyen

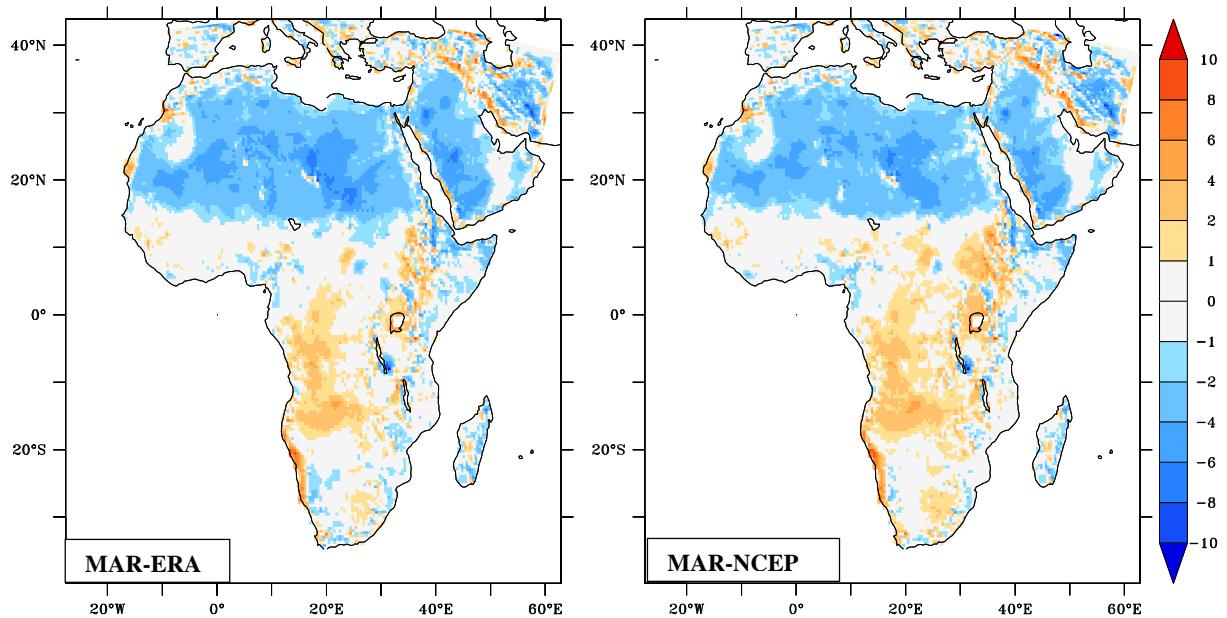


Figure 6-6 : Biais moyens mensuels des températures ($^{\circ}\text{C}/\text{mois}$) sur la période 1990-2000 (MAR – UDEL).

Le RCM MAR sous-estime les températures aux latitudes du Sahara et de la péninsule arabique. Ces régions affichent un biais moyen de -2°C à -6°C (Figure 6-6). MAR reproduit mieux les températures dans le reste du domaine où il y est plutôt trop chaud (de 1°C à 4°C). Notamment sur les hauts plateaux de l’Afrique de l’Est et dans la région centrée sur le méridien 20°E entre 0° et 20°S de latitude (République démocratique du Congo, Angola, Namibie et Botswana en autres). Un biais important intervient dans une région plus restreinte, en effet, le modèle réalise une surestimation (jusqu’à 10°C) des températures le long de la côte de la Namibie (côte Sud-Ouest entre plus ou moins 20°S et 30°S). En dehors de ces régions, le biais moyen devient négligeable (entre -1°C et 1°C).

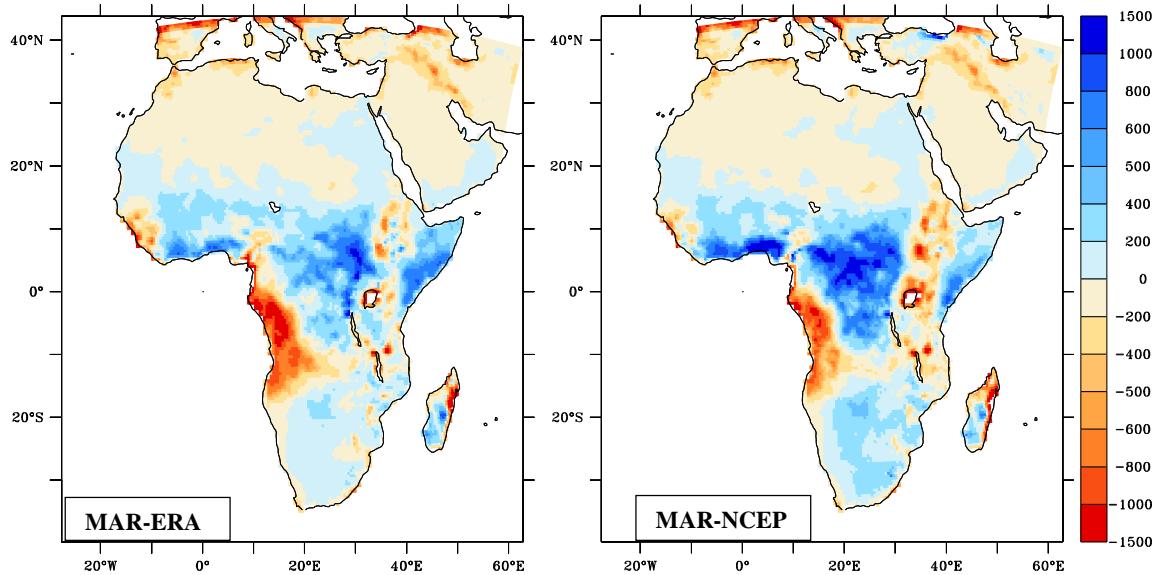


Figure 6-7 : Biais moyens annuels de la somme des précipitations (mm/an) pour la période 1990-2000 (MAR – GPCC).

MAR ne simule pas assez de précipitations sur la côte Ouest de l’Afrique entre 0° et 15° S de latitude (biais moyen annuel jusqu’à -1500mm ; Figure 6-7). MAR en simule trop au centre de l’Afrique ainsi que dans la corne de l’Afrique. Un biais humide est également visible le long de la côte du golfe de Guinée en Afrique de l’Ouest. Trop peu de précipitations sont simulées à l’extrême Ouest de cette même côte (Guinée, Sierra Leone et Gambie entre autres). Enfin les hauts plateaux de l’Afrique de l’Est ne reçoivent pas assez de précipitations.

6.2.2. Saisonnalité

6.2.2.1. Biais moyens

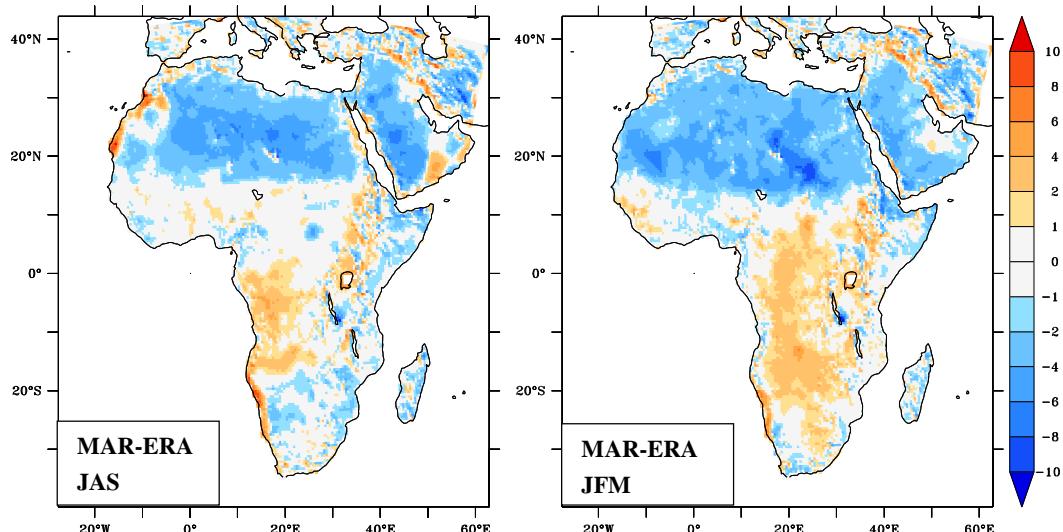


Figure 6-8 : Biais moyens mensuels des températures (°C/mois) des deux saisons étudiées (JAS et JFM) pour la période 1990-2000 (MAR – UDEL).

Les principaux biais de température relevés au point précédent (biais froid dans les latitudes du Sahara, biais chaud au centre de l'Afrique et en Namibie) sont également reproduits durant les deux saisons évaluées (JFM et JJA ; Figure 6-8). Le biais froid sur le Sahara est moins étendu durant l'été boréal (JAS).

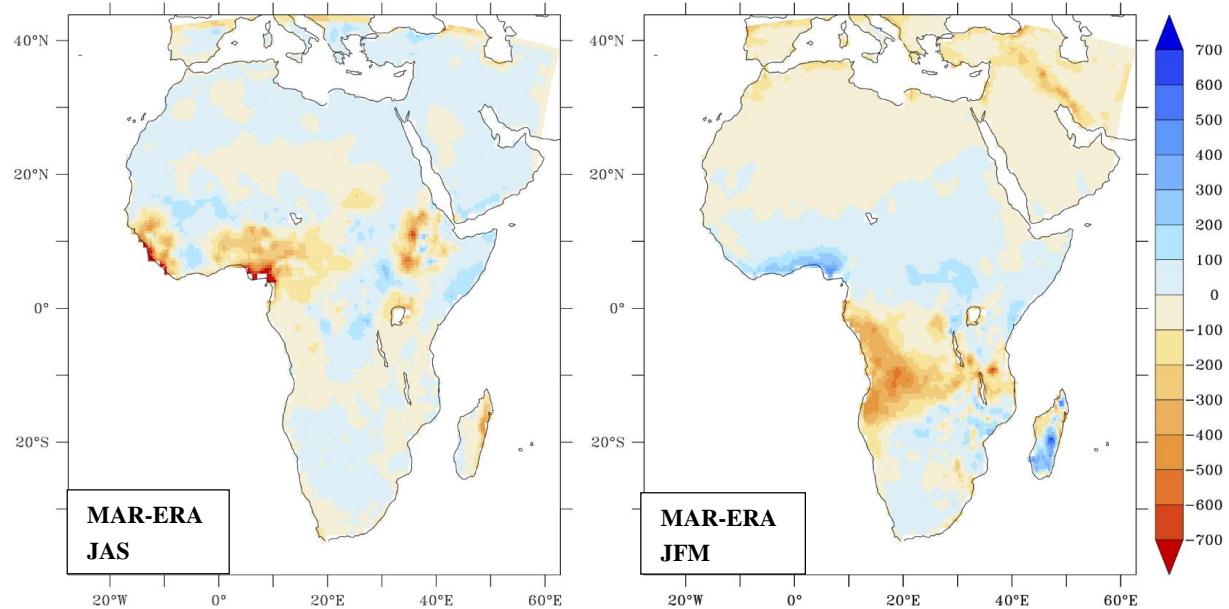


Figure 6-9 : Biais moyens saisonniers (mm/saison) de la somme des précipitations sur toute la saison (JAS et JFM) pour la période 1990 :2000 (MAR – GPCC).

Pour les précipitations (Figure 6-9), comme pour les températures, les biais des mois de JFM présentent la même répartition spatiale que les biais annuels. Pour l'été boréal (JAS), les biais sont moins étendus et donc plus localisés. De plus, MAR semble quelque peu plus proche des observations durant cette saison qui n'est pas forcément plus sèche.

En conclusion, bien qu'elles apportent une première information, ces cartes, trop générales, ne suffisent pas à évaluer de manière adéquate la saisonnalité reproduite par MAR.

6.2.2.2. Climatologie annuelle

Afin d'apporter plus d'éléments à la critique des différentes sources de données, nous avons décidé de remettre ici toutes les données d'observation maillées disponibles ainsi que les ERA-Interim. Les NCEP sont rejetées à ce stade car elles constituent la source de données la plus éloignée des observations (cf. 6.1). Afin de ne pas surcharger ce chapitre, seuls deux ou trois régions seront présentées par variable pour illustrer nos propos, le reste des figures pouvant être consulté en annexe (Annexes 7, 8 et 9).

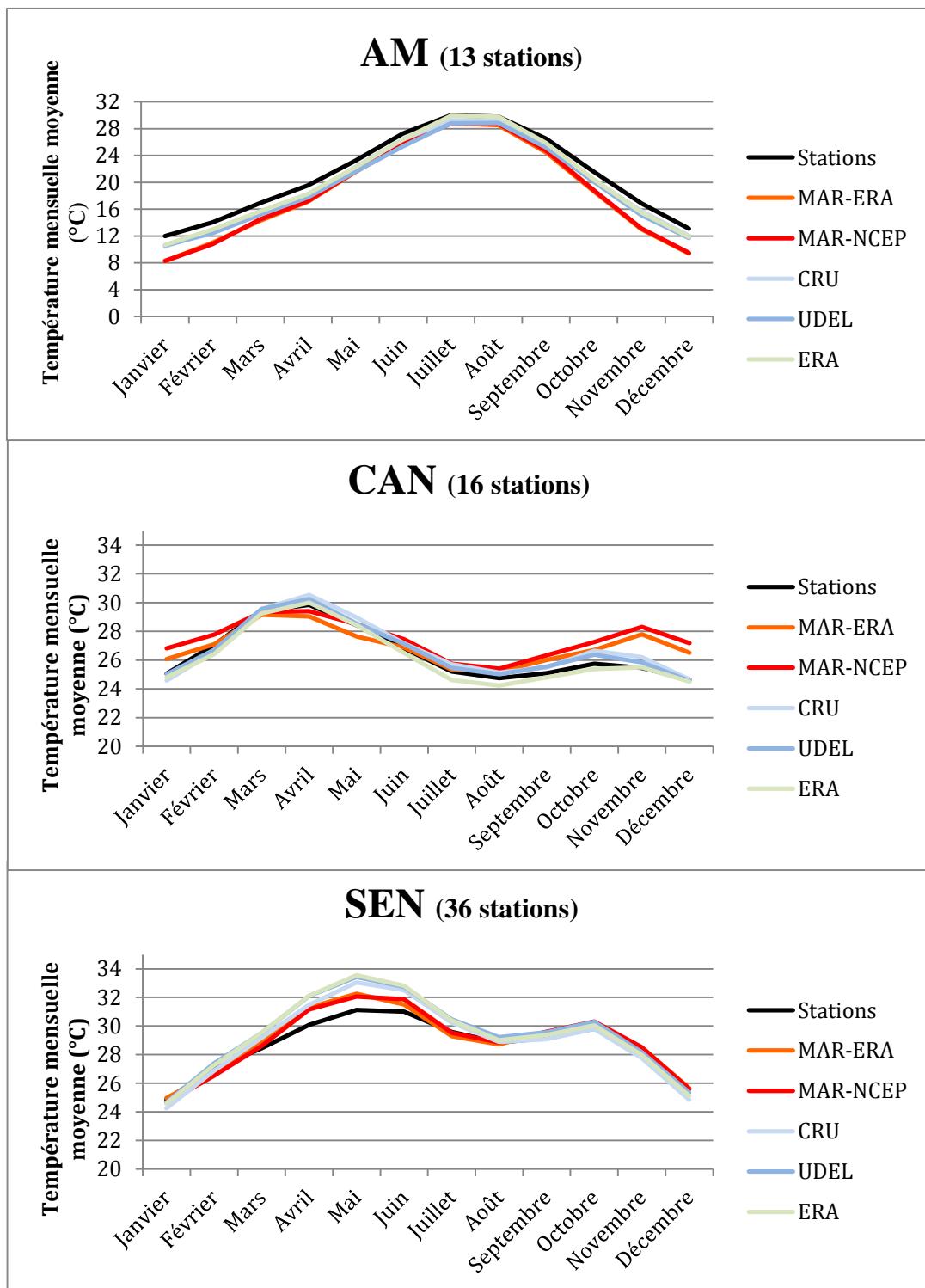


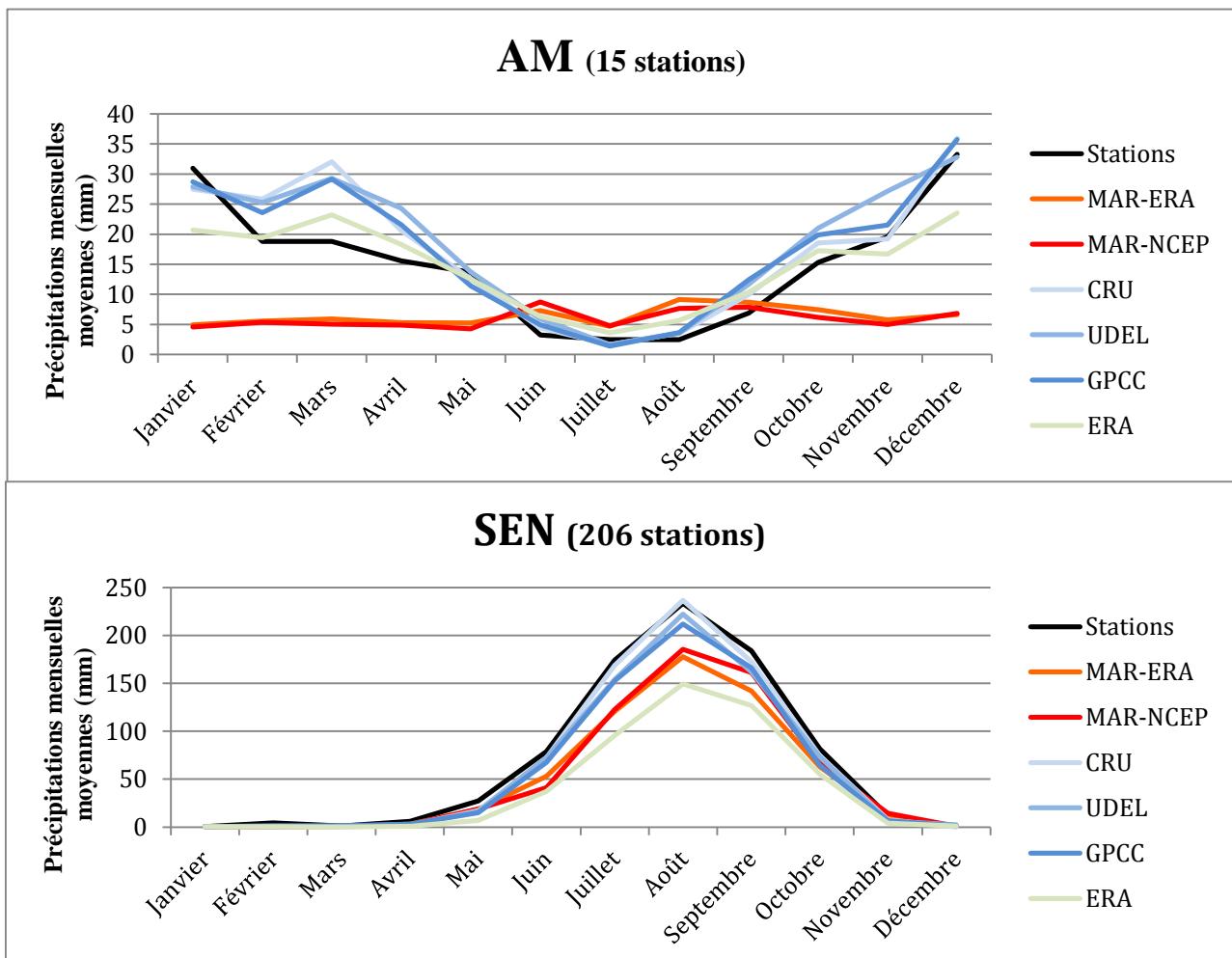
Figure 6-10 : Cycle annuel moyen des températures (°C) par sous-régions d'évaluation pour la période 1990-2000. Seuls les pixels représentés par nos stations ont été extraits pour le calcul des moyennes mensuelles.

Au niveau des différentes sources d'observation, nous noterons ici encore l'adéquation de celles-ci (Figure 6-10). En effet, les courbes des CRU, UDEL, GPCC et de nos stations se

superposent pratiquement pour la majorité des régions. Cependant on observe tout de même des différences dans la région SEN. En effet, lors de la première moitié de l'année, une différence, allant jusque 2.5°C , est observable entre nos stations et les données d'observation maillées.

En ce qui concerne nos deux simulations, nous pouvons globalement observer que MAR reproduit correctement la variabilité saisonnière des températures pour toutes les sous-régions d'évaluation (Figure 6-10). Plus précisément, similairement à ce qui a été observé au point 5.2.2.1., le biais froid du MAR semble plus important pour la région AM durant l'hiver boréal. Pour la région SEN, MAR se situe entre les deux courbes d'observations et est donc compris dans l'incertitude de celles-ci. La climatologie des températures reproduites par MAR est aussi légèrement biaisée pour la région CAN. En effet, le deuxième maximum de température est mal capturé par les deux simulations. Les maxima sont trop importants (près de 2°C de biais) et interviennent, de plus, avec un mois en retard par rapport aux observations.

Enfin les ERA-Interim reproduisent également adéquatement la climatologie annuelle des températures dans la plupart des sous-régions d'évaluation (Figure 6-10). Nous pouvons ajouter que pour certaines régions (AM, CAN, SEN, OAN), les réanalyses sont plus proches des observations que les deux simulations effectuées par MAR.



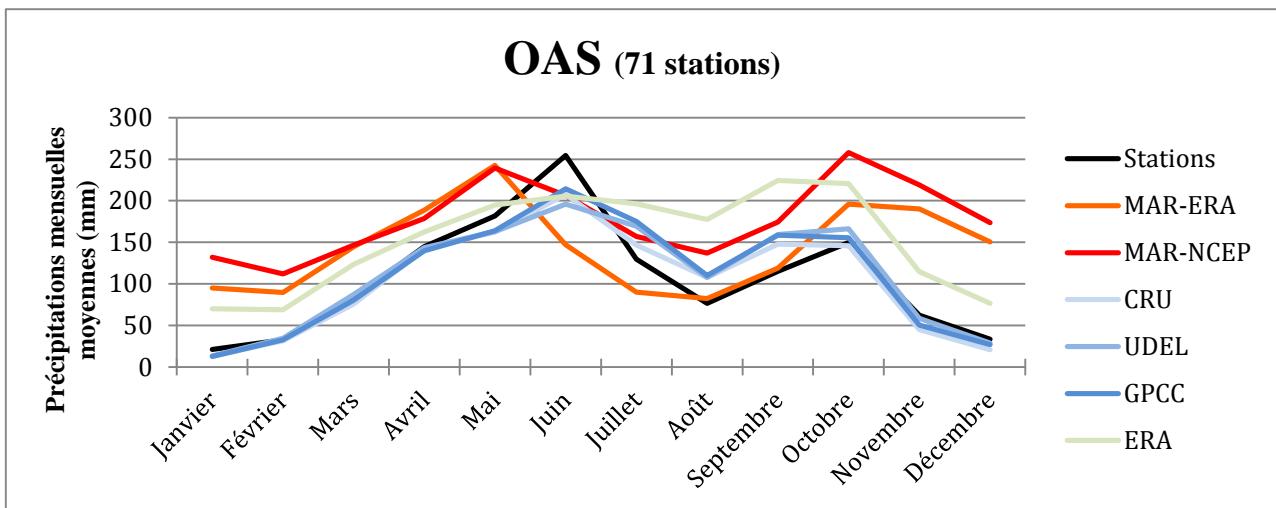


Figure 6-11 : Cycle annuel moyen des précipitations (mm/mois) par sous-régions d'évaluation pour la période 1990-2000. Seuls les pixels représentés par nos stations ont été extraits pour le calcul des sommes mensuelles.

Il existe plus de différences entre les divers jeux de données d'observation dans la climatologie annuelle des précipitations que dans celle des températures (Figure 6-11). Globalement les données maillées sont assez proches l'une de l'autre mais des incertitudes existent tout de même entre celles-ci et nos stations (50 mm/mois de plus enregistrés par nos stations au moins de juin dans la région OAS par exemple).

La Figure 6-11 ne nous permet pas de conclure que MAR simule correctement la climatologie des précipitations. Pour la région AM, MAR ne simule en rien la saisonnalité observée, il y simule en effet que très peu de précipitations tout au long de l'année. Ce biais pourrait être causé par le fait que cette région soit en fait trop proche de la zone de relaxation du modèle où les précipitations sont inexploitables. Mis à part cette région, le modèle capture la saison sèche des régions CAN et OAN mais ne peut représenter correctement la saison humide. La saisonnalité de la région SEN est mieux reproduite mais la saison des pluies n'est pas assez intense en précipitations. MAR est capable de reproduire les deux maxima de précipitations liés à la MOA de la région OAS. Cependant le premier intervient un mois trop tôt dans l'année alors que le deuxième intervient un mois trop tard. Dans cette même région, MAR ne semble pas capable de simuler convenablement la saison sèche. Ajoutons qu'il existe ici plus de différences entre les deux simulations. Les plus grandes d'entre elles s'observent dans les régions CAN et OAS. Alors que les climatologies restent semblables, la quantité de précipitations varie en effet d'une simulation à l'autre. Par exemple, une différence de 62 mm/mois est observée entre les deux simulations au mois d'octobre dans la région OAS.

Les ERA-Interim semblent mieux reproduire que MAR les caractéristiques principales de la variabilité saisonnière des précipitations.

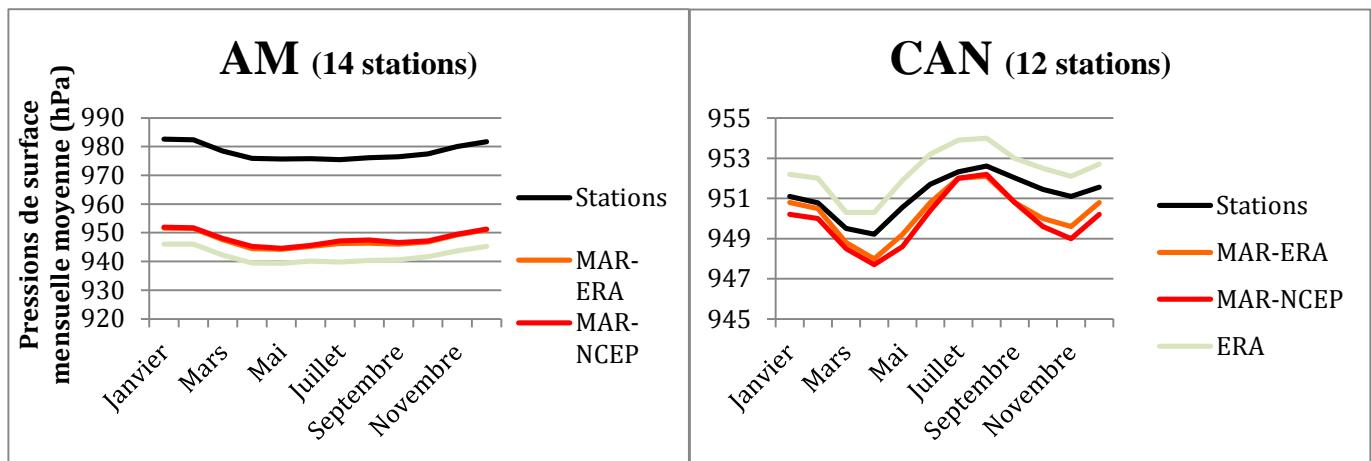
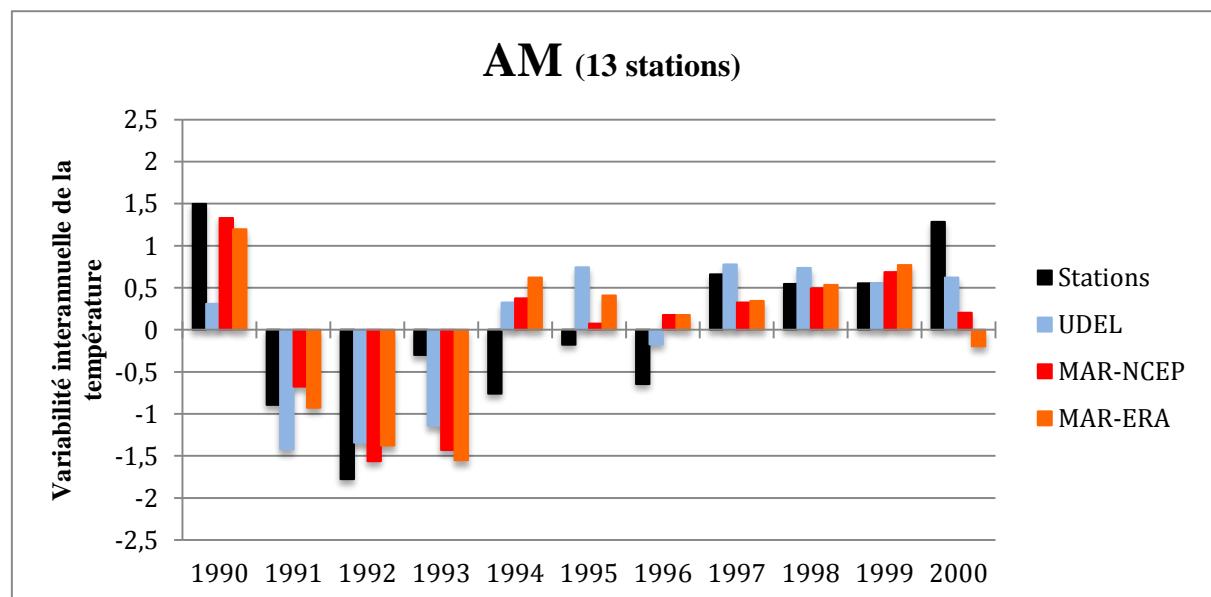


Figure 6-12 : Cycle annuel moyen de la pression de surface (hPa/mois) par sous-régions d'évaluation pour la période 1990-2000. Seuls les pixels représentés par nos stations ont été extraits pour le calcul des moyennes mensuelles.

Pour la pression au sol nous n'avons pas d'autre jeu de données que les stations et réanalyses. A noter que la différence entre les courbes de la Figure 6-12 est probablement due à la différence entre l'altitude des stations et des pixels du MAR ou des ERA-Interim. Ce qui importe donc ici, c'est plutôt l'allure générale des courbes. La faible variation tout au long de l'année de la pression de la région AM est bien reproduite par MAR et les ERA-Interim. Par contre il existe plus de différence dans les régions où la pression varie de manière plus importante au cours de l'année. MAR produit une amplitude de variation trop importante dans ces régions. Les ERA-Interim sont, elles, plus proches de nos observations.

6.2.3. Variabilité interannuelle

Comme précisé à la méthodologie (cf. 5.7.2.3.), pour que la variabilité interannuelle soit considérée comme significative, il faut que celle-ci soit supérieure à 1 ou inférieure à -1. Similairement à ce qui a été fait pour l'analyse de la climatologie annuelle, seule une partie des graphiques est affichée ici, le reste se trouvant en Annexe 10.



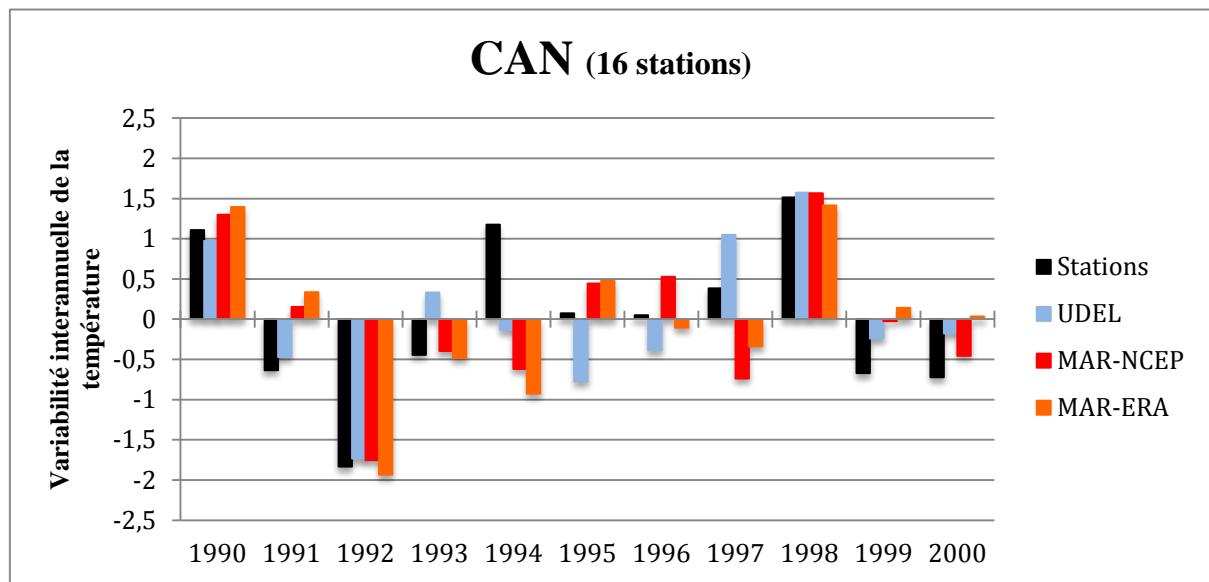


Figure 6-13 : Variabilité interannuelle de la température annuelle normalisée par l'écart-type de la période (1990-2000) par sous-régions d'évaluation. Seuls les pixels représentés par nos stations ont été extraits pour le calcul de la variabilité interannuelle.

Nous pouvons tirer de la Figure 6-13 que MAR capture correctement la variabilité interannuelle de la température annuelle. Par exemple, l'année 1998 qui semble être exceptionnellement chaude dans nos sous-régions d'évaluation (excepté AM) est bien représentée par MAR. L'intensité de ces évènements est également bien simulée. A noter qu'il existe cependant quelques désaccords entre les deux sources d'observations, comme pour l'année 1990 de la région AM par exemple.

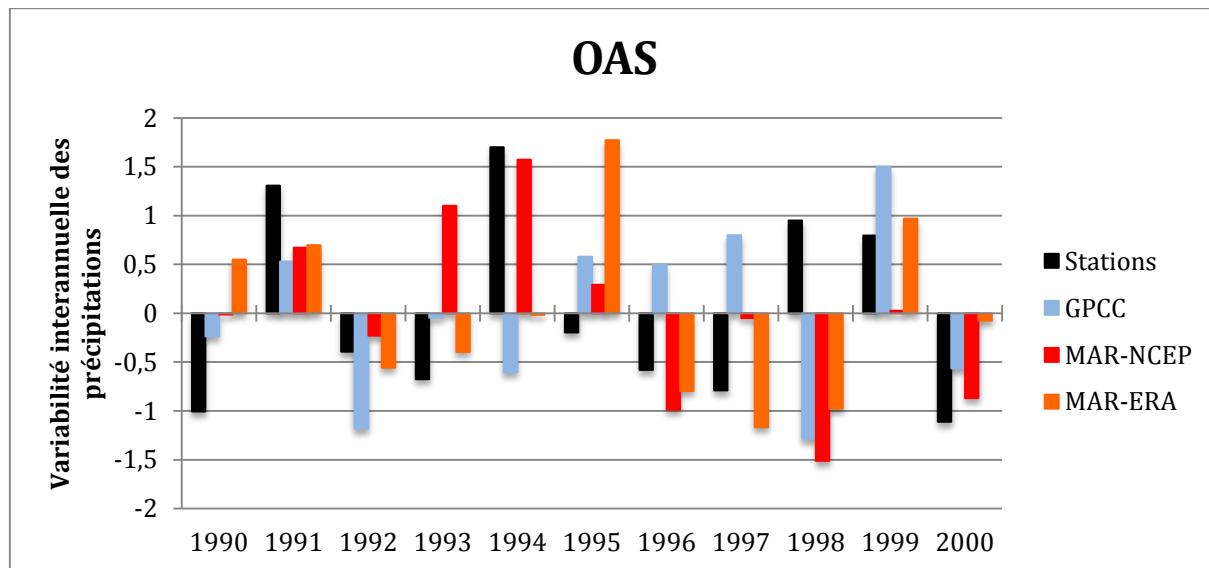


Figure 6-14: Variabilité interannuelle de la somme annuelle des précipitations normalisée par l'écart-type de la période (1990-2000) par sous-régions d'évaluation. Seuls les pixels représentés par nos stations ont été extraits pour le calcul de la variabilité interannuelle.

La variabilité interannuelle des précipitations (Figure 6-14) diffère fortement entre les deux sources de données in situ. Dès lors la comparaison avec les résultats des deux simulations du MAR est rendue hasardeuse. Nous ne pouvons donc pas tirer d'autres conclusions de ces résultats.

6.2.4. Conclusions

6.2.4.1. Température

A l'aide des différents outils statistiques utilisés ici, nous avons pu montrer que, dans l'ensemble, MAR simulait correctement les températures. En effet, l'état moyen, la saisonnalité et la variabilité interannuelle sont bien reproduits. Cependant nous avons pu mettre en évidence deux biais principaux : une sous-estimation des températures dans le Sahara (-2 °C à -6 °C) et la péninsule arabique et une surestimation dans le centre de l'Afrique (entre 0°S et 20°S ; de 1 °C à 4 °C). Ces biais sont présents en toutes saisons et ne varient pas de manière significative en fonction des conditions aux frontières (MAR-ERA versus MAR-NCEP). Ceci nous montre donc que le forçage n'influence pas fortement les températures reproduites par MAR et que les biais observés sont donc, très certainement, propres au modèle régional.

Le fait que le biais froid soit majoritairement situé dans la bande de latitudes de l'hémisphère Nord, où les régions désertiques se trouvent, nous amène à penser que le problème se retrouve au niveau de la représentation du sol dans MAR. Pour vérifier cette hypothèse une inspection du bilan radiatif a été réalisée. Quatre variables sont disponibles : courtes et longues longueurs d'ondes vers le haut et vers le bas au niveau du sol. Malheureusement, une modification du code du MAR nous empêche d'utiliser la variable des courtes longueurs d'ondes vers le haut directement. Il en résulte que les valeurs présentées ici pour cette variable sont des estimations. Ces variables ont été comparées aux données du NASA/GEWEX SRB (National Aeronautics and Space Administration/Global Energy and Water Cycle Exchanges Project Surface Radiation Budget)⁸. Le bilan radiatif de surface y est reproduit via des algorithmes utilisant différentes données d'entrées (paramètres sur les nuages, colonne d'ozone, profils verticaux de températures et pressions).

⁸ Ces données ont été obtenues depuis le NASA Langley Research Center / Atmospheric Science Data Center

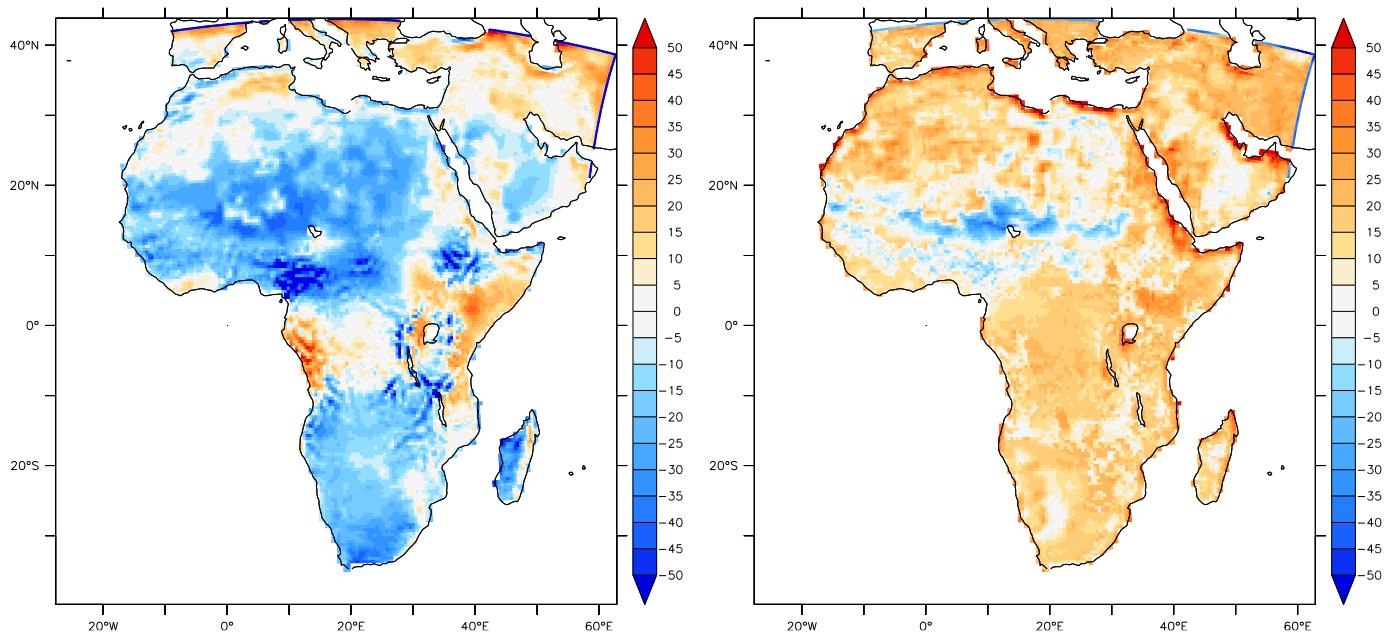


Figure 6-15 : Biais moyens journaliers ($\text{Wm}^{-2}\text{j}^{-1}$) des courtes longueurs d'ondes vers le bas (gauche) et vers le haut (droite) pour l'année 1990 (MAR – NASA/GEWEX SRB).

Les courtes longueurs d'ondes ne semblent pas être biaisées de manière significative (Figure 6-15). Par rapport aux valeurs absolues les biais restent en effet relativement faibles. De ce fait, l'hypothèse d'un rayonnement solaire réfléchi de façon trop importante par le sol ne tient pas la route.

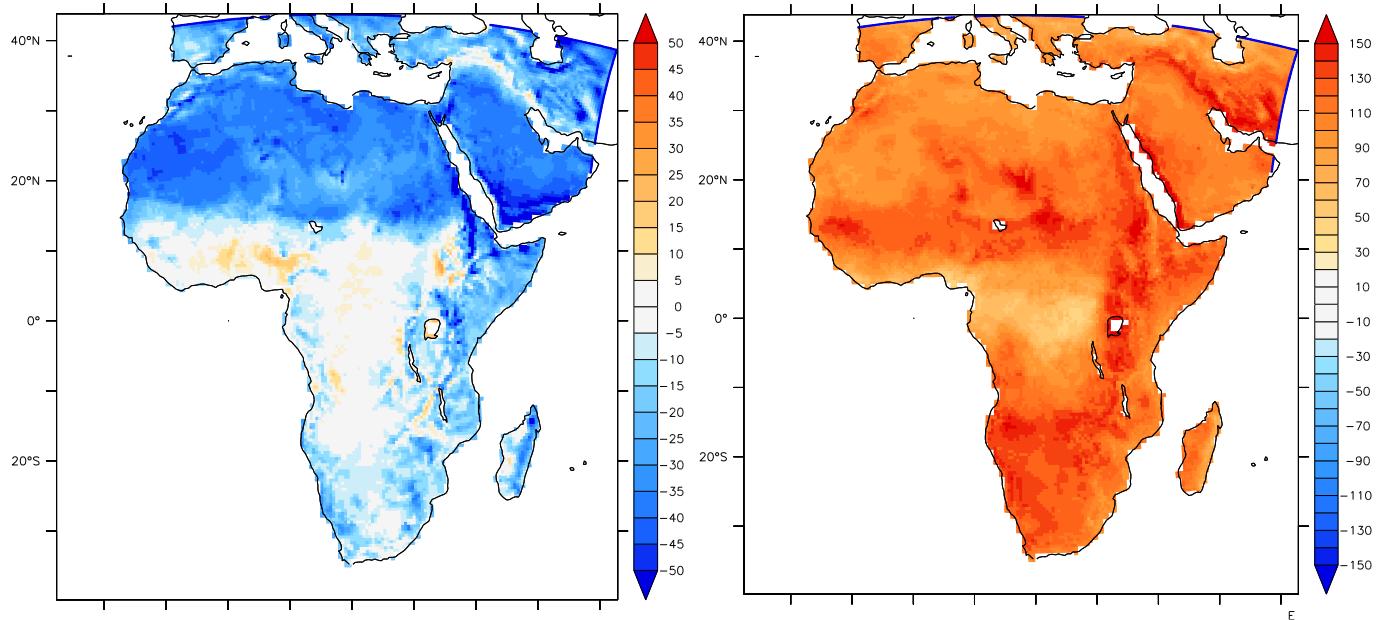


Figure 6-16 : Biais moyens journaliers ($\text{Wm}^{-2}\text{j}^{-1}$) des longues longueurs d'ondes vers le bas (gauche) et vers le haut (droite) pour l'année 1990 (MAR-NCEP – NASA/GEWEX SRB).

Les valeurs des longues longueurs d'ondes vers le bas du NASA/GEWEX semblent aberrantes (Figure 6-16). Comme nous n'avons pas des biais de températures sur l'entièreté

du domaine, il nous semble dès lors peu probable que MAR émettent à ce point un biais positif de rayonnement infrarouge. Pour avoir une deuxième source de comparaison nous avons utilisé les résultats d'un modèle CORDEX qui présentait peu de biais au niveau des températures (HadGEM3, Figure 6-19 au point 6.3.1.).

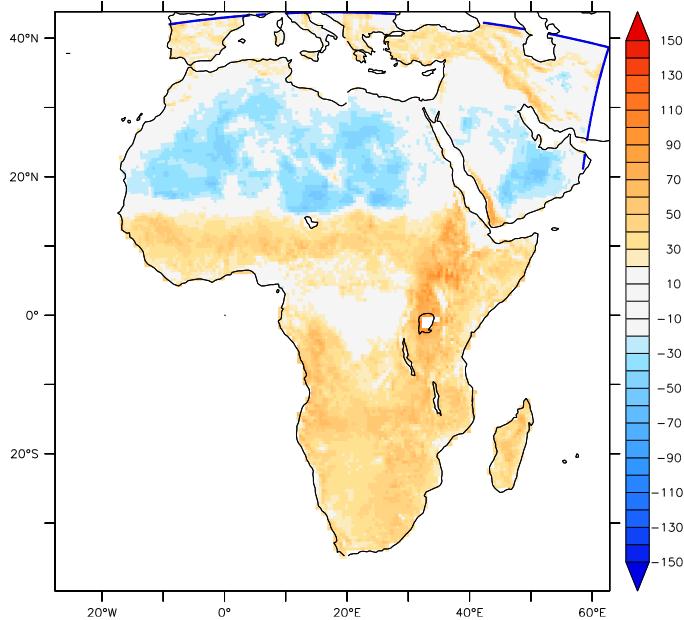


Figure 6-17 : Biais moyen journalier ($\text{W m}^{-2} \text{j}^{-1}$) des longues longueurs d'ondes vers le haut pour l'année 1990 (MAR – HadGEM3)

Les biais des ondes thermiques sont probablement plus une conséquence de notre biais de température qu'une cause (Figure 6-16 et Figure 6-17). En effet, la surface étant moins chaude, il est normal que celle-ci émette moins de rayonnement infrarouge. Le biais négatif d'ondes infrarouges descendantes sur le Sahara nous semble tout de même particulier. Premièrement celui-ci est situé exactement au même endroit que le biais négatif de température. Deuxièmement, il est difficile de l'expliquer. En effet, si le biais avait été situé dans une région non-désertique, nous aurions pu émettre l'hypothèse d'une couverture nuageuse insuffisante. Pour expliquer ce biais, nous pouvons émettre l'hypothèse qu'il n'y a pas que la température près de la surface qui est sous-estimée par MAR en ces latitudes mais aussi tout le reste de la colonne d'air (ou du moins une grande partie). Terminons en signalant le fait, qu'ici aussi, le biais est tout même relativement faible par rapport aux valeurs absolues (350 W/m^2).

En conclusion, il nous est difficile d'avancer une hypothèse solide pour justifier les biais de température reproduit par MAR. Quelques pistes pourront être vérifiées dans des recherches ultérieures. Par exemple, le biais pourrait venir d'une mauvaise représentation de la branche descendante de la cellule de Hadley dans l'hémisphère Nord. En effet, une

subsidence trop faible pourrait empêcher l'air de se réchauffer suffisamment. Ceci reste bien sûr qu'une supposition qui mérite d'être vérifiée.

6.2.4.2. Précipitations

Les résultats du MAR sont moins satisfaisants pour les précipitations que pour les températures. Les biais moyens des sommes annuelles sont relativement importants. De plus, la saisonnalité et la variabilité interannuelle ne sont pas correctement capturées par MAR. La répartition des biais en fonction des deux saisons évaluées montre que MAR peine à reproduire le déplacement méridional des précipitations au cours de l'année. Durant les moins de JFM, où les maxima de précipitations se trouvent dans l'hémisphère Sud, MAR parvient à reproduire la ceinture de précipitations sur l'Est de l'Afrique australe mais celle-ci ne se retrouve pas suffisamment loin dans l'Ouest (Annexe 4). Cette observation explique le biais sec de précipitations qu'on retrouve sur la carte des biais annuels (Figure 6-9). Quant au mois de JAS, la ceinture de précipitations liées à la ZCIT semble être positionnée aux bonnes latitudes mais c'est plutôt dans l'intensité des pluies que le biais se manifeste. De plus, c'est durant cette saison que le biais sec sur les hauts plateaux d'Ethiopie s'observe.

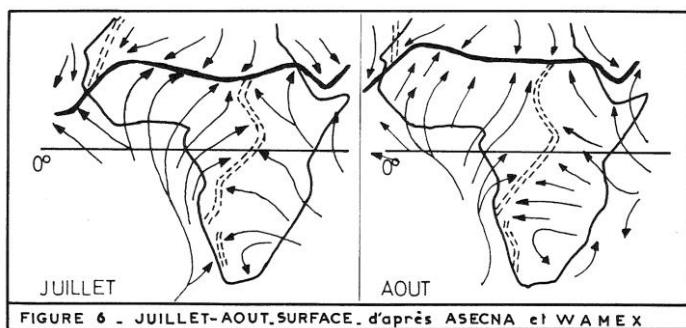


Figure 6-18 : Vents à la surface au mois de juillet et aout (Leroux, 1983).

La Figure 6-18 nous laisse suggérer que les précipitations sont amenées sur les hauts-plateaux éthiopiens par les vents, ayant quasiment un caractère de mousson, provenant de l'océan Indien. Il s'agirait donc de précipitations orographiques. En considérant cela, il semblerait alors que MAR produit trop de précipitations lors de l'entrée des masses d'air dans la corne de l'Afrique. Par conséquent, il ne reste certainement pas assez d'humidité lors de l'ascendance forcée des mêmes masses d'air sur les hauts reliefs d'Ethiopie. Cette hypothèse pourrait donc expliquer le biais humide retrouvé dans la corne de l'Afrique et le biais sec sur les hauts plateaux de l'Afrique de l'Est (Figure 6-7). Pour expliquer les biais liés au déplacement méridional de la ZCIT, notre hypothèse principale est que la convection n'est pas encore suffisamment bien représentée dans MAR alors que celle-ci est l'acteur principal

des précipitations en Afrique. Démontrer cette hypothèse demandera des investigations supplémentaires plus poussées.

6.3. Modèles CORDEX

6.3.1. Comportement moyen

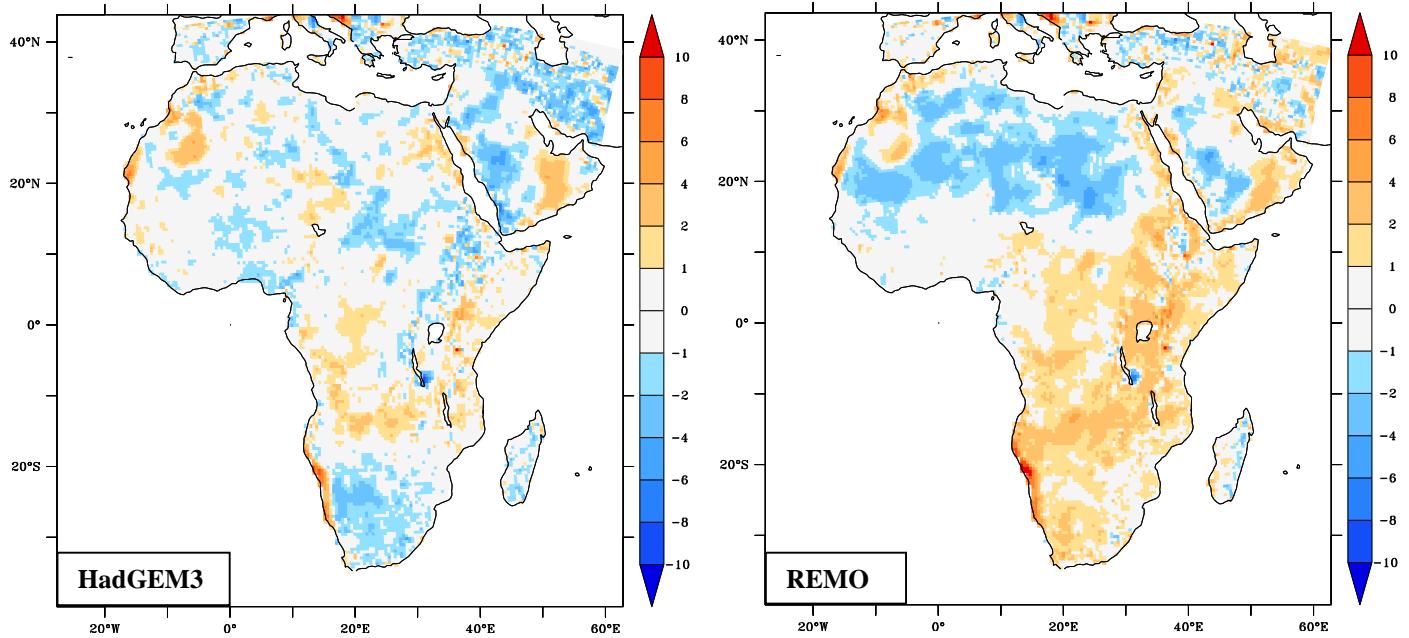


Figure 6-20 : Biais moyens mensuels des températures ($^{\circ}\text{C}/\text{mois}$) d'HadGEM3 et REMO sur la période 1990-2000 (RCM – UDEL).

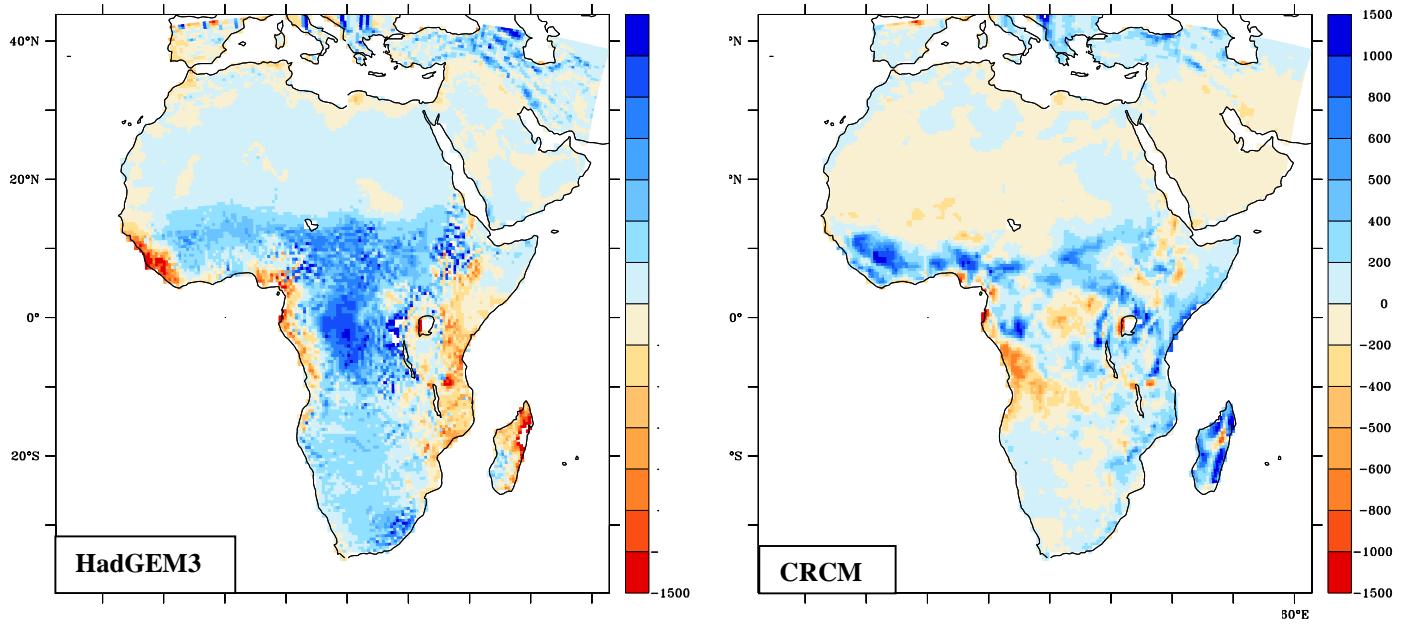


Figure 6-19: Biais moyens annuels de la somme des précipitations (mm/an) d'HadGEM3 et CRCM pour la période 1990-2000 (RCM – GPCC)

Les résultats concernant le comportement moyen des modèles HadGEM3, REMO et CRCM sont visibles à la Figure 6-19 et à la Figure 6-20, les autres résultats CORDEX étant placés aux Annexes 11 et 12. Les modèles CORDEX reproduisent également des biais au niveau des températures et précipitations (Figure 6-19 et Figure 6-20). On peut ajouter que tous ces modèles produisent des résultats assez différents. Si l'amplitude des biais ne varie pas fortement entre les modèles, il n'en va pas de même pour la répartition spatiale de ceux-ci. HadGEM3 est le RCM qui simule le mieux la température moyenne de la période 1990-2000. REMO simule, à l'image du MAR, un biais froid sur la région du Sahara. Ajoutons que tous les modèles affichent un biais chaud important en Namibie, biais qui est également produit par MAR. Cela nous laisse penser que celui-ci est probablement causé par un biais propre aux données UDEL (Annexe 5). Il semblerait également qu'un biais froid existe dans les données UDEL dans l'Ouest du Sahara (Annexe 5). Enfin nous pouvons également relever le biais tout de même important d'HadGEM3 au niveau des précipitations alors que les températures reproduites par celui-ci sont relativement proches des observations.

6.3.2. Climatologie annuelle

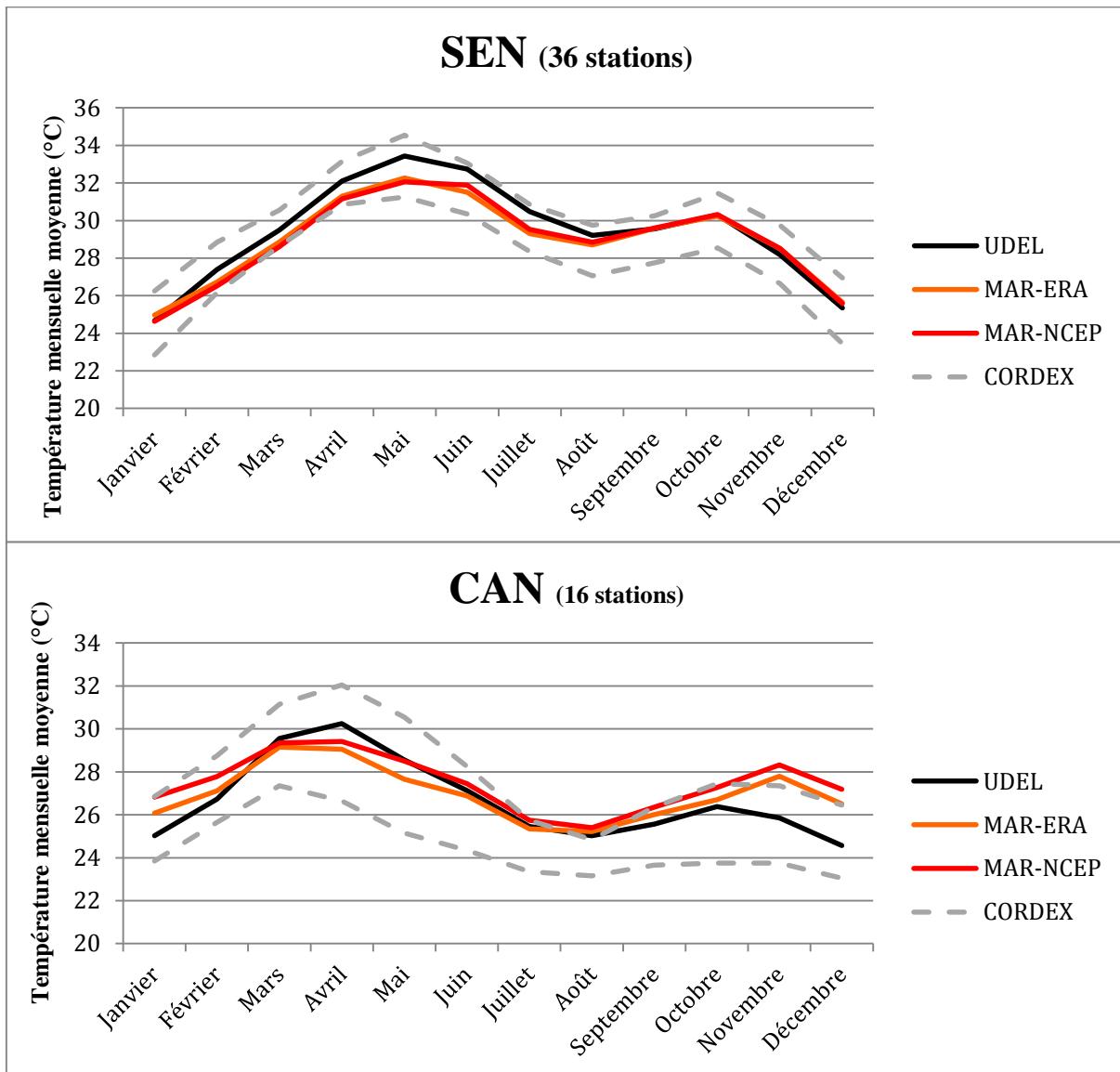


Figure 6-21: Cycle annuel moyen des températures (°C) par sous-régions d'évaluation pour la période 1990-2000. Seuls les pixels représentés par nos stations ont été extraits pour le calcul des sommes mensuelles. La variabilité entre les modèles CORDEX est représentée par les traits tiretés gris.

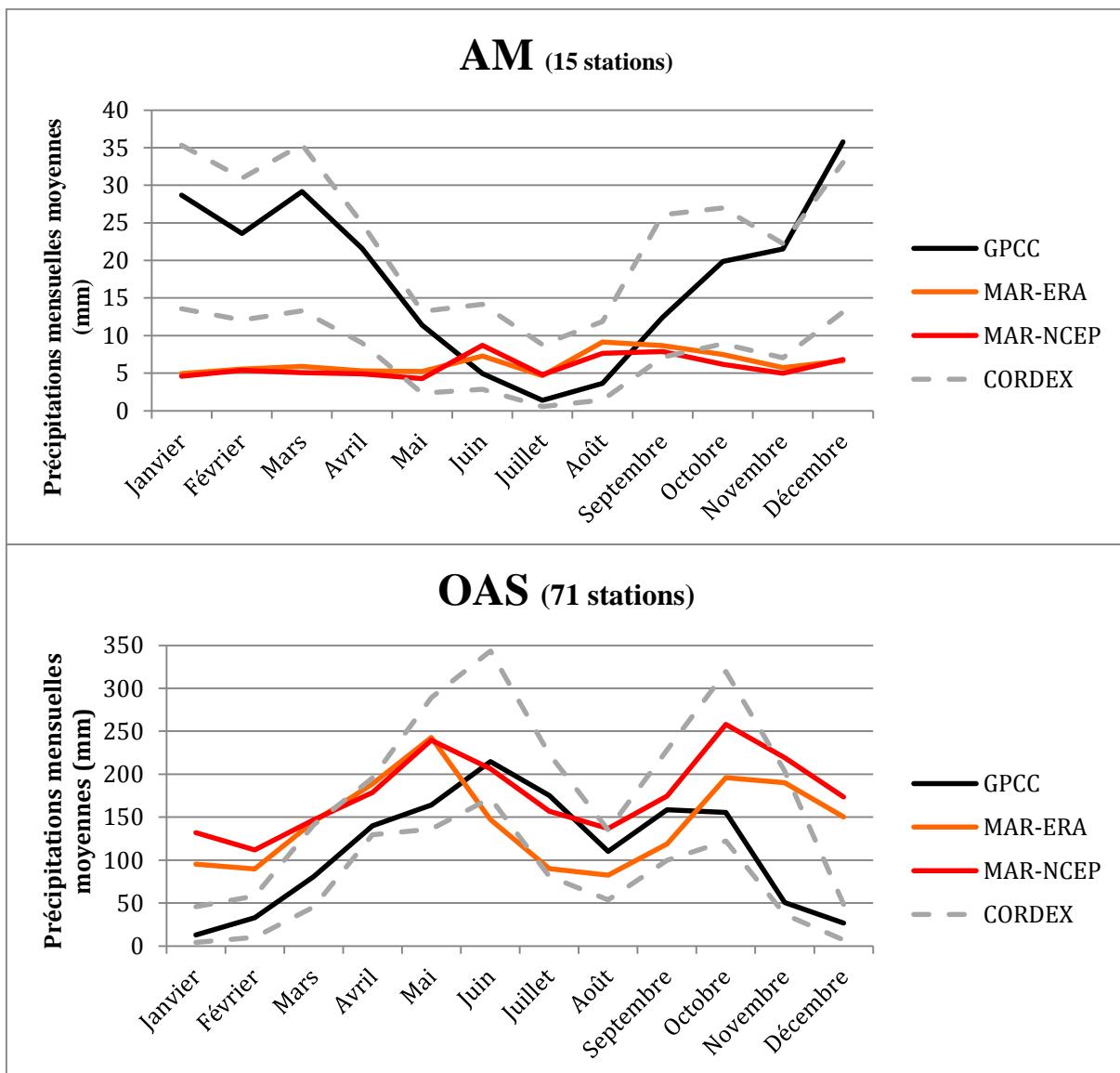
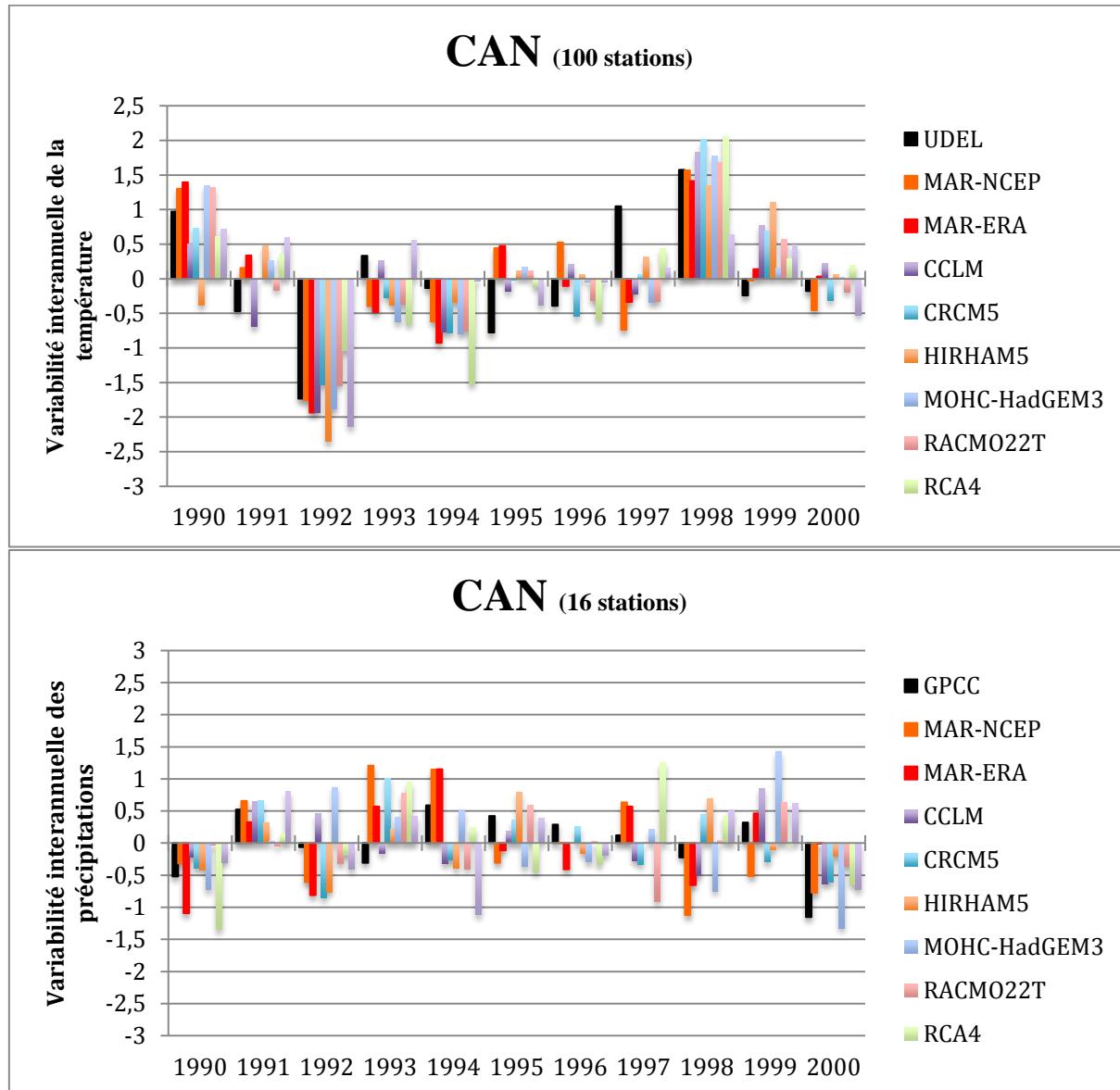


Figure 6-22 : Cycle annuel moyen des précipitations (°C) par sous-régions d'évaluation pour la période 1990-2000. Seuls les pixels représentés par nos stations ont été extraits pour le calcul des moyennes mensuelles. La variabilité entre les modèles CORDEX est représentée par les traits tiretés gris.

Le reste des figures est placé aux Annexes 13 et 14. La Figure 6-21 et la Figure 6-22 montrent la grande variabilité qui existe entre les différents RCM comparés ici. Globalement, les résultats du MAR sont compris dans la variabilité des modèles CORDEX. Cette affirmation est plus exacte pour les températures que pour les précipitations. En effet, il n'y a que MAR qui omette à ce point la saison sèche de la région OAS ainsi que la variabilité saisonnière de la région AM (bien que le biais soit probablement causé par la zone de relaxation).

En regardant ainsi l'ensemble des RCM, nous pouvons tout de même affirmer que les modèles capturent bien les caractéristiques principales de la saisonnalité des deux variables étudiées ici.

6.3.3. Variabilité interannuelle



Le reste des figures est placé à l'Annexe 15. Au niveau des températures, les différents modèles reproduisent correctement la variabilité interannuelle. L'année 1998 exceptionnellement plus chaude (excepté pour la région AM), que nous avions prise comme exemple au point 6.2.3., est simulée par tous les modèles dans pratiquement toutes les

régions. Pour les précipitations, nous pouvons émettre le même constat qu'au point 6.2.3.: la variabilité interannuelle varie fortement parmi les différents RCM. Nous ne pouvons donc pas affirmer qu'un modèle soit capable de capturer de manière satisfaisante la variabilité interannuelle observée. Rappelons tout de même qu'il existe des incertitudes au sein même des observations (cf. 6.2.3.)

6.4. Analyse de la valeur ajoutée par MAR aux réanalyses

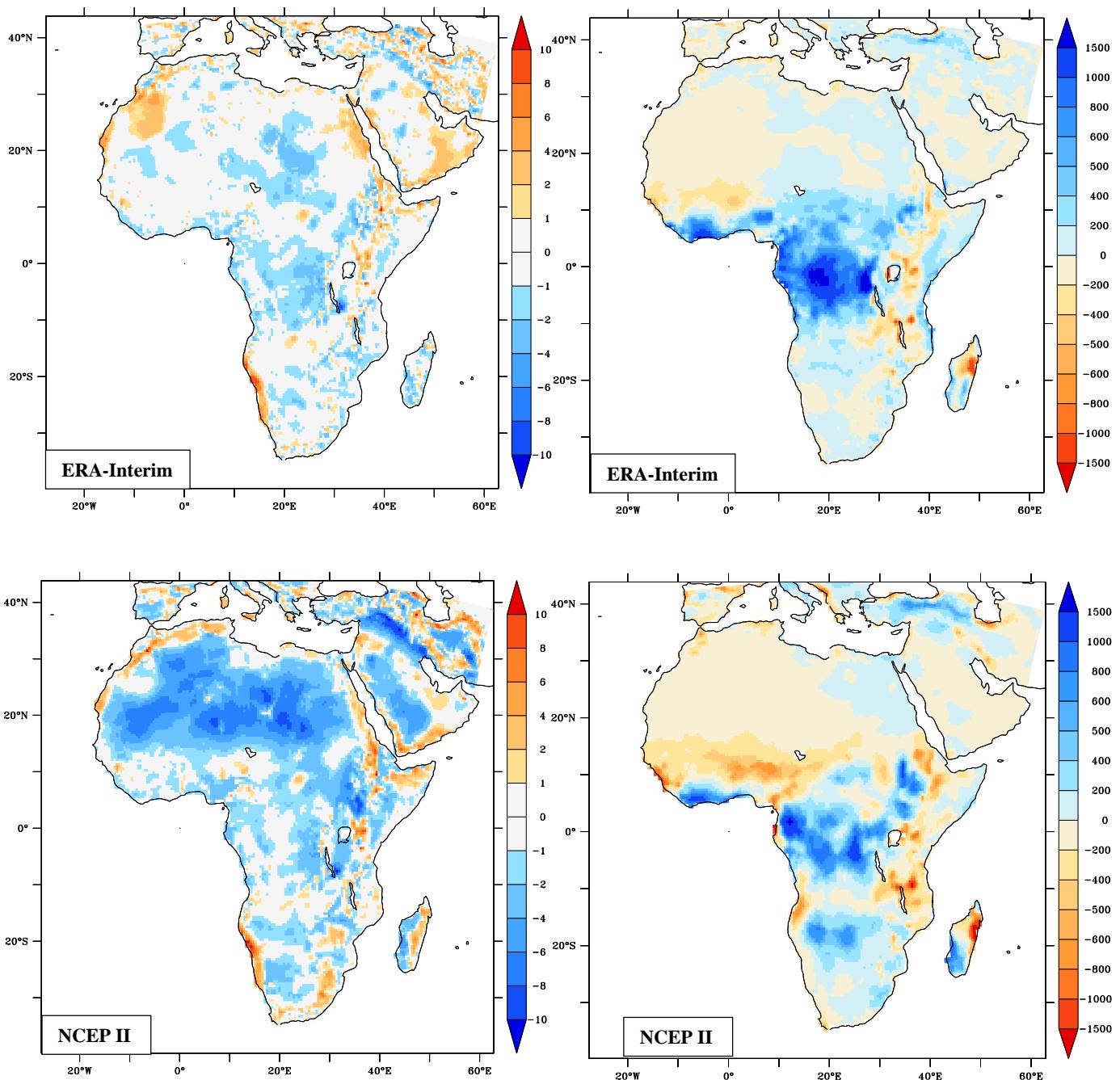


Figure 6-24 : Biais moyens des températures (gauche) et précipitations (droite) des ERA-Interim(haut) et NCEP II (bas)

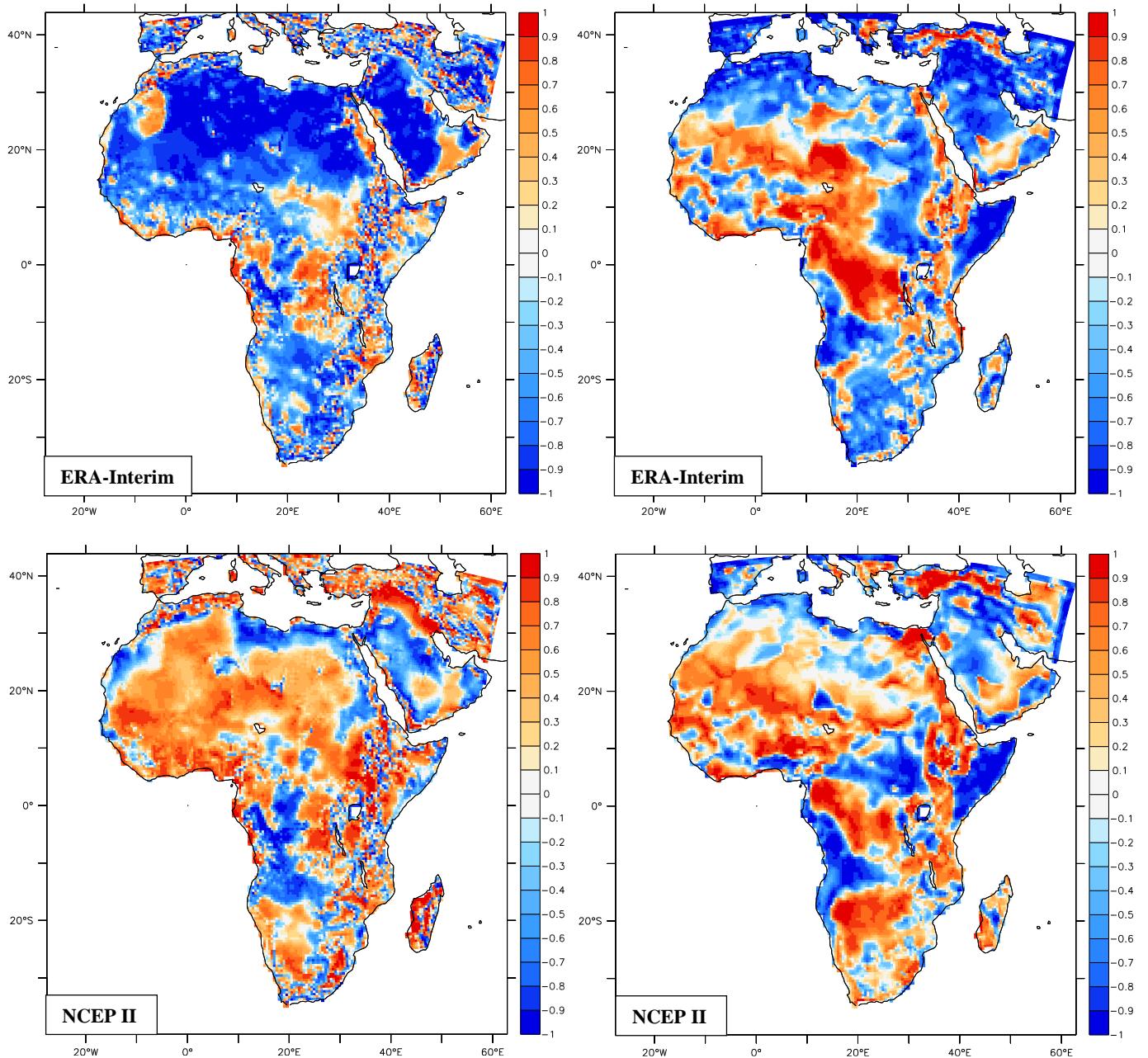


Figure 6-25 : Valeur ajoutée par MAR aux réanalyses pour les températures (gauche) et les précipitations (droite).

Comme observé au point 5.1, les ERA-Interim produisent des résultats plus proches des observations que les NCEP au niveau des températures. Quant aux précipitations, il est plus difficile de les départager. En effet, les ERA-Interim produisent des biais moins étendus mais de plus fortes intensités que les NCEP. Nous pouvons également ajouter que les NCEP produisent, à l'image du MAR, un biais froid sur le Sahara et la péninsule arabique. La comparaison des biais moyens des réanalyses, du MAR et des modèles CORDEX nous permet d'évaluer l'abilité des RCM à corriger les biais de leur forçage. Il semblerait à ce sujet, que les biais de température des ERA-Interim (les températures sont assimilées par celles-ci) soient semblables à ceux des meilleurs modèles CORDEX (HadGEM3 notamment).

En ce qui concerne les précipitations, les biais des réanalyses sont plus importants que certains RCM (CRCM par exemple). Enfin, ajoutons que les ERA-Interim produisent des résultats plus satisfaisants que MAR (que ce soit pour les températures ou les précipitations).

L’analyse de la valeur ajoutée (Figure 6-25) par MAR aux réanalyses confirme nos propos. En effet au niveau des températures, la valeur ajoutée par MAR aux ERA-Interim est majoritairement négative. Ce qui n’est pas étonnant vu notre biais froid au Sahara. Par contre, MAR ajoute une valeur au NCEP et ce même dans le Sahara. L’interprétation est plus délicate pour les précipitations. Pour les ERA-Interim, MAR y ajoute de la valeur dans certaines régions et en enlève dans d’autres. Encore une fois, MAR ajoute plus de valeur aux NCEP qu’aux ERA-Interim.

6.4.1. Conclusions

Nous avons pu mettre ici en évidence les différences qui existent entre les NCEP et les ERA-Interim. MAR-ERA et MAR-NCEP produisent des résultats relativement semblables alors que les différences entre les deux forçages sont significatives. Ceci nous renseigne sur le fait que les biais du MAR sont probablement causés par sa physique interne et non par le forçage⁹.

MAR, dans sa version actuelle, ne semble pas pouvoir apporter une valeur en plus aux ERA-Interim sur le domaine CORDEX Afrique à 50 Km de résolution. Premièrement les deux résolutions sont relativement proches (0.75° pour les ERA-Interim et 0.5 ° pour MAR); on ne peut donc pas justifier cela par la meilleure résolution du RCM. Deuxièmement, les biais de températures des ERA-Interim sont significativement plus faibles. Par contre, il n’en est pas de même quand on compare MAR aux NCEP. Les biais de températures semblent en effet plus faibles et, dans ce cas-ci, la résolution du MAR est bien meilleure que les NCEP (2.5° pour les NCEP soit près de 280 Km).

⁹ Rappelons que les précipitations ne sont pas forcées dans les RCM, seules les températures représentent ici une variable de forçage aux frontières de leur domaine.

7. Discussion et limites

7.1. Critique des données d'observation et réanalyses

Pour rappel, nous avons premièrement réalisé une critique des différentes données d'observation en notre possession. Nous avons d'abord pu noter que le nombre de stations assimilées dans les données maillées variait en fonction de la source et de la variable. Les précipitations affichent en effet un plus grand nombre de stations. De plus, nous avons pu remarquer que bon nombre de nos stations étaient situées au même endroit que celles des données maillées. Enfin les corrélations et biais moyens entre nos données inédites et les autres sources de données ont permis de montrer la très bonne cohérence entre nos stations et les données d'observation maillées.

Toutes ces conclusions à propos des données inédites que nous avons testées ici nous poussent à remettre en cause la validité de l'expression « données inédites » que nous avons employée depuis le début de cette recherche. Nous émettons en effet l'hypothèse que notre banque de données d'observation a en fait été assimilée dans les différentes sources de données d'observation maillées. Par exemple les données du CRU proviennent de différents instituts comme l'OMM ou la National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) mais aussi des différents services météorologiques nationaux (Harris *et al.*, 2014). Nous n'avons malheureusement que très peu de détails sur la provenance de notre jeu de données d'observation. Cependant, en inspectant les fichiers disponibles, nous avons pu remarquer que certaines stations possédaient en fait un numéro de l'OMM et étaient ainsi retrouvables sur Internet. Des données archivées pour ces stations peuvent alors être retrouvées de cette manière. Si une partie de nos stations a effectivement été assimilée pour produire les données d'observation maillées que nous avons utilisées ici, il est normal que ces premières montrent d'excellents résultats quand elles sont comparées à ces dernières. Mieux encore, lors de l'assimilation des données, celles-ci doivent répondre à des critères précis pour être effectivement sélectionnées. Dès lors, il est probable que les données d'observation maillées soient en fait plus robustes que notre jeu de données (au moins dans les zones affichant un nombre de stations suffisant). Par conséquent, les quelques stations qui ne présentent pas une bonne cohérence avec les données maillées aux Figures 6-3, 6-4 et 6-5 ont en fait pu être été rejetées lors de l'assimilation des stations.

La comparaison des données de nos stations aux réanalyses a mis en évidence la difficulté qu'ont ces dernières à reproduire le climat observé. Si les températures sont relativement bien reproduites par les réanalyses, il n'en va pas de même pour les précipitations. De plus, nous avons pu remarquer que le nombre de stations météorologiques

en Afrique diminue depuis les années 70-80 (cf. Figure 7-1). Les réanalyses, comme dit précédemment, dépendent des données qu'elles assimilent. Nous nous interrogeons donc sur la qualité des réanalyses en Afrique durant la fin du XX^e siècle et le début du XXI^e.

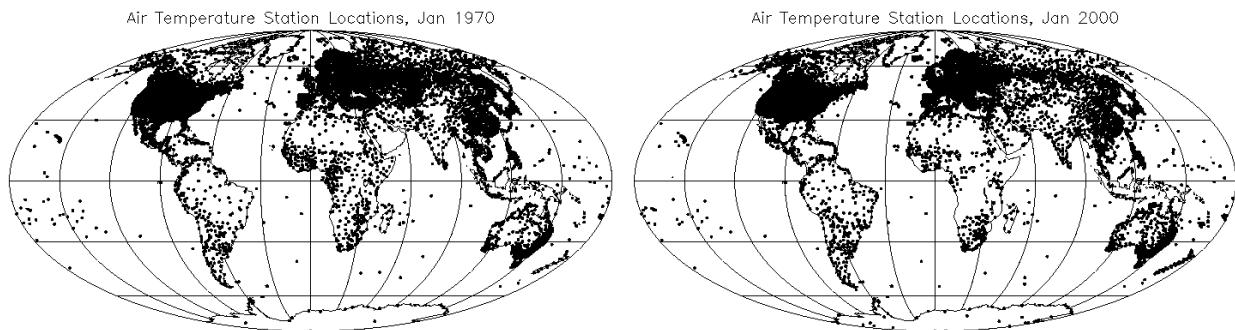


Figure 7-1 : Evolution du nombre de stations utilisées pour la production des données UDEL (température) entre 1970 et 2000.

7.2. Conclusions et limites de l'intercomparaison

Nous sommes parvenus à montrer la grande variabilité qui existe entre les sources principales de données climatiques en Afrique. Après avoir discuté des données d'observation et des réanalyses, il nous reste donc la modélisation climatique régionale. Il existe également une variabilité importante entre les résultats des différents RCM évalués, alors que ceux-ci sont censés représenter le même climat. La plupart de ces modèles sont capables de simuler les températures de manière acceptable (état moyen, saisonnalité et variabilité interannuelle) mais peinent à produire des précipitations proches des observations.

Pour pouvoir se prononcer sur la meilleure source de données climatiques en Afrique que nous avons évaluée, il faut prendre en compte plusieurs critères. Premièrement, il est certain que la qualité des résultats sera le critère prépondérant. Deuxièmement, la résolution spatiale et temporelle doit également être considérée. Enfin, troisièmement, certaines sources ne sont disponibles que pour certaines périodes. La résolution spatiale des différents jeux de données est assez semblable (excepté les NCEP) mais la résolution temporelle ne l'est pas. En effet, alors que les données d'observation maillées sont mensuelles, les RCM et réanalyses ont une résolution temporelle journalière et peuvent même encore descendre en dessous de cette limite. Les données d'observation maillées semblent donc représenter la meilleure source mais sont grandement limitées par leur résolution temporelle. Avant de choisir une source de données climatiques, il faudra donc déterminer l'application qui en sera faite. Par exemple dans le cas d'une étude assez générale sur la variabilité interannuelle, les données d'observation maillées seront certainement le meilleur choix. Par contre, dans le cas d'une étude sur l'arrivée de la saison des pluies ou bien sur la MOA, des données journalières

s'imposeront rapidement. Cependant nous avons mis en évidence la mauvaise représentation des précipitations par les RCM et réanalyses. Il faudra également porter une attention particulière à la zone d'étude car, comme nous l'avons vu, la densité spatiale des observations varie fortement en Afrique. Le choix ne sera donc pas toujours aisé et une connaissance des forces et faiblesses des jeux de données utilisés sera indispensable.

Comme dit à plusieurs reprises, la difficulté d'une telle intercomparaison de données climatiques en Afrique réside dans le manque d'une référence inébranlable. Nous avons comparé tous les RCM et réanalyses aux données UDEL (température) et GPCC (précipitation) alors qu'aucune évaluation de celles-ci à l'échelle du continent n'a été proposée. Il est donc important de considérer ce fait à la lecture des conclusions du paragraphe précédent. Pour pallier en partie cette déficience dans une étude ultérieure, il sera nécessaire de considérer des sources de données alliant observations au sol et données satellitaires comme les TRMM ou les GPCP.

Enfin, nous pouvons émettre quelques pistes afin de réaliser une étude plus complète dans le futur. Premièrement, nous nous sommes principalement focalisés sur deux variables : la température de l'air à proximité du sol et les précipitations. La pression de surface a également été utilisée dans l'évaluation de la climatologie annuelle. Il serait cependant intéressant d'inclure dans les études ultérieures d'autres variables telles que l'humidité spécifique ou la nébulosité pour expliquer les différents biais des RCM. Deuxièmement, nous pouvons reconnaître que notre évaluation par sous-régions n'est pas représentative de tout le continent africain. Dès lors, comme l'ont déjà fait certaines études (Buontempo *et al.*, 2015), il sera important de définir un plus grand nombre de sous-régions dans les évaluations à l'avenir.

8. Conclusion et perspectives :

8.1. Synthèse

Notre objectif était de comparer différentes sources de données climatiques disponibles en Afrique. Nous avions en notre possession un jeu de données provenant de stations au sol, des données d'observation maillées de différents instituts (CRU, UDEL et GPCC), des réanalyses (NCEP I et II et les ERA-Interim) et enfin des RCM. Nous avons ajoutés MAR aux modèles CORDEX disponibles. De plus, s'agissant de la première application de MAR sur l'intégralité du continent africain, une évaluation particulière lui a été réservée. Plusieurs conclusions ont ainsi émané des chapitres 6 et 7.

La première conclusion importante est que les données « inédites » que nous possédons ont probablement été assimilées par les données maillées et les réanalyses. De par leurs critiques de sélection lors de l'assimilation des données, ces deux dernières sources sont d'ailleurs certainement plus robustes que nos données *in situ*.

Nous avons pu également montrer qu'il existe peu de variabilité entre les diverses sources de données d'observation maillées. Les quelques différences résultent probablement du nombre de stations assimilées et des techniques d'interpolation.

Les résultats de MAR comparés aux données d'observation maillées montrent que celui-ci présente encore de nombreux biais. Le plus important est certainement le large biais froid aux latitudes du Sahara. Nous avons émis quelques pistes d'explication de ces biais mais les hypothèses devront être vérifiées dans des recherches ultérieures. Nous avons également mis en évidence le peu de différences existant entre nos deux simulations (MAR-NCEP et MAR-ERA). La comparaison avec les modèles CORDEX a cependant permis de relativiser ces résultats. En effet, la variabilité entre les modèles est importante. Concernant la saisonnalité, MAR se situe entre les valeurs extrêmes des différents RCM pour la plupart des sous-régions d'évaluation. De plus, il a également été montré que, quand on considère les différents modèles comme un unique ensemble, ceux-ci peuvent capturer les caractéristiques principales de variabilité saisonnière des précipitations et températures. Il est donc aujourd'hui important d'élargir au maximum le nombre de RCM disponibles en Afrique. Enfin, la variabilité interannuelle des températures est bien reproduite par les différents modèles mais celle des précipitations n'a montré aucun résultat appréciable, tant au niveau des observations qu'au niveau des modèles.

Nous avons terminé nos développements par l'analyse de la valeur ajoutée aux réanalyses par MAR. Globalement MAR ajoute de la valeur aux NCEP et ce pour deux

raisons : la résolution spatiale grossière des NCEP (2.5°) et leurs résultats moins satisfaisants lorsque comparées aux UDEL et GPCC. En revanche, MAR ne semble pas pouvoir ajouter de la valeur aux ERA-Interim. En effet, les résultats des réanalyses sont équivalents ou meilleurs que ceux du MAR et leur résolution spatiale est semblable.

8.2. Incertitudes sur les données climatiques en Afrique

La conclusion principale de cette recherche est donc qu'il est difficile de lever l'incertitude sur les données climatiques en Afrique. La solution proposée, par de nombreuses études et la présente recherche, pour pallier le manque de données d'observation est la modélisation climatique régionale. Cependant, nous avons montré à quel point il était délicat d'y évaluer des modèles et ce notamment à cause de l'absence d'une référence indiscutable. De plus, dans l'état actuel des choses, il semble que la modélisation climatique régionale ne peut pas encore prétendre être cette solution. Les données d'observation maillées et les réanalyses assimilant des données d'observation sont, aujourd'hui, probablement le meilleur type de données pour étudier le climat africain dans son ensemble. Cependant, comme nous l'avons mentionné au chapitre 7, cette affirmation peut être nuancée en fonction du contexte d'utilisation des données.

Finalement, au lieu de proposer une solution directe à la problématique présentée au chapitre 1, cette recherche permet de mieux la maîtriser, en précisant les forces et faiblesses des différentes sources principales de données climatiques en Afrique.

8.3. Perspectives

Notre jeu de données « inédites » - Malgré le fait que la majorité de celui-ci ait probablement été assimilé dans les données maillées, ce jeu de données pourra toujours s'avérer utile dans le futur. En effet, il présente l'avantage par rapport aux données maillées d'avoir une résolution temporelle journalière. Avec une critique plus rigoureuse que celle présentée dans ce travail, notre jeu de données « inédites » pourra être utilisé pour une évaluation régionale de modèles climatiques.

MAR - Avant d'utiliser MAR en Afrique, du moins pour une étude sur tout le continent, il faudra calibrer une nouvelle fois le modèle pour corriger les principaux biais relevés. Son utilisation pourra cependant s'avérer utile dans les régions où il présente des résultats satisfaisants.

Modélisation climatique régionale – Une fois les biais principaux corrigés, MAR pourra venir s'ajouter aux modèles ayant déjà fourni des résultats à l'intérieur du projet CORDEX. Comme nous l'avons indiqué à plusieurs reprises, il est essentiel de constituer le plus grand

ensemble de modèles possible. Ainsi par compensation des erreurs (cf. chapitre 3), les résultats devraient converger vers les observations. La construction d'un ensemble performant permettra ainsi d'utiliser celui-ci pour la suite des étapes du protocole CORDEX (cf. chapitre 3) et donc de faire des projections pour l'étude des effets du changement climatique prévu en Afrique.

Critique des données d'observation – Nous avons donc pu montrer que les différences entre les différentes sources de données climatiques en Afrique demeuraient importantes. Comme Nikulin *et al.* (2012) le proposent, il serait intéressant, à l'image de ce qui est fait pour les RCM, de former un ensemble de données d'observation maillées. Il sera alors peut-être possible de compenser de cette manière les erreurs entre elles.

Références

- Brasseur, O. (2001). Development and Application of a Physical Approach to Estimating Wind Gusts. *Monthly Weather Review*, 129(1), 5–25. [http://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0005:DAAOAP>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0005:DAAOAP>2.0.CO;2)
- Brasseur, O., Gallée, H., Creutin, J., & Lebel, T. (2002). High resolution simulations of precipitation over the Alps with the perspective of coupling to hydrological models. *Advance in Global Change Research*, 10, 75–99.
- Buontempo, C., Mathison, C., Jones, R., Williams, K., Wang, C., & McSweeney, C. (2015). An ensemble climate projection for Africa. *Climate Dynamics*, 44(7), 2097–2118. <http://doi.org/10.1007/s00382-014-2286-2>
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, a. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–597. <http://doi.org/10.1002/qj.828>
- Dosio, A., Panitz, H.-J., Schubert-Frisius, M., & Lüthi, D. (2015). Dynamical downscaling of CMIP5 global circulation models over CORDEX-Africa with COSMO-CLM: evaluation over the present climate and analysis of the added value. *Climate Dynamics*, 44(9), 2637–2661. <http://doi.org/10.1007/s00382-014-2262-x>
- Dosio, A., & Panitz, H. J. (2016). Climate change projections for CORDEX-Africa with COSMO-CLM regional climate model and differences with the driving global climate models. *Climate Dynamics*, 46(5), 1599–1625. <http://doi.org/10.1007/s00382-015-2664-4>
- Druyan, L. M., Feng, J., Cook, K.H., Xue, Y., Fulakeza, M., Hagos, S. M., ..., Ibrah, S.S. (2010). The WAMME regional model intercomparison study. *Clim Dyn*, 35, 175–192. doi:10.1007/s00382-009-0676-7
- Endris, H. S., Omondi, P., Jain, S., Lennard, C., Hewitson, B., Chang'a, L., ... Tazalika, L. (2013). Assessment of the Performance of CORDEX Regional Climate Models in Simulating East African Rainfall. *Journal of Climate*, 26(21), 8453–8475. <http://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00708.1>
- Fettweis, X. (2006). *Reconstruction of the 1979-2005 Greenland ice sheet surface mass balance using satellite data and the regional climate model MAR*. Louvain-la-Neuve, Université catholique de Louvain.
- Fettweis, X., Franco, B., Tedesco, M., van Angelen, J. H., Lenaerts, J. T. M., van den Broeke, M. R., & Gallée, H. (2012). Estimating Greenland ice sheet surface mass balance contribution to future sea level rise using the regional atmospheric climate model MAR. *The Cryosphere*, 7(2), 469–489. <http://doi.org/10.5194/tcd-6-3101-2012>

Franco, B., Fettweis, X., Lang, C., & Erpicum, M. (2012). Impact of spatial resolution on the modelling of the Greenland ice sheet surface mass balance between 1990–2010, using the regional climate model MAR. *The Cryosphere*, 6(3), 695–711. <http://doi.org/10.5194/tc-6-695-2012>

Gallée, H., Moufouma-Okia, W., Bechtold, P., Brasseur, O., Dupays, I., Marbaix, P., ... Lebel, T. (2004). A high-resolution simulation of a West African rainy season using a regional climate model. *Journal of Geophysical Research*, 109(D5). <http://doi.org/10.1029/2003JD004020>

Gbobaniyi, E., Sarr, A., Sylla, M. B., Diallo, I., Lennard, C., Dosio, A., ... Lamptey, B. (2014). Climatology, annual cycle and interannual variability of precipitation and temperature in CORDEX simulations over West Africa. *International Journal of Climatology*, 34(7), 2241–2257. <http://doi.org/10.1002/joc.3834>

Giorgi, F., Jones, C., & Asrar, G. R. (2009). Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *Bulletin - World Meteorological Organization*, 58(3), 175–183.

Giorgi, F., & Gutowski Jr., W. J. (2015). Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. *Annual Review of Environment and Resources*, 40(1), 150724171620008. <http://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021217>

Griffiths, J. (2004). Africa: Climate of. In *Encyclopedia of World Climatology* (pp. 6–14).

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(3), 623–642. <http://doi.org/10.1002/joc.3711>

Hernández-Díaz, L., Laprise, R., Sushama, L., Martynov, A., Winger, K., & Dugas, B. (2013). Climate simulation over CORDEX Africa domain using the fifth-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *Climate Dynamics*, 40(5), 1415–1433. <http://doi.org/10.1007/s00382-012-1387-z>

IPCC. (2014). Africa. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1199–1265.

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., ... Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. [http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)

- Kalognomou, E.-A., Lennard, C., Shongwe, M., Pinto, I., Favre, A., Kent, M., ... Büchner, M. (2013). A Diagnostic Evaluation of Precipitation in CORDEX Models over Southern Africa. *Journal of Climate*, 26(23), 9477–9506. <http://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00703.1>
- Karbou, F., Beucher, F., Bock, O., Lafore, J.-P., Mumba, Z., Ngamini, J.-B., ... Redelsperger, J.-L. (2012). Les leçons de l'expérience AMMA en matière de prévision numérique du temps. *La Météorologie, SP AMMA*, 49–54.
- Kim, J., Waliser, D. E., Mattmann, C. A., Goodale, C. E., Hart, A. F., Zimdars, P. A., ... Favre, A. (2014). Evaluation of the CORDEX-Africa multi-RCM hindcast: systematic model errors. *Climate Dynamics*, 42(5), 1189–1202. <http://doi.org/10.1007/s00382-013-1751-7>
- Klutse, N. A. B., Sylla, M. B., Diallo, I., Sarr, A., Dosio, A., Diedhiou, A., ... Büchner, M. (2016). Daily characteristics of West African summer monsoon precipitation in CORDEX simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 123(1), 369–386. <http://doi.org/10.1007/s00704-014-1352-3>
- Kouassi, A., Assamoi, P., Bigot, S., Diawara, A., Schayes, G., Yoroba, F., & Kouassi, B. (2010). Etude du climat ouest-africain à l'aide du modèle atmosphérique régional M.A.R. *Climatologie*, 7, 39–55.
- Krähenmann, S., Kothe, S., Panitz, H. J., & Ahrens, B. (2013). Evaluation of daily maximum and minimum 2-m temperatures as simulated with the regional climate model COSMO-CLM over Africa. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(3), 297–316. <http://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0468>
- Lafore, J. P., Flamant, C., Giraud, V., Guichard, F., Knippertz, P., Mahfouf, J. F., ... Williams, E. R. (2010). Introduction to the AMMA Special Issue on “Advances in understanding atmospheric processes over West Africa through the AMMA field campaign.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136(SUPPL. 1), 2–7. <http://doi.org/10.1002/qj.583>
- Laprise, R., Hernández-Díaz, L., Tete, K., Sushama, L., Šeparović, L., Martynov, A., ... Valin, M. (2013). Climate projections over CORDEX Africa domain using the fifth-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *Climate Dynamics*, 41(11), 3219–3246. <http://doi.org/10.1007/s00382-012-1651-2>
- Leduc-leballeur, M. (2012). *Influence océanique du golfe de Guinée sur la mousson en Afrique de l'Ouest*. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, Paris, France.
- Le Barbé, L., Lebel, T., & Tabsoba, D. (2002). Rainfall Variability in West Africa during the Years 1950 – 90. *Journal of Climate*, 15(2), 187–202. [http://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<0187:RVIWAD>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0187:RVIWAD>2.0.CO;2)

Love, T. B., Kumar, V., Xie, P., & Thiaw, W. (2004). A 20-year daily Africa precipitation climatology using satellite and gauge data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 5213–5216.

Mariotti, L., Diallo, I., Coppola, E., & Giorgi, F. (2014). Seasonal and intraseasonal changes of African monsoon climates in 21st century CORDEX projections. *Climatic Change*, 125(1), 53–65. <http://doi.org/10.1007/s10584-014-1097-0>

Messager, C., Gallée, H., & Brasseur, O. (2004). Precipitation sensitivity to regional SST in a regional climate simulation during the West African monsoon for two dry years. *Climate Dynamics*, 22(2-3), 249–266. <http://doi.org/10.1007/s00382-003-0381-x>

Navari, M., Margulis, S. A., Bateni, S. M., Tedesco, M., Alexander, P., & Fettweis, X. (2016). Feasibility of improving a priori regional climate model estimates of Greenland ice sheet surface mass loss through assimilation of measured ice surface temperatures. *The Cryosphere*, 10(1), 103–120. <http://doi.org/10.5194/tc-10-103-2016>

Nikulin, G., Jones, C., Giorgi, F., Asrar, G., Büchner, M., Cerezo-Mota, R., ... Sushama, L. (2012). Precipitation Climatology in an Ensemble of CORDEX-Africa Regional Climate Simulations. *Journal of Climate*, 25(18), 6057–6078. <http://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00375.1>

Panitz, H. J., Dosio, A., Büchner, M., Lüthi, D., & Keuler, K. (2014). COSMO-CLM (CCLM) climate simulations over CORDEX-Africa domain: Analysis of the ERA-Interim driven simulations at 0.44° and 0.22° resolution. *Climate Dynamics*, 42(11), 3015–3038. <http://doi.org/10.1007/s00382-013-1834-5>

Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644. <http://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>

Ramel, R., Gallé, H., & Messager, C. (2006). On the northward shift of the West African monsoon. *Climate Dynamics*, 26(4), 429–440. <http://doi.org/10.1007/s00382-005-0093-5>

Redelsperger, J. L., Thorncroft, C. D., Diedhiou, A., Lebel, T., Parker, D. J., Polcher, J. (2006). African monsoon multidisciplinary analysis: an international research project and field campaign. *Bull Am Meteorol Soc*, 87, 1739–1746.

Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Rudolf, B., Ziese, M. (2011). GPCC Full Data Reanalysis Version 6.0 at 0.5°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data. DOI: 10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V6_050

Scholzen, C. (2015). *Study of the recent disappearance of a tropical glacier in the Bolivian Andes with the help of the high resolution regional climate model MAR*. Université de Liège, Liège.

Stock, R. (2004). *Africa South of the Sahara : a geographical interpretation* (2nd ed). New York: Guilford Press.

Sultan, B., & Janicot, S. (2000). Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability. *Geophysical Research Letters*, 27(20), 3353–3356. <http://doi.org/10.1029/1999GL011285>

Sultan, B., & Janicot, S. (2003). The West African monsoon dynamics. Part II: The “preonset” and “onset” of the summer monsoon. *Journal of Climate*, 16(21), 3407–3427. [http://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<3407:TWAMDP>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<3407:TWAMDP>2.0.CO;2)

Sylla, M. B., Giorgi, F., Coppola, E., & Mariotti, L. (2013). Uncertainties in daily rainfall over Africa: assessment of gridded observation products and evaluation of a regional climate model simulation. *International Journal of Climatology*, 33(7), 1805–1817. <http://doi.org/10.1002/joc.3551>

Trzaska, S., & Schnarr, E. (2014). *A Review of Downscaling Methods for Climate Change Projections*. Washington, Etats-Unis.

UNEP. (2008). *Africa: Atlas of Our Changing Environment*. Nairobi, Kenya.

Washington, R., & Brew, D. (2004). *African Climate Report : a report comissioned by the UK Government to review African climate science, policy and options for action*.

Wyard, C., Fettweis, X., & Erpicum, M. (2015). Étude de l'évolution de l'enneigement dans les hautes fagnes (Belgique) au cours des cinquante dernières années à l'aide du Modèle Climatique Régional MAR. In *XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie* (pp. 84–90). Liège.

Autres références

Matsuura et Willmott. (2012). Terrestrial Air Precipitation: 1900-2010 Gridded Monthly Time Series : http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/Global2011/README.GlobalTsP2011.html

Annexes

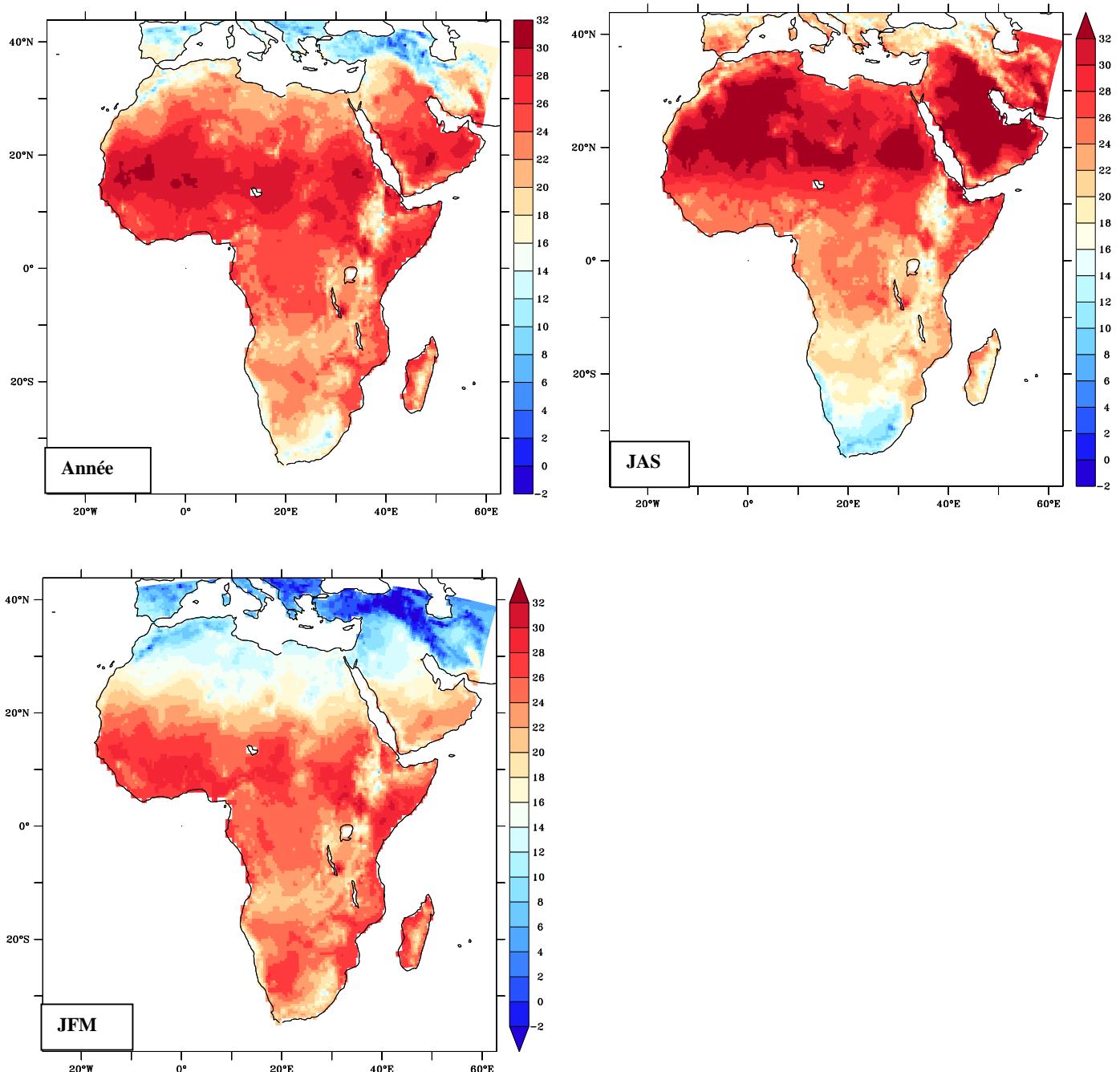


Annexe 1: Carte politique de l'Afrique. Depuis <https://www.sangonet.com/afriqg/CartepolAfrique.html>. Consulté en Aout 2016

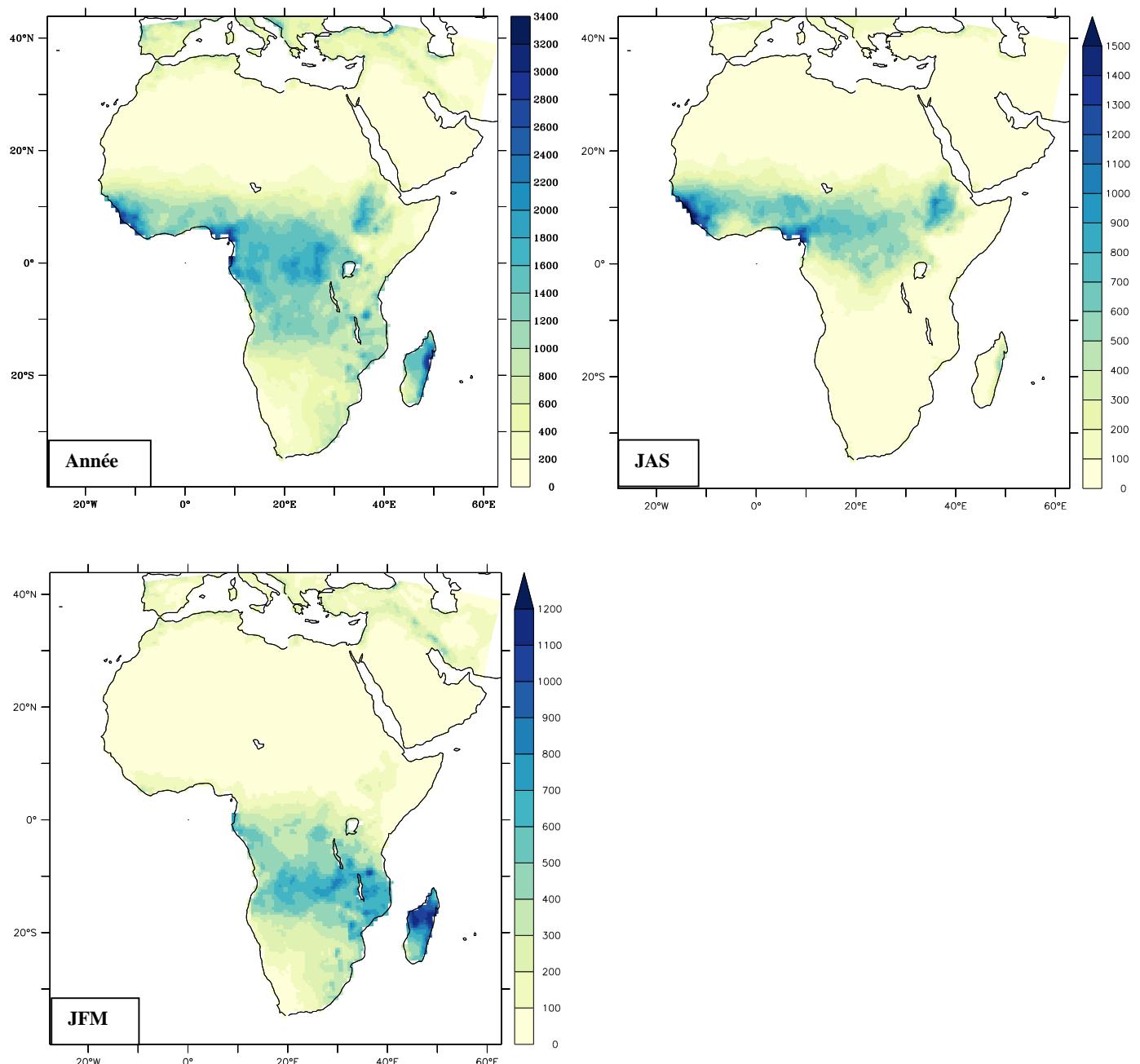
Liste des articles ayant évalué des RCM sur le domaine CORDEX Afrique

- | | |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| Buontempo <i>et al.</i> (2015) | Kim <i>et al.</i> (2014) |
| Dosio <i>et al.</i> (2015) | Klutse <i>et al.</i> (2016), |
| Dosio et Panitz (2016) | Krähenmann <i>et al.</i> (2013) |
| Endris <i>et al.</i> (2014) | Laprise <i>et al.</i> (2013), |
| Gbobaniyi <i>et al.</i> (2014), | Mariotti <i>et al.</i> (2014) |
| Hernández-Díaz <i>et al.</i> (2013) | Nikulin <i>et al.</i> (2012) |
| Kalognomou <i>et al.</i> (2013), | Panitz <i>et al.</i> (2014) |

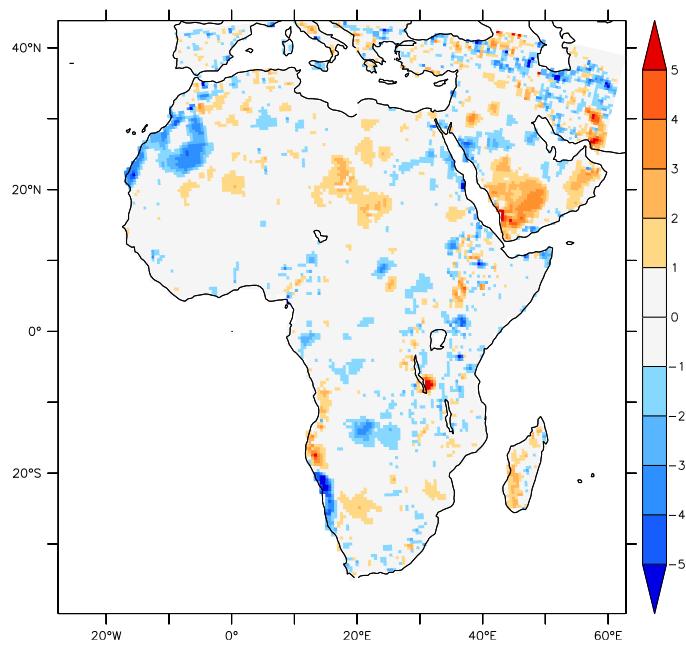
Annexe 2: Liste des articles ayant évalué des RCM sur le domaine CORDEX Afrique



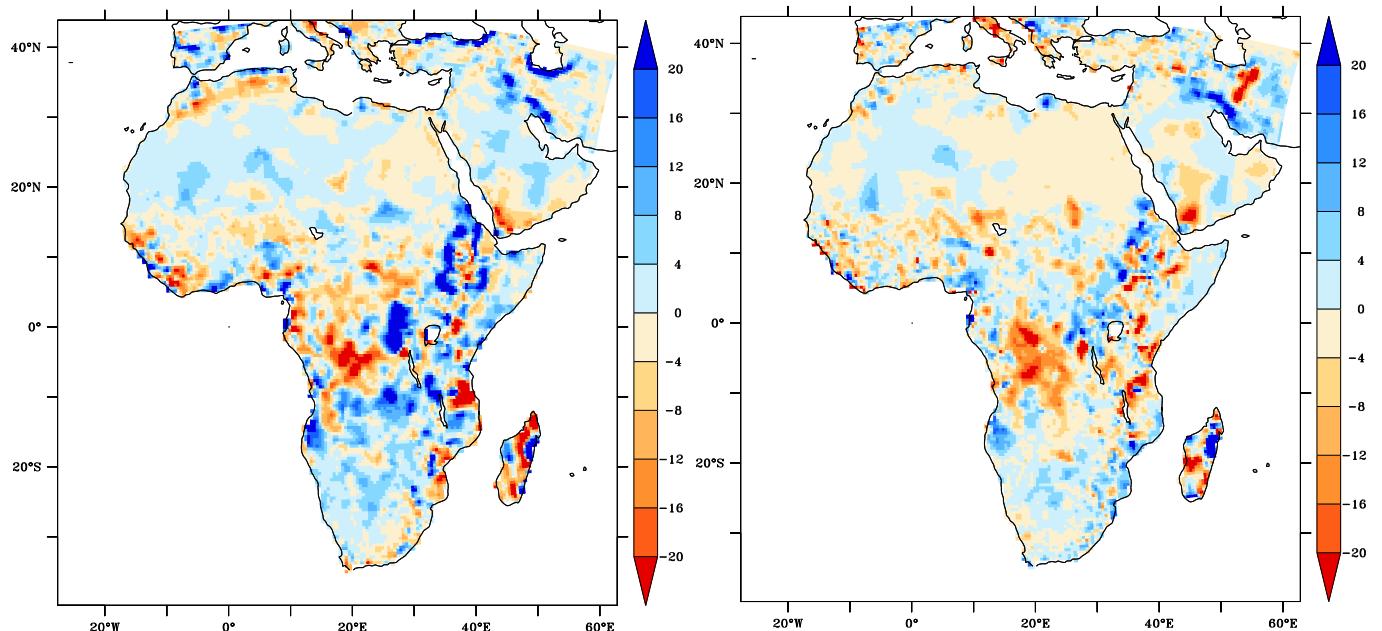
Annexe 3 : Moyenne mensuelle des températures ($^{\circ}\text{C}$) des UDEL pour la période 1990-2000



Annexe 4: Somme annuelle moyenne (mm/an) et somme des saisons (mm/saison) des précipitations GPCC pour la période 1990-2000

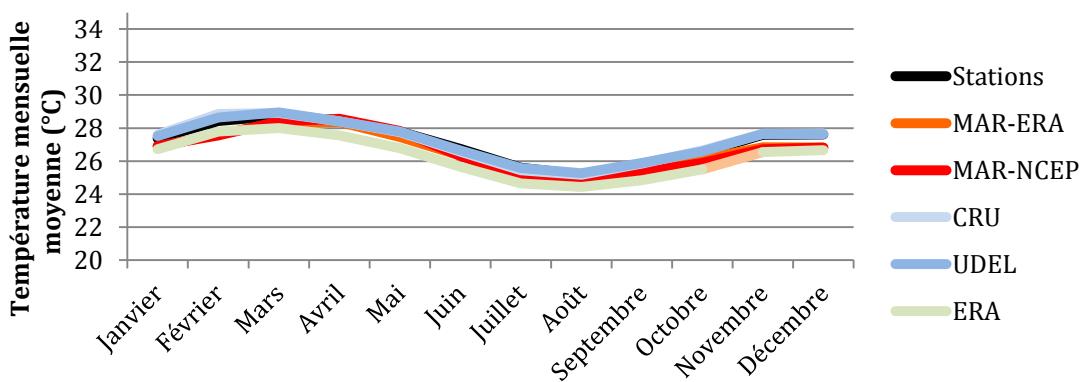


Annexe 5: Biais moyens mensuels des températures (°C/mois) sur la période 1990-2000 des UDEL par rapport aux CRU (UDEL-CRU)

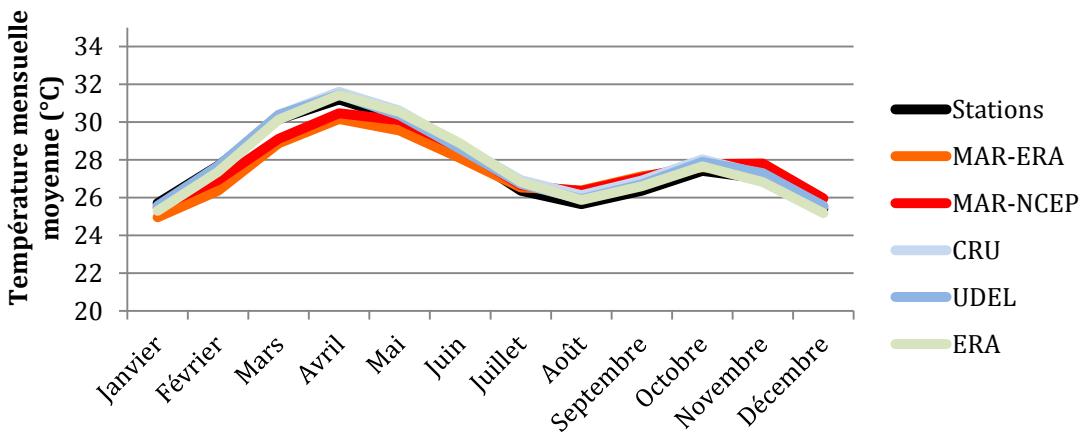


Annexe 6: Biais moyens mensuels des précipitations (mm/mois) sur la période 1990-2000 des GPCC par rapport au CRU (gauche) et UDEL (droite)

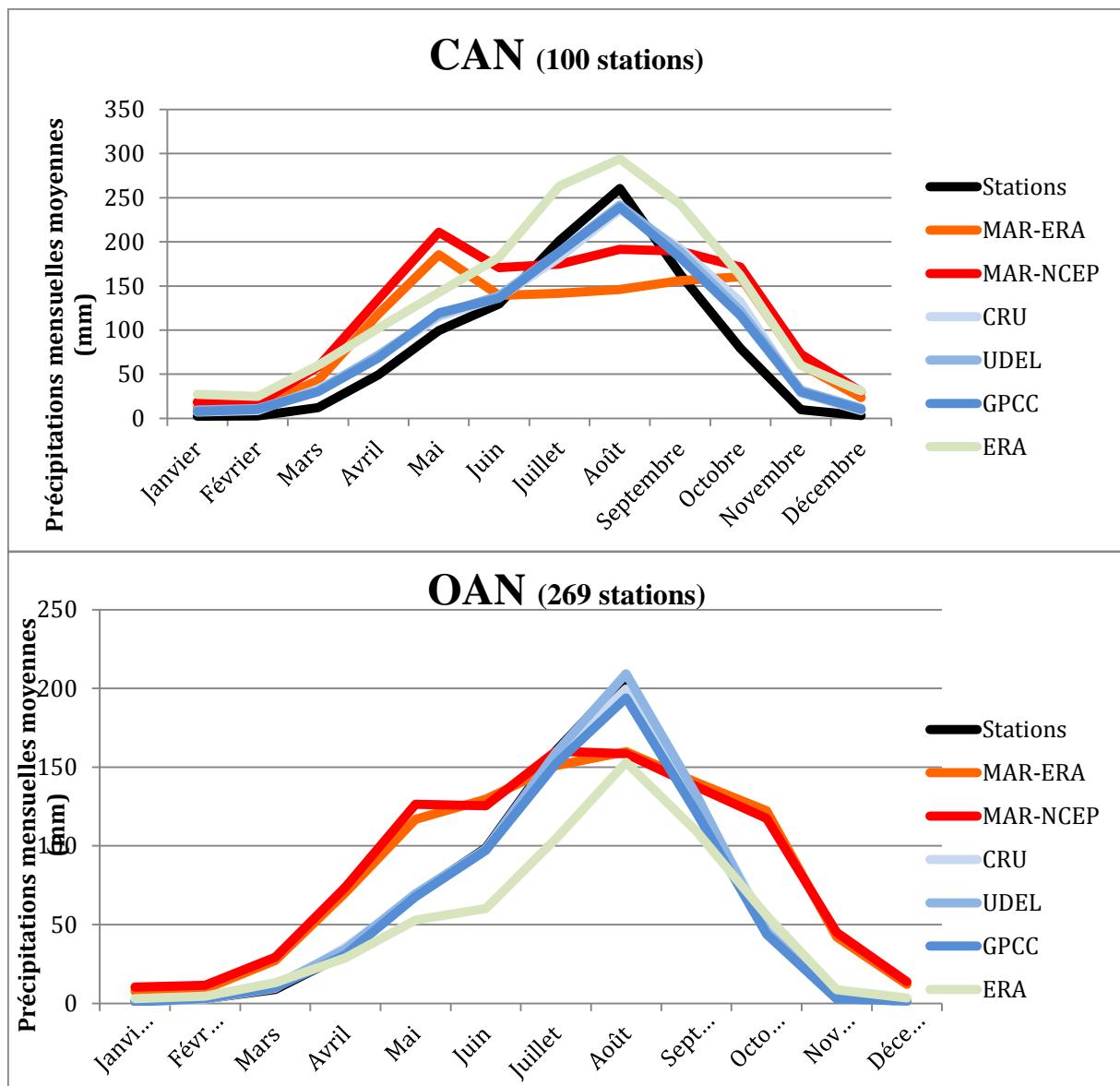
OAS (7 stations)



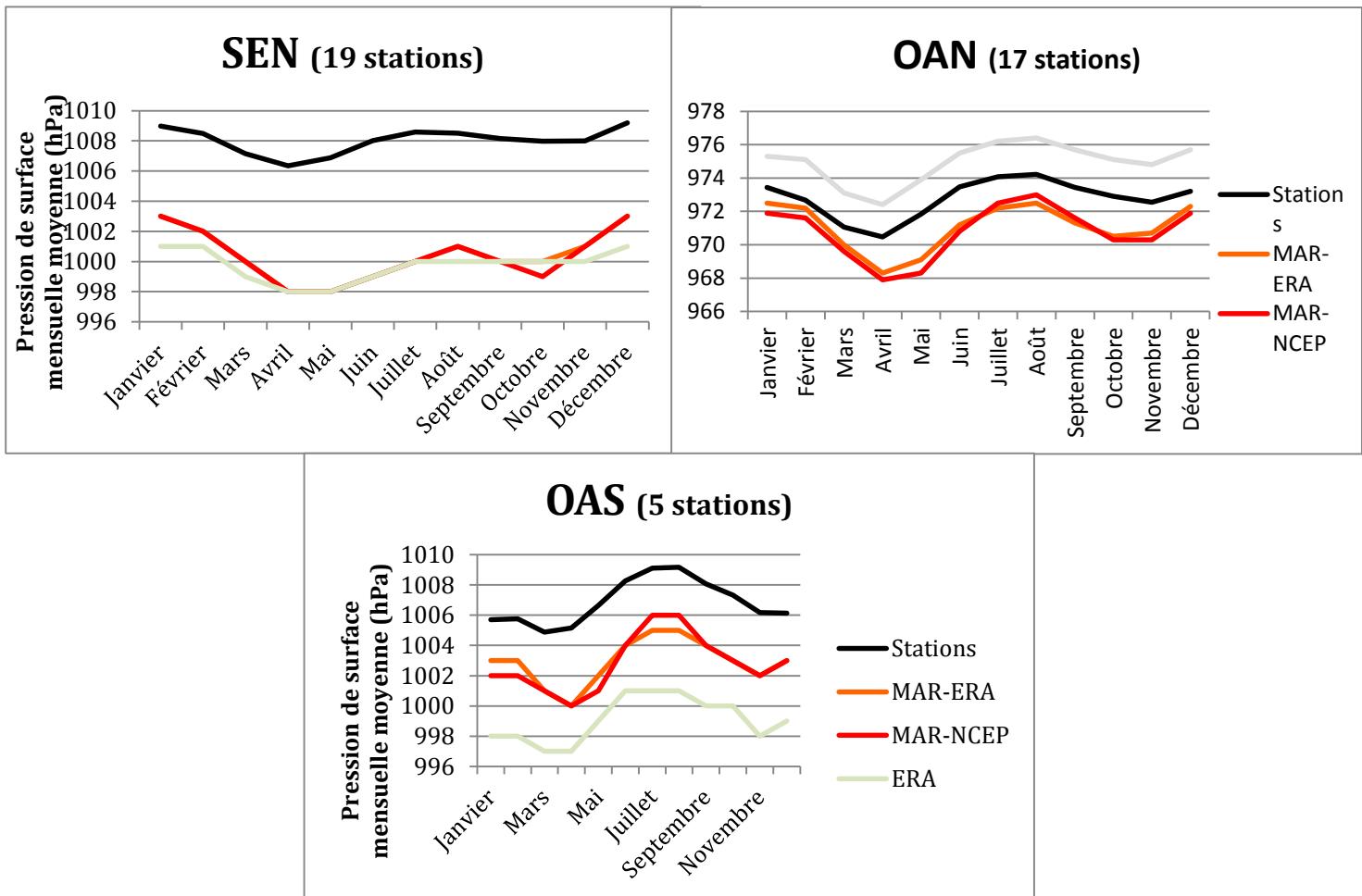
OAN (46 stations)



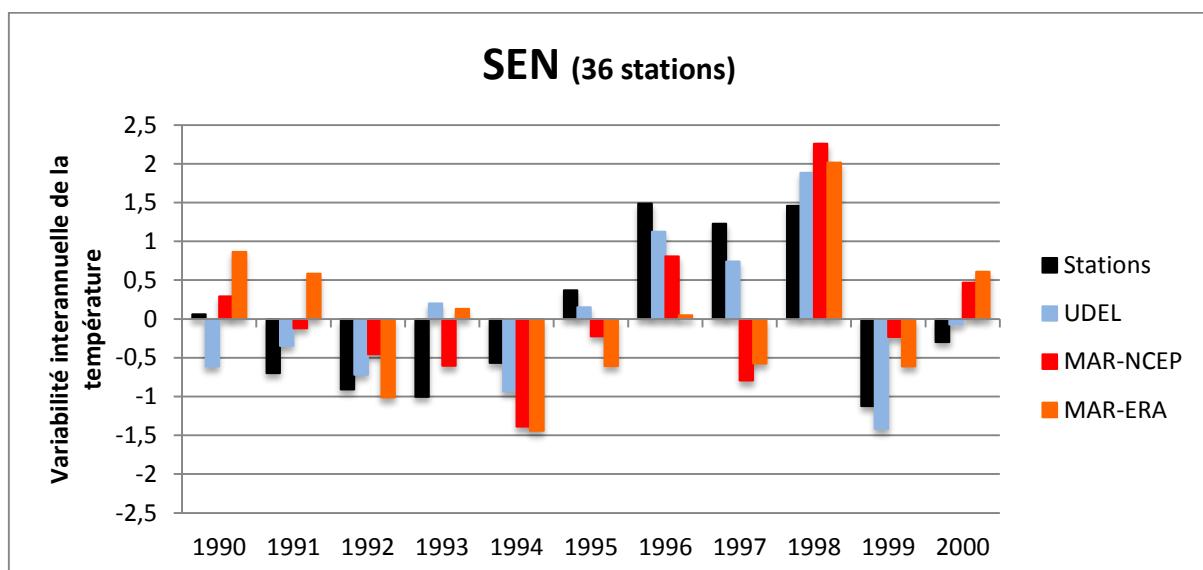
Annexe 7 : Cycle annuel moyen des températures (°C) par sous-régions d'évaluation pour la période 1990-2000. Seuls les pixels représentés par nos stations ont été extraits pour le calcul des moyennes mensuelles.

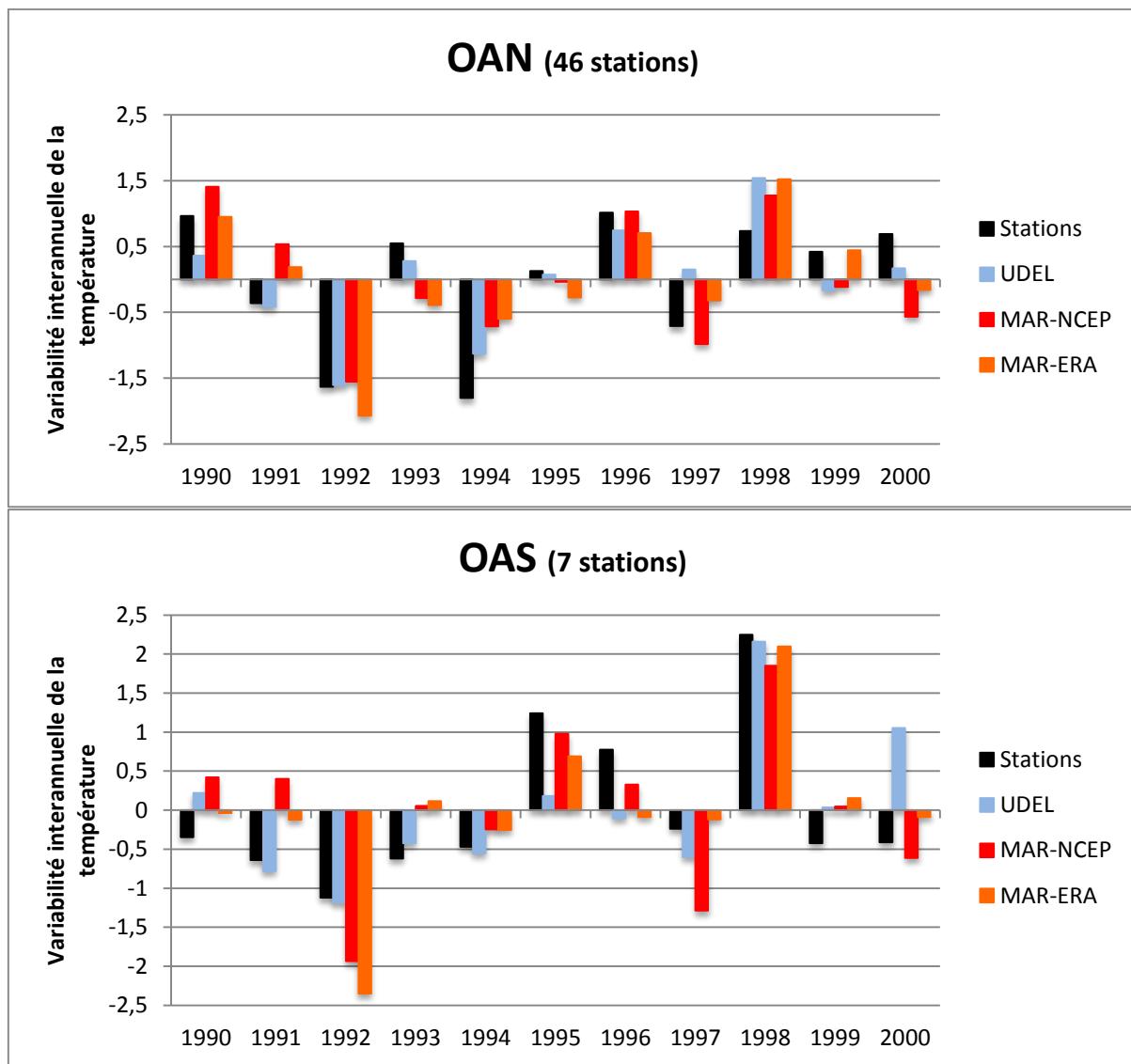


Annexe 8 : Cycle annuel moyen des précipitations (mm/mois) par sous-régions d'évaluation pour la période 1990-2000. Seuls les pixels représentés par nos stations ont été extraits pour le calcul des sommes mensuelles.

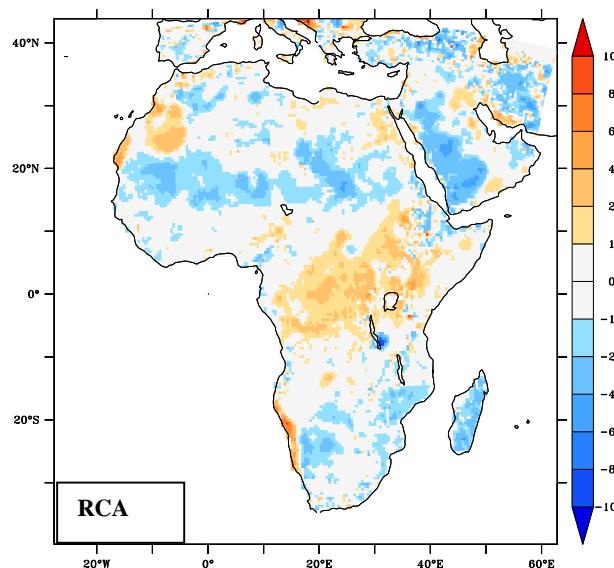
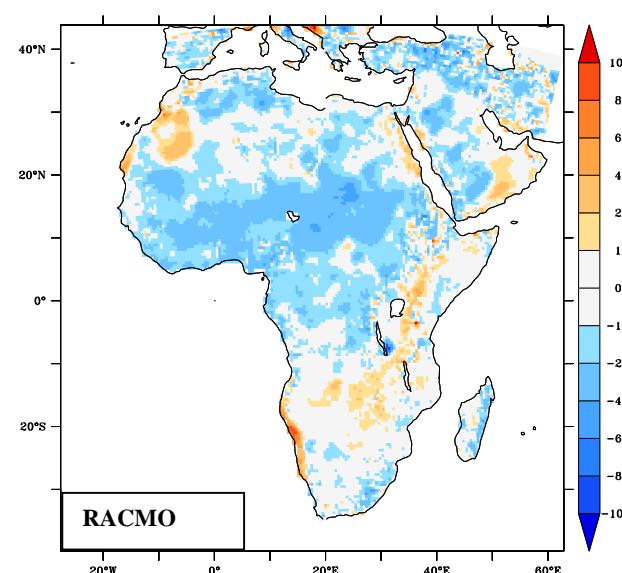
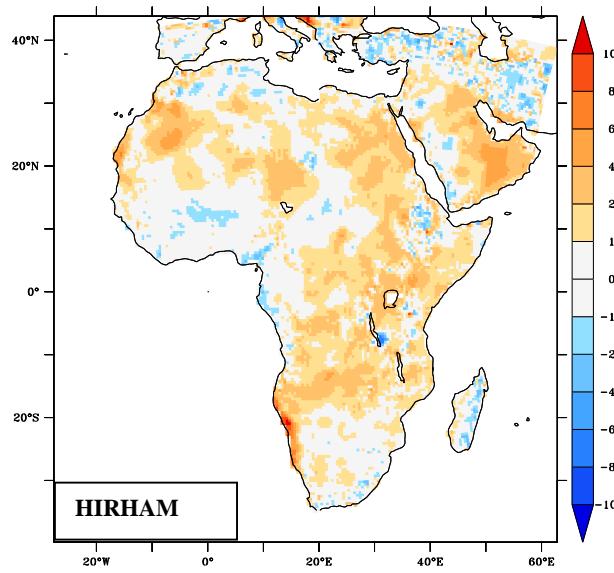
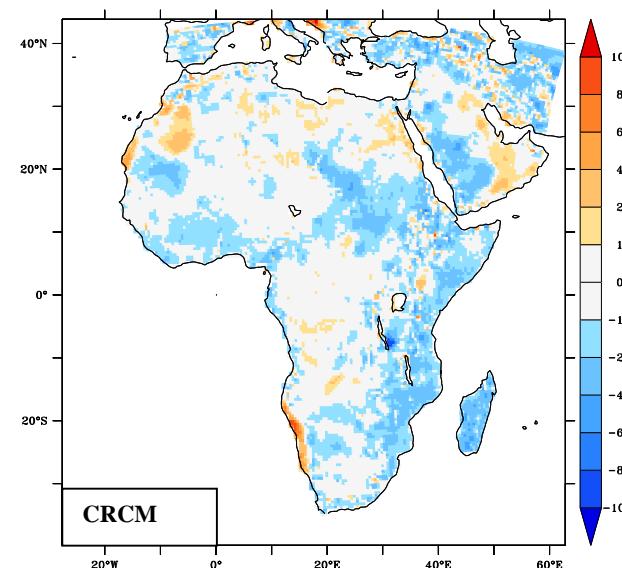
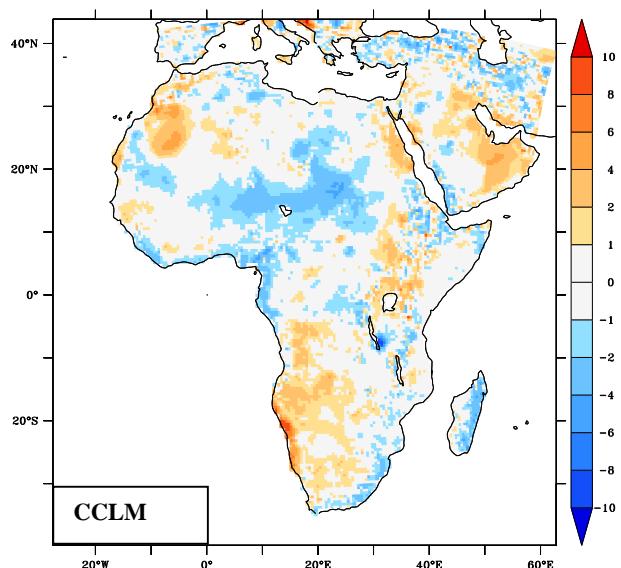


Annexe 9 : Cycle annuel moyen de la pression de surface (hPa/mois) par sous-régions d'évaluation pour la période 1990-2000. Seuls les pixels représentés par nos stations ont été extraits pour le calcul des moyennes mensuelles.

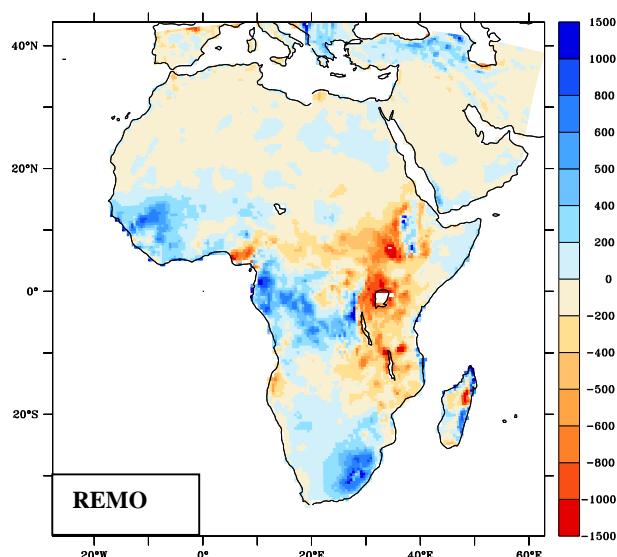
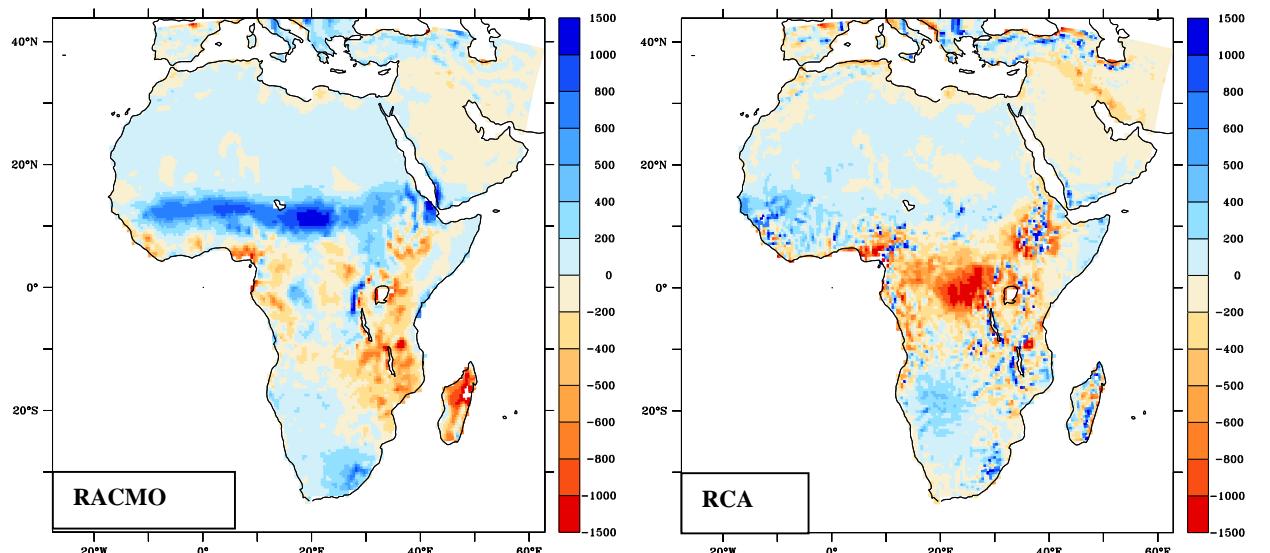
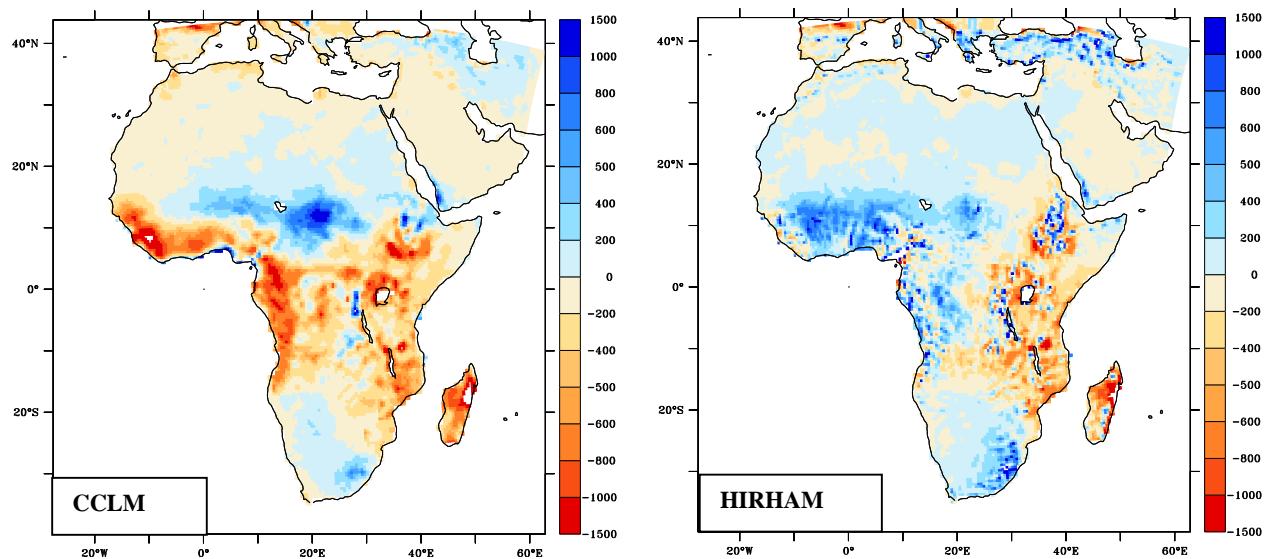




Annexe 10 : Variabilité interannuelle de la température annuelle normalisée par l'écart-type de la période (1990-2000) par sous-régions d'évaluation. Seuls les pixels représentés par nos stations ont été extraits pour le calcul de la variabilité interannuelle.

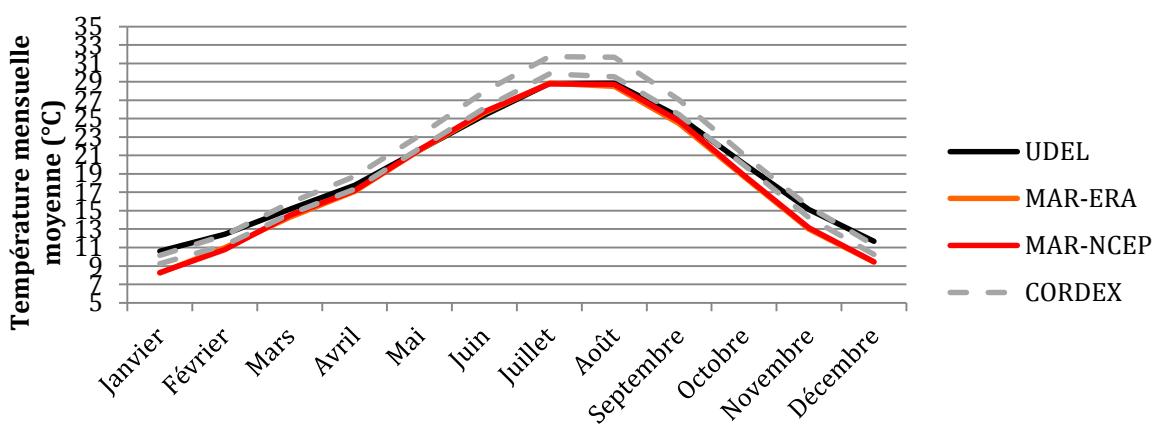


Annexe 11 : Biais moyens mensuels des températures (°C/mois) d'HadGEM3 et REMO sur la période 1990-2000 (RCM – UDEL).

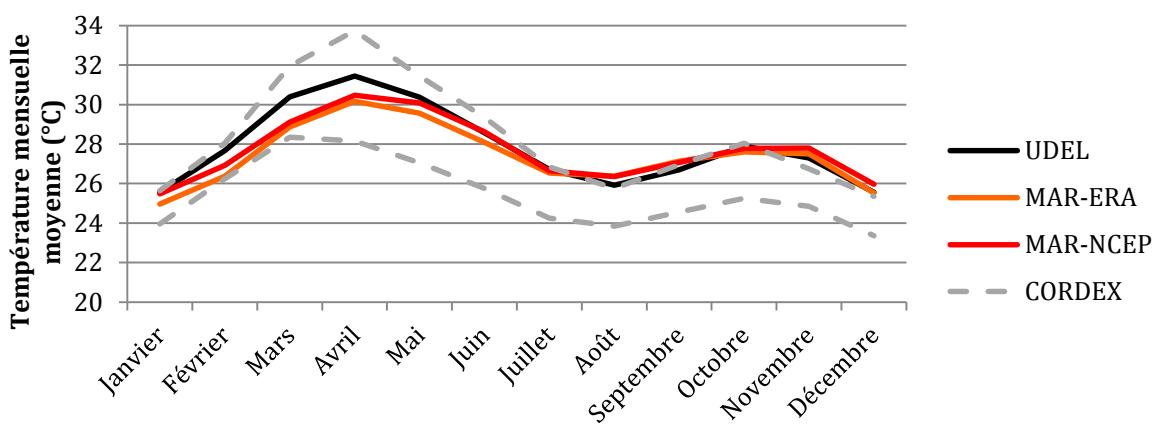


Annexe 12 : Biais moyens annuels de la somme des précipitations (mm/an) d'HadGEM3 et CRCM pour la période 1990-2000 (RCM – GPCC)

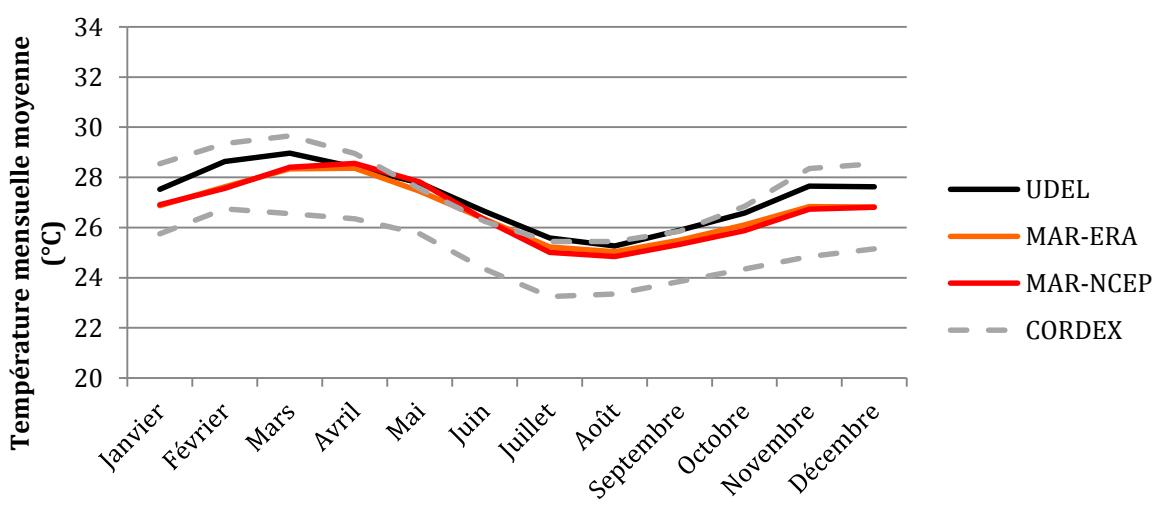
AM (13 stations)



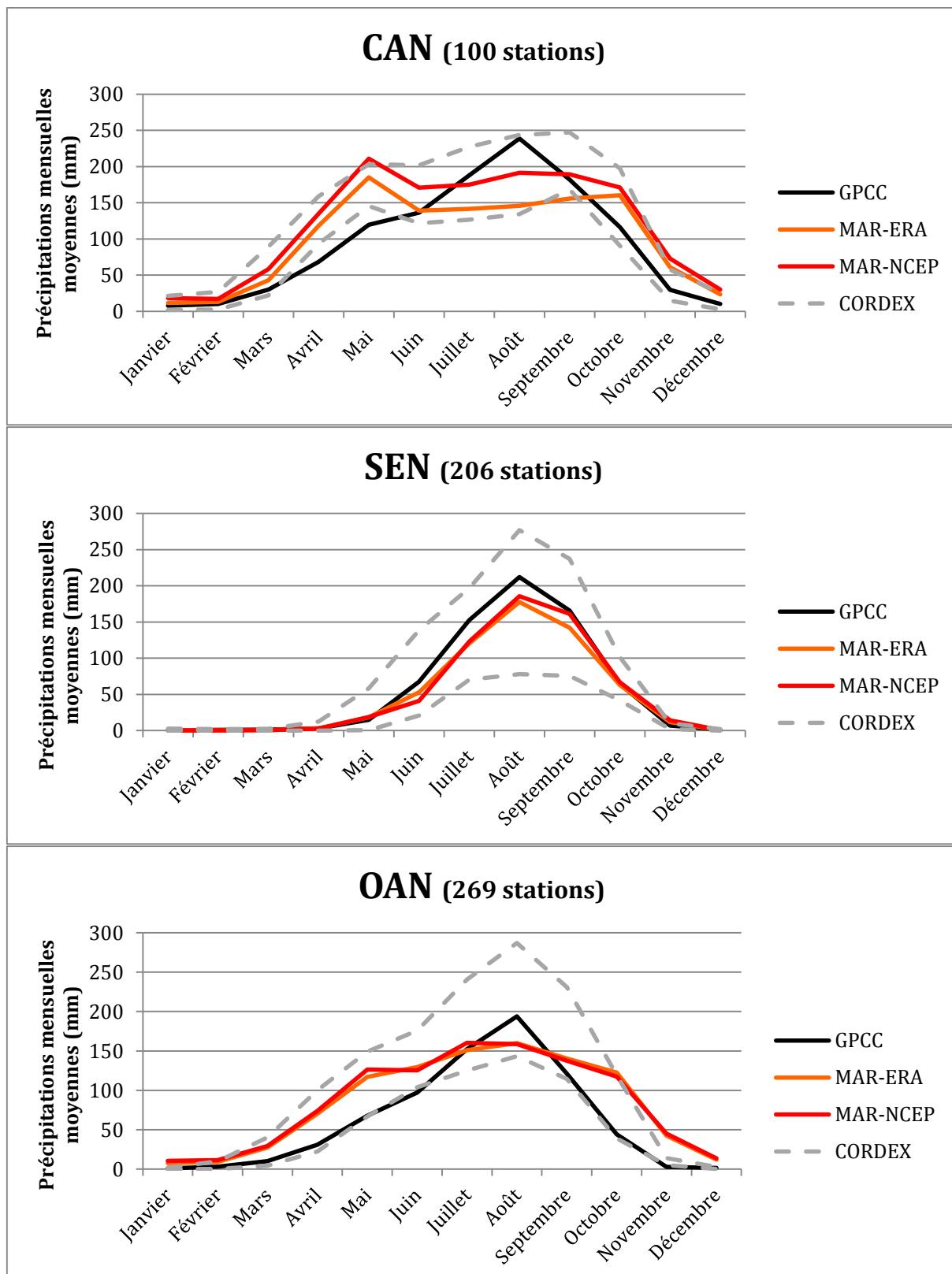
OAN (46 stations)



OAS (7 stations)

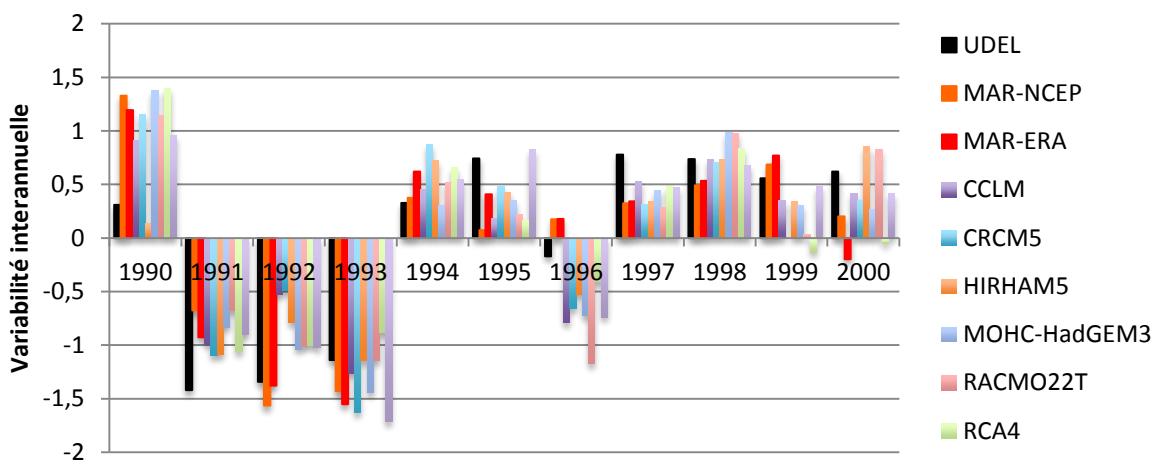


Annexe 13 : Cycle annuel moyen des températures (°C) par sous-régions d'évaluation pour la période 1990-2000. Seuls les pixels représentés par nos stations ont été extraits pour le calcul des sommes mensuelles. La variabilité entre les modèles CORDEX est représentée par les traits tiretés gris.

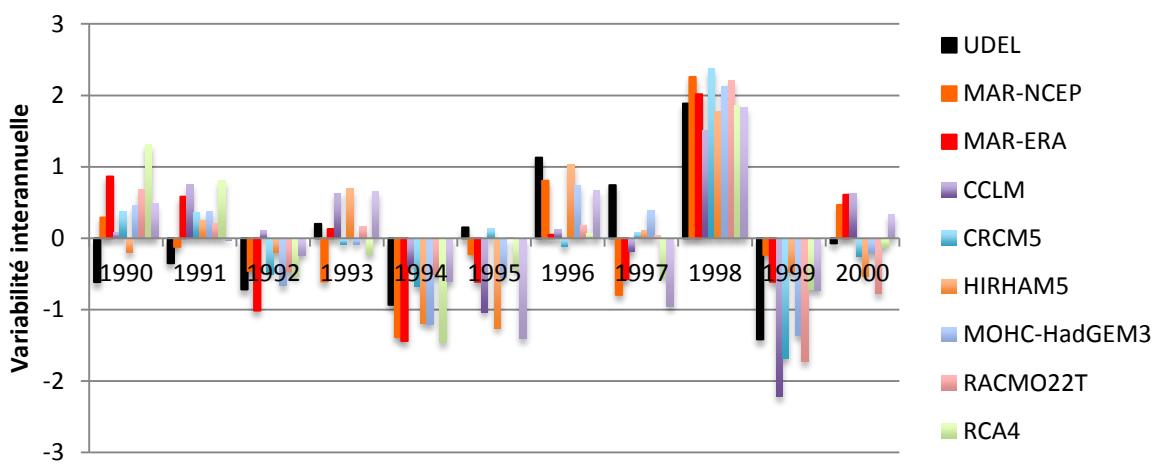


Annexe 14 : Cycle annuel moyen des précipitations (°C) par sous-régions d'évaluation pour la période 1990-2000. Seuls les pixels représentés par nos stations ont été extraits pour le calcul des moyennes mensuelles. La variabilité entre les modèles CORDEX est représentée par les traits tiretés gris.

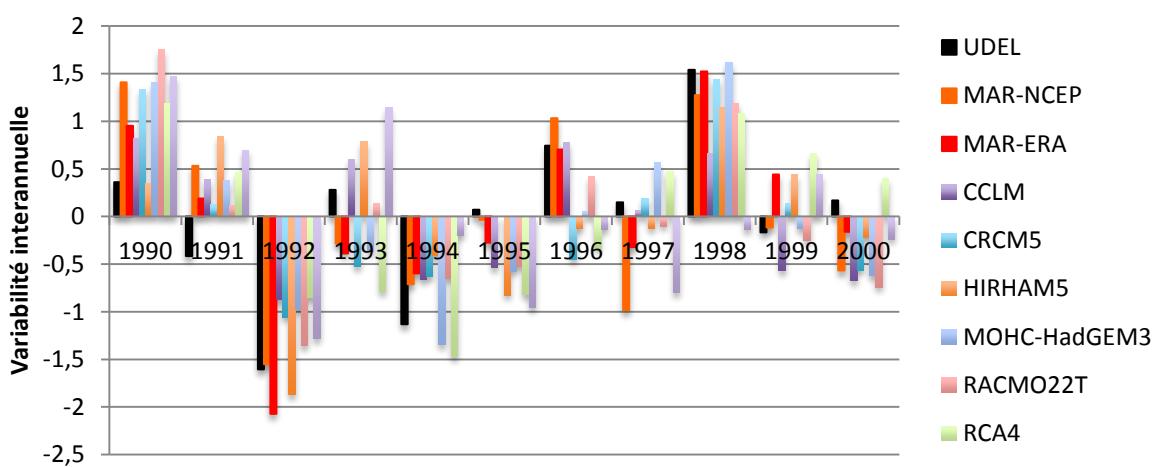
AM (13 stations)

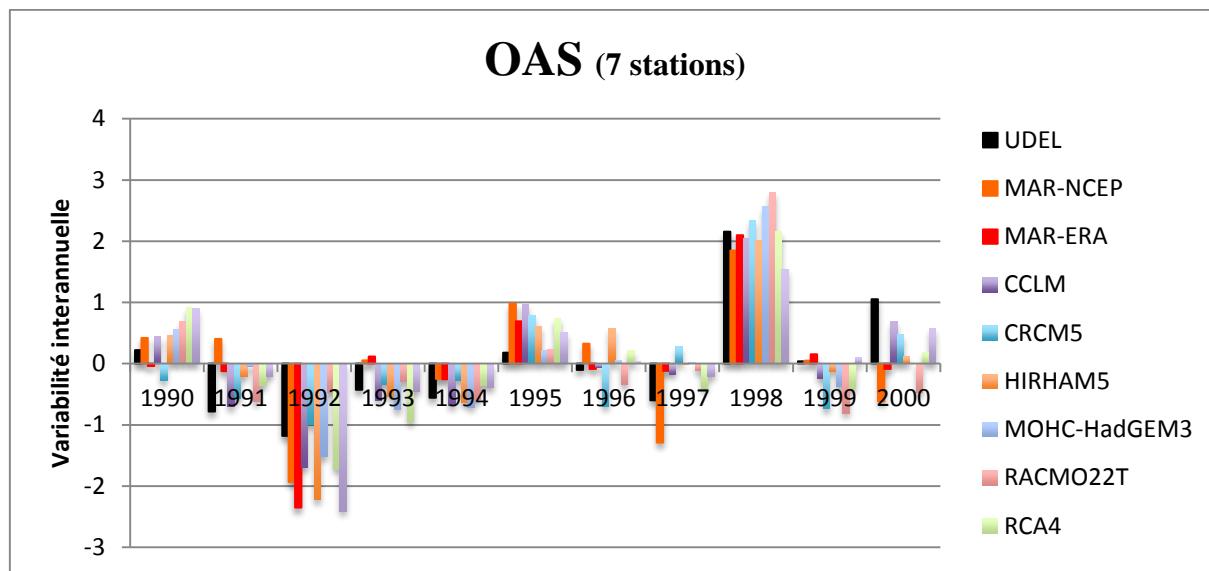


SEN (36 stations)



OAN (46 stations)





Annexe 15 : Variabilité interannuelle de la température annuelle normalisée par l'écart-type de la période (1990-2000) par sous-régions d'évaluation. Seuls les pixels représentés par nos stations ont été extraits pour le calcul de la variabilité interannuelle ?