HAL open science

Les vagues de chaleur au Sahel : caractérisation, mécanismes, prévisibilité

Boutheina Oueslati, Marie-Jeanne Sambou, Benjamin Pohl, Sandra Rome, Vincent Moron, Serge Janicot

To cite this version:

Boutheina Oueslati, Marie-Jeanne Sambou, Benjamin Pohl, Sandra Rome, Vincent Moron, et al.. Les vagues de chaleur au Sahel : caractérisation, mécanismes, prévisibilité. 29e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Jul 2016, Besançon, France. pp.327-332. hal-01359873

HAL Id: hal-01359873

https://hal.science/hal-01359873v1

Submitted on 8 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

XXIXe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie

Climat et pollution de l'air

Actes du Colloque organisé à Besançon
du mercredi 6 au samedi 9 juillet 2016

Editeurs scientifiques
Jean-Michel FALLOT, Daniel JOLY, Nadine BERNARD

Colloque organisé par l'Institut de géographie et durabilité (IGD) de l'Université de Lausanne (UNIL, Suisse) et par les laboratoires ThéMA et Chrono-Environnement de l'Université Bourgogne Franche-Comté (UBFC) site de Besançon (France)

LES VAGUES DE CHALEUR AU SAHEL : CARACTERISATION, MECANISMES, PREVISIBILITE

OUESLATI B.[1], SAMBOU M.-J. G.[2], POHL B.[1], ROME S.[3], MORON V.[4], JANICOT S.[5]

[1]*CRC, UMR6282 Biogéosciences, CNRS/Université Bourgogne Franche-Comté, Dijon, France, benjamin.pohl@u-bourgogne.fr*
[2]*LPAOSF/ESP/UCAD, Dakar, Sénégal*
[3]*Université de Grenoble Alpes, LTHE UMR 5564 CNRS/UJF/IRD/G-INP, Grenoble, France*
[4]*CEREGE, UM34 CNRS/univ. Aix-Marseille, Aix-en-Provence, France*
[5]*LOCEAN, UMR7159 Sorbonne Univ. UPMC-CNRS-IRD-MNHN, Paris, France*

Résumé *– Les mécanismes contrôlant les caractéristiques (durée, intensité, extension) des vagues de chaleur (HW) sahéliennes sont analysés sur la période 1979-2014 à l'aide des observations de la base GSOD et des réanalyses ERA-Interim. Une décomposition des HW dans les différents termes du bilan d'énergie montre un poids prépondérant du rayonnement solaire incident sur la variabilité des températures maximales (Tx) quotidiennes, et de la vapeur d'eau atmosphérique augmentant l'effet de serre naturel pour moduler les températures minimales (Tn). La tendance de fond au réchauffement, non expliquée par les variables précédemment citées, est vraisemblablement reliée à une modification d'origine anthropique des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre. Une analyse de la prévisibilité d'ensemble de ces événements par un modèle météo et pour une échéance allant jusqu'à 15 jours montre une très forte variabilité, d'une HW à l'autre, des incertitudes et des erreurs associées à la prévision : sur le printemps 2010, le plus chaud enregistré à ce jour au Sahel, les pics de Tn, associés à une masse d'air plus humide, sont nettement plus prévisibles que les pics de Tx, modulés par la fraction nuageuse et le rayonnement solaire incident.*

Mots-clés : *vague de chaleur, prévisibilité, variabilité, Sahel, ACASIS*

Abstract *–* ***Sahelian heat waves: characterization, mechanisms, predictability.*** *The mechanisms controlling Sahelian heat wave (HW) variability are examined on the period 1979-2014 using the GSOD observational database and ERA-Interim reanalyses. HW events are analyzed through all terms of the atmospheric energy balance, showing a predominant role of incoming shortwave radiation on daily maximum temperature (Tx) and atmospheric water vapor on minimum temperature (Tn). The low-frequency warming trend, not explained by the previous terms, is thought to relate to the increase of greenhouse gases concentrations, due to anthropogenic emissions. The predictability of Sahelian HW events is assessed for lead times reaching up to 15 days. The model's skill, biases and uncertainties all highly vary from one event to another. During the very warm 2010 spring, the Tn peaks associated with a moister air mass appears as much more predictable than those concerning Tx and modulated by the cloud fraction and incoming solar radiation.*

Keywords: *heat wave, predictability, variability, Sahel, ACASIS*

Introduction

Les vagues de chaleur (HW pour *heat wave* en anglais) au Sahel font l'objet d'une attention particulière, de la communauté française en particulier, les efforts étant fédérés par le programme de recherche ACASIS financé par l'Agence Nationale de la Recherche française. Il cherche à comprendre les mécanismes et processus gouvernant la variabilité des températures sur le Sahel au printemps et donc ceux qui favorisent l'occurrence des HW. D'autres tâches réalisées dans ce programme concernent les biais radiatifs des modèles de prévision du temps et du climat, ainsi que l'analyse de la perception des HW et de leurs conséquences sanitaires. À diverses échelles temporelles, il s'agira en outre d'analyser la prévisibilité météorologique de ces événements, les prévisions saisonnières, et les évolutions projetées par les modèles de climat sur le siècle en cours dans le cadre du réchauffement climatique global d'origine anthropique.

Un travail associé à celui-ci (Rome *et al*. 2016) part du constat qu'une définition unique n'existe pas pour extraire et caractériser les HW. Il propose, d'une part, une revue des études

antérieures s'étant intéressées aux climats de type tropical semi-aride, et d'autre part, des critères de définition adaptés au cas sahélien. Dans le présent travail, nous utilisons les mêmes évènements et analysons les différents termes du bilan d'énergie atmosphériques associés aux HW sahéliennes, afin de déterminer les mécanismes et processus contrôlant leur occurrence. En nous appuyant sur des données de prévisions d'ensemble *a posteriori* (« re-forecast »), nous analysons enfin la prévisibilité météorologique de ces évènements, à travers l'étude du printemps 2010 (le plus chaud à ce jour des 50 dernières années sur le Sahel), et ce pour une échéance de prévision pouvant atteindre 15 jours.

1. Données et Méthodes

Les données quotidiennes de température observées proviennent de la base GSOD sur la période 1973-2014 et couvrent 145 stations (cf. leur répartition dans Rome *et al*. 2016) réparties sur un large espace africain (24°N-3°N ; 24°W-36°E). Ces observations synoptiques comprennent les températures quotidiennes maximales (Tx), minimales (Tn), moyennes (Tm) et la température du point de rosée (Td).

Les réanalyses ERA-Interim (Dee *et al*., 2011 ; ERA-I ci-après) sont utilisées pour analyser la dynamique et la thermodynamique associées aux HW (définies selon les préconisations de Rome *et al.* 2016). ERA-I est disponible depuis 1979. Il s'agit d'une série d'analyses *a posteriori* réalisées avec le modèle IFS du Centre Européen, utilisant un module d'assimilation 4D-Var avec une analyse toutes les 6h et une intégration de 12h. La résolution native est d'environ 0.75° (troncature T255).

Les données de prévisions ensemblistes *a posteriori* (« re-forecast version 2 », RF2 ci-après) de la NOAA (Hamill *et al*., 2013) sont enfin utilisées pour caractériser et analyser la prévisibilité des HW. RF2 est une série d'analyses réalisées chaque jour depuis décembre 1984 avec une version constante du modèle GEFS. Onze membres sont obtenus par perturbation des conditions initiales obtenues par assimilation 4D-Var, et les intégrations atteignent une échéance de 16 jours, les sorties du modèle étant archivées toutes les 3 heures. La résolution horizontale est d'environ 0.75° (T254) pendant les 8 premiers jours d'intégration puis 1° (T190) pendant les 8 jours suivants.

2. Résultats

2.1 Bilan d'énergie atmosphérique associé aux HW sahéliennes

Dans cette première partie, nous utilisons les réanalyses ERA-I pour analyser les différents termes du bilan d'énergie de l'atmosphère associés aux évènements de HW sur le Sahel. Cette analyse a pour finalité de déterminer les processus exerçant une influence significative sur la variabilité temporelle des évènements de HW.

Soit h l'énergie statique humide (en kJ kg^{-1}) de l'atmosphère sur la région d'intérêt, avec $h=CpT+gZ+LQ$ où CpT est l'énergie sensible (Cp la chaleur spécifique de l'air à pression constante et T la température absolue en K), LQ l'énergie latente (L la chaleur latente de condensation de l'eau et Q l'humidité spécifique en g kg^{-1}) et gZ l'énergie potentielle (g l'intensité de la pesanteur et Z l'altitude en km). La variabilité temporelle de h est donnée par :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\int_0^{p_s} \nabla.(hV)\frac{dp}{g} + R + SH + LH \qquad \text{(Eq. 1)}$$

où $-\int_0^{p_s} \nabla.(hV)\frac{dp}{g}$ est l'intégrale sur toute la colonne d'air de la divergence de h, R est le rayonnement net calculé comme la différence entre les flux radiatifs au sommet de

l'atmosphère et la surface, *LH* est le flux de chaleur latente à la surface et *SH* le flux de chaleur sensible à la surface.

Il s'agit par la suite d'analyser les anomalies de ces différents termes pendant le printemps 2010, avant d'étendre l'analyse à l'ensemble de la période post-1979.

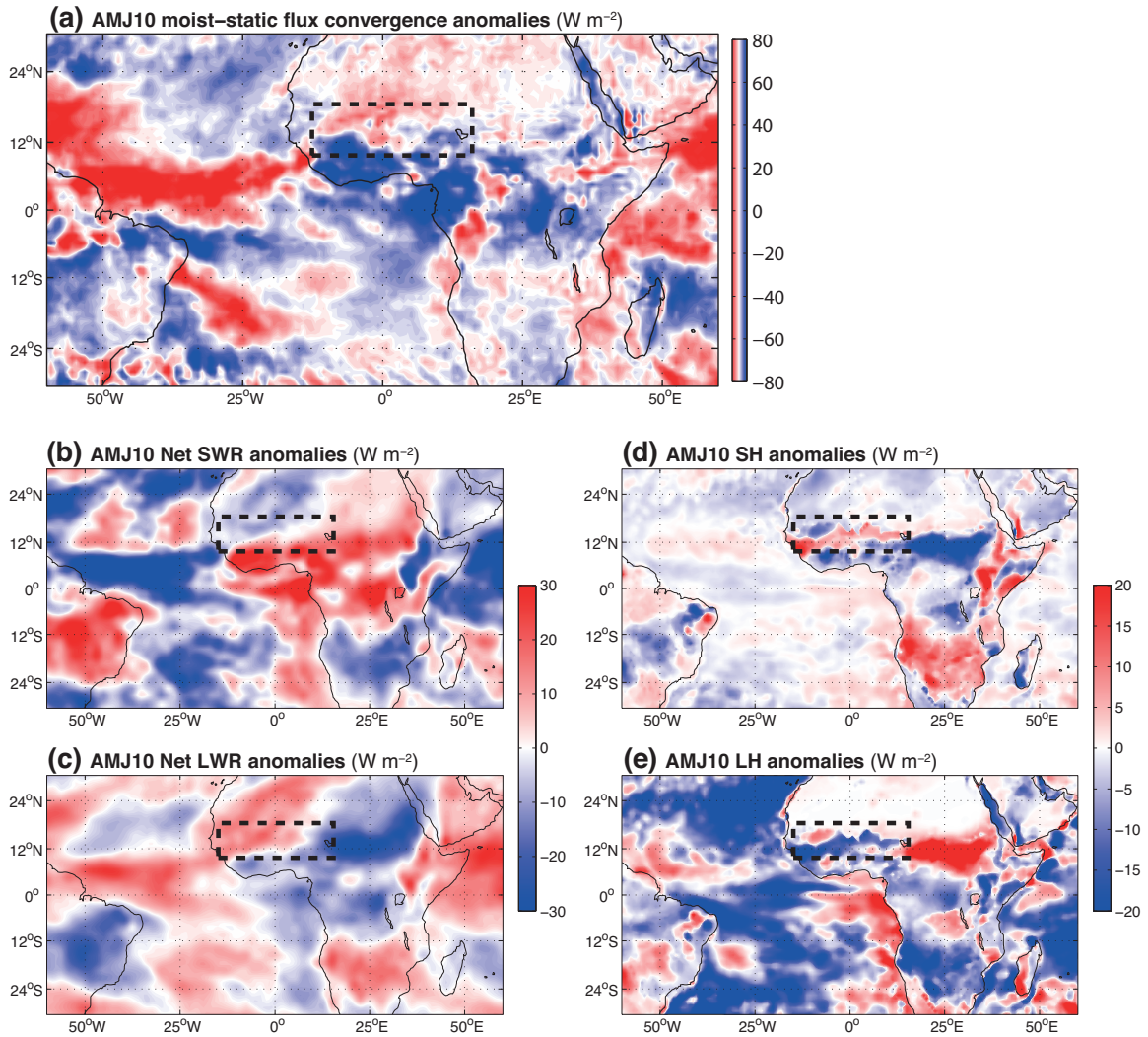

Figure 1. Anomalies des différents termes du bilan d'énergie (Eq. 1) pour la période avril-mai-juin 2010 (en W m^{-2}) pendant les HW par rapport à la climatologie 1979-2014. (a) Convergence des flux d'énergie statique humide intégrés sur la verticale : les valeurs positives (négatives) correspondent à des anomalies de convergence (divergence) des flux d'énergie. (b) Rayonnement net ondes courtes. (c) Rayonnement net ondes longues. (d) Flux d'énergie sensible à la surface. (e) Flux d'énergie latente à la surface. Toutes les anomalies montrées sur la figure sont significatives à 95% selon un *t*-test.

Au printemps 2010, saison anormalement chaude sur le Sahel central, des anomalies convergentes prévalent globalement sur le Sahel (Fig. 1a), s'opposant à des anomalies divergentes sur une bonne partie de l'Atlantique. Ce résultat suggère que l'Atlantique a été une source d'énergie advectée ensuite vers l'Afrique, ce qui a contribué aux températures saisonnières élevées. Si le rayonnement visible présente des anomalies faibles (Fig. 1b), l'infra-rouge (Fig. 1c) montre *a contrario* des anomalies saisonnières fortes (> 10 W m^{-2}) sur le Sahel ouest et central. Elles résultent d'un effet de serre accru en raison de la présence de vapeur d'eau dans la troposphère, advectée vers le Sahel (Fig. 1a) depuis l'Atlantique, où les flux de chaleur latente à la surface sont anormalement forts (Fig. 1e). Les anomalies de flux de chaleur sensible sont plus modestes (Fig. 1d). Au final, les anomalies chaudes de 2010

peuvent s'expliquer à la fois par la dynamique (advections d'énergie depuis l'Atlantique) et par un effet de serre renforcé par l'humidification de la masse d'air.

Tableau 1. Corrélations interannuelles (1979-2014) entre la fréquence des HW (2 colonnes de gauche), les Tx (2 colonnes centrales) et les Tn (2 colonnes de droite) atteintes pendant les HW de chaque saison, et le rayonnement ondes courtes (SW), l'effet de serre atmosphérique (GHE, calculé comme le rayonnement infra-rouge montant à la surface moins l'infra-rouge net au sommet de la colonne d'air), la divergence du flux d'énergie intégrée sur le Sahel ($\nabla . hV$), et les flux de chaleur latente (LH) et sensible (SH) à la surface. Pour chaque variable, les tendances basse fréquence (calculées selon une tendance linéaire) ont été conservées ou ôtées. Les corrélations significatives positives (négatives) à 95% selon un test de Pearson apparaissent en rouge (bleu).

	Fréquence HW		**Tx**		**Tn**	
	Avec tendance	Sans tendance	Avec tendance	Sans tendance	Avec tendance	Sans tendance
SW	**0.32**	0.14	**0.81**	**0.75**	**0.51**	0.29
GHE	**0.46**	**0.39**	0.18	0.03	**0.60**	**0.54**
$\nabla . hV$	**0.32**	0.24	0.09	0.03	0.25	0.09
SH	**-0.31**	**-0.33**	**-0.51**	**-0.58**	**-0.40**	**-0.47**
LH	0.05	0.20	**0.37**	**0.65**	0.07	**0.35**

Le Tableau 1 tente de généraliser ces analyses pour toutes les HW sahéliennes détectées sur l'ensemble de la période couverte par les réanalyses ERA-Interim. Les anomalies de Tx sont prioritairement associées avec celles du rayonnement ondes courtes tandis que celles des Tn et la fréquence des HW montrent un lien prioritaire avec l'effet de serre (en variabilité interannuelle ou sur les tendances basse fréquence). La relation avec la convergence des flux large échelle est robuste. À la surface, une masse d'air chaud, en réduisant le gradient thermique avec le sol, réduit les flux de chaleur sensible (c'est vrai à la fois pour Tn et Tx). LH intervient surtout en fin de printemps : une température élevée, en augmentant la capacité hygrométrique de l'air (via la loi de Clausius-Clapeyron), favorise alors une évapotranspiration relativement forte. La relation disparaît toutefois en début de printemps, lorsque les sols sont uniformément secs à la fin de la saison sèche. D'une manière générale, le Tableau 1 tend donc à confirmer, sur une période excédant 30 ans, les résultats issus de l'analyse détaillée du printemps 2010.

2.2 Prévisibilité météorologique des HW sahéliennes

À l'aide des prévisions ensemblistes *a posteriori* de la NOAA, étudiées ici sur le printemps 2010, la Figure 2 présente (i) la qualité des prévisions à échéance 24h, (ii) généralise ce résultat pour toutes les échéances jusqu'à 16 jours, soit, en d'autres termes, analyse la prévisibilité à moyenne échéance des Tn et Tx. Les incertitudes entre les 11 membres sont quantifiées par une mesure d'écart-type. La Figure 3 tente d'identifier les mécanismes physiques pouvant influencer la prévisibilité des pics de Tn ou Tx.

Par rapport aux observations GSOD, ERA-I surestime les Tn et sous-estime les Tx (Fig. 2a-b), d'où une amplitude thermique diurne (DTR pour *diurnal thermal range*) très largement sous-estimée. RF2 produit en tout point des erreurs opposées, avec une incertitude relativement faible à une échéance aussi courte. Ce constat est toutefois vérifié pour le seul premier jour de prévision, les valeurs prédites de Tn tendant à s'élever très nettement dès le second jour (Fig. 2c). Ceci traduit probablement des incohérences entre les observations assimilées et l'état naturel du modèle, d'où une mise à l'équilibre (« spin-up ») lors des premiers pas d'intégration du modèle. À noter que Tx est nettement moins concernée par ce problème.

Sur la période d'étude, on note un premier pic de Tx au jour 21 (18 avril) puis un second pic (surtout de Tn) au jour 45 (12 mai). Le premier pic n'est prévisible qu'à une échéance de 4-5 jours (Fig. 2d et 2f), tandis que le second reste prévu (Fig. 2c) avec une incertitude assez faible (Fig. 2e) jusqu'à une échéance de 12-14 jours environ.

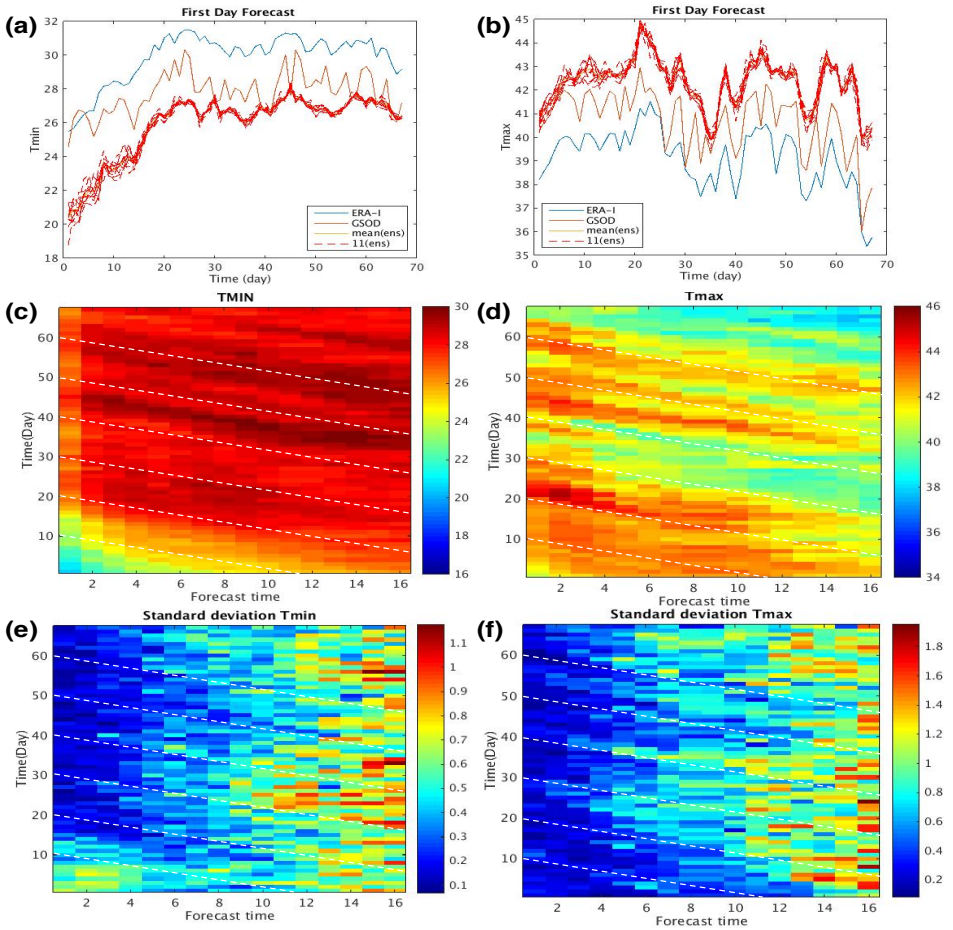

Figure 2. (a) Tn observées, réanalysées (ERA-I) et prédites à échéance 24h par RF2 (11 membres représentés). (b) Comme (a) pour Tx. (c) Prévisions (moyenne d'ensemble) des Tn pour toutes les échéances de 0 à 16 jours : le jour d'analyse est en ordonnée (de fin mars à fin mai), l'échéance de prévision en abscisses, les diagonales pointillées suivent les différentes prévisions d'un même jour à différentes échéances. (d) Comme (c) pour Tx. (e-f) Comme (c) mais écart-type inter-membre pour Tn et Tx, respectivement.

À la lumière des résultats obtenus dans la section 3.1, la Fig. 3 décompose les prévisions d'ensemble effectuées dans les différents termes du bilan d'énergie. Le but serait de trouver les termes de l'équation qui influencent la qualité des prévisions et les incertitudes associées. Le pic de Tx du 18 avril (Fig. 2b), à l'instar des Tx sahéliennes plus généralement (Table 1), est associé à un rayonnement ondes courtes particulièrement important mais assez peu prévisible (Fig. 3c-d). Les erreurs de prévision et les incertitudes augmentent drastiquement pour des échéances dépassant les 4-5 jours, en accord avec la prévisibilité des Tx elles-mêmes (Fig. 2d,f). Le pic de Tn du 12 mai (Fig. 2a) tout comme celui du 25 mai, est précédé d'un épisode particulièrement humide dans l'atmosphère sahélienne (Fig. 3e). Ces deux évènements sont prévisibles à des échéances élevées (c'est tout particulièrement vrai pour le premier pic : Fig. 3f) et augmentent significativement l'effet de serre (visible à travers une diminution du flux ondes longues net, Fig. 3a-b), d'où des pics de Tn associés à des pertes radiatives nocturnes réduites. Pour les pics de Tn comme de Tx, la divergence du vent semble être une conséquence plutôt que la cause de la variabilité des températures, les anomalies de convergence se produisant typiquement un ou deux jours après le pic de température (Fig. 3g-h), en réponse au développement de basses pressions thermiques.

Ces premiers éléments–confirment les diagnostics établis à partir des réanalyses sur la période 1979-2014. Ils proposent en outre un lien physique entre la prévisibilité des pics de température et la capacité d'un modèle à prévoir les processus qui les contrôlent.

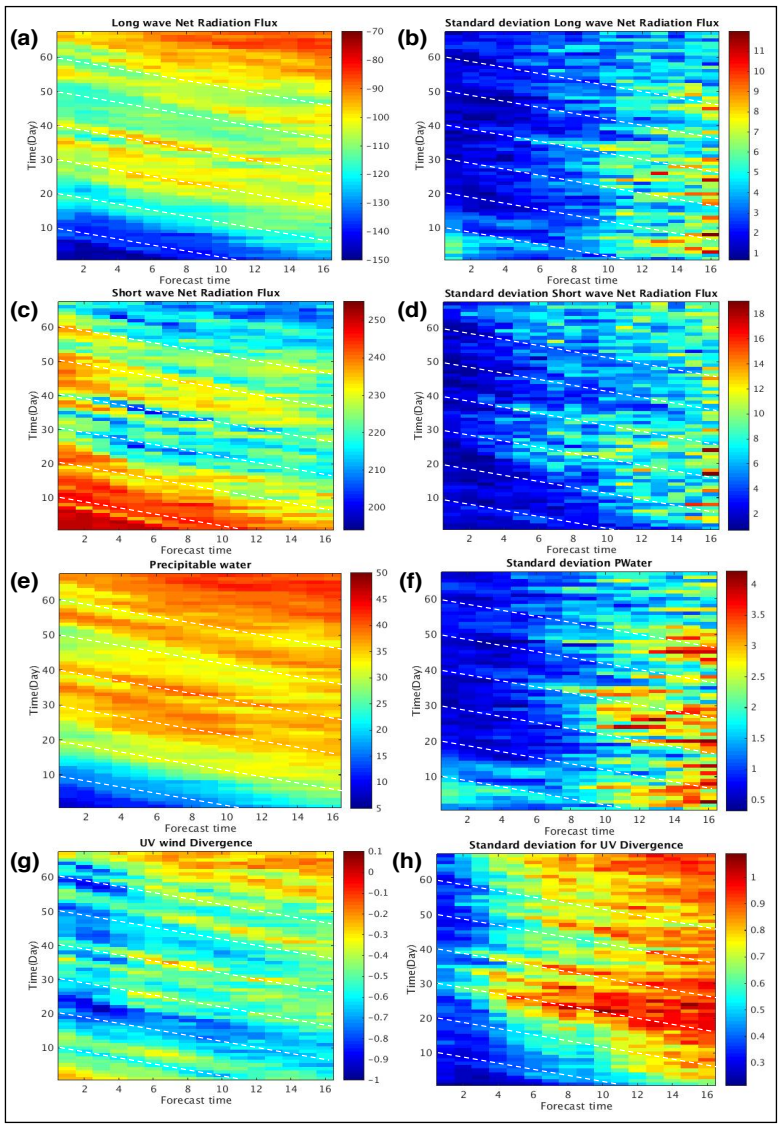

Figure 3. (a-b) Comme Fig. 2c mais pour le rayonnement ondes longues net : moyenne d'ensemble (a) et écart-type inter-membres (b). (c-d) Comme (a-b) pour le rayonnement ondes courtes net. (e-f) Comme (a-b) pour l'eau précipitable. (g-h) Comme (a-b) pour la divergence des flux de masse intégrée sur la verticale.

Conclusion

Les Tx au Sahel africain sont principalement contrôlées par le rayonnement ondes courtes incident, les Tn étant plus directement associées à l'effet de serre *via* l'humidité de la masse d'air. Nos premiers résultats suggèrent une meilleure prévisibilité des Tn, puisque celles-ci dépendent d'une variable pronostique tandis que les Tx sont tributaires des échanges radiatifs et de la fraction nuageuse, toutes deux issues de la physique du modèle. Cette analyse demande toutefois à être conduite sur une période plus longue, comprenant un plus grand nombre de cas.

Bibliographie

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. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 553–597, DOI:10.1002/qj.828.

Hamill T. M., Bates G. T., Whitaker J. S., Murray D. R., Fiorino M., Galarneau T. J., … Lapenta W., 2013. NOAA's second-generation global medium-range ensemble reforecast data set. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **94**, 1553–1565, DOI:10.1175/BAMS-D-12-00014.1.

Rome S., Oueslati B., Moron V., Pohl B., Diedhiou A., 6-9 juill. 2016. Les vagues de chaleur au Sahel : définition et principales caractéristiques spatio-temporelles (1973-2014). *Actes du XXIXème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC),* 6-9 juillet 2016 (pp. 339-344). Besançon, France.