



**HAL**  
open science

## Les vagues de chaleur au Sahel: définition et principales caractéristiques spatio-temporelles (1973-2014).

S. Rome, Boutheina Oueslati, Vincent Moron, Benjamin Pohl, A. Diedhiou

### ► To cite this version:

S. Rome, Boutheina Oueslati, Vincent Moron, Benjamin Pohl, A. Diedhiou. Les vagues de chaleur au Sahel: définition et principales caractéristiques spatio-temporelles (1973-2014).. 29ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Jul 2016, Besançon, France. pp.345-350. hal-01360076

**HAL Id: hal-01360076**

**<https://hal.science/hal-01360076>**

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.



XXIX<sup>e</sup> 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 : DEFINITION ET PRINCIPALES CARACTERISTIQUES SPATIO-TEMPORELLES (1973-2014)

ROME S.<sup>1</sup>, OUESLATI B.<sup>2</sup>, MORON V.<sup>3</sup>, POHL B.<sup>2</sup>, DIEDHIOU A.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Université Grenoble Alpes, LTHE, UMR 5564 CNRS/UGA/IRD/G-INP, BP 53, 38041 Grenoble, France, sandra.rome@univ-grenoble-alpes.fr

<sup>2</sup>CRC, UMR6282 Biogéosciences, CNRS/univ. Bourgogne Franche-Comté, Dijon, France, Benjamin.Pohl@u-bourgogne.fr

<sup>3</sup>Aix-Marseille université, CEREGE, UM34 CNRS/, Aix-en-Provence, France, moron@cerege.fr

<sup>4</sup>IRD, LTHE UMR 5564, 38041 Grenoble, France, arona.diedhiou@ird.fr

**Résumé** – Une définition des vagues de chaleur (HW) pertinente pour les régions tropicales sèches est proposée et testée au Sahel (i.e. durée, intensité et fréquence). L'indice de chaleur (HI dérivé de la formule Steadman, 1979) est ainsi calculé sur les données quotidiennes de 145 stations d'Afrique de l'Ouest issues de la base Global Surface Summary of the Day (GSOD) sur la période 1973-2014. Les HWs enregistrées en climats sahélien et soudanien (stations issues d'une classification) se produisent surtout au printemps boréal, i.e. avril-mai-juin. Elles sont plus fréquentes depuis 1998 (+8 % de jours torrides, i.e. dépassant le 90<sup>ème</sup> centile des jours) et elles deviennent plus longues (+1,2 jours par décennie) et plus intenses (+ 0,3 à 0,4°C/décennie respectivement en climat soudanien et sahélien).

**Mots-clés** : vague de chaleur (HW), indice de chaleur (HI), Sahel, ACASIS.

**Abstract** – *Heat waves in Sahel: definition and main spatial-temporal characteristics (1973-2014).* A definition of heat waves (HW) relevant for dry tropical regions is proposed and tested in the Sahel (i.e. duration, intensity and frequency). The Heat Index (HI derivative of Steadman's (1979) formula) is calculated on daily data of 145 West African stations from the GSOD database over the period 1973-2014. HWs recorded in Sahelian and Sudanese climates mainly occur in boreal spring, i.e. April-May-June. They are more frequent since 1998 (+ 8% very hot days, T90p) and they become longer (+1.2 days per decade) and more intense (from +0.3 to 0.4 °C / decade respectively Sudanese and Sahelian climate) on the end of the period 1973-2014.

**Keywords**: Heat Wave, Heat Index, Sahel, ACASIS program.

### Introduction

Le réchauffement global contemporain s'accompagne par une augmentation de la fréquence des extrêmes chauds (Easterling *et al.*, 2000 ; Alexander *et al.*, 2006 ; Seneviratne *et al.*, 2012). Le 5<sup>ème</sup> rapport d'évaluation du GIEC (Stocker *et al.*, 2013) prévoit ainsi que les vagues de chaleur (HW pour « Heat Wave » en anglais) sont de plus en plus fréquentes et intenses, avec une augmentation très probable (>90% de probabilité) du nombre de jours chauds et de nuits chaudes depuis 1950 à l'échelle globale ; or le manque de données et/ou d'études sur l'Afrique limite ce degré de confiance à 60-90% pour ce continent. En Afrique, Fontaine *et al.* (2013) observent un réchauffement significatif (+1 à + 3°C) dans la région sub-saharienne occidentale de 1979 à 2011, ainsi que des fréquences plus élevées des HW avec des durées plus longues après 1994. Dans les régions côtières du Golfe de Guinée (e.g. à Abidjan, Côte d'Ivoire) et au Sahel Central (e.g. Niamey, Niger), Ringard *et al.* (2015) confirment que depuis 1950, les températures se sont réchauffées, le nombre annuel de HW et le pourcentage des jours et des nuits chaudes extrêmes ont augmenté.

Les HW ont été définies essentiellement en milieux tempérés et plus rarement en zone intertropicale (Australie, Inde). Aussi, ce travail propose une définition des HW pertinente pour l'espace tropical ouest-africain et les analyse en étudiant leur durée, leur intensité et leur fréquence depuis 1973.

Ce travail contribue au programme ANR ACASIS qui a pour finalité de produire un système opérationnel d'alerte aux canicules, l'intérêt consistant à prendre en compte un indice

adapté aux impacts sanitaires (cf. section 2.2.1). La partie 1 présente le contexte des extrêmes thermiques ; les données et méthodes sont présentées en partie 2 et les résultats en partie 3.

## 1. Absence de définition universelle sur les vagues de chaleur

### 1.1 Critères de définition des vagues de chaleur

Aucune définition universelle des HW ne fait foi ; celles-ci peuvent être définies comme une période plus ou moins longue durant laquelle les températures locales sont anormalement élevées par rapport à une température absolue ou bien relative. Une HW est néanmoins caractérisée par plusieurs critères : sa rareté ou faible occurrence, soit moins de 10% des jours ; son intensité, *i.e.* l'amplitude des températures en terme d'anomalie par rapport à la climatologie locale (Goubanova, 2007) ou par tout excès au-delà d'un seuil absolu, ou encore, par l'intensité maximale du pic de température (Soubeyroux *et al.*, 2015) ; sa sévérité en termes de pertes humaines (Beniston, 2004) ou socio-économiques (agriculture, électricité et énergie, etc.) (Perkins and Alexander, 2012) ; sa durée comprise au minimum entre 2 et 6 jours consécutifs selon les auteurs : dès 2 jours consécutifs pour Kent *et al.* (2014), 3 jours pour la plupart des auteurs (*e.g.* Steadman, 1979 ; Nairn, 2014 ; Russo *et al.*, 2014), ou encore sur une fenêtre glissante de 5 jours (ETCCDI, 2013).

### 1.2 Différents indices d'extrêmes de chaleur

Plusieurs indicateurs de chaleur existent selon la finalité de l'étude :

- Le **HWDI** –*Heat Wave Duration Index*- indique la durée d'une HW par le nombre de jours durant des intervalles d'au moins 6 jours avec  $TX > T_{\text{jour}} + 5^{\circ}\text{C}$  (pour une moyenne calculée quotidiennement sur la base 1961-1990) sur une fenêtre glissante de 5 jours (*i.e.*  $d-2$  à  $d+2$ ). Cet indice est utilisé dans les programmes ClimDex, STARDEX ou encore ECA (Frich *et al.*, 2002) ;
- Le **WSDI** –*Warm Spell Duration Index*- compte le nombre de jours par an où TX dépasse son 90<sup>ème</sup> centile pendant au moins 6 jours consécutifs (*i.e.*  $TX > TX_{90p}$ ). Ceci est surtout valable pour les milieux tempérés car les seuils de durée sont assez longs (ETCCDI, 2013) ;
- Le **HWMI** –*Heat Wave Magnitude Index*- mesure la magnitude ou l'intensité globale du réchauffement (Russo *et al.*, 2014) ;
- Le **EHF** –*Excess Heat Factor*- mesure l'excès de chaleur en lien avec l'acclimatation des populations (Nairn et Fauwett, 2015).

Des « indicateurs biométéorologiques » sont calculés en France suite à la canicule qui a sévit en Europe de l'Ouest en août 2003 (action combinée entre Météo-France et l'Institut de veille sanitaire (InVS)). Météo-France a recensé les HW passées aux échelles nationales, régionales et locales pour ensuite déterminer des caractéristiques comme le début, la fin et le pic de chaleur lors d'une vague de chaleur (Soubeyroux *et al.*, 2015).

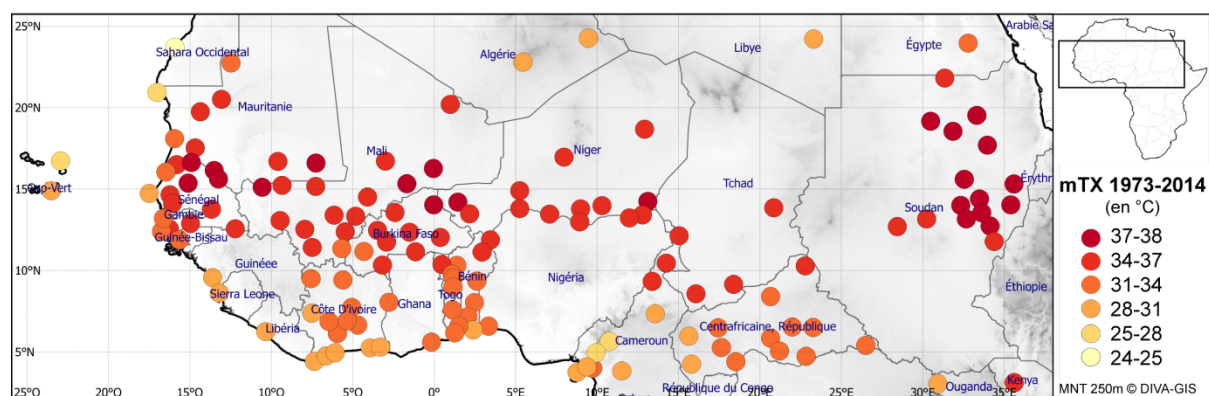
Les HW sont redoutées pour les impacts sanitaires potentiels engendrés, y compris au Sahel ; aussi, l'ACMAD (*African Centre of Meteorological Applications for Development*) émet un message d'alerte aux populations ouest africaines lorsque les  $TX > 40^{\circ}\text{C}$ .

Si en domaine tempéré, différents types de températures seuils sont utilisés (seuils absolus ou relatifs), en revanche en domaine tropical, l'utilisation des percentiles semble plus adaptée que des températures seuils supérieures de  $5^{\circ}\text{C}$  aux normales locales, en raison de la faible variabilité thermique quotidienne (Alexander *et al.*, 2006).

## 2. Données et méthodes

### 2.1 Données quotidiennes 1973-2014 de la base GSOD

Les données utilisées proviennent de la base GSOD sur la période 1973-2014 et couvrent 145 stations réparties sur un large espace africain (24°N-3°N ; 24°W-36°E) (Figure 1). Ces observations synoptiques contiennent les températures quotidiennes maximales (TX), minimales (TN), moyennes (Tm) et la température du point de rosée (Td). En moyenne, 35% des données quotidiennes sont manquantes. Les lacunes ne sont pas comblées et toutes les analyses sont fondées sur les seules données disponibles.

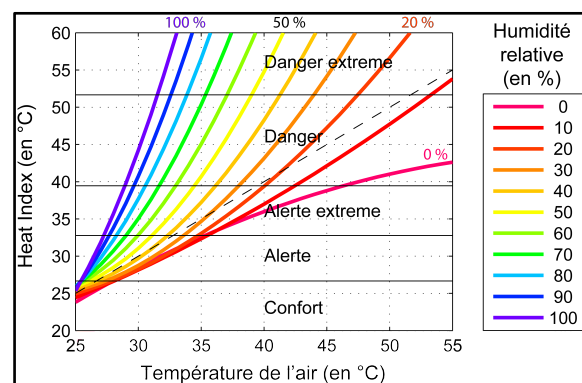


**Figure 1.** Moyenne 1973-2014 des températures maximales (°C) dans les 145 stations issues de la base *Global Surface Summary of the Day*–GSOD- disponibles et utilisables sur l'Afrique de l'Ouest.

### 2.2 Méthode d'analyse des HW sahéliennes

#### 2.2.1 Calcul de l'indice de chaleur par le Heat Index de Steadman modifié

Pour étudier les HW avec une visée sanitaire, l'indice de chaleur utilisé dérive du **Heat Index** (HI) élaboré par Steadman (1979) et utilisé par le *National Weather Service* américain (Equation 1). Comme seul le point de rosée est disponible en moyenne quotidienne, le HI est ici calculé en tenant compte à la fois des HI diurne (HI<sub>Max</sub>) et nocturne (HI<sub>Min</sub>) ; cet indice est une fonction non linéaire de la température (T) et de l'humidité relative (HR) permettant d'évaluer la température ressentie par le corps humain (Figure 2) et son rôle sanitaire potentiel ; si T > 35°C et HR > 39%, l'indice de chaleur indique un « danger » pour l'Homme.



**Figure 2.** L'indice de chaleur (Heat index –HI- en °C) fonction de la température de l'air convertie en degrés Celsius (adapté de Steadman, 1979) et de l'humidité relative (en %) ; HI varie de la température de « confort » au « danger extrême ».

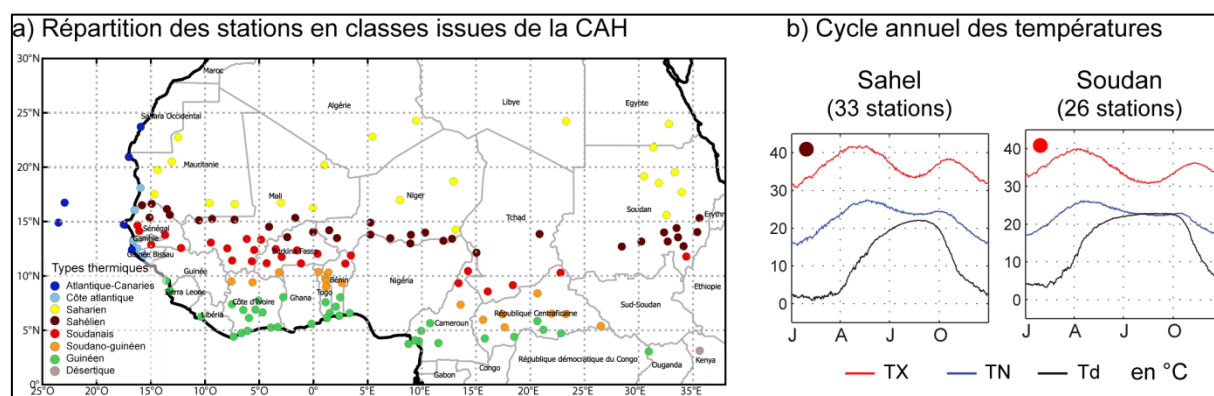
$$HI = c1 + c2 T + c3 R + c4 TR + c5 T^2 + c6 R^2 + c7 T^2R + c8 TR^2 + c9 T^2R^2 \quad [\text{Equation 1}]$$

où : HI= indice de chaleur (en °F) ; T= température (en °F) ; R= humidité relative (en %) ;  
 $c1 = -42,379$  ;  $c2 = 2,04901523$  ;  $c3 = 10,14333127$  ;  $c4 = -0,22475541$  ;  $c5 = -6,83783 \times 10^{-3}$  ;  
 $c6 = -5,481717 \times 10^{-2}$  ;  $c7 = 1,22874 \times 10^{-3}$  ;  $c8 = 8,5282 \times 10^{-4}$  ;  $c9 = -1,99 \times 10^{-6}$

Une vague de chaleur est dès lors définie et détectée au Sahel lorsque le 90<sup>ème</sup> centile (90p) de la distribution de l'indice de chaleur ( $HI_{Max}$  et  $HI_{Min}$ ) est atteint ou dépassé pendant au moins 6 demi-journées consécutives (6 dépassements). Le seuil de HI extrême ( $HI_{90p}$ ) est ici calculé sur l'ensemble de la période d'étude, mettant alors en exergue les HW printanières *a priori* les plus génératrices de morbidité et de mortalité au Sahel.

### 2.2.2 Typologie des températures en Afrique de l'Ouest

Une classification ascendante hiérarchique (CAH) effectuée sur les températures moyennes annuelles des 145 stations d'Afrique de l'Ouest disponibles permet de discrétiser l'espace en classes ; celles-ci répondent assez bien à une distribution zonale (Figure 3a). Deux classes sur huit sont particulièrement étudiées car pleinement situées dans le périmètre d'étude du programme ACASIS : elles correspondent aux nuances de climats sahélien (33 stations) et soudanien (26 stations). Le cycle thermique annuel est commenté en section 3.1.



**Figure 3.** Typologie des régimes thermiques pour 145 stations d'Afrique tropicale au nord de l'équateur, sur la période 1973 à 2014. a) répartition spatiale des stations en classes, issues d'une CAH effectuée sur les données quotidiennes de TN, TX et Td (corrélations de rang de Spearman pour la distance entre les variables et distance moyenne pour l'agrégation itérative) ; b) cycle annuel moyen de TX, TN et Td (en Celsius) des domaines « Sahel » et « Soudan ».

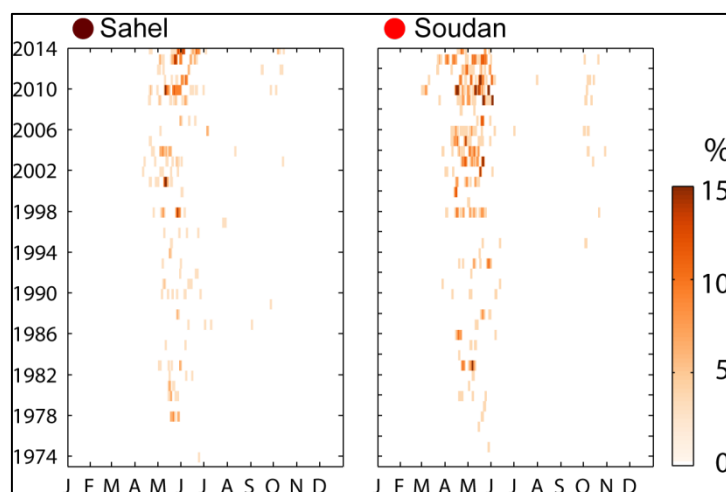
## 3. Résultats : caractérisation des HW en domaine sahélo-soudanien

### 3.1 Variation spatio-temporelle des températures

Compte tenu de sa latitude tropicale (8-15°N) et de la continentalité, la frange sahélo-soudanienne connaît un régime thermique bimodal : les TX et TN les plus chaudes sévissent au printemps (avril-juin), juste avant l'arrivée de la mousson -perceptible par la température du point de rosée moyenne (Td) maximale au 3<sup>ème</sup> trimestre- et dans une moindre mesure en automne (Figure 3b) ; le Sahel enregistre 223 « jours torrides » par an *-i.e.*  $TX \geq 35^{\circ}C$ -, et 249 « nuits tropicales » par an *-i.e.*  $TN \geq 20^{\circ}C$ - en moyenne, ce qui en fait une des zones les plus chaudes de la planète (Moron *et al.*, 2016). Dans ces deux ceintures tropicales, les températures nocturnes (TN) et diurnes (TX) moyennes sont globalement très chaudes ; les extrêmes montrent des seuils élevés avec  $TN_{90} \geq 25,5^{\circ}C$  et  $TX_{90} \geq 39^{\circ}C$ .

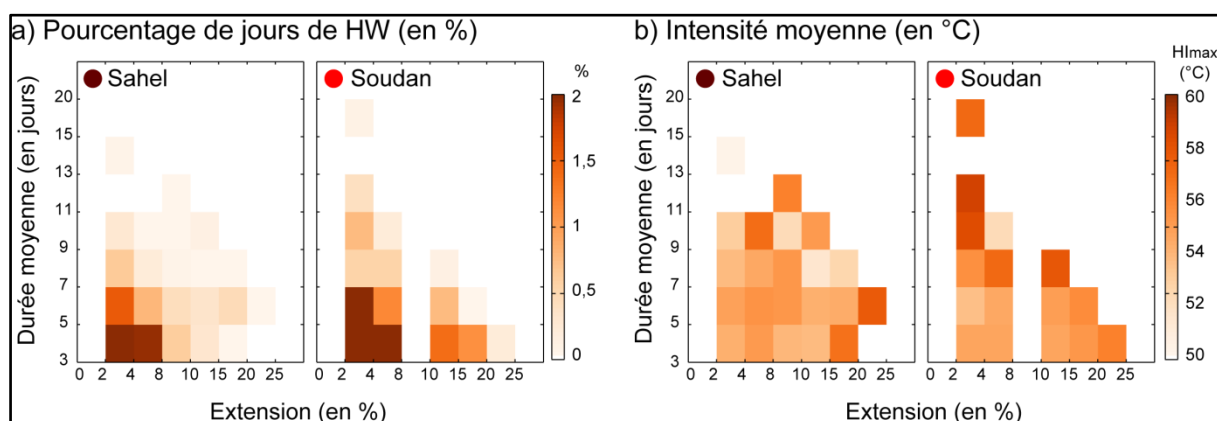
### 3.2 Évolution des vagues de chaleur sur la période 1973-2014

Les HW enregistrées en climats sahélien et soudanien se produisent surtout au printemps, *i.e.* avril-mai-juin. Elles sont plus fréquentes depuis 1998, printemps particulièrement chaud (+ 8 % de jours de HW) et elles deviennent plus longues (+ 1,2 jours par décennie), plus intenses (+ 0,3 à 0,4°C/décennie respectivement en climat soudanien et sahélien) en fin de période (Figure 4). Quelques stations situées au Sahel central (10-15°N ; 5°W-5°E) enregistrent une augmentation de 10% jours de HW printanières (non montré).



**Figure 4.** Extension spatiale (en % du domaine) et temporelle (1973-2014) des HW en zones sahélienne et soudanienne. Le % est calculé comme le quotient entre les stations ayant une HW et le nombre total de stations du domaine.

La figure 5 montre les fonctions de densité de probabilité croisées (PDF pour *Probability Density Function*) des HW, à savoir leur fréquence, durée et intensité dans les ceintures sahélienne et soudanienne.



**Figure 5.** Fréquence, durée et intensité des vagues de chaleur printanières en milieux sahélien & soudanien. a) Pourcentage de jours de HW en fonction de leur durée et étendue spatiale (en pourcentage des stations de la classe correspondante). b) Intensité moyenne des HW en fonction de la durée moyenne et l'étendue spatiale. Pour chaque pixel, l'intensité moyenne est calculée comme la moyenne des  $HI_{Max}$  pendant les journées chaudes en moyenne sur la période 1973-2014.

Pour chaque domaine, les HW les plus fréquentes sont de courte durée (3-7 jours) et très localisées (2-8% du domaine). Elles sont peu à modérément intenses ( $HI_{Max} < 54^{\circ}C$ ). Les HW présentant un « danger extrême » pour les populations ( $-HI_{Max} > 54^{\circ}C$ -) durent plus de 9 jours et/ou couvrent relativement de grandes surfaces ( $> 10\%$  du domaine). Dans les deux régions, quelques HW sont de courte durée et néanmoins très intenses. La ceinture sahélienne montre des HW légèrement moins intenses et moins étendues que la frange soudanienne.

## Conclusion

Les vagues de chaleur (HW) au Sahel sont définies par le dépassement du 90<sup>ème</sup> centile de l'indice de chaleur quotidien (*i.e.*  $HI_{Max}$  et  $HI_{Min} > HI_{90p}$ ) durant au moins trois jours consécutifs. Cette définition est testée sur 33+26 stations appartenant respectivement aux ceintures sahélienne et soudanienne. Les vagues de chaleur les plus rudes affectent les deux domaines, surtout la ceinture soudanienne avec des HW printanières plus intenses depuis 1998 (+ 0,3 à 0,4°C/décennie), plus longues (augmentation de 7 jours des HW) et plus intenses ( $HI \geq$  danger) en fin de période 1973-2014. Les mécanismes et processus gouvernant les occurrences de ces HW sont analysés dans Oueslati *et al.* (2016).

## Bibliographie

- Alexander L. V., Zhang X., Peterson T. C., Caesar J., Gleason B., Klein Tank A. M. G., Haylock M., Collins D., Trewin B., Rahimzadeh F., Tagipour A., Rupa Kumar K., Revadekar J., Griffiths G., Vincent L., Stephenson D. B., Burn J., Aguilar E., Brunet M., Taylor M., New M., Zhai P., Rusticucci M., Vazquez-Aguirre J. L., 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, **111**, D05109.
- Beniston M., 2004. The 2003 heat wave in Europe. A shape of things to come? *Geophysical Research Letters*, **31**, L02022.
- Easterling D. R., Meehl G. A., Parmesan C., Changnon S. A., Karl T. R., Mearns L. O., 2000. Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, **289**, 2068–2074.
- ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices). Dernière mise à jour le 29.01.2013. [http://etccdi.pacificclimate.org/list\\_27\\_indices.shtml](http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml), consulté le 15.12.2015.
- Fontaine B., Janicot S., Monerie P. A., 2013. Recent changes in air temperature, heat waves occurrences and atmospheric circulation in Northern Africa. *Journal of Geophysical Research*, **118**, 8536-8552.
- Frich P., Alexander L. V., Della-Marta P., Gleason B., Haylock M., Klein Tank A. M., Peterson T., 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, **19**, 193–212.
- Goubanova K., 2007. *Une étude des événements climatiques extrêmes sur l'Europe et le bassin Méditerranéen et de leur évolution future* (Thèse de doctorat). Université Paris VI, France.
- Kent S. T., McClure L. A., Zaitchik B. F., Smith T. T., Gohlke J. M., 2014. Heat Waves and Health Outcomes in Alabama (USA): The Importance of Heat Wave Definition. *Environ Health Perspect*, **122**, 151-158.
- Moron V., Oueslati B., Pohl B., Rome S. and Janicot S., 2016. Trends of mean temperatures and warm extremes in Northern Tropical Africa (1961-2014). En révision pour *Journal of Geophysical Research*.
- Nairn, J., 2014. Heatwave defined as a heat impact event for all community and business sectors in Australia. Dans Bureau of Meteorology (éd.) *Urban climate and weather, 13-15 March 2012*. South Australia, Australie.
- Nairn J., and Fawcett R., 2015. The Excess Heat Factor: A Metric for Heatwave Intensity and Its Use in Classifying Heatwave Severity. *Int J Environ Res Public Health*, **12**(1), 227–253.
- Oueslati B. Sambou M.-J., Pohl B., Rome S., Moron V. et Janicot S., 6-9 juill. 2016. Les vagues de chaleur sahéliennes : caractérisation, mécanismes, prévisibilité. *Actes du 29<sup>ème</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC)*, 6-9 juillet 2016 (pp. 321-326). Besançon, France.
- Perkins S. E., Alexander L. V., 2012. On the measurement of heat waves. *J. Clim.*, **26**, 4500–4517.
- Ringard J., Dieppois B., Rome S., Diedhiou A., Pellarin T., Konaré A., Diawara A., Konaté D., Dje B. K., Katiellou G. L., Seidou Sanda I., Hassane B., Vischel T., Garuma G. F., Mengistu G., Camara M., Diongue A., Gaye A. T., Descroix L., 2015. The intensification of thermal extremes in West Africa. *Global and Planetary Change*, **139**, 66–77.
- Russo S., Dosio A., Graversen R.G., Sillmann J., Carrao H., Dunbar M. B., Singleton A., Montagna P., Barbola P., and Vogt J. V., 2014. Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**.
- Seneviratne S. I., Nicholls N., Easterling D., Goodess C. M., Kanae S., Kossin J., Luo Y., Marengo J., McInnes K., Rahimi M., Reichstein M., Sorteberg A., Vera C., Zhang Z., 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. Dans C.B. Field V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (éds.) *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 109–230). Cambridge, UK and New York, NY, Cambridge University Press, 582p.
- Soubeyroux J.-M., Schneider M., Ouzéau G., 1-4 juill. 2015. Recensement des vagues de chaleur en France à différentes échelles spatiales et évolution en contexte de changement climatique. *Actes du 28<sup>ème</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC)*, 1-4 juillet 2015 (pp. 615-620). Liège, Belgique.
- Steadman R. G., 1979. The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. *J. Appl. Meteor.*, **18**, 861-873.
- Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, L.V. Alexander, S.K. Allen, N.L. Bindoff, F.-M. Bréon, J.A. Church, U. Cubasch, S. Emori, P. Forster, P. Friedlingstein, N. Gillett, J.M. Gregory, D.L. Hartmann, E. Jansen, B. Kirtman, R. Knutti, K. Krishna Kumar, P. Lemke, J. Marotzke, V. Masson-Delmotte, G.A. Meehl, I.I. Mokhov, S. Piao, V. Ramaswamy, D. Randall, M. Rhein, M. Rojas, C. Sabine, D. Shindell, L.D. Talley, D.G. Vaughan and S.-P. Xie, 2013: Technical Summary.. Dans T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P. M. Midgley (éds.) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp.33-115). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 1535 p