

Université Assane Seck de Ziguinchor



U.F.R Sciences et Technologies

Département de physique

Mémoire de Master 2

Mention : Physiques et Applications

Spécialité : Sciences de l'Atmosphère et de l'Océan

Évolution spatio-temporelle des vagues de chaleur en Afrique de l'Ouest et risques sanitaires associés

Présentée par **Ndèye Sira DIOUF**

Sous la direction de **Dr Samo DIATTA**

et sous la supervision de **Dr Moctar CAMARA**

Soutenu publiquement le 27/01/2018 devant le jury composé de :

Prénoms et Noms	Grade	Qualité	Établissement
Lat Grand NDIAYE	Maître de Conférences	Président	UASZ
Youssouph SANÉ	Chercheur	Rapporteur	ANACIM
Moctar CAMARA	Maître de Conférences	Examineur	UASZ
Mamadou Lamine MBAYE	Assistant	Examineur	UASZ
Samo DIATTA	Maître-Assistant	Encadreur	UASZ

Dédicaces

*Je dédie ce travail, à toute ma famille particulièrement à mon père,
ma mère, mes frères et sœurs,
la famille Bâ de Alwar Ziguinchor ainsi qu'à mes amis.*

Que DIEU vous garde et vous accorde sa bénédiction.

Remerciements

J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.

En premier lieu, je remercie Dr. DIATTA, professeur à l'université Assane Seck de Ziguinchor. En tant que Directeur de mémoire, il m'a guidé dans mon travail et m'a aidé à trouver des solutions pour avancer.

Je remercie également les membres du jury avec à sa tête le président, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail.

Je remercie les enseignants chercheurs du département de Physique : Dr Bamol Ali Sow, Dr Moctar Camara, Dr Mamadou Lamine Mbaye, Dr Moustapha Thiame, Dr Ababacar Ndiaye, Dr Diouma Kobor, Dr Lat Grand Ndiaye, Dr Ibrahima Sakho, Dr Tine et Dr Joseph Diatta.

Je remercie aussi les chercheurs du Laboratoire d'Océanographie, des sciences de l'Environnement et du Climat (LOSEC) : M. Ibrahima Diba, M. Alioune Badara Sarr, M. Hamady Ngansou Sabaly, M. Moustapha Sow, M. Cheikh Waly Diédhiou, M. Youssouph Coly, M. Mamadou S. Sow et M. Alioune Mbaye pour l'aide qu'ils m'ont apporté.

J'adresse mes remerciements particuliers à ma famille pour m'avoir toujours poussée à poursuivre mes études. Vous m'avez encouragé et donné de la force. Je suis très reconnaissante à ma mère et à mon père pour m'avoir donné une bonne éducation. Un grand merci à ma mère qui m'a toujours fait confiance dans mes études et m'a soutenu dans tous les secteurs. Je voudrais aussi remercier mes frères et sœurs qui m'ont toujours soutenu avec leurs meilleurs vœux.

Résumé

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aux vagues de chaleur qui touchent le Sahel et leur risque sur la santé des populations. Défini comme une période d'au moins trois jours consécutifs où les températures maximales et minimales dépassent le 90^{ème} percentile, les vagues de chaleur sont de plus en plus fréquentes, chaudes et donc dangereuses pour les populations. Il est établi qu'elles peuvent causer des accidents cardio-vasculaires, une altération de la tension artérielle, des problèmes respiratoires et coups de chaleur chez les personnes vulnérables comme les enfants et les personnes âgées. L'impact des vagues de chaleur (VC) sur l'homme est caractérisé par des indices qui déterminent la température ressentie par le corps humain. L'objectif de cette étude est de déterminer l'évolution spatio-temporelle des vagues de chaleur (VC) et évaluer leurs risques sanitaires. Le TX90 (90^e percentile de la température maximale), le TN90 (90^e percentile de la température minimale), le HWDI (Heat Wave Duration Index), l'indice de chaleur (ou Heat Index HI) et l'humidex sont ainsi calculés avec des données quotidiennes sur l'Afrique de l'Ouest issues de la base de donnée du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) sur la période 1979-2016. Les VCs enregistrées en zone sahélienne se produisent surtout au printemps, c'est-à-dire avril-mai-juin (AMJ) et sont plus fréquentes depuis 1998. Les printemps 1998, 2010 et 2016 furent les printemps les plus chauds au Sahel avec des pics de chaleur assez important. En moyenne les risques sanitaires liés aux VCs au Sahel, sont plus perceptibles durant la saison AMJ avec une exposition probable à un haut niveau d'inconfort. Cette même distribution est aussi obtenue en se basant sur l'humidex qui reflète le niveau de ressenti de la chaleur par l'organisme ; cependant il faut noter que le niveau de risque sanitaire obtenu avec l'humidex augmente durant toutes les saisons et présente un certain danger pour la population. Cet indice (humidex) évolue spatialement en suivant le déplacement saisonnier de la ZCIT et du flux de mousson.

Mots clés : Vagues de chaleur, Indice de chaleur, risques sanitaires, Sahel, percentile

Abstract

In this study, we were interested to heat waves affecting the Sahel and their risks, on the health of populations. Defined as a period of at least three consecutive days where the minimum and maximum temperatures exceed the 90th percentile, heat waves are more frequent, warm and so dangerous for local population. It is established that they can cause cardiovascular accidents, an alteration of the blood pressure, respiratory problems and heat strokes for vulnerable population such as children and the elders. The impact of heat waves (HWs) on humans is characterized by indexes that determine the temperature felt by the body. The objective of this study is to determine the spatial-temporal evolution of heat waves (HWs) and assess their health risks. TX90 (90th percentile of the maximum temperature), TN90 (90th percentile of the minimum temperature), the HWDI (Heat Wave Duration Index), the heat index and the humidex are then calculated with daily data on West Africa from the database of the European Center for Medium-range Weather Forecast (ECMWF) over the period 1979-2016. The HWs recorded in the Sahelian zone occur mostly in the spring, i.e., April-May-June (AMJ) and are more frequent since 1998. The spring of 1998, 2010 and 2016 were the warmest spring in the Sahel with significant heat peaks. On average the health risks related to the HWs in the Sahel, are more noticeable during the AMJ season with a probable exposure to a high level of discomfort. This same distribution is also achieved based on humidex that reflects the level of feeling of the heat by the body; however it should be noted that the level of health risk obtained with the humidex increases during all seasons and presents a certain danger for the population. This index (humidex) evolves spatially by following the seasonal movement of the ITCZ and the monsoon flow.

Keywords: heat waves, heat index, health risks, Sahel, percentile

Liste des abréviations

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution Climat

HW/VC: Heat Waves/Vague de Chaleur

ACMAD: African Centre of Meteorological Applications for Development

ZCIT: Zone de Convergence Intertropicale

TEJ/JET: Tropical Easterly Jet/Jet d'Est Tropical

AEJ/JEA: African Easterly Jet/Jet d'Est Africain

FIT: Front Intertropical

OMM: Organisation Météorologique Mondiale

GIEC: Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

InVS: Institut de Veille Sanitaire

EOF/ACP: Empirical Orthogonal Function/Analyse en Composantes Principales

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

NWS : National Weather Service

Liste des figures

1.1 Coupe verticale de la composante du vent méridien et du vent vertical moyenné en juin-juillet-septembre-octobre pour l'année 1998 (Ringard, 2013).....	6
1.2 Coupe verticale du vent zonale (m/s) moyenné sur la longitude 10°W-10°E. Et carte des moyennes JJAS de 1998 des flux de vents à trois niveaux de pression (Ringard, 2013).....	7
2.1 Zone d'étude (Bernard, 2015)	13
2.2 Répartition des percentiles et de leur probabilité d'occurrence (Sillman, 2005).	16
2.3 Indice de chaleur en degrés Celsius	19
2.4 L'indice humidex (source : environment canada).....	20
3.1 Cycle annuel des températures maximale et minimale au Sahel.....	21
3.2 Nombre de nuits tropicales par an au sahel sur la même période	22
3.3 Evolution du pourcentage de jours chauds (Tx90p) et de nuits chaudes (Tn90p) au Sahel sur la période 1979-2016.	22
3.4 Anomalie des températures maximales en AMJ au Sahel (Anomalie positive en rouge et anomalie négative en bleu).	23
3.5 Anomalie des températures maximales en Juillet-Aout-Septembre (JAS) au Sahel (Anomalie positive en rouge et anomalie négative en bleu).....	24
3.6 Analyse en composante principale de l'anomalie des températures maximales, en Avril-Mai-Juin.....	25
3.7 Série temporelle des composantes principales correspondant aux six ACPs précédentes	26
3.8 Analyse en composante principale de l'anomalie des températures maximales, en Juillet-Août-Septembre	27
3.9 Série temporelle des composantes principales correspondant aux ACPs de la figure 3.8	28
3.10 Analyse en composante principale de l'anomalie des températures minimales en Avril-Mai-Juin	28
3.11 Les composantes principales correspondant aux six premières ACPs précédentes	29
3.12 Évolution du nombre de vagues de chaleur sur le sahel pendant la saison chaude AMJ (Avril, Mai et Juin) pendant la période d'étude. Nday = nombre de jours consécutifs.	30
3.13 Évolution annuelle du nombre de HWs au Sahel pour différent nombre de jours consécutifs.....	30
3.14 Évolution du nombre de vagues de chaleur pour Niamey pendant la saison chaude AMJ (Avril, Mai et Juin) pendant la période d'étude pour différents seuil de jours consécutifs	31
3.15 Évolution du nombre de vagues de chaleur pour Ziguinchor compte tenu de la période chaude AMJ (Avril, Mai et Juin) pour différents nombre de jours consécutifs	32

3.16 Évolution du nombre de vagues de chaleur pour Saint-Louis compte tenu de la période chaude AMJ (Avril, Mai et Juin) pour différents nombre de jours consécutifs	32
3.17 Distribution spatiale de l'indice de chaleur maximal saisonnier en Afrique de l'ouest de 1979 à 2016.....	34
3.18 Distribution spatiale de l'indice de chaleur minimal saisonnier en Afrique de l'ouest de 1979 à 2016	35
3.19 Évolution de l'indice de chaleur maximal saisonnier (en degré Celsius) au Sahel période 1979-2016	36
3.20 Évolution de l'indice de chaleur minimal saisonnier (en degré Celsius) au Sahel période 1979-2016	36
3.21 Distribution spatiale de l'humidex saisonnier en Afrique de l'ouest de 1979 à 2016	37
3.22 Évolution de l'humidex saisonnier (en degré Celsius) au Sahel période 1979-2016	38
3.23. Évolution de l'humidex saisonnier (en degré Celsius) en Zone guinéenne période 1979-2016	38

Liste des tableaux

2.1	Signification des indices employés dans la présente étude	17
2.2	Les quatre termes de supportabilité des conditions météorologiques traduisant l'HI.....	20

Table des matières

Dédicaces.....	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Abstract.....	v
Liste des abréviations.....	vi
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	ix
Table des matières.....	1
Introduction Générale.....	3
Chapitre 1 : État de l’art.....	5
1.1 La climatologie Ouest Africaine.....	5
1.2 Contexte, définition des vagues de chaleur.....	8
1.3 Vagues de chaleur et santé.....	10
1.3.1 Effets des fortes chaleurs sur la santé : aspects cliniques.....	10
1.3.2 Facteurs favorisant l’impact sanitaire de la chaleur.....	11
1.3.2.1 Facteurs individuels.....	11
1.3.2.2 Facteurs environnementaux.....	12
Chapitre 2: Données et méthodes.....	13
2.1 Présentation du domaine d’étude.....	13
2.2 Les données.....	13
2.3 Méthodes et outils.....	14
2.3.1 Outils statistiques.....	14
2.3.2 Les percentiles.....	15
2.3.3 Les indices d’extrêmes chaleur.....	16

2.3.4 Les indices de chaleur: Indices relatifs aux risques sanitaires pour l'homme.....	17
2.3.4.1 L'indice de chaleur apparente (ou Heat Index en Anglais).....	18
2.3.4.2 L'humidex ou Indice Humidité.....	20
Chapitre 3: Analyses des résultats et discussion.....	23
3.1 Analyses des vagues de chaleur.....	23
3.1.1 Variations spatio-temporelles des températures.....	23
3.1.2 Evolution des vagues de chaleur sur la période 1979-2016 au Sahel.....	31
3.1.3 Évolution des vagues de chaleur sur trois villes du Sahel.....	33
3.2 Evolution spatiale et temporelle des indices de chaleur et leurs risques sanitaires.....	35
3.2.1 L'indice de chaleur (ou heat index en anglais).....	35
3.2.2 L'humidex ou Indice humidité.....	39
Conclusion Générale.....	42
Bibliographie.....	44
Webographie.....	47

Introduction Générale

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^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (Stocker et al., 2013) prévoit ainsi que les vagues de chaleurs (HW pour « Heat Wave » en anglais) seront 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. Fontaine et al. (2013) observent en Afrique un réchauffement significatif (+1 à + 3 °C) dans la région sub-saharienne occidentale de 1979 à 2011, ainsi que des fréquences plus élevées des VCs avec des durées plus longues après 1994. Ringard et al. (2015) confirment que depuis 1950, dans les régions côtières du Golfe de Guinée (e.g. à Abidjan, Cote d'Ivoire) et au Sahel Central (e.g. Niamey, Niger), les températures se sont réchauffées, le nombre annuel de VC et le pourcentage des jours et des nuits chaudes extrêmes ont augmenté.

L'impact des vagues de chaleur sur les populations des pays développés a été largement étudié, notamment après l'événement intense de l'été 2003 sur l'Europe de l'ouest. Cependant peu d'études se sont portées sur les risques sanitaires de ces vagues de chaleur lorsqu'elles surviennent dans les pays moins développés, en particulier en Afrique, alors que le climat est plus chaud et les capacités d'adaptation sont plus faibles. En effet, nous pensons que le corps humain était habitué à la chaleur, c'est-à-dire acclimaté aux températures de la région de résidence. Désormais les températures sont nettement plus élevées et, les conditions de vie sont plus difficilement supportables, même pour les populations locales. Des travaux préliminaires sur des analyses climatiques et épidémiologiques, en Afrique de l'Ouest, montrent cependant que ce problème est en train d'émerger. De plus, les projections climatiques dans cette zone indiquent que ces événements devraient s'accroître en intensité et en fréquence.

La durée caractérise le plus la sévérité en terme d'impacts d'une vague de chaleur. En effet, plus la vague de chaleur est longue, plus les impacts sur la société notamment la santé sont importants (Anderson and Bell, 2011). Les auteurs ne justifient pas leur choix en nombre de jours pour définir la fréquence des vagues de chaleur. Cependant, des seuils de températures ont été établis ;

ils permettent de mettre en place des alertes sur les canicules lorsque ces seuils sont dépassés. L'ACMAD émet un message d'alerte aux populations ouest africaines lorsque les températures maximales sont supérieures à 40°C (Rome et al., 2014). Meehl et Tebaldi (2004) ainsi que Trigo et al. (2005) montrent que les vagues de chaleur les plus sévères sont caractérisées par de fortes températures nocturnes. Il s'agit dans ce travail d'étudier, d'une part l'évolution temporelle des vagues de chaleur et d'autre part de déterminer sa distribution spatiale ainsi que les risques potentiels de ces vagues de chaleur sur la santé de la population, en Afrique de l'Ouest.

Au chapitre 1, nous présentons les généralités sur les vagues de chaleur en Afrique de l'ouest, puis nous allons faire une description sommaire des données et de la méthodologie utilisée dans le chapitre 2. Le chapitre 3 est consacré à l'analyse et la discussion des résultats obtenus. Enfin la dernière partie est réservée à la conclusion et aux perspectives.

Chapitre 1 : État de l'art

Dans ce chapitre nous avons fait une description de la climatologie ouest africaine ainsi que des vagues de chaleurs et de leurs risques potentiels sur la santé et les facteurs favorisant ces risques.

1.1 La climatologie Ouest Africaine

Il est important de connaître la circulation atmosphérique afin de mieux comprendre la climatologie de la région d'étude. A l'échelle globale, la circulation atmosphérique résulte de deux mouvements combinés : une circulation zonale (Est-Ouest) et une circulation méridienne (Nord-Sud). En Afrique de l'Ouest, la circulation méridienne joue un rôle très important sur le climat. En effet ce type de circulation rassemble les cellules de Hadley qui sont des cellules convectives (Figure 1.1). Ces cellules soulèvent l'air chaud, présent à l'équateur, à haute altitude et transportent vers les zones tempérées l'excédent d'énergie accumulé sous forme de chaleur et d'humidité. La masse d'air atteint la Tropopause et, ne pouvant monter plus haut, est donc repoussée vers le Nord ou le Sud. En s'éloignant de l'équateur, la force de Coriolis augmente, déviant les particules. De plus, en se déplaçant vers les Pôles, l'air se refroidit par échange avec l'environnement ce qui éventuellement le rend négativement instable et il commence à descendre. Lors de la descente, l'air se réchauffe et s'assèche. Cela se produit autour de 30 à 35 degrés Nord et Sud, latitudes où l'on retrouve les zones aride et désertique. Finalement, l'air se dirige vers l'équateur pour compléter le cycle et cette fois, la force de Coriolis le dévie vers l'Ouest. Ce sont les alizés qui soufflent du nord-est dans l'hémisphère nord (Harmattan) et du Sud-Est dans l'hémisphère Sud (Ringard, 2013).

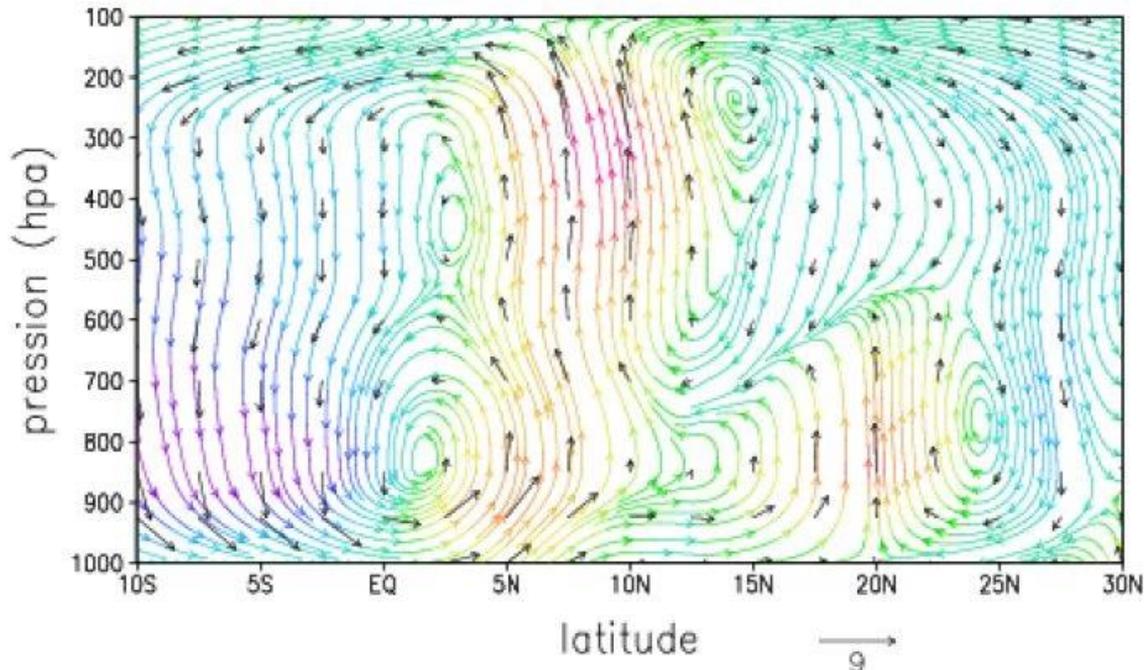


Figure 1.1 Coupe verticale de la composante du vent méridien et du vent vertical moyenné en juin-juillet-septembre-octobre pour l'année 1998. (Ringard, 2013).

Le climat Ouest Africain est influencé par l'interaction de deux masses d'air différentes. C'est la rencontre de ces deux masses qui crée la zone de convergence intertropicale (ZCIT). Cette ZCIT correspond à la branche ascendante de la cellule de Hadley. La ZCIT est la zone de rencontre entre deux masses d'air continental dont l'une est un vent chaud et sec provenant du Nord (Sahara) et l'autre est un vent chaud et humide issue du sud de l'Océan Atlantique. La migration Nord-Sud de la ZCIT tend à suivre l'inclinaison des rayons solaires ; en effet elle atteint la position la plus septentrionale en juillet-août et la plus méridionale en janvier. La différence thermique des masses d'air, combinée à la différence de direction des vents dans les deux hémisphères, crée le front intertropical (FIT). Cette zone frontale est particulièrement active en été et diffuse les pluies de mousson. Les alizés, habituellement de Sud-Est et liés à cette ZCIT vont s'inverser après le passage de l'équateur en raison de la force de Coriolis et devenir des vents de Sud voire même Sud-ouest provenant du Golfe de Guinée et chargés d'humidité (Goutorbe et al., 1994 ; Fontaine et al., 1995 ; Janicot et al., 1997).

De plus, trois grands flux régulent la circulation atmosphérique au-dessus de l'Afrique de l'Ouest (Figure 1.2). Le premier, le Jet d'Est Tropical (JET) est un flux se trouvant à 200 hPa. Il résulte des contrastes entre les massifs montagneux (froids) et les régions océaniques (chaudes). À 700

hPa se trouve le Jet d'Est Africain (JEA) qui, lui, émane de la différence de température entre le Golfe de Guinée froid et le Sahara chaud. Enfin, le troisième flux, celui de mousson qui se situe à 925 hPa (Bielli et al., 2009). La mousson de l'Afrique de l'Ouest est une grande circulation saisonnière de l'Atmosphère dans les basses couches générée par le gradient d'énergie statique sèche et humide respectivement venant du continent (Sahel) et de l'Atlantique (le Golfe de Guinée).

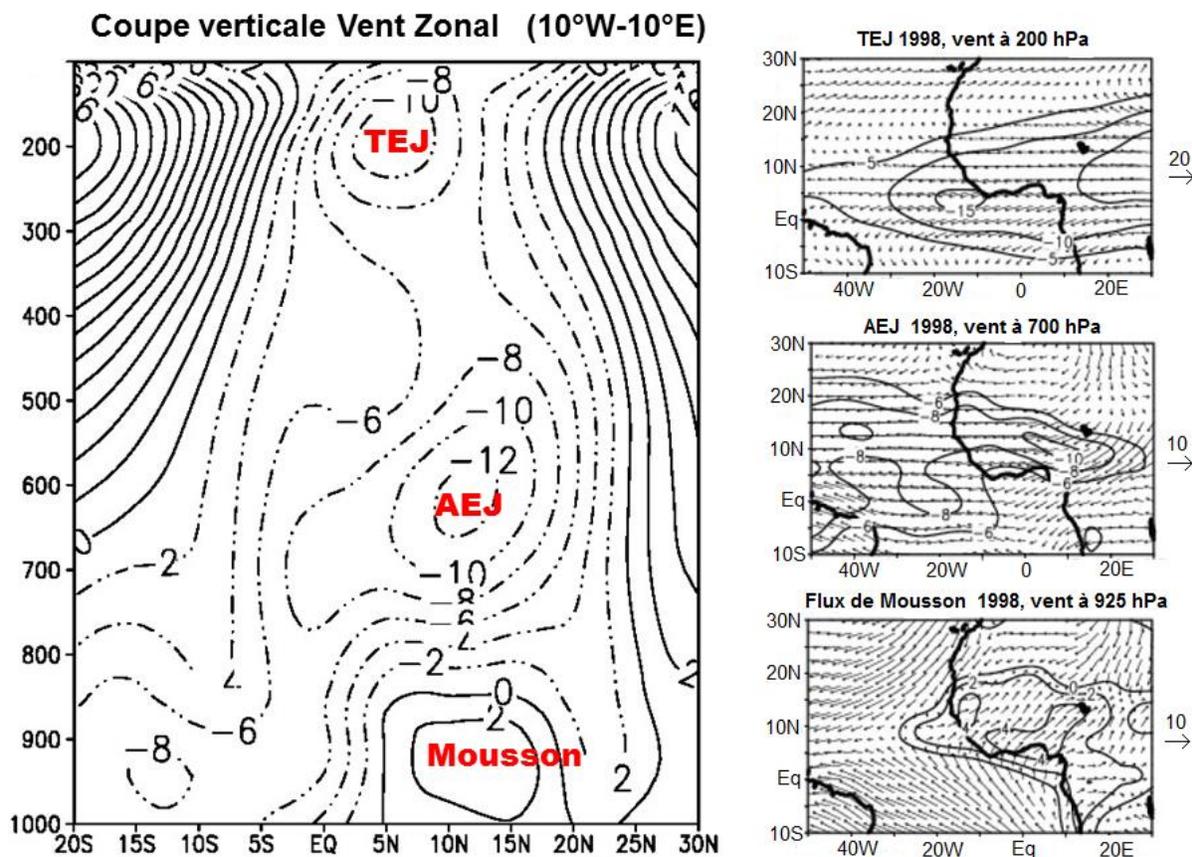


Figure 1.2 À gauche coupe verticale du vent zonal (m/s) moyenné sur la longitude 10°W – 10°E. Altitude en hPa. A droite carte des moyennes JJAS de 1998 des flux de vents à trois niveaux de pression : 200 hPa en haut représentant le TEJ, 700 hPa au centre représentant l'AEJ et 925 hPa en bas représentant le flux de mousson (Ringard, 2013).

Le cycle saisonnier des précipitations en Afrique de l'Ouest est modulé, principalement, par l'oscillation saisonnière méridienne de la ZCIT. Il existe donc deux régimes pluviométriques

principaux: le régime guinéen qui affiche un cycle bimodal dominé par deux pics pluviométriques (en avril-mai et décembre sur la partie côtière) séparés par une petite saison sèche de juillet à septembre. Le régime sahélien présente un cycle uni-modal où les pluies sont présentes de juillet à septembre, et une saison sèche beaucoup plus importante d'octobre à juin (Ringard, 2013).

1.2 Contexte, définition des vagues de chaleur

Les vagues de chaleur correspondent à des températures anormalement élevées pendant plusieurs jours consécutifs. Mais il n'existe pas de définition universelle du phénomène. En effet, les niveaux de températures et la durée de l'épisode qui permettent de caractériser une vague de chaleur varient selon les régions du monde et les domaines considérés (caractérisation d'un point de vue climatologique, activité de recherche, dispositif de vigilance météorologique).

L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), définit la vague de chaleur comme « un réchauffement important de l'air, ou une invasion d'air très chaude sur un vaste territoire, généralement sur une période de quelques jours à quelques semaines », sans pour autant y associer de seuil spécifique, en raison de la grande diversité des climats locaux.

Actuellement, une définition absolue de la vague de chaleur n'existe pas. Cependant, il est possible de définir un épisode caniculaire comme étant fondé sur l'intensité et la durée des températures extrêmes diurnes (températures maximales) et nocturnes (températures minimales) (Goubanova, 2007). Généralement le concept repose sur le dépassement de seuils qui peuvent être calculés selon plusieurs méthodes.

Un événement météorologique extrême est un événement rare en un endroit et à un moment de l'année particulier (GIEC, 2007). Un événement météorologique extrême devrait normalement être aussi rare, sinon plus, que le 10^{ème} ou le 90^{ème} percentile de la fonction de densité de probabilité observée. Lorsque des conditions météorologiques extrêmes se prolongent pendant un certain temps, l'espace d'une saison par exemple, elles peuvent être considérées comme un événement climatique extrême, en particulier si elles correspondent à une moyenne ou à un total en lui-même extrême (GIEC, 2007). Selon Klein Tank and Konnen (2003), un phénomène extrême est défini comme une vague de chaleur lorsque les températures dépassent le percentile 90 pendant six jours consécutifs.

Huth et al. (2000) suggèrent une seconde méthode constituée de deux seuils. Le 1^{er} seuil T1 est le percentile 97.5 de la distribution des températures maximales. Le second seuil T2 est défini comme étant le percentile 81. Une vague de chaleur est donc la plus longue période de jours consécutifs satisfaisants les 3 critères suivants :

- La température maximale journalière doit être supérieure à T1 pendant au moins 3 jours.
- La moyenne journalière des températures maximales doit être supérieure à T1 pendant toute la période.
- La température maximale journalière doit être supérieure à T2 chaque jour de la période.

De plus, la littérature montre que d'une définition à l'autre, les percentiles et la durée prise en compte lorsque l'on a un dépassement du seuil sont différents. En effet les seuils deviennent non seulement variables d'un pays à un autre mais aussi d'un département à un autre. Par exemple en France la vague de chaleur est une période d'au moins deux jours consécutifs au cours desquels les températures ont atteint ou dépassé la valeur de 35°C (Bessemoulin et al., 2004). Certaines nations, comme la Grande-Bretagne, considèrent qu'il y a canicule dès que la moyenne journalière dépasse de plus de 4°C la normale mensuelle du lieu. L'Institut royal de météorologie des Pays-Bas définit la vague de chaleur comme une période supérieure ou égale à cinq jours consécutifs pendant lesquels la température minimale atteint 25°C et la température maximale 30°C.

En zone sahélienne une vague de chaleur est définie lorsque la température de l'air (T_{\min} et T_{\max}) atteint ou dépasse le 90^{ème} percentile (T_{90p}) pendant au moins trois jours consécutifs (Rome et al., 2014).

Les vagues de chaleur sont des extrêmes météorologiques qui affectent le plus le bien-être et la santé. Ainsi le stress thermique résultant d'une hausse de température peut provoquer l'épuisement, voir une dégradation de l'état de santé, aboutissant à la mort.

1.3 Vagues de chaleur et santé

1.3.1 Effets des fortes chaleurs sur la santé : aspects cliniques

L'exposition d'un individu à une température environnementale élevée, sans période de fraîcheur nocturne suffisante pour permettre à l'organisme de récupérer, est susceptible d'entraîner des réactions bénignes ou graves, dues à des réponses inadéquates ou insuffisantes des mécanismes

de thermorégulation. La surexposition aux fortes chaleurs peut entraîner deux types de réactions au niveau de l'organisme: l'épuisement par la chaleur et le coup de chaleur (InVS, octobre 2003).

L'épuisement par la chaleur est la conséquence d'une perte liquidienne excessive. Il se manifeste par des céphalées, des nausées, des vomissements une sensation de malaise, une faiblesse musculaire et des vertiges, accompagnés d'une hypotension. L'évolution se fait vers un effondrement de la pression sanguine. L'équilibre hydro-électrolytique du sang est perturbé avec notamment une déshydratation. L'épuisement par la chaleur est généralement transitoire et répond bien à une réhydratation. Le pronostic est favorable si la défaillance circulatoire n'est pas prolongée (InVS, octobre 2003).

Le coup de chaleur quant à lui est dû à une défaillance des mécanismes de déperdition (affaiblissement des forces physique et morales de quelqu'un) de chaleur. Les premiers signes d'un coup de chaleur sont des céphalées, des vertiges et affaiblissement prononcé de l'état général. La sudation (ou transpiration est la production et évacuation de sueur par les pores de la peau ou au travers de certaines muqueuses) est généralement diminuée et la température corporelle s'élève rapidement à 40-41°C. Un épisode de désorientation peut précéder le coma et les convulsions. Les autres signes comprennent accélération du rythme cardiaque, vomissements et hypotension artérielle. Le coup de chaleur constitue une urgence médicale majeure, rapidement mortelle en l'absence de traitement. Des lésions cérébrales définitives ou une insuffisance rénale peuvent survenir lors de la phase aiguë (InVS, octobre 2003).

Il faut aussi noté que les effets de la chaleur ne sont pas souvent immédiats.

1.3.2 Facteurs favorisant l'impact sanitaire de la chaleur

Les études épidémiologiques menées ces 30 dernières années en Europe et aux États-Unis ont mis en évidence les facteurs de risque de mortalité lors d'une vague de chaleur.

1.3.2.1 Facteurs individuels

Un des facteurs de risque est d'ordre individuel :

- **Age:** les études épidémiologiques menées suite à la vague de chaleur d'août 2003 ont permis d'identifier les personnes âgées comme la principale population à risque de décéder (BEH n°19-20, 2006). Le besoin de boire est de moins en moins bien perçu avec l'âge, une déshydratation

modérée n'entraînant peu ou pas de sensation de soif après 70 ou 75 ans (Besancenot, 2002). Les personnes âgées constituent la population la plus sensible à la déplétion hydrique et présentent des mécanismes de régulation thermique fragiles.

Quel que soit la localité, les enfants et les personnes âgées sont les plus vulnérables aux effets des canicules

- **Sexe:** La surmortalité due aux vagues de chaleur touche différemment les hommes et les femmes selon les études. D'une façon générale, alors que les femmes sont plus touchées en Europe, cette tendance est inversée aux États-Unis ou au Canada (Besancenot, 2002). Pour la canicule d'août 2003 (InVS, octobre 2003), la surmortalité observée chez les femmes (+70%) est sensiblement plus élevée que celle qui a été observée chez les hommes (+40%). Étant donné qu'il n'y a pas assez d'études sur les répercussions des vagues de chaleur en Afrique, nous n'avons pas pu trouver de statistiques concernant la surmortalité observée chez les femmes et chez les hommes en Afrique de l'Ouest.

- **État général de la santé:** les études cohorte de personnes âgées réalisées par l'Institut de Veille Sanitaire (InVS, février 2006) sur les facteurs de risque individuels pendant la vague de chaleur de 2003 montrent que les sujets atteints d'affections cardiovasculaires, respiratoires, neurologiques ou psychiatriques sont plus à risque de voir leur état de santé se dégrader en période de canicule.

Les ouvriers travaillant en plein air, les personnes à faible revenu font aussi parti des populations vulnérables aux vagues de chaleur.

1.3.2.2 Facteurs environnementaux

La surmortalité liée aux vagues de chaleur touche essentiellement les villes, et ce, d'autant plus qu'elles sont de grande taille et éloignées de la mer : les activités humaines et la densité de l'habitat entraînent l'apparition d'îlots de chaleur (Le terme îlot de chaleur urbain (ICU) caractérise un secteur urbanisé où les températures de l'air et des surfaces sont supérieures à celles de la périphérie rurale), la température nocturne reste élevée. Les caractéristiques de l'habitat (petits appartements, dans les étages supérieurs, sans la climatisation) sont également des facteurs de risques de décès bien identifiés. Enfin la pollution atmosphérique et la température pourraient avoir un effet synergique sur la mortalité (BEH n°45-46, 2003).

Le climat ouest africain est influencé par l'interaction de deux masses d'air différentes. C'est la rencontre de ces deux masses d'air qui crée la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT). De plus la circulation atmosphérique au-dessus de l'Afrique de l'Ouest est régulée par trois grands flux: le Jet d'Est Tropical (JET), le Jet Est Africain (JEA) et le flux de mousson.

L'exposition d'un individu à une température environnementale élevée peut entraîner des réactions, plus ou moins graves, de l'organisme. Au maximum, survient le coup de chaleur, urgence médicale rapidement mortelle en l'absence de traitement.

De nombreux facteurs individuels modulant les risques sanitaires de la chaleur sont bien identifiés. Les personnes âgées et les enfants constituent les populations les plus à risques. Des facteurs de risque environnementaux sont également bien identifiés : la surmortalité, au cours des vagues de chaleur, touche essentiellement les populations des villes de grande taille et éloignées de la mer.

Chapitre 2: Données et méthodes

2.1 Présentation du domaine d'étude

L'étude s'intéresse à une zone de l'Afrique (figure 2.1) de longitude allant de -30°W à 30°E et de latitudes s'étendant de 0°N à 25°N , plus particulièrement le sahel (-10°W - 10°E ; 10°N - 20°N). C'est la zone la plus touchée par les vagues de chaleur. Cette région présente une grande variété géographique et culturelle. Limitée au Sud et à l'Ouest par l'océan Atlantique, le Sahara au Nord et approximativement le méridien 20 à l'Est. Le fleuve Niger est généralement comme la frontière septentrionale de cette région, tandis que sa frontière orientale est placée sur une ligne reliant le mont Cameroun au lac Tchad 15°E . Elle couvre une superficie de $6140\ 000\ \text{km}^2$ soit un cinquième du continent Africaine. La grande majorité de la région est composée de plaines dont l'altitude est inférieure à 300 mètres. La partie septentrionale est occupée par le Sahel, zone de transition aride et semi-aride entre le désert du Sahara et l'Afrique intertropicale. Le Sahel forme une bande longitudinale large de 160 à 240 km.

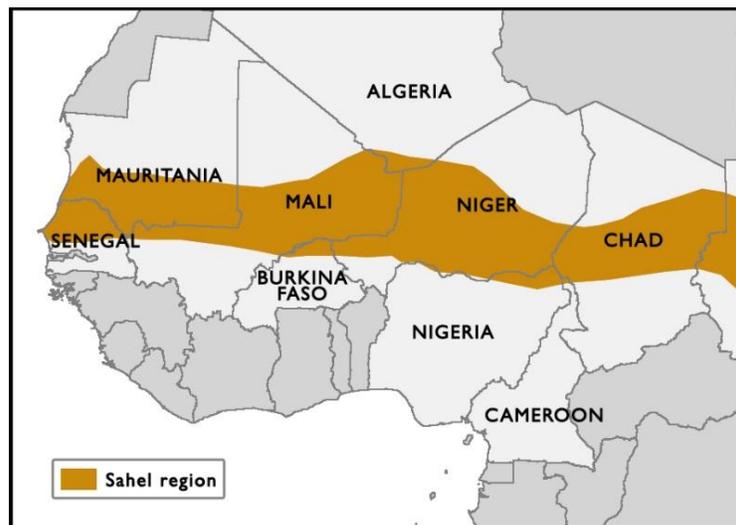


Figure 2.1 Zone d'étude (Bernard, 2015).

2.2 Les données

Les données exploitées dans ce travail proviennent du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT ; en anglais European Center for Medium-Range Weather Forecasts : ECMWF) qui couvrent la période 1979-2016. Étant donné qu'il n'est pas

toujours possible d’avoir des données relevées sur site de chaque paramètre météorologique sur de longues périodes temporelles, des modèles de climat ont été créés. Les ré-analyses permettent donc d’augmenter la quantité des séries de données en offrant une couverture spatiale continue. (Duclot I., 2009). Il existe différentes séries de réanalyses, il faut donc sélectionner le modèle qui correspond le mieux aux conditions météorologiques de la zone étudiées. Dans notre étude nous allons utiliser les ré-analyses ERA-Intérim car elles reproduisent bien le cycle saisonnier et la variabilité interannuelle des températures maximales et minimales du Sahel, de plus elles sont récentes et actuellement les plus fiables sur de longues périodes. Elle se présentent sur une grille de 0.75°x0.75°, avec des niveaux (100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 300, 350,400, 450, 500, 550, 600, 700, 750, 800, 850, 825, 850, 875, 900, 950, 975, 1000) et une résolution temporelle de 6h, elles simulent l’atmosphère globale sur une période de 1979-2016 et pour un nombre important de variables dynamique et thermodynamiques qui sont : la pression, le vent le géopotential, la température, l’humidité spécifique, l’humidité relative, la vitesse verticale à différentes niveaux de pression. Ce sont des données quotidiennes de température de l’air à 2m, de la température maximale et minimale, de l’humidité relative et de la température du point de rosée.

2.3 Méthodes et outils

2.3.1 Outils statistiques

➤ La moyenne

La moyenne est égale à la somme des données (température) divisée par leur nombre. Elle est donnée par la formule suivante :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.1)$$

Où x_i représente la température maximale (minimale ou moyenne) d’une année (i) donnée de la série et N la longueur de la série.

➤ L’écart-type de la référence

L’écart-type, en statistique est une mesure de dispersion de données. Il est défini comme la racine carrée de la variance ou, de manière équivalente, comme la moyenne quadratique des écarts par

rapport à la moyenne. L'écart type est calculé ici dans le but de pouvoir calculer l'anomalie standardisée en conservant les mêmes indices. Il s'obtient par la formule suivante :

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.2)$$

x_i , N sont respectivement la température d'une année (i) donnée de la série, la longueur de la série.

➤ **L'anomalie**

L'anomalie représente l'écart par rapport à une normale et elle est calculée par la formule suivante :

$$Y = x_i - \bar{x} \quad (2.3)$$

Où x_i représente la température maximale d'une année (i) donnée de la série et \bar{x} la moyenne climatologique.

➤ **Analyse en Composantes Principales ACP/EOFs**

L'analyse en composante principale (Empirical Orthogonal Function ; EOF) est un outil qui permet de simplifier la représentation d'un phénomène complexe. L'objectif des ACP est de trouver la combinaison linéaire de toutes les variables, c'est-à-dire des points de grille qui expliquent la variance maximale. La composante principale associée à l'ACP correspondant fournit le signe et l'amplitude globale de l'ACP en fonction du temps.

2.3.2 Les percentiles

Par définition les percentiles sont les valeurs de la variable qui divisent la variable continue en 100 groupes égaux en nombre.

Dans notre cas, les percentiles représentent les valeurs qui divisent en 100 groupes la densité de probabilité de la température qui est en fait une gaussienne. Les extrêmes étant définis comme des dépassements d'un seuil fixe, se regroupent dans les queues de la distribution avec respectivement des extrêmes froides à gauche et des extrêmes chaudes à droite (figure 2.2).

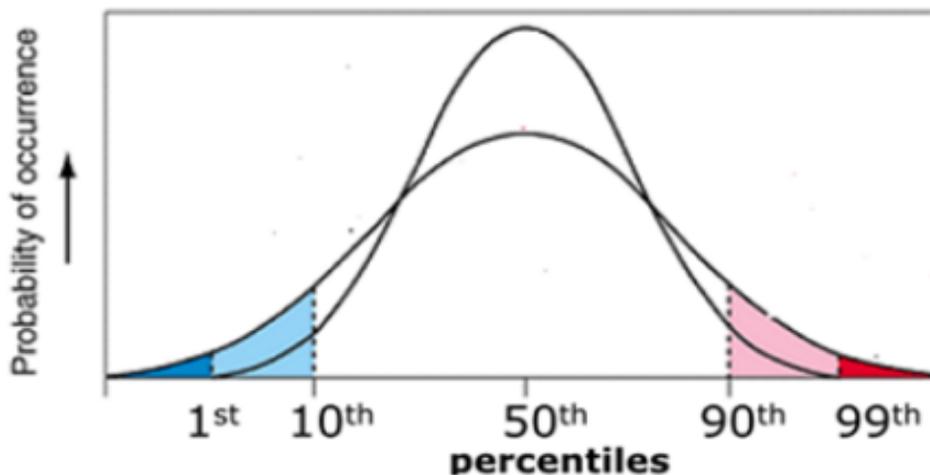


Figure 2.2. Répartition des percentiles et de leur probabilité d'occurrence (Sillman, 2005).

Ainsi les percentiles peuvent être utilisés pour caractériser et définir les pics et vagues de chaleur. En effet Stephenson (2008) a considéré les événements chauds détectés entre le 90ème et le 99ème percentile. Ceci est en accord avec Sillman (2005) qui considérait déjà le 99^e percentile comme un seuil permettant une sélection plus étroite. La probabilité d'occurrence est plus faible pour ce dernier percentile que pour le 90ème. Les indices fondés sur les percentiles utilisent les jours chauds (T_{max}) et nuits chaudes (T_{min}). « Les températures minimales jouent souvent un rôle décisif, en permettant ou non un repos nocturne réparateur » (Besancenot, 2002). L'avantage des percentiles est de prendre en compte les particularités du climat local et de la perception de la chaleur.

2.3.3 Les indices d'extrêmes chaleur

Nous avons trouvé dans la littérature plusieurs indicateurs de chaleur et sont tous basés suivant la finalité de l'étude. Dans notre étude, nous allons utiliser les indices présentés dans le tableau 2.1 pour caractériser les vagues de chaleur en Afrique de l'Ouest.

Tableau 2.1 Signification et usage des indices employés dans la présente étude.

Sigle	Signification
TR (tropicals nights)	Nombre de nuits où la température minimale (T_{min}) $> 20^{\circ}C$
Tx90p	Pourcentage de jours chauds (journées où la température maximale (T_x ou T_{max}) supérieure au dernier décile (90p)).
HWDI(Heat Wave Duration Index)	Indique la durée d'une vague de chaleur par le nombre de jours durant des intervalles d'au moins 6 jours avec $TX > T_{jour+5}$ (pour une moyenne calculée quotidiennement sur la base 1961-1990) sur une fenêtre glissante de 5jours (i.e. d-2 à d+2).
Tn90p	Pourcentage de nuits chaudes (nuits où la température minimale (T_n ou T_{min}) supérieure au dernier décile (90p))

2.3.4 Les indices de chaleur: Indices relatifs aux risques sanitaires pour l'homme

Les vagues de chaleur ont un impact certain sur la société et présentent des risques sanitaires pour l'homme. Plusieurs indices relatifs à ces risques ont été établis et pour la plupart reposent sur les variables météorologiques, qui conditionnent la température ressentie par l'homme et donc lié à l'intensité de la vague de chaleur. La température de l'air, l'humidité atmosphérique, la vitesse du vent ainsi que la température radiante sont les variables météorologiques les plus déterminants.

Les risques potentiels sanitaires peuvent présenter des différences régionales mais n'altère en rien la vulnérabilité. En effet, les populations vivants dans un climat chaud supportent généralement mieux la température car leur corps s'est adapté ; cependant, il n'empêche que ces personnes sont tout aussi vulnérables aux vagues et pics de chaleur: la température du corps est la même pour tous les hommes (Rome et al, 2014). Parmi les indices de chaleur existant, l'indice de chaleur apparente de Steadman (1979) converti en degrés Celsius ou température ressentie est le plus utilisée (Heat Index) notamment par la NOAA, ainsi que l'Humidex canadien, très proche. Ces deux indices combinent température de l'air et humidité relative et fournissent des niveaux d'inconfort thermique voire de danger pour l'homme.

2.3.4.1 L'indice de chaleur (ou Heat Index en Anglais)

Plusieurs indices de chaleur ont été développés dans la littérature. Anderson et al. (2013) présentent 21 indices de chaleur, mais dans le cadre de notre étude nous allons utiliser l'indice de chaleur ou heat index.

L'indice de chaleur est développé par le National Weather Service, aux Etats-Unis. Il représente l'effet de l'humidité sur un organisme soumis à de fortes chaleurs. Cet indice est basé sur la capacité de production de sueur du corps humain qui, en s'évaporant permet de refroidir la peau. Si la température de l'air est inférieure à la température de la peau, la perte de chaleur vers l'extérieur est favorisée. Et, si la température externe est supérieure à celle du corps et/ou que l'humidité est élevée, il est plus difficile de transpirer et donc de refroidir sa température corporelle, donnant une sensation subjective de chaleur intense. Il va permettre d'indiquer le seuil d'inconfort thermique voire de danger pour l'homme d'une vague de chaleur. Cet indice de chaleur est calculé par la formule suivante :

$$HI = c_1 + c_2 T + c_3 R + c_4 TR + c_5 T^2 + c_6 R^2 + c_7 T_2 R + c_8 T R^2 + c_9 T^2 R^2 \quad (2.4)$$

$$c_1 = -42,379 \quad , \quad c_2 = 2,04901523 \quad , \quad c_3 = 10,14333127 \quad , \quad c_4 = -0,22475541$$

$$c_5 = -6,83783 * 10^{-3} \quad , \quad c_6 = -5.481717 * 10^{-2} \quad , \quad c_7 = 1.22874 * 10^{-3} \quad , \\ c_8 = 8.5282 * 10^{-4} \quad , \quad c_9 = 1.22874 * 10^{-3}$$

Où HI est l'indice de chaleur en °F, R l'humidité relative noté de 0 à 100 et T, la température atmosphérique en °F.

Suivant les différents valeurs de l'indice de chaleur, nous pourrions interpréter les risques sanitaires ou non sur l'homme. Le tableau 2.2 présente les différents niveaux d'inconfort et risques sanitaires sur l'homme.

Tableau 2.2- Les quatre termes de supportabilité des conditions météorologiques traduisant l’HI.

Degré C	Degré F	Notes
27-32	80-90	Inconfort: Fatigue possible après une exposition prolongée et la pratique d’une activité physique
32-41	90-105	Extrême inconfort: Insolation, Crampes musculaires et épuisement physique
41-54	105-130	Danger: Insolation, crampes et épuisement probables et coup de chaleur possible
54+	130+	Danger Extrême: Risque élevé de coup de chaleur/coup de soleil

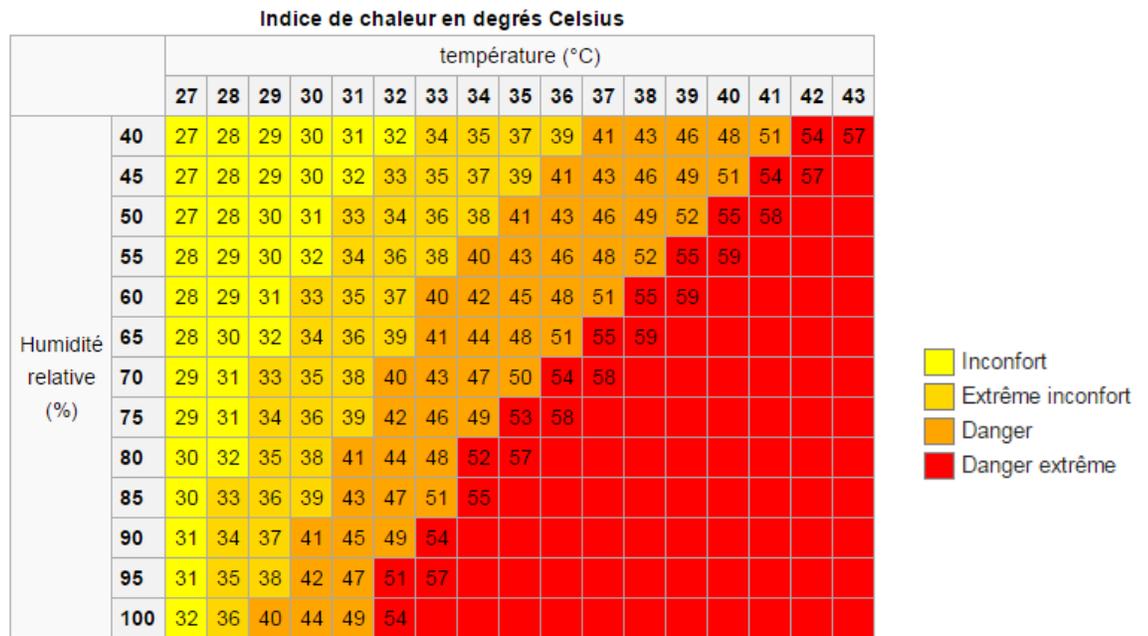


Figure 2.3 Indice de chaleur en degrés Celsius (Bernard, 2015).

Sur la figure 2.3 les codes de couleur permettent d’identifier les différents niveaux d’inconfort voir de danger des vagues de chaleur sur l’homme.

2.3.4.2 L’humidex ou Indice Humidité

L’Humidex a été développé par le service météorologique canadien. Il indique le ressenti d’une personne lambda lors d’un temps chaud ou humide. Suivant les valeurs de l’humidex, on définit les différents degrés d’inconfort et risques pour la santé des populations. Sur la figure 2.4 les

codes de couleur permettent d'identifier les différents niveaux de risque des vagues de chaleur sur l'homme de l'inconfort au danger extrême (Coup de chaleur).

$$Humidex = (\text{température de l'air}) + h \quad (2.5)$$

Où : $h = (0,5555) \times (e - 10,0)$

e = pression partielle de vapeur en hPa ; donnée par :

$$e = 6,11 \times e \left[5417,7530 \left(\frac{1}{273,16} - \frac{1}{T_d} \right) \right]$$

T_d : point de rosée exprimé en Kelvin (température en K = température en °C + 273,16)

5417,7530 = constante arrondie fondée sur le poids moléculaire de l'eau, de la chaleur latente de l'évaporation et le gaz régulier universel.

Ainsi:

$$Humidex = t_{air} + 0,5555 * \left(6,11 * e^{5417,7530 \left(\frac{1}{273,16} - \frac{1}{T_d} \right)} - 10 \right) \quad (2.6)$$

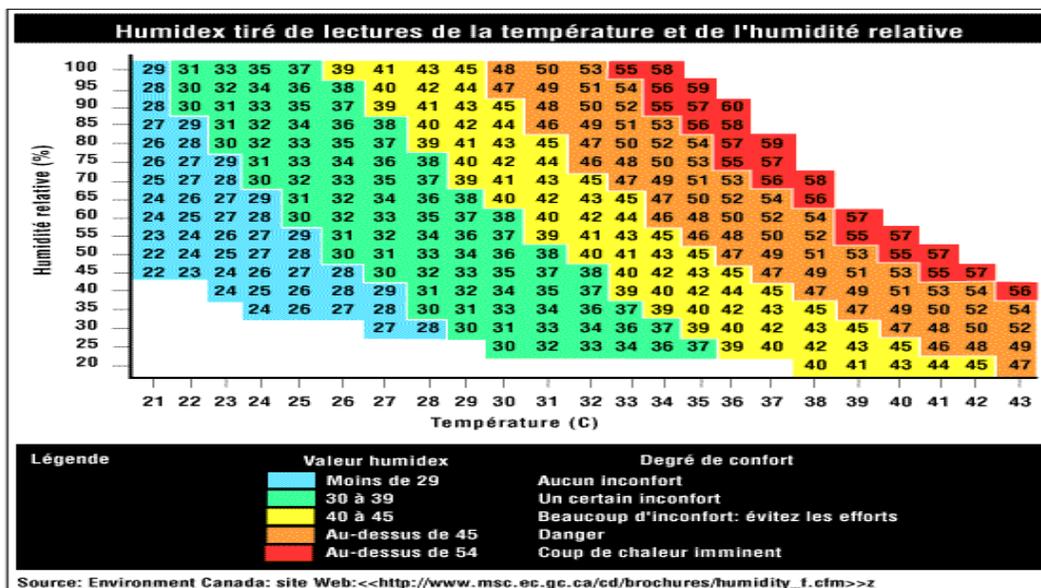


Figure 2.4 L'indice Humidité (Environment Canada)

Ce chapitre présente les données utilisées au cours de ce stage sur la même période avec les mêmes résolutions temporelles et des résolutions spatiales différentes, des données atmosphériques des ré-analyses ERA-Intérim. Ce chapitre détaille aussi les outils statistiques de base utilisés : moyenne, anomalie ainsi que les indices.

Chapitre 3: Analyses des résultats et discussion

Ce chapitre sera consacré à l'analyse des résultats obtenus ainsi qu'aux discussions.

3.1 Analyses des vagues de chaleur

La température est le paramètre essentiel dans l'analyse des vagues de chaleur; cependant l'humidité joue un rôle important sur l'effet ressenti, la chaleur humide étant plus difficilement supportable que la chaleur sèche.

3.1.1 Variations spatio-temporelles des températures

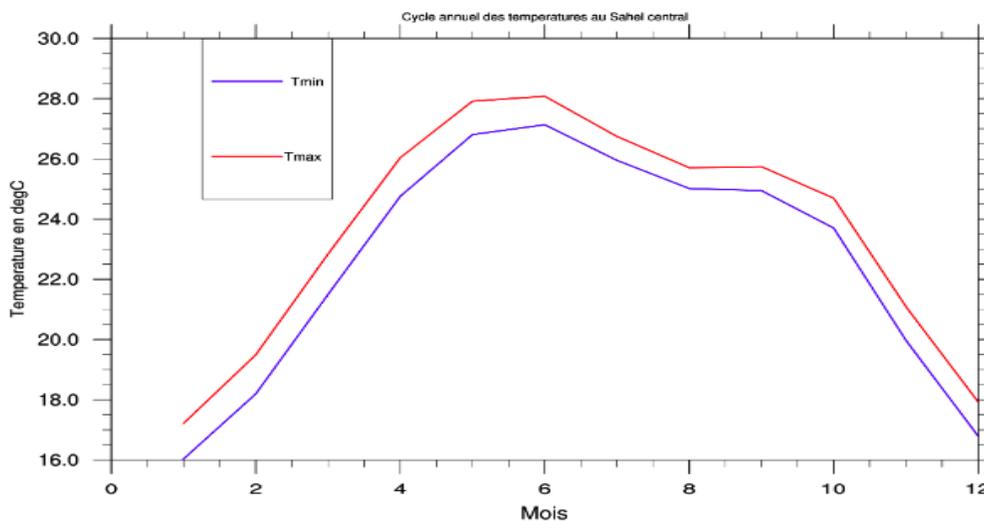


Figure 3.1 Cycle annuel des températures maximale et minimale au Sahel.

La zone sahélienne connaît un régime thermique bimodal et ceci est due à sa faible latitude tropicale et de la continentalité. Les températures maximales et minimales les plus chaudes sévissent au printemps (Avril-Mai-Juin) et en Août-Septembre-Octobre comme on le constate sur la figure 3.1. Des études ont montrées que les vagues de chaleur de saison sèche, c'est-à-dire au printemps, sont plus importantes et plus difficiles à supporter c'est donc sur celles-ci que nous allons porter notre attention.

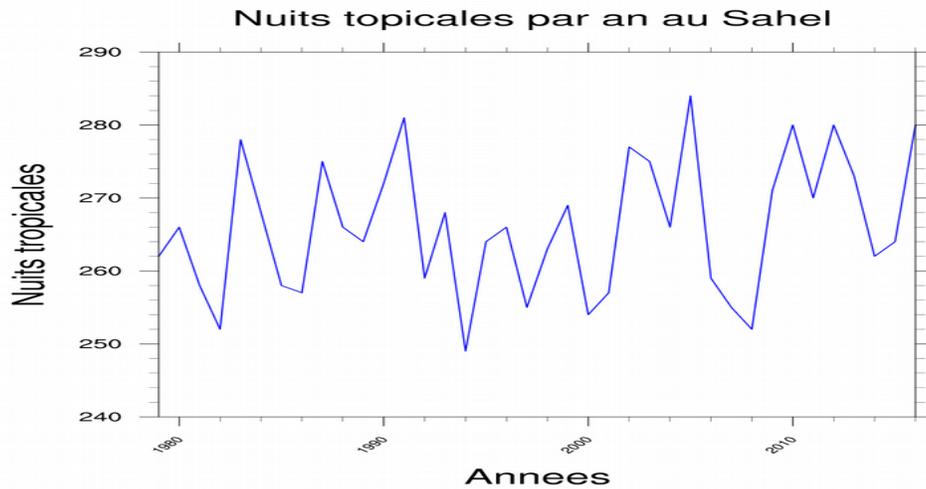


Figure 3.2 Nombre de nuits tropicales par an au sahel sur la même période que la figure précédente.

Le Sahel enregistre plus de 249 nuits tropicales par an. Ces résultats sont en accord avec ceux de Moron et al., (2016) qui trouvent que le Sahel enregistre 223 « jours torrides » par an (i.e. $T_{\max} \geq 35^{\circ}\text{C}$), et 249 « nuits tropicales » par an (i.e. $T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$) en moyenne, ceci fait du Sahel une des zones les plus chaudes de la planète. Les années 1990, 2005, 2010 et 2016 sont les années où nous avons le plus grands nombre de nuits tropicales (figure 3.2).

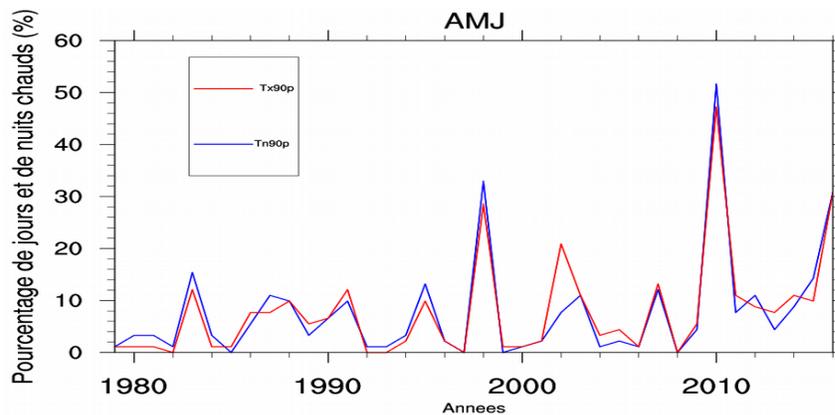


Figure 3.3 Evolution du pourcentage de jours chauds (Tx90p) et de nuits chaudes (Tn90p) au Sahel sur la période 1979-2016.

Les jours chauds (Tx90p), au Sahel, connaissent une forte variation au cours de la série temporelle considérée (1979-2016). En effet sur la figure 3.3 est représenté le pourcentage de jours et nuits chaudes de 1979 à 2016 pendant la saison AMJ. Nous constatons une forte variabilité interannuelle avec des pics assez important pour certaines années.

On assiste également à une augmentation des fréquences du nombre de jours chauds, ce qui se traduit par un accroissement des températures de jours (figure 3.3). Cette situation se manifeste aussi par des tendances à la baisse de l'amplitude thermique journalière traduisant du coup, une augmentation de la durée des canicules ou vagues de chaleurs.

Les mêmes tendances observées sur les Tx90p, s'observent sur les nuits chaudes (Tn90p, tendance à une hausse significative). Cette situation témoigne parfaitement d'un réchauffement des températures nocturnes au niveau de la zone étudiée (Sahel). Toutefois, sur les dix dernières années, on remarque que l'évolution des nuits chaudes est plus rapide que celle des jours chauds, traduisant une accentuation du réchauffement nocturne.

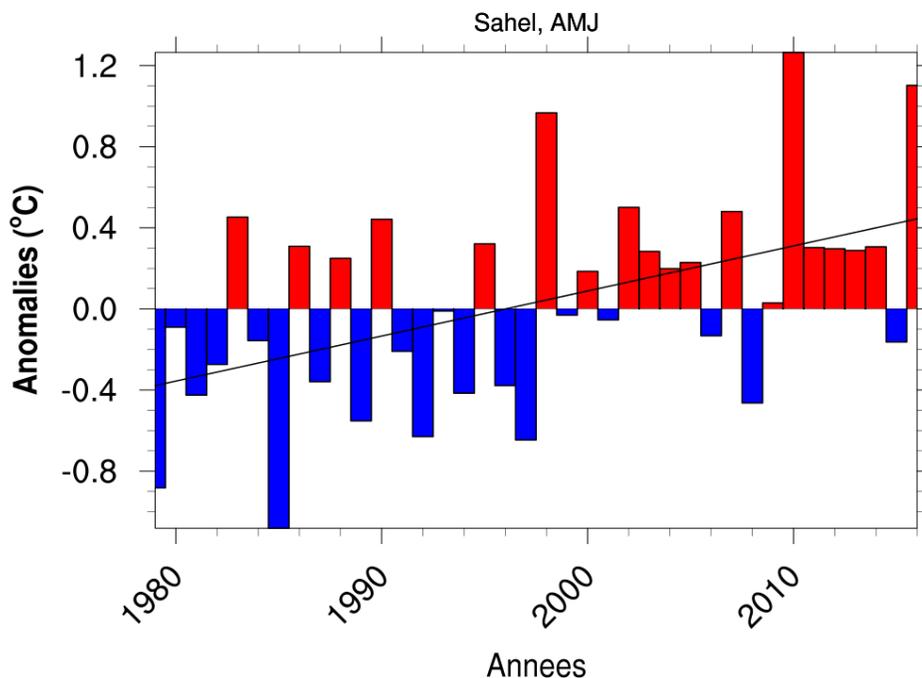


Figure 3.4- Anomalie des températures maximales en AMJ au Sahel (Anomalie positive en rouge et anomalie négative en bleu).

La variabilité interannuelle de la saison AMJ de l'anomalie des températures maximales au Sahel (10°W-10°E et 10 à 20°N) sur la période 1979-2016 avec les données ERA-Intérim est représentée sur la figure 3.4. On rappelle que l'anomalie positive (bar rouge) correspond à une année chaude donc supérieure à la normale et l'anomalie négative (bar bleu) correspond à des températures inférieures à la normale.

En premier lieu nous avons constaté en AMJ au sahel des anomalies positives très marquées pendant la décennie 1998-2016 avec des pics en 2010 et 2016 de l'ordre de 1.1 et 1.3 K

respectivement. Ces observations nous permettent de dire que la température maximale a augmentée et a été très forte pendant ces années, surtout le printemps 2010 où le sahel a subi une vague de chaleur particulièrement longue et intense, très difficile à supporter pour la population. Nous remarquons que les années allant de 1979 à 1997 sont moins chaudes, par contre les années 1998 à 2016 sont des années, globalement chaudes. Nous assistons de fait à un changement de l'effet thermique d'une période à une autre, ce qui se traduit probablement par un environnement beaucoup plus chauds et donc des conséquences beaucoup plus importante pour la population mais également sur les phénomènes météorologiques, sachant que l'apport thermique joue un rôle prépondérant dans ces processus.

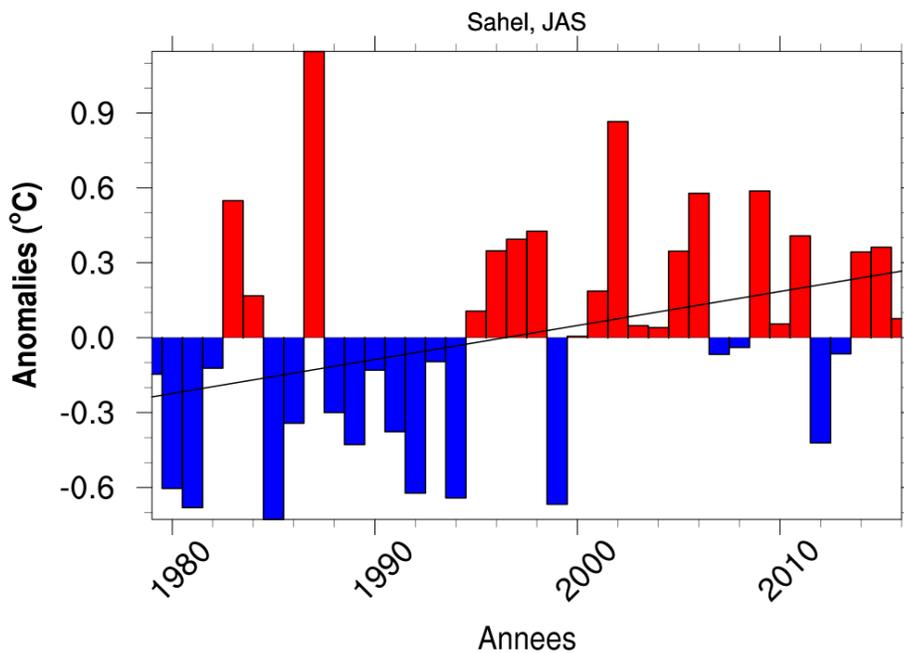


Figure 3.5 Anomalie des températures maximales en JAS au Sahel (Anomalie positive en rouge et anomalie négative en bleu).

En premier lieu, sur la figure 3.5, nous constatons des anomalies négatives de 1979 à 1994 sauf 1987 et 1983 et des anomalies positives de 2001 à 2016. En comparant l'anomalie positive obtenue pour les différentes années, nous voyons que l'anomalie positive la plus importante est observée pour l'année 1987.

MX2T: AMJ: 1979-2016

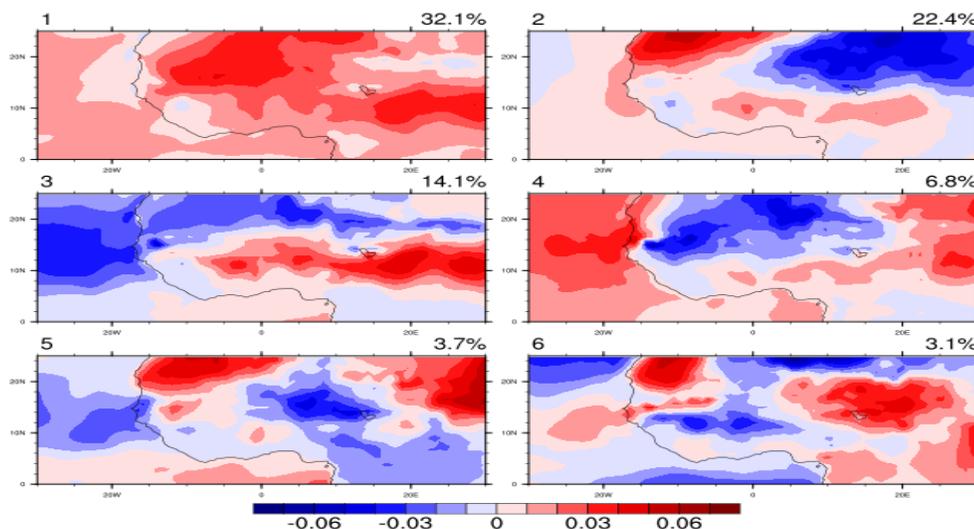


Figure 3.6 Analyse en composante principale de l'anomalie des températures maximales, en Avril-Mai-Juin. Afin de caractériser la variation spatiale, nous avons fait une analyse en composante principale de la température maximale pendant la saison AMJ. Les deux premières composantes expliquent respectivement 32.1% et 22.4% de la variance totale. La partie positive (rouge) correspond à un réchauffement et la partie négative (bleue) à un refroidissement (Figure 3.6).

Pour la 1^{ère} composante, maximum de variance expliquée située au sahel-est et au Sahara avec un même signe d'anomalie sur toute la zone d'étude, 32.1% (pourcentage de variance expliquée) de la variabilité saisonnière moyenne de la température maximale est expliquée par un réchauffement dans la quasi-totalité de la zone continentale.

La seconde composante montre deux centres (négatif et positif) séparés sur le Sahara-est et ouest respectivement.

Pour la 3^{ème} composante, 14.1% de la variabilité saisonnière moyenne de la température maximale est expliquée par un refroidissement sur la façade maritime et par un refroidissement (Sahara) associé à un réchauffement (Sahel) sur la zone continentale qui se présente sous forme de dipôle baptisé mode « méridien » ou « dipôle », c'est-à-dire maximum de variance au Sahara et au sahel avec des signes opposés. Les trois dernières composantes sont assez faibles et proches expliquant respectivement 6.8%, 3.7% et 3.1% de la variance totale.

La figure 3.7 montre les six premières composantes principales correspondant respectivement aux composantes précédentes. La série temporelle de la composante principale correspondant à la première ACP nous permet de voir une variabilité saisonnière faible de 1979 à 1997 et une

variabilité saisonnière forte à partir de 1998. Le mode correspondant à la première ACP est négatif de 1979-1997, et positives de 1998-2016 (CP1). Les trois dernières composantes sont assez faibles et proches et n'expliquent que 6.8, 3.7 et 3.1% de la variance totale respectivement. La série temporelle est caractérisée par une variabilité interannuelle relativement basse fréquence (figure 3.7, CP1).

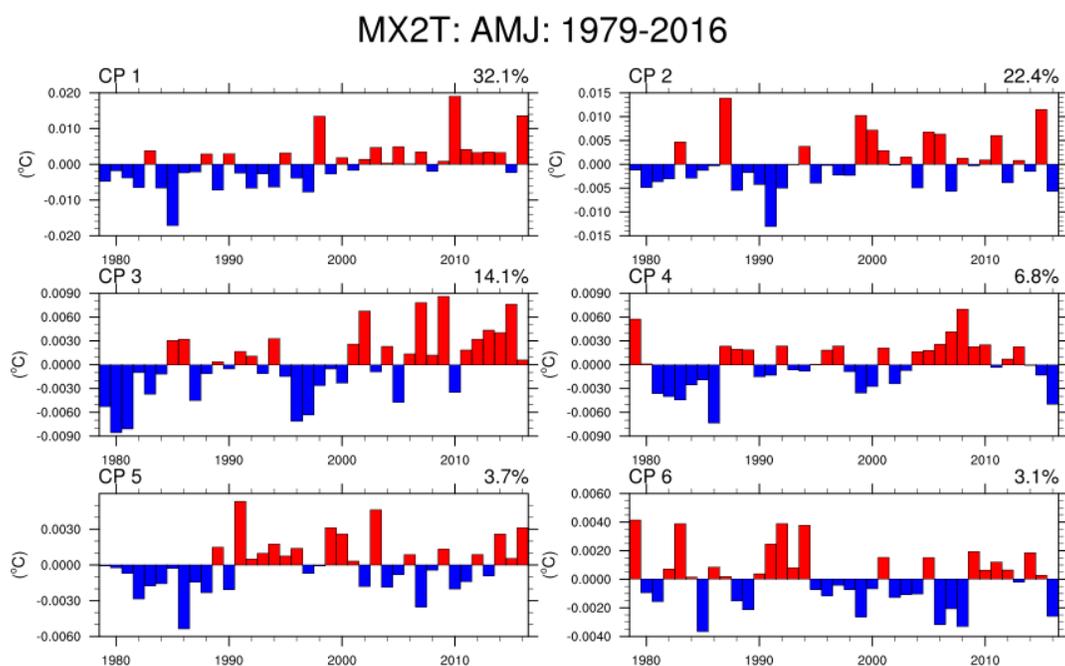


Figure 3.7 Série temporelle des composantes principales (CP).

MX2T: JAS: 1979-2016

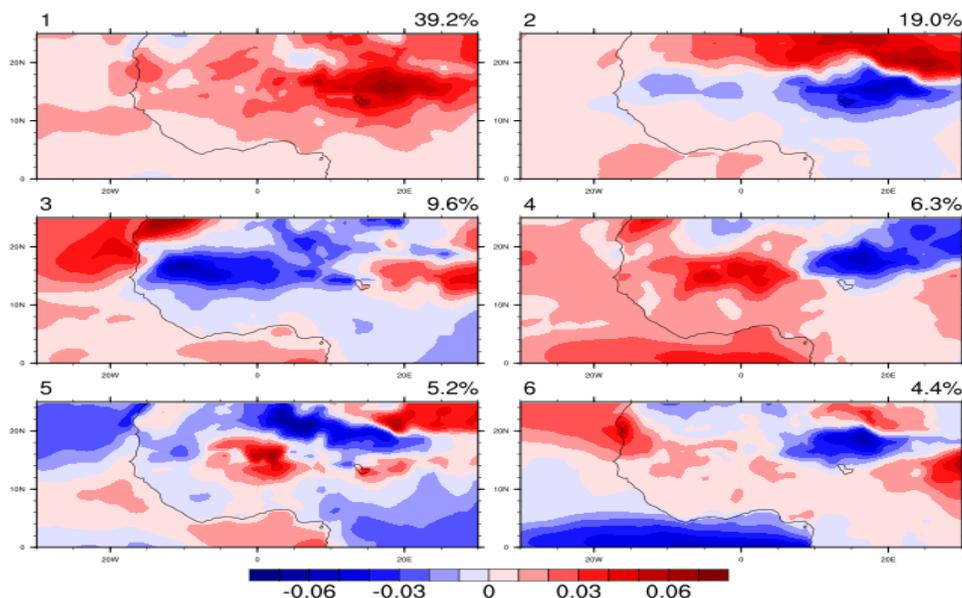


Figure 3.8 Analyse en composante principale de l'anomalie des températures maximales, en Juillet-Août-Septembre.

Les premières composantes représentées sur la figure 3.8 expliquent respectivement 39,2% et 19% de la variance totale. Pour la première composante nous retrouvons un maximum de variance sur le sahel avec un signe positif. Dans la deuxième composante nous observons un maximum de variance sur le sahel (négative) et le Sahara (positive) avec des signes opposés qui correspond au dipôle méridien. Le pourcentage de variance expliquée des autres composantes est très faible donc ne seront pas exploités. La série temporelle de la composante principale 1 (CP1) (Figure 3.9) correspondant à la première composante (ou mode) montre que ce mode est en phase négative de 1980 à 1996 sauf l'année 1983 et 1987 et phase positive de 1998 à 2016. Quant à la deuxième composante principale, elle se caractérise par une alternance de phases positive et négative.

MX2T: JAS: 1979-2016

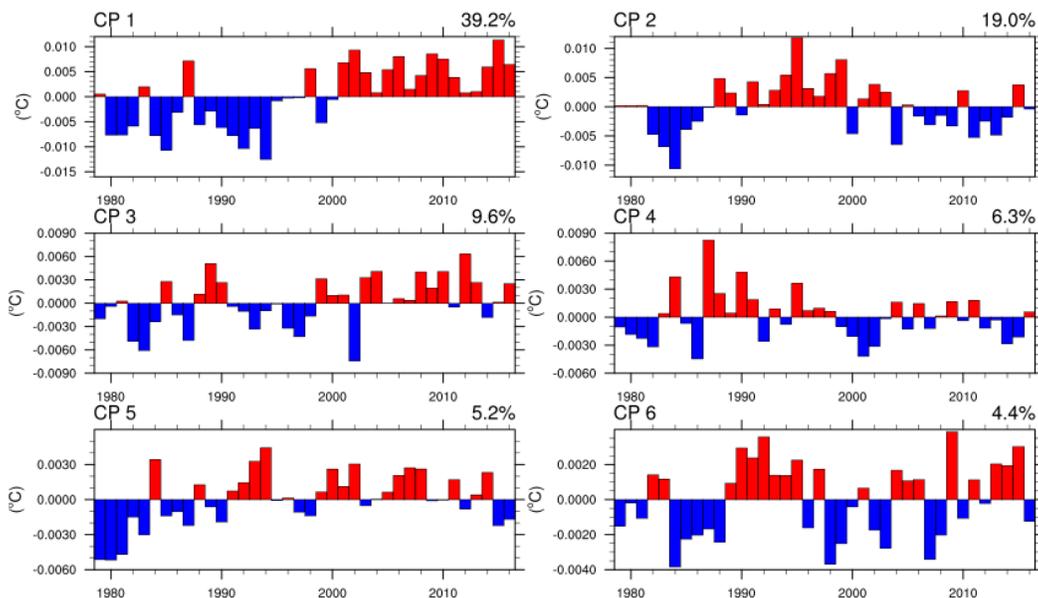


Figure 3.9 Série temporelle des composantes principales en JAS.

MN2T: AMJ: 1979-2016

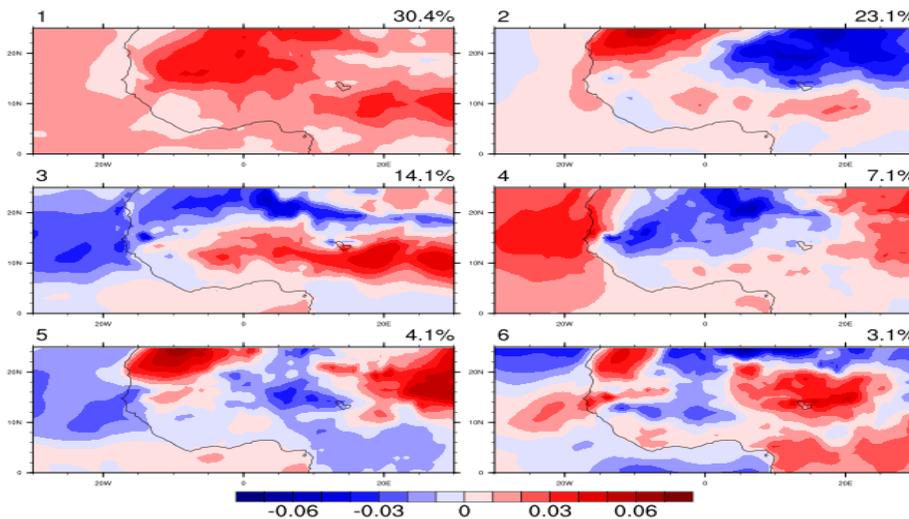


Figure 3.10 Analyse en composante principale de l'anomalie des températures minimales, en Avril-Mai-Juin.

Nous avons effectué les mêmes analyses avec les températures minimales. Globalement nous retrouvons les mêmes structures et zone de variabilité qu'avec la température maximale.

Cependant nous constatons que les modes sont plus prononcés avec la température maximale. (Figure 3.10 et 3.11).

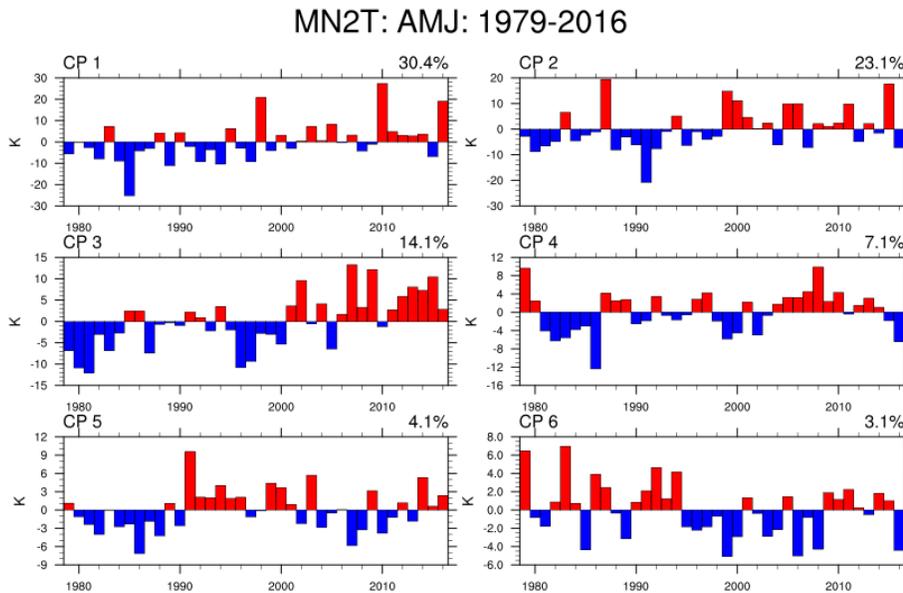


Figure 3.11 Les composantes principales correspondant aux six premiers modes de la figure 3.10

3.1.2 Evolution des vagues de chaleur sur la période 1979-2016 au Sahel

Pour la définition des vagues de chaleur, nous avons pris l'option de tester plusieurs seuils, étant donné que la définition classique limite le nombre de jours minimum à trois au Sahel. Nous avons pris d'abord le seuil de six jours consécutifs où nous avons T_{max} supérieures au 90^{ème} percentile, (nous avons pris la période chaude pour le Sahel AMJ), ensuite nous avons diminué la durée, c'est-à-dire que nous avons examiné la durée de la vague de chaleur pour cinq, quatre et trois jours consécutifs dans la même saison. Nous avons commencé à six jours parce que la vague de chaleur avec sept jours consécutifs est très rare dans toutes les villes. Au Sahel, les vagues de chaleur sont plus fréquentes en AMJ et sont plus concentrées au cours de la dernière décennie (2005-2016) que les années précédentes. Les années 1998, 2010 et 2016 ont enregistré plus de VCs comparées aux autres années de la série considérée. Les seuils avec trois jours et quatre jours consécutifs donnent un meilleur échantillonnage des vagues de chaleur, comme nous pouvons le constater sur la Figure 3.12.

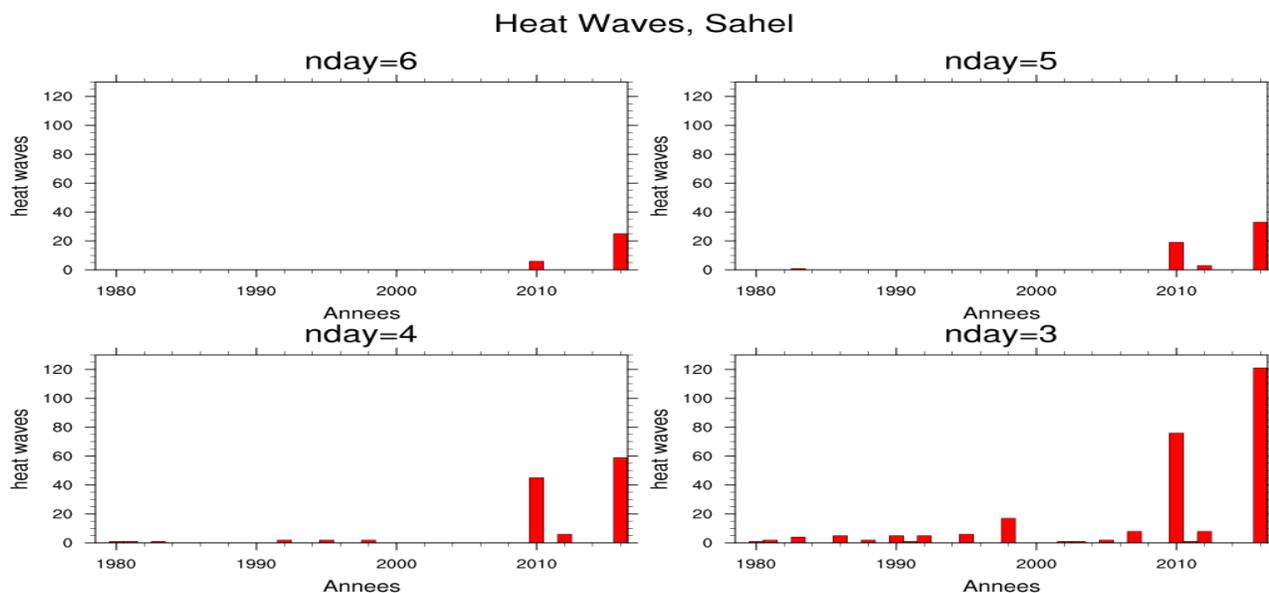


Figure 3.12 Évolution du nombre de vagues de chaleur sur le sahel pendant la saison chaude AMJ (Avril, Mai et Juin) pendant la période d'étude. Nday = nombre de jours consécutifs.

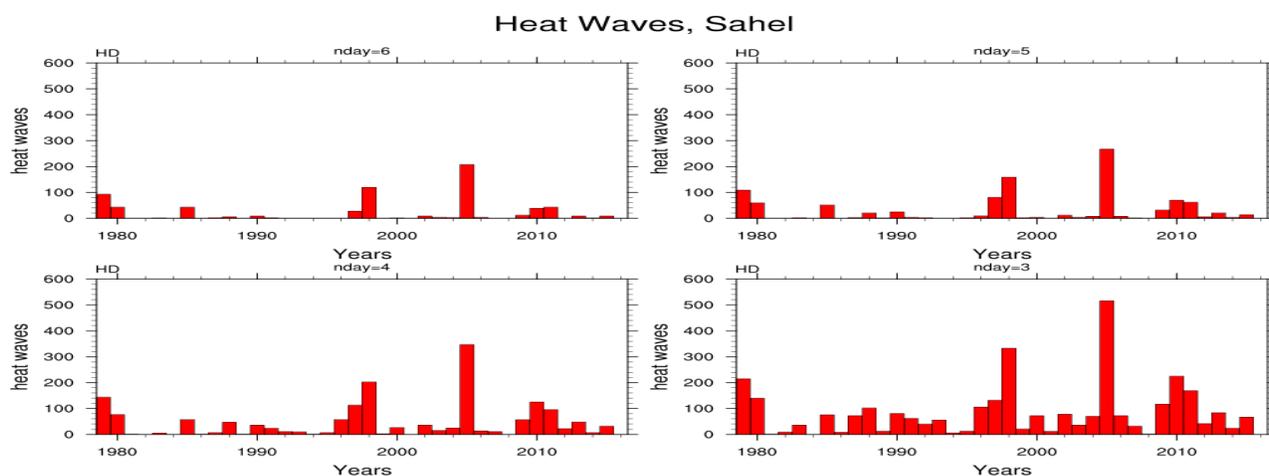


Figure 3.13 Évolution annuelle du nombre de vagues de chaleur au Sahel pour différent nombre de jours consécutifs.

Le nombre de vague de chaleur annuel au sahel pour différents seuils de jours consécutifs est représenté sur la figure 3.13. Nous remarquons que les années 2005, 1998 et 2010 sont les années où nous retrouvons plus de vagues de chaleur. Ces résultats sont en accord avec ceux de

BERNARD (2015) qui montre que les plus importantes quantités de vagues de chaleur se trouvent sur les années 1998, 2004 et 2010 ou il retrouve aussi les maxima de pourcentage de jour chauds.

3.1.3 Évolution des vagues de chaleur sur trois villes du Sahel

Nous avons représenté l'évolution des vagues de chaleur pour trois localités situées dans la zone sahélienne. Le choix des villes est à priori arbitraire, mais notre souci est de voir comment évolue les VCs sur une ville continentale (Niamey) et sur une ville côtière (Saint-Louis). Nous avons également choisi d'y ajouter la ville de Ziguinchor afin de voir si le gradient latitudinal influence l'évolution des VCs.

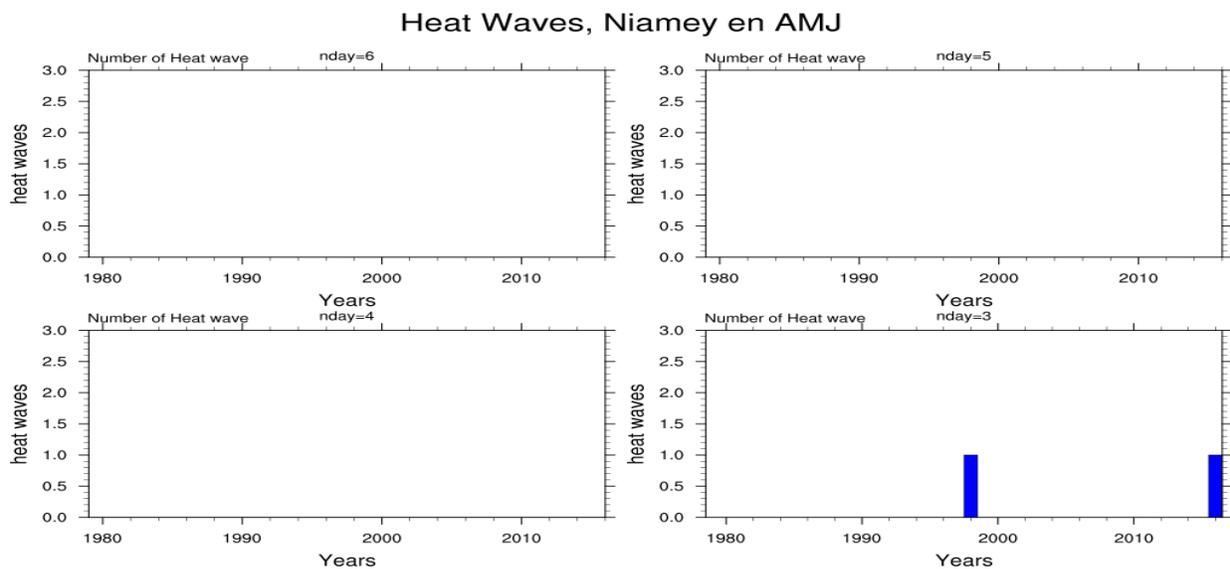


Figure 3.14 Évolution du nombre de vagues de chaleur pour Niamey compte tenu de la période chaude AMJ (Avril, Mai et Juin) pour différents nombre de jours consécutifs.

Nous avons calculé les vagues de chaleur sur trois villes du Sahel avec différents seuils de jour consécutifs. Les seuil avec trois jours et quatre jours consécutifs sont plus pertinents sur cette zone car donnent un meilleur échantillonnage des vagues de chaleur, comme nous pouvons le constater sur les figures 3.14, 3.15 et 3.16. Les seuils avec cinq jours et six jours consécutifs sont très grands pour définir une vague de chaleur sur ces villes du Sahel. Ce pendant nous avons enregistré deux vagues de chaleur à Niamey, une en 1998 et l'autre en 2016. La ville de Saint-Louis comparée à celle de Ziguinchor a enregistré plus de VCs surtout en 2015.

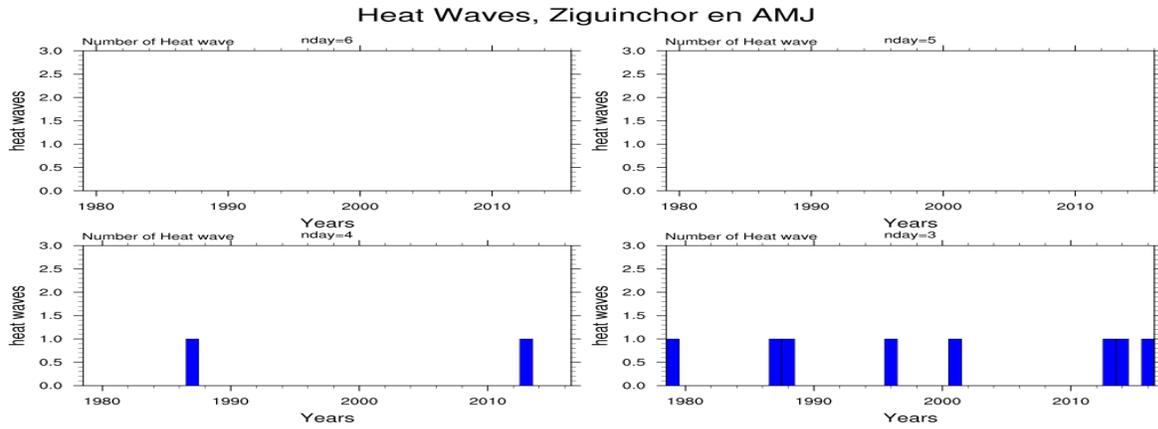


Figure 3.15 Évolution du nombre de vagues de chaleur pour Ziguinchor compte tenu de la période chaude AMJ (Avril, Mai et Juin) pour différents nombre de jours consécutifs.

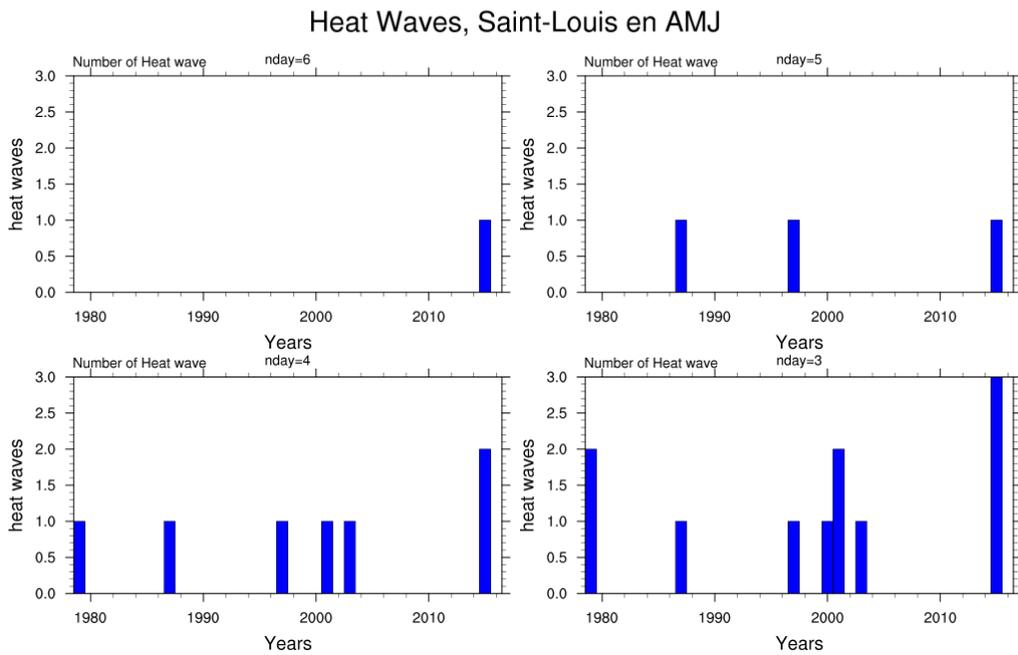


Figure 3.16 Évolution du nombre de vagues de chaleur pour Saint-Louis compte tenu de la période chaude AMJ (Avril, Mai et Juin) pour différents nombre de jours consécutifs.

3.2 Evolution spatiale et temporelle des indices de chaleur et leurs risques sanitaires

3.2.1 L'indice de chaleur (ou heat index en anglais)

La figure 3.17 suivante représente l'indice de chaleur (pour heat index en anglais) maximal saisonnier en Afrique de l'ouest moyenné sur la période 1979-2016 obtenu avec la température maximale. L'indice de chaleur est traduit par quatre niveaux de supportabilité des conditions météorologiques selon sa valeur: l'inconfort, l'extrême inconfort, le danger et le danger extrême indiqué précédemment sur le Tableau 2.3.

Nous observons une distribution dipolaire du «heat index» suivant les saisons étudiées. En Janvier-Février-Mars (JFM), tout le sahel comme l'Afrique de l'Ouest, subissent des valeurs de «heat index» comprises entre 16 et 28°C et traduit un faible risque sanitaire. Cette même situation est plus ou moins observée pendant la saison Octobre-Novembre-Décembre (OND) cependant avec un niveau de risque un peu plus élevé que précédemment et pouvant aboutir à des coups de fatigues et crampes après de longues expositions. Les niveaux de risques sanitaires les plus élevés au Sahel sont obtenus pendant les saisons Avril-Mai-Juin (AMJ) et Juillet-Août-Septembre (JAS), où nous observons des valeurs de «heat index» comprises entre 35°C et 39°C (en AMJ) voire 42°C (en JAS) vers l'Est du Mali. Cette tendance ou distribution du «heat index» traduit un niveau d'inconfort extrême pour la population vivant dans cette zone avec des risques de «coups de chaleur» réguliers, mais également des crampes musculaires entraînant une fatigue physique permanente. Au nord du Sahel, ce risque sanitaire atteint un niveau dangereux en JAS, car la population est exposée à un épuisement régulier voir permanent de l'organisme et pouvant aboutir à de possible coup de chaleur.

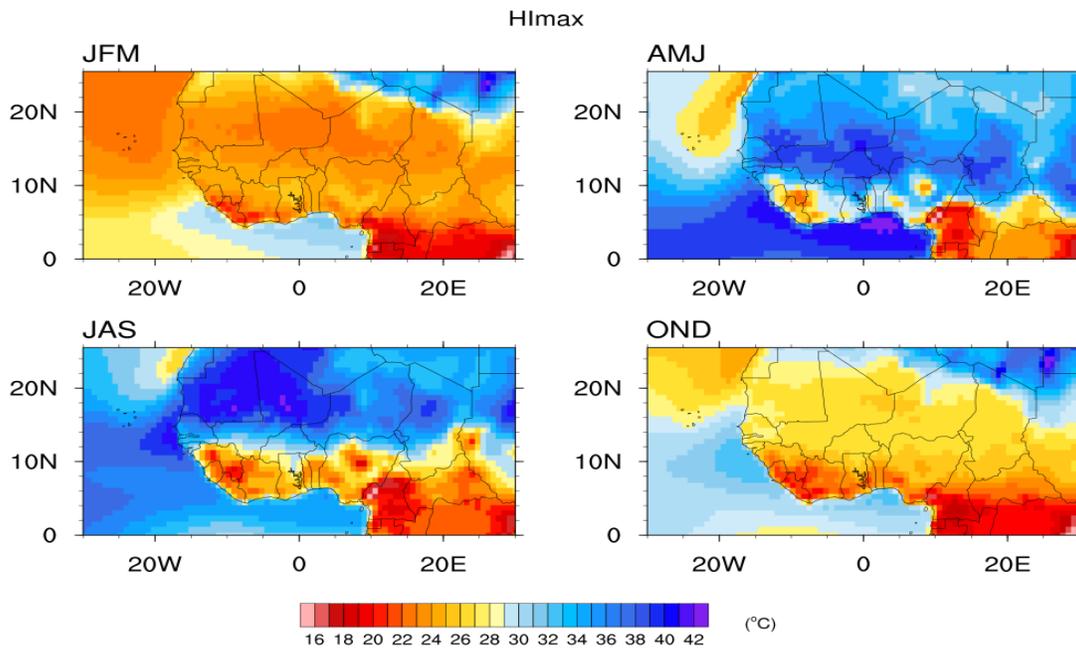


Figure 3.17 Distribution spatiale de l'indice de chaleur maximal saisonnier en Afrique de l'ouest de 1979 à 2016.

Le rapport de 2011 de la fondation MAIF, indiquait que la chaleur nocturne (T_{min}) est plus néfaste que la chaleur diurne dans ce sens qu'elle empêche à l'organisme de récupérer. Nous avons étudié la distribution du «heat index» en se basant sur les températures minimales (Figure 3.18) pendant toutes les saisons sur la zone d'étude. L'analyse des figures montrent les mêmes caractéristiques que précédemment, et cela va dans le même sens que les travaux de Meehl et Tebaldi (2004) ainsi que Trigo et al. (2005). Ils montrent que les vagues de chaleur les plus sévères sont caractérisées par de fortes températures nocturnes (températures minimales). Cette caractéristique des vagues de chaleur s'explique par le fait que l'évolution des températures en Afrique de l'ouest et plus spatialement au sahel est plus marquée au niveau des minima que des maxima (CEDEAO-CSAO/OCDE, 2008).

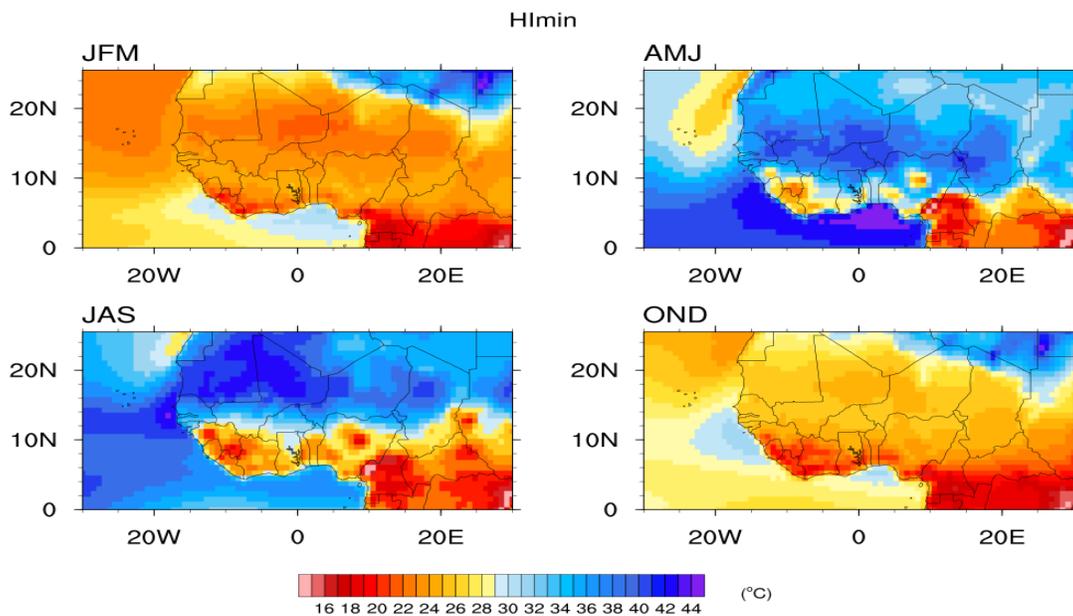


Figure 3.18 Distribution spatiale de l'indice de chaleur minimal saisonnier en Afrique de l'ouest de 1979 à 2016.

Les figures 3.19 et 3.20 représentent respectivement l'évolution saisonnière de l'indice de chaleur (heat index) maximal et minimal depuis 1979 au Sahel. Les droites de régression linéaire (en rouge) montrent que les indices de chaleur maximal et minimal sont en augmentation croissantes pour les saisons AMJ et JAS contrairement à ceux de la saison JFM (en baisse) et OND (quasi-constant). Cela confirme d'une part les conclusions du dernier rapport du GIEC, qui indiquent que le Sahel sera de plus en plus exposé à des événements extrêmes en termes de fréquence et d'intensité, en plus sa population sera de plus en plus exposée à cause du déficit de politique d'adaptation. D'autres part, les résultats précédents indiquent notamment que les saisons AMJ et JAS sont les saisons chaudes au Sahel où nous avons les T_{\max} et T_{\min} les plus fortes et donc les périodes où le risque sanitaire continue à être de plus en plus élevé. Nous pouvons aussi observer des similitudes avec l'évolution des courbes de tendance représentant les vagues de chaleur (maximale et minimale), nous retrouvons ainsi les mêmes années, 1998, 2010 ou 2016 où les plus importantes quantités de vagues de chaleur et plus importants pourcentages de jours chauds et nuits chaudes sont observés. Nous pouvons donc en conclure que l'indice de chaleur (maximal et minimal) augmente durant les saisons chaudes et diminue durant les saisons moins chaudes au Sahel. L'augmentation de l'indice de chaleur maximale/minimale est lié au réchauffement climatique qui rend donc les conditions de vie de plus en plus difficiles en région sahélienne. Puisque l'indice de chaleur est lié à l'intensité de la vague de chaleur, il faut donc s'attendre à des

vagues de chaleur de plus en plus intenses et par conséquent des coups de chaleur plus fréquents surtout chez les personnes âgées et les jeunes qui sont les plus vulnérables.

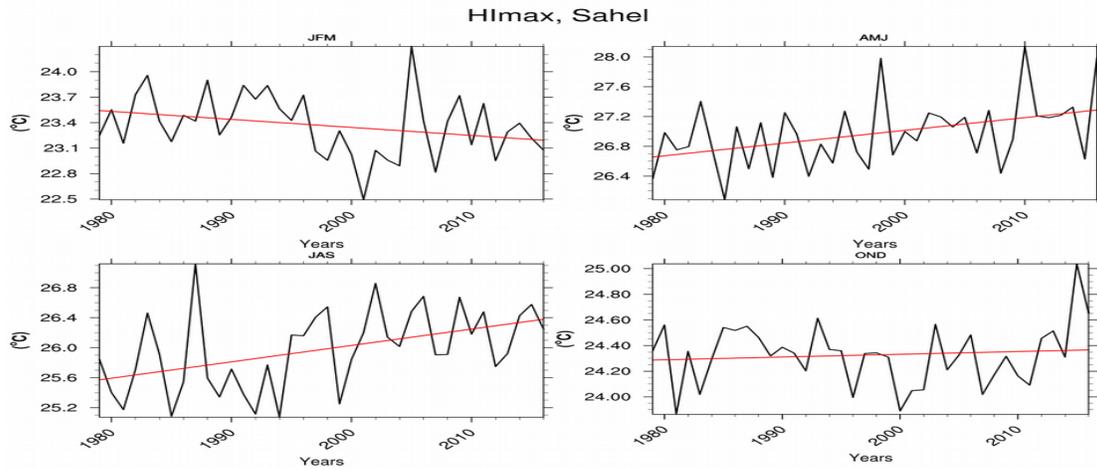


Figure 3.19 Évolution de l'indice de chaleur maximal saisonnier (en degré Celsius) au Sahel période 1979-2016.

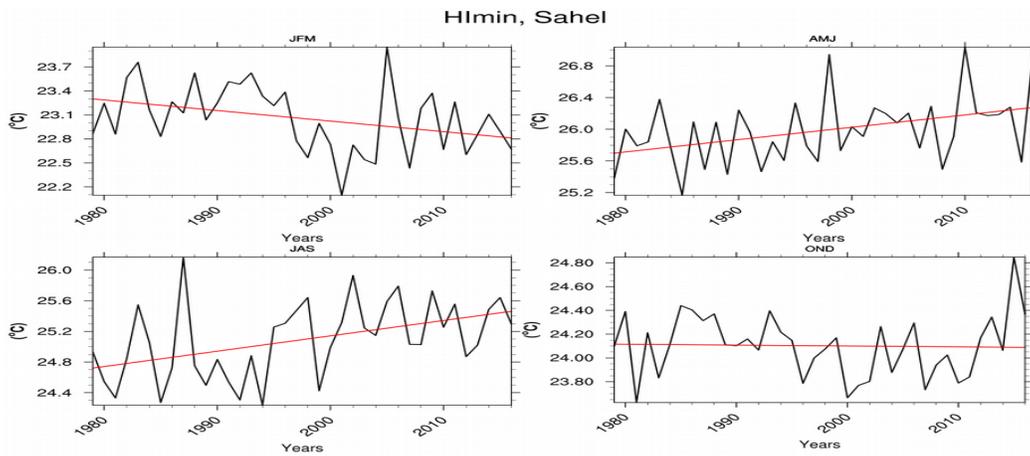


Figure 3.20 Évolution de l'indice de chaleur minimal saisonnier (en degré Celsius) au Sahel période 1979-2016.

3.2.2 L'humidex ou Indice humidité

Comme nous l'avons précisé au chapitre 2, l'humidex est un indice qui permet d'indiquer l'effet de l'humidité sur l'organisme soumis à de fortes chaleurs. La figure 3.21 montre la variation spatiale de l'humidex saisonnier en Afrique de l'Ouest moyenné sur la période 1979-2016. En effet nous constatons que cet indice de chaleur est en augmentation du nord-est de l'Afrique de

l'ouest vers le sud-ouest en JFM et en OND. Sur le continent, les maxima d'humidex se retrouvent en zone guinéenne pendant la saison JFM et OND, alors qu'ils se localisent sur le Sahel en AMJ et JAS variant entre 30°C et 42°C. Cette plage d'humidex indique des niveaux de risques induisant d'un certain inconfort à beaucoup d'inconfort qui peuvent entraîner une fatigue de l'organisme et des crampes. Donc nous remarquons un déplacement du sud vers le nord du niveau de risque sanitaire lié à l'influence de l'humidité, et cela s'explique assez aisément par l'action du flux de mousson et du déplacement de la ZCIT du sud vers le nord suivant les saisons en Afrique de l'Ouest. Il faut signaler pendant les saisons JFM et OND, le Sahel n'est pas soumis à aucun inconfort lié à l'humidité.

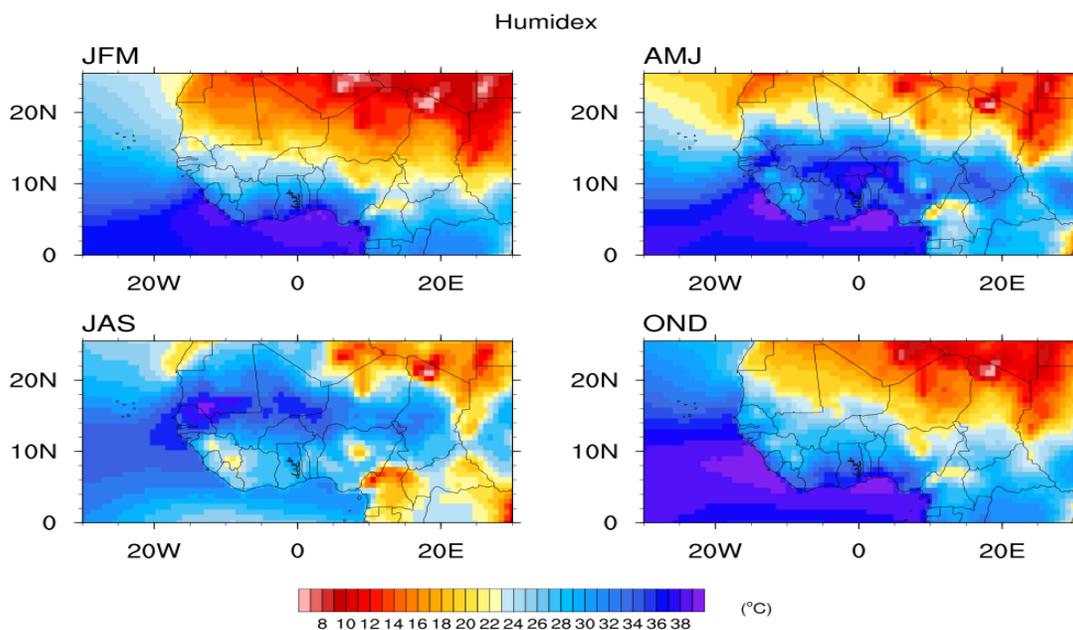


Figure 3.21 Distribution spatiale de l'humidex saisonnier en Afrique de l'ouest de 1979 à 2016.

L'évolution saisonnière de l'humidex depuis 1979 au Sahel et en zone guinéenne a été analysée et représentée sur les figures 3.22 et 3.23 respectivement. Sur l'ensemble des saisons, nous constatons une tendance à la hausse de la sensation de chaleur avec des pentes positives des droites de régression linéaires (rouges). Cependant, nous notons que le taux d'évolution ou d'augmentation n'est pas la même d'une saison à une autre. L'évolution est plus marquée pendant les saisons JAS et OND aussi bien qu'au Sahel et en région de Golfe de guinée. L'évolution de l'augmentation de l'humidex en AMJ est plus rapide au Sahel qu'en région du golfe de guinée; ceci est lié probablement aux mouvements saisonniers de la ZCIT et donc au flux de vents humides ou mousson.

Cette tendance à l'augmentation de la sensation de chaleur montre que le Sahel demeure une zone sanitaire à risques. Les personnes vulnérables comme les personnes âgées et les enfants sont et seront donc toujours exposés à des risques pouvant aboutir à des coups de chaleurs, des crampes et une fatigue musculaire intense.

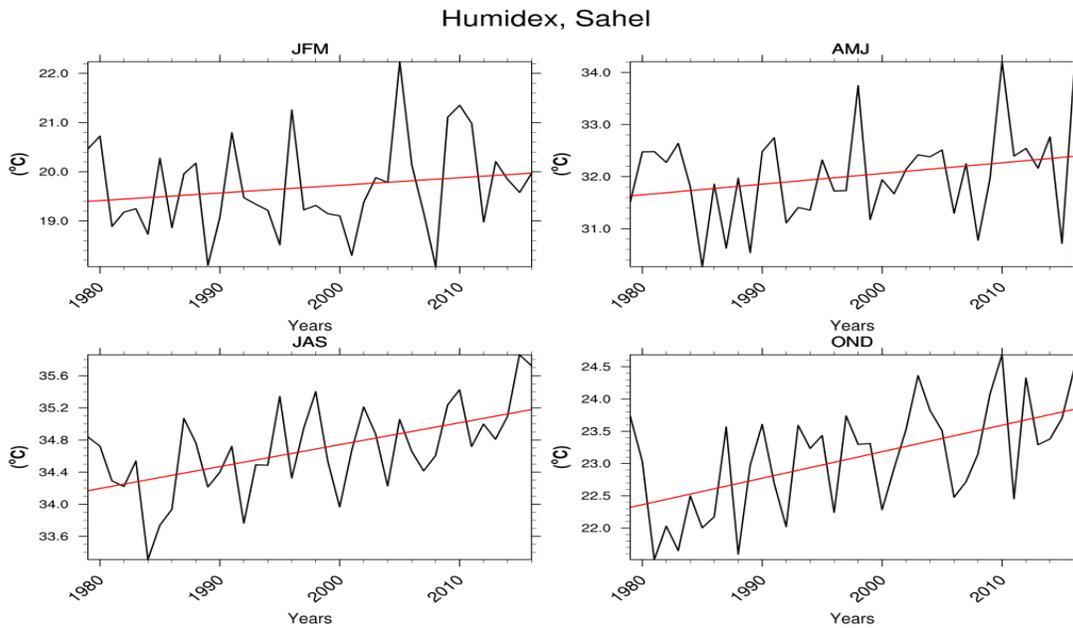


Figure 3.22 Évolution de l'humidex saisonnier au Sahel période 1979-2016.

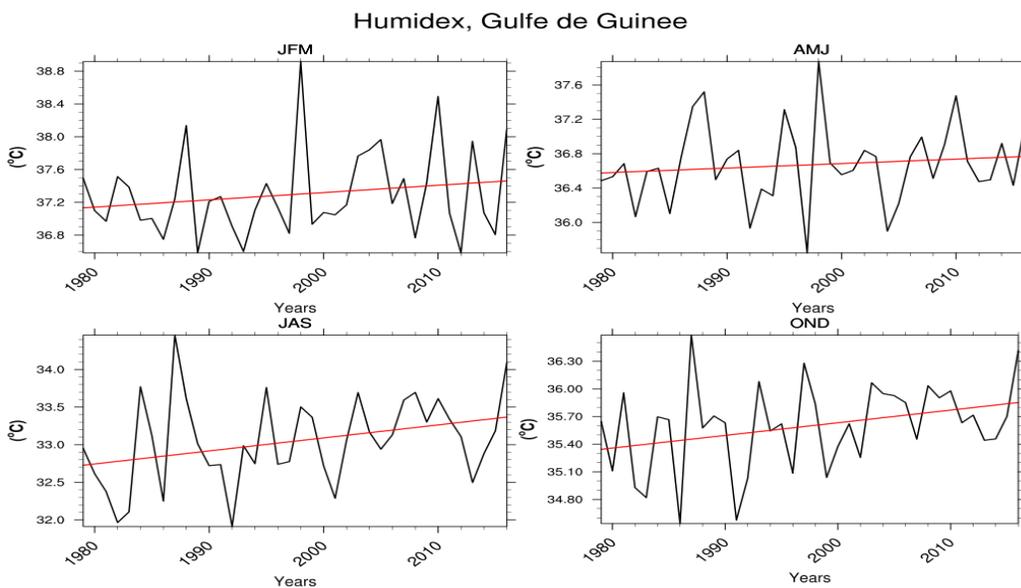


Figure 3.23 Évolution de l'humidex saisonnier en Zone guinéenne période 1979-2016.

Conclusion Générale

Dans cette étude, nous avons dans un premier temps fait un rappel bibliographique sur les vagues de chaleur (VCs), ainsi que les risques potentiels sur la santé des populations. Nous avons par la suite étudié ces VCs en Afrique de l'Ouest et plus précisément sur le Sahel. La variabilité interannuelle des VCs pendant la saison AMJ nous a permis d'identifier les années chaudes qui correspondent aux années où nous avons enregistré le plus grand nombre de vagues de chaleur printanières. Ainsi les années 1998, 2010 et 2016 ont enregistré plus de VCs par rapport aux autres années. Le nombre de jours chauds et de nuits chaudes nous donne une idée des années où nous avons un accroissement des températures et donc une augmentation de la durée des canicules ou vagues de chaleurs.

Les résultats obtenus à partir de l'anomalie des T_{\max} montrent des anomalies positives durant les mois d'Avril-Mai-Juin en 1998, 2010 et 2016 au Sahel. Le réchauffement de la température maximale en 2010 dans cette zone pourrait être à l'origine de la vague de chaleur qu'a subit le Sahel au printemps 2010. Le calcul des vagues de chaleur en Afrique de l'Ouest particulièrement au Sahel est plus pertinent avec le seuil de trois jours consécutifs où la température maximale est supérieure au 90^{ième} percentile.

La variabilité saisonnière montre une distribution zonale dipolaire de l'indice de chaleur maximal et minimal sur le Nord et le Sud du Sahel avec des proportions spatiales différentes. Le Sahel présente un niveau de risque sanitaire élevé lié aux VCs en AMJ, et un pic de risque dangereux pour les populations du nord du Sahel en JAS. L'évolution de l'indice de chaleur montre une augmentation nette en AMJ et en JAS sur le Sahel, ce qui montre que le Sahel demeure très vulnérable aux changements du climat et sa population vulnérable (personnes âgées et enfants) est plus que jamais exposée aux risques sanitaires liés aux VCs. L'indice d'humidité ou humidex quant à lui évolue spatialement en suivant le déplacement saisonnier de la ZCIT et du flux de mousson. Les risques d'inconfort à beaucoup d'inconforts pouvant aboutir à des fatigues de l'organisme et à des crampes sur le Sahel, sont observés pendant les saisons AMJ et JAS. Les saisons JFM et OND correspondent à des niveaux de risques très faibles liés à l'humidité au Sahel. Une tendance à la hausse, sur l'ensemble des saisons, de la sensation de chaleur (humidex) montre que le Sahel demeure une zone sanitaire à risques. Les personnes vulnérables comme les

personnes âgées et les enfants sont et seront donc toujours exposées à des risques pouvant aboutir à des coups de chaleurs, des crampes et une fatigue musculaire intense.

L'accès des données sanitaires liés aux statistiques de consultations, d'hospitalisation, de mortalité ou de morbidité serait très utile pour l'étude de l'impact des vagues de chaleur sur la santé et la vie des populations. Il sera également judicieux d'étudier l'impact des vagues de chaleur sur l'agriculture, l'économie et sur la consommation d'énergie au Sahel et en Afrique de l'Ouest.

Bibliographie

Anderson, G. B., Bell, M. L., 2011. *Heat waves in the United States: mortality risk during heat waves and effect modification by heat waves characteristics and 43 US communities.* *Environmental Health Perspectives*, 119, 210.

Anderson, G. B., Bell, M. L., Peng, R. D., 2013. *Methods to Calculate the Heat Index as an Exposure Metric in Environmental Health Research.* *Environmental Health Perspectives*, 121, 1113..

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.

Bernard E., 2015. *Téléconnections des vagues de chaleur sahéliennes. Stage de 2^{ème} année Mesures Physiques, Institut Universitaire de Technologie d'Aix-Marseille 30p.*

Besancenot J. P., septembre-octobre 2002. « *Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines* », *Environnement, Risques et Santé*, vol. 1, n°4, pp. 229-240.

Bessemoulin, P., N. Bourdette, P. Coutier, J. Manach., 2004. *La canicule d'août 2003 en France et en Europe.* *Météorologie*, 46, 25-33.

Bielli, S., H. Douville, B. Pohl., 2009. *Understanding the West African monsoon variability and its remote effects: an illustration of the grid point nudging methodology.* *Climate Dynamics*, 35, 159-174, doi : 10.1007/S00382-009-0667-8.

Duclot, I., 2009. *Évolution climatique dans les latitudes austral (1973-2002) : Températures et précipitations dans les îles de l'océan Indien Austral en relation avec la dynamique atmosphère, Mémoire de Master II Géobiosphère, Centre de Recherche en climatologie, Université de Bourgogne, Dijon, Juin 2009, 57p.*

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.

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.

Fontaine, B., S. Janicot, V. Moron., 1995. *Rainfall Anomaly Patterns and Wind Field Signals over West Africa in August (1958-1989).* *Journal of climate*, 8, 1503-1510.

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.

CEDEAO-CSAO/OCDE/ CILSS. 2008. *Climate and Climate Change. The Atlas on Regional Integration in West Africa. Environment Series.* Available at: « www.atlas-westafrica.org ».

GIEC, 2007 : *Bilan des changements climatiques. Contribution des groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du climat, équipe de rédaction principale, Pachauri R. K. et Reisinger A., GIEC, Genève.*

Goubanova, K., 2007. *Une étude des événements climatiques extrêmes sur l'Europe et le bassin Méditerranéen et de leur évolution future. Thèse de Doctorat de l'université Paris 6 : université Pierre et Marie Curie, 121p, URL:*

Goutorbe, J. P., T. Lebel, A. Tinga, P. Bessemoulin, J. Brouwer, A. J Dolman, E. T. Engman, J. H. C. Gash, M. Hoepffner, P. Kabat, Y. H. Kerr, B. Monteny, S. Prince, F. Said, P. Selles J. S. Wallace., 1994. *HAPEx-Sahel: a large-scale study of land-atmosphere interactions in the Sémi-arid tropics, Annales Geophysical*, 12, 53-64.

Huth, R., J. Kysely, J. Pokorna, 2000. *A GCM simulation of Heat waves, dry spells and their relationships to circulation, Journal of climate*, 46, 29-60.

InVS, 16 mai 2006. « Numéro thématique : après la vague de chaleur d'août 2003, une meilleure connaissance au service d'une meilleure prévention », *BEH [en ligne]*, n°19-20, pp 129-140. .

InVS, 25 novembre 2003. « Impact sanitaire de la vague de chaleur d'août 2003 : premiers résultats et travaux à mener », *BEH [en ligne]*, n°45-46, pp 217-227. .

InVS, octobre 2003. « Impact sanitaire de la vague de chaleur d'août 2003 : bilan et perspectives », *Département des maladies chroniques et traumatismes : Département santé environnement.*

Janicot, S., A. Harzallah, B. Fontaine, V. Moron, 1997. *West African Monsoon Dynamics and Eastern Equatorial Atlantic and Pacific SST Anomalies (1970-88).* *Journal of climate*, 11, 1874-1882.

- Klein Tank A. M. G., Konnen G. P., 2003.** *Trend in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99.* *Journal of climatique*, 16, 3665-3680.
- Meehl, G. A., C. Tebaldi, 2004.** *More Intense, More Frequent, and Longer lasting Heat Waves in the 21st century.* *Science*, 305, 994-997.
- 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*.
- Ringard J., 2013.** *Étude rétrospective et prospective des vagues de chaleur en Afrique de l'ouest (Mémoire de Stage, Master 2 Recherche en Sciences de la Terre et de l'Environnement, Spécialité : Eau, Climat, Environnement, Université Joseph Fourier, Grenoble).* Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement.
- 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.
- Rome S., Fontaine, B., Moron, V., Pohl, B., Jarry C., Diedhiou A., 2014.** *Analyse Sémantique des vagues de chaleur; exemple dans le sahel ouest et central.* Programme ANR ACASIS, France, 23p.
- Sambou, D., 2015.** *Caractéristiques atmosphériques et causes potentielles des épisodes d'inondation durant l'été 2012 en Afrique de l'Ouest.* Mémoire Master Recherche : Science de l'Atmosphère et de l'Océan : UASZ, 66 p.
- 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.
- 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.
- Stephenson, D. B., 2008.** *Définition, diagnosis, and origin of extreme weather and climate events.* *Climate Extremes and Society*, 384p. Cambridge University Press: new York.
- 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.

Trigo, R. M., R. Garcia-Herrera, J. Diaz, I. F. Trigo, M. A. Valente, 2005. *How exceptional was the early August 2003 heat wave in France? Géophysical Research Letters, 32, L10701, doi: 10.1029/2005GL022410.*

Webographie

<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/> .

.