

**Projet ANR-13-SENV-0007**

**ACASIS**

Programme SOCENV 2013

<b>A</b>	<b>IDENTIFICATION.....</b>	<b>2</b>
<b>B</b>	<b>RÉSUMÉ CONSOLIDÉ PUBLIC .....</b>	<b>2</b>
	B.1 Instructions pour les résumés consolidés publics .....	2
	B.2 Résumé consolidé public en français .....	3
	B.3 Résumé consolidé public en anglais .....	5
<b>C</b>	<b>MÉMOIRE SCIENTIFIQUE.....</b>	<b>6</b>
	C.1 Résumé du mémoire .....	6
	C.2 Enjeux et problématique, état de l'art .....	7
	C.3 Approche scientifique et technique .....	7
	C.4 Résultats obtenus .....	8
	C.5 Exploitation des résultats .....	13
	C.6 Discussion.....	14
	C.7 Conclusions.....	15
	C.8 Références .....	15
<b>D</b>	<b>LISTE DES LIVRABLES.....</b>	<b>17</b>
<b>E</b>	<b>IMPACT DU PROJET.....</b>	<b>20</b>
	E.1 Indicateurs d'impact.....	20
	E.2 Liste des publications et communications .....	21
	E.3 Liste des éléments de valorisation .....	24
	E.4 Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires).....	25

*Ce document est à remplir par le coordinateur en collaboration avec les partenaires du projet. L'ensemble des partenaires doit avoir une copie de la version transmise à l'ANR.*

*Ce modèle doit être utilisé uniquement pour le compte-rendu de fin de projet.*

## A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	ACASIS
Titre du projet	Alerte aux Canicules Au Sahel et à leurs Impacts sur la Santé
Coordinateur du projet (société/organisme)	Serge Janicot (Institut de Recherche pour le Développement)
Période du projet (date de début – date de fin)	1 Janvier 2014 – 31 Décembre 2018
Site web du projet, le cas échéant	<a href="https://acasis.locean-ipsl.upmc.fr">https://acasis.locean-ipsl.upmc.fr</a>

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	Mr Serge Janicot
Téléphone	0144277536
Adresse électronique	<a href="mailto:serge.janicot@ird.fr">serge.janicot@ird.fr</a>
Date de rédaction	25 Février 2019

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	LOCEAN – Serge Janicot SEDOO – Guillaume Brissebrat CRC – Benjamin Pohl CNRM-GAME – Françoise Guichard LPED – Richard Lalou LPAOSF – Daouda Badiane CSE – Ibrahima Sy ANACIM – Ousmane Ndiaye UGB – Abdoulaye Deme DGM – Pascal Yaka ISSP – Stéphanie Dos Santos CRSN – Ali Sié
---	--

## B RÉSUMÉ CONSOLIDÉ PUBLIC

*Ce résumé est destiné à être diffusé auprès d'un large public pour promouvoir les résultats du projet, il ne fera donc pas mention de résultats confidentiels et utilisera un vocabulaire adapté mais n'excluant pas les termes techniques. Il en sera fourni une version française et une version en anglais. Il est nécessaire de respecter les instructions ci-dessous.*

### B.1 INSTRUCTIONS POUR LES RÉSUMÉS CONSOLIDÉS PUBLICS

*Les résumés publics en français et en anglais doivent être structurés de la façon suivante.*

*Titre d'accroche du projet (environ 80 caractères espaces compris)*

*Titre d'accroche, si possible percutant et concis, qui résume et explicite votre projet selon une logique grand public : il n'est pas nécessaire de présenter exhaustivement le projet mais il faut plutôt s'appuyer sur son aspect le plus marquant.*

*Les deux premiers paragraphes sont précédés d'un titre spécifique au projet rédigé par vos soins.*

*Titre 1 : situe l'objectif général du projet et sa problématique (150 caractères max espaces compris)*

**Paragraphe 1 :** (environ 1200 caractères espaces compris)

Le paragraphe 1 précise les enjeux et objectifs du projet : indiquez le contexte, l'objectif général, les problèmes traités, les solutions recherchées, les perspectives et les retombées au niveau technique ou/et sociétal

**Titre 2 :** précise les méthodes ou technologies utilisées (150 caractères max espaces compris)

**Paragraphe 2 :** (environ 1200 caractères espaces compris)

Le paragraphe 2 indique comment les résultats attendus sont obtenus grâce à certaines méthodes ou/et technologies. Les technologies utilisées ou/et les méthodes permettant de surmonter les verrous sont explicitées (il faut éviter le jargon scientifique, les acronymes ou les abréviations).

**Résultats majeurs du projet** (environ 600 caractères espaces compris)

Faits marquants diffusables en direction du grand public, expliciter les applications ou/et les usages rendus possibles, quelles sont les pistes de recherche ou/et de développement originales, éventuellement non prévues au départ.

Préciser aussi toute autre retombée= partenariats internationaux, nouveaux débouchés, nouveaux contrats, start-up, synergies de recherche, pôles de compétitivités, etc.

**Production scientifique et brevets depuis le début du projet** (environ 500 caractères espaces compris)

Ne pas mettre une simple liste mais faire quelques commentaires. Vous pouvez aussi indiquer les actions de normalisation

**Illustration**

Une illustration avec un schéma, graphique ou photo et une brève légende. L'illustration doit être clairement lisible à une taille d'environ 6cm de large et 5cm de hauteur. Prévoir une résolution suffisante pour l'impression. Envoyer seulement des illustrations dont vous détenez les droits.

**Informations factuelles**

Rédiger une phrase précisant le type de projet (recherche industrielle, recherche fondamentale, développement expérimental, exploratoire, innovation, etc.), le coordonnateur, les partenaires, la date de démarrage effectif, la durée du projet, l'aide ANR et le coût global du projet, par exemple « Le projet XXX est un projet de recherche fondamentale coordonné par xxx. Il associe aussi xxx, ainsi que des laboratoires xxx et xxx). Le projet a commencé en juin 2006 et a duré 36 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de xxx € pour un coût global de l'ordre de xxx € »

## **B.2 RÉSUMÉ CONSOLIDÉ PUBLIC EN FRANÇAIS**

Suivre impérativement les instructions ci-dessus.

Titre : Les vagues de chaleur au Sahel ont un impact en termes de mortalité et morbidité

Titre 1 : La caractérisation et l'impact sanitaire des vagues de chaleur au Sahel sont inconnus.

Le projet répond à ces deux points et crée un système d'alerte

Alors que les impacts sur la santé publique des vagues de chaleur ont été analysés dans les pays développés, peu d'actions ont été mises en place pour les détecter et évaluer leurs impacts en Afrique où le climat est plus chaud et les capacités d'adaptation plus faibles. Ce problème est cependant en train d'émerger au Sahel et les projections climatiques indiquent que de tels épisodes devraient augmenter en fréquence et en intensité dans les décennies à venir. L'objectif principal du projet a été la mise en place d'un système pré-opérationnel d'alerte aux canicules adapté aux risques sanitaires pour les populations, centré sur le Sénégal et le Burkina où les services météorologiques délivrent déjà des produits dédiés aux risques sanitaires, et où plusieurs observatoires de suivis démographiques et de santé opèrent depuis plusieurs décennies. Nous avons évalué les structures des vagues de chaleur, leur prévisibilité météorologique et leur évolution sur le long terme. Nous avons évalué leur impact en termes de mortalité et morbidité, et un système d'alerte fonctionne dans ces deux pays. Ces résultats visent à sensibiliser les politiques publiques à un renforcement des systèmes de santé dédiés aux canicules.

Titre 2 : Une synergie entre bases de données météorologiques et sanitaires, analyses statistiques, modélisation épidémiologique et modélisation climatique.

On a d'une part construit une base de données météorologiques sur l'Afrique de l'ouest en fusionnant plusieurs jeux de données et effectuer des tests statistiques de qualification de ces

données, les confronter avec différents jeux de réanalyses, intégrer et analyser les projections climatiques d'une trentaine de modèles sur le siècle. La modélisation climatique et des études de sensibilité ont permis de cerner les biais dans la physique des modèles et de réaliser des études sur la vague de chaleur sahélienne du printemps 2010. D'autre part un travail conséquent d'harmonisation et de standardisation des données de mortalité et de morbidité a été nécessaire, dû à des pratiques de collecte et de codification souvent différentes entre les sites. Des analyses et modélisations statistiques linéaires et non linéaires ont été largement appliquées pour quantifier les liens entre indices de chaleur et indicateurs de santé. Des enquêtes par questionnaire ont été réalisées sur trois de ces sites sur des échantillons d'au moins 1000 ménages. Un portail web a été utilisé pour alimenter le système d'alerte opérationnel avec un nombre important de diagnostics dédiées aux vagues de chaleur.

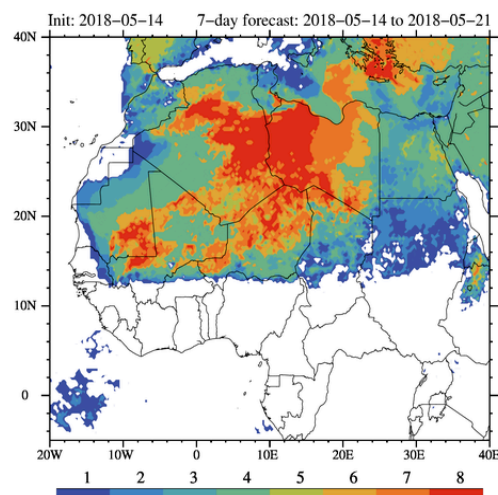
#### Résultats majeurs du projet :

Nous avons constitué des bases de données météorologiques et épidémiologiques qualifiées. Nous avons caractérisé les structures météorologiques des vagues de chaleur sur le Sahel, évalué leur prévisibilité, développé des schémas statistiques et numériques de prévision saisonnière de leur occurrence, démontré leur tendance à la hausse sur les dernières décennies et la poursuite de cette intensification durant ce siècle. Nous avons quantifié leur impact en termes de mortalité et morbidité, et réalisé des enquêtes de terrain sur la vulnérabilité des populations. Un système d'alerte fonctionne actuellement au Sénégal et au Burkina Faso.

#### Production scientifique :

En termes d'articles publiés dans des revues internationales de rang A, notre production concerne tous les volets du projet : les tendances des vagues de chaleur sur les décennies récentes (7 articles), leurs projections climatiques (2), leur prévision saisonnière (2), leurs caractéristiques météorologiques et les processus physiques associés (5), les processus physiques dans les modèles de climat (2), les études épidémiologiques (1). Plusieurs autres sont en cours de rédaction. Deux thèses ont été réalisées et trois autres sont en cours. 16 rapports de fin d'étude (Master 2 ou diplôme d'ingénieur) ont aussi été publiés par de jeunes chercheurs africains.

#### Illustration :



Tiré du portail web de prévision opérationnelle [acasis.sedoo.fr](http://acasis.sedoo.fr) réalisé par les partenaires SEDOO, CNRM-GAME et ANACIM du projet : Prévision à une semaine d'échéance (14 au 21 Mai 2018) du nombre de jours en vague de chaleur basée sur un critère en Température minimale ; les prévisions similaires existent pour un critère de température maximale (Barbier et al. 2017).

### Informations factuelles :

Le projet ACASIS est un projet de recherche fondamentale et d'innovation coordonné par le Dr Serge Janicot (laboratoire LOCEAN). Il associe les partenaires français SEDOO, CRC, CNRM-GAME et LPED, les partenaires sénégalais ANACIM, LPAOSF, CSE, UGB, et les partenaires burkinabé ANAM, ISSP et CRSN. Le projet a débuté en Janvier 2014 et a duré 60 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de 1 259 908 € pour un coût global d'environ 4 052 900 €.

## **B.3 RÉSUMÉ CONSOLIDÉ PUBLIC EN ANGLAIS**

*Suivre impérativement les instructions ci-dessus.*

Title: Heat waves in the Sahel have an impact in terms of mortality and morbidity

Title 1: The characterization and health impact of heat waves in the Sahel are unknown. The project responds to these two points and creates a warning system

While the public health impacts of heat waves have been analyzed in developed countries, few actions have been put in place to detect and assess their impacts in Africa where the climate is warmer and adaptation capacities are weaker. However, this issue is emerging in the Sahel and climate projections indicate that such episodes should increase in frequency and intensity in the coming decades. The main objective of the project was the establishment of an pre-operational warning system for heat waves adapted to the health risks for the populations, centered on Senegal and Burkina where the meteorological services already delivered products dedicated to health risks and where several observatories for demographic and health monitoring have been operating for several decades. We have evaluated the structures of heat waves, their predictability, and their long-term evolution. We evaluated their impacts in terms of mortality and morbidity, and an alert system works in both countries. These results aim to raise awareness of public policies to strengthen health systems dedicated to heat waves.

Title 2: A synergy between meteorological and health databases, statistical analyses, epidemiological modeling and climate modeling

On one hand we built a meteorological database on West Africa by merging several datasets and performing statistical tests to qualify these data, compare them with different reanalyzes, integrate and analyze climate projections of about thirty models over the century. Climate modeling and sensitivity studies have helped to identify biases in model physics and to conduct case studies on the Sahel heat wave of the 2010 spring. On the other hand, a substantial work of harmonization and standardization of mortality and morbidity data has been necessary, due to often different collection and coding practices between sites. Linear and nonlinear statistical analyzes and modeling have been widely applied to quantify the links between heat indices and health indicators. Questionnaire surveys were conducted at three out of these sites on samples of at least 1000 households. A web portal was used to feed the operational warning system with an important number of diagnostics dedicated to heat waves.

Major results of the project:

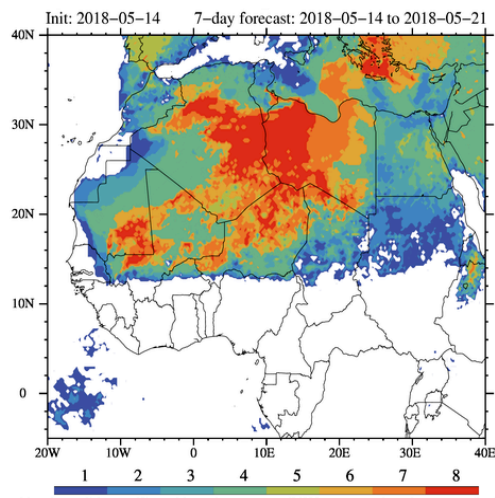
We have established qualified epidemiological and meteorological databases. We have characterized the weather patterns of heat waves in the Sahel, assessed their predictability, developed statistical and numerical seasonal forecasts of their occurrences, demonstrated their increasing trend over the last decades and the continuation of this intensification during this century. We quantified their impacts in terms of mortality and morbidity, and conducted field surveys on the vulnerability of these populations. A warning system is currently operating in Senegal and Burkina Faso.

Scientific production:

In terms of articles published in international rank A journals, our production covers all aspects of the project: heat waves trends over the recent decades (7 papers), their climate projections (2), their seasonal forecast (2), their meteorological characteristics and associated physical processes (5), the physical processes in climate models (2), epidemiological studies (1). Several others are being written. Two theses have been completed and three others are in

progress. 16 end-of-study reports (Master 2 or engineering degree) have also been published by young African researchers.

Illustration:



From the operational forecasting web portal [acasis.sedoo.fr](http://acasis.sedoo.fr) made by the partners SEDOO, CNRM-GAME and ANACIM of the project : weekly range forecast (14-21 May 2018) of the number of days in heat wave based on a minimum temperature criterion; similar forecasts exist for a maximum temperature criterion (Barbier et al. 2017).

Factual information:

The ACASIS project is a fundamental research and innovation project coordinated by Dr. Serge Janicot (LOCEAN laboratory). It associates the French partners SEDOO, CRC, CNRM-GAME and LPED, the Senegalese partners ANACIM, LPAOSF, CSE, UGB, and the Burkinabe partners ANAM, ISSP and CRSN. The project started in January 2014 and lasted 60 months. He received ANR funding of 1 259 908 € for an overall cost of about 4 052 900 €.

## C MÉMOIRE SCIENTIFIQUE

*Maximum 5 pages. On donne ci-dessous des indications sur le contenu possible du mémoire. Ce mémoire peut être accompagné de rapports annexes plus détaillés.*

*Le mémoire scientifique couvre la totalité de la durée du projet. Il doit présenter une synthèse auto-suffisante rappelant les objectifs, le travail réalisé et les résultats obtenus mis en perspective avec les attentes initiales et l'état de l'art. C'est un document d'un format semblable à celui des articles scientifiques ou des monographies. Il doit refléter le caractère collectif de l'effort fait par les partenaires au cours du projet. Le coordinateur prépare ce rapport sur la base des contributions de tous les partenaires. Une version préliminaire en est soumise à l'ANR pour la revue de fin de projet.*

*Un mémoire scientifique signalé comme confidentiel ne sera pas diffusé. Justifier brièvement la raison de la confidentialité demandée. Les mémoires non confidentiels seront susceptibles d'être diffusés par l'ANR, notamment via les archives ouvertes <http://hal.archives-ouvertes.fr>.*

**Mémoire scientifique confidentiel** : Non

### C.1 RÉSUMÉ DU MÉMOIRE

*Ce résumé peut être repris du résumé consolidé public.*

Alors que les impacts sur la santé publique des vagues de chaleur ont été analysés dans les pays développés, peu d'actions ont été mises en place pour les détecter et évaluer leurs impacts en Afrique où le climat est plus chaud et les capacités d'adaptation plus faibles. Ce problème est cependant en train d'émerger au Sahel et les projections climatiques indiquent que de tels épisodes devraient augmenter en fréquence et en intensité dans les



décennies à venir. L'objectif principal du projet a été la mise en place d'un système pré-opérationnel d'alerte aux canicules adapté aux risques sanitaires pour les populations, centré sur le Sénégal et le Burkina où les services météorologiques délivrent déjà des produits dédiés aux risques sanitaires, et où plusieurs observatoires de suivis démographiques et de santé opèrent depuis plusieurs décennies. Des recommandations spécifiques à l'arrivée de tels épisodes de canicule pourront être diffusées aux directions générales de la santé jusqu'aux services sanitaires et aux populations.

De très nombreuses informations et documents sont disponibles sur le site web du projet : <https://acasis.locean-ipsl.upmc.fr>

## **C.2 ENJEUX ET PROBLÉMATIQUE, ÉTAT DE L'ART**

*Présenter les enjeux initiaux du projet, la problématique formulée par le projet, et l'état de l'art sur lequel il s'appuie. Présenter leurs éventuelles évolutions pendant la durée du projet (les apports propres au projet sont présentés en C.4).*

Alors que les impacts sur la santé publique des vagues de chaleur ont été analysés dans les pays développés, en particulier après l'épisode intense de l'été 2003 en Europe de l'ouest, peu d'actions ont été mises en place dans les pays en développement pour les détecter et évaluer leurs impacts, en particulier en Afrique où le climat est plus chaud et les capacités d'adaptation plus faibles. En Afrique de l'ouest, des échos dans les media locaux ainsi que quelques analyses épidémiologiques montraient pourtant que ce problème était en train d'émerger (Diboulo et al 2012), en lien avec l'augmentation des températures extrêmes (Ly et al. 2013), et les projections climatiques indiquaient que de tels épisodes allaient très probablement augmenter en fréquence et en intensité dans les décennies à venir (voir les rapports IPCC 2013-2014). Les modèles de climat utilisés pour ces projections comportent cependant sur cette région des biais importants en température et dans les composantes de leur bilan radiatif (Roehrig et al. 2013), qui nécessitent d'être compris et réduits afin de fournir des informations plus fiables sur l'évolution future de ces vagues de chaleur.

A partir de ce contexte, l'objectif principal fixé dans le projet ACASIS était de mettre en place sur l'Afrique de l'ouest un système pré-opérationnel d'alerte aux canicules adapté aux risques sanitaires pour les populations. C'était un projet de démonstration centré sur le Sénégal et le Burkina où les services opérationnels de prévision de temps délivraient déjà des produits dédiés aux risques sanitaires, et où plusieurs observatoires de suivis démographiques et de santé opéraient depuis plusieurs décennies. Pour cela un socle de connaissances devait être construit. Les résultats obtenus visaient aussi à sensibiliser les politiques publiques à un renforcement des systèmes de santé dédiés aux canicules dans ces pays du Sahel.

## **C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE**

Pour mener ce projet à bien, un consortium pluridisciplinaire a été construit, rassemblant climatologues, modélisateurs du climat, météorologistes, biostatisticiens, démographes, épidémiologistes, médecins, socio-économistes et géographes. Il s'est développé par de fortes collaborations entre équipes françaises et africaines, où un certain nombre de jeunes chercheurs ont été fortement impliqués.

Le projet a été organisé en plusieurs axes d'investigation, mettant au centre l'objet « vague de chaleur » (voir organigramme en annexe). Un travail spécifique a été développé pour l'acquisition, la qualification, l'harmonisation et la standardisation de bases de données climatiques, de jeux de réanalyses, et de bases de données épidémiologiques (T2). La caractérisation des vagues de chaleur sur le Sahel et de leurs structures atmosphériques a été réalisée, ainsi que leur évolution durant les dernières décennies, par de nombreuses analyses diagnostiques et statistiques (T3). Leur prévisibilité à court (échelle synoptique) à long (échelle saisonnière) terme a été évaluée à partir d'ensembles multi-modèles de prévision. Pour les échéances plus longues, les ensembles de simulations climatiques historiques et futures qui servent de base aux rapports du GIEC ont été analysées pour évaluer l'évolution des vagues de chaleur dans les décennies à venir sur le Sahel (T3). Les processus physiques à l'origine des biais dans ces modèles de climat ont été étudiés par des études de sensibilité et de confrontation à des observations géophysiques haute-résolution AMMA (T4). Une approche multi-modèles d'un cas de vague de chaleur extrême en Avril 2010 sur le Sahel a

aussi été réalisée (T4). En parallèle, des études épidémiologiques (en termes de mortalité et morbidité) associées à des enquêtes de terrain sur des échantillons de 1000 à 1800 ménages ont été menées sur trois des observatoires de suivi démographique et de santé au Sénégal et au Burkina afin d'évaluer et de quantifier la vulnérabilité physiologique et sociale des populations aux caractéristiques physiques des vagues de chaleur, et de définir des indices biométéorologiques adaptés (T5). Des analyses et modélisations statistiques linéaires et non linéaires ont été largement appliquées pour quantifier les liens entre indices de chaleur et indicateurs de santé (T5). Ces indices ont été intégrés dans un système d'alerte qui a été mis en place, fruit d'une collaboration entre les agences météorologiques française, sénégalaise et burkinabé (T6). Ce système d'alerte opérationnel s'appuie sur un portail web contenant un nombre important de diagnostics dédiées aux vagues de chaleur.

## C.4 RÉSULTATS OBTENUS

*Positionner les résultats par rapports aux livrables du projet et aux publications, brevets etc. Revisiter l'état de l'art et les enjeux à la fin du projet.*

### C.4.1 L'OBJET « VAGUE DE CHALEUR »

Une première réflexion collective s'est portée sur les critères pouvant caractériser une vague de chaleur et dans quelle mesure on pourrait construire une définition d'un indicateur sahélien. La stratégie établie a été de faire un bilan des indicateurs en cours, de travailler avec certains d'entre eux pour analyser les caractéristiques géophysiques des vagues de chaleur, tout en développant en parallèle une investigation épidémiologique permettant d'identifier un indicateur « biométéorologique » lié aux impacts sanitaires (sur-mortalité et sur-morbidité), enfin refaire le lien aux analyses géophysiques avec cet indicateur biométéorologique. Les délais non anticipés qui ont été nécessaires pour la constitution et l'analyse des bases de données sanitaires (voir C.4.4) ne nous ont pas permis d'aller totalement au bout de cette démarche.

Des analyses bibliographiques initiales larges nous ont permis de confirmer qu'il n'y a pas de critère unique pour la définition d'une vague de chaleur (Rome et al 2014), tant en termes de variables météorologiques (température moyenne, minimale, maximale, combinaison avec un critère d'humidité (température « apparente », indice de chaleur), de vent) que de seuil de détection (seuil fixe, percentile entre 90% et 99%), et de durée minimale (3 jours, 5 jours, ...). D'autre part on a montré qu'en termes de seuil de détection, l'usage d'un percentile fixe est adapté aux quantifications d'impacts sanitaires alors que l'usage d'un percentile mobile (similaire à une désaisonnalisation) est nécessaire pour appréhender les conditions synoptiques associées à une vague de chaleur (Oueslati et al. 2017, Barbier et al. 2018, Sambou et al. 2018).

Nous nous sommes focalisés sur la saison de printemps car d'une part c'est la plus chaude de l'année et celle où la tendance à la hausse sur les 60 dernières années est la plus claire (~+2°C ; Guichard et al. 2017), et d'autre part c'est la saison sèche, donc plus « simple » à étudier en termes de processus physiques et d'impacts sanitaires car non perturbée respectivement par des processus humides liées aux précipitations et par des pathologies vectorielles (paludisme par exemple).

Différentes bases de données météorologiques journalières historiques sur l'Afrique de l'ouest ont été constituées, analysées et comparées, et une en particulier, fusion de plusieurs sources de données intégrant des tests de qualification statistique (Moron et al. 2016) a servi de référence pour la plupart des études géophysiques réalisées et aussi pour les études épidémiologiques.

Les études menées par plusieurs partenaires (en géophysique comme en santé) ont convergé assez rapidement sur le fait de définir deux types de vagues de chaleur distinctes, non fréquemment coïncidentes, « sèches » (de jour) définies à partir de la température maximale (Tx) et « humides » (de nuit) à partir de la température minimale (Tn), contrôlées par des processus différents (voir C.4.3) et ayant des impacts sanitaires différents (voir C.4.4). Le seuil d'une durée minimale de 3 jours sera aussi rapidement choisi par les différents partenaires. La dimension spatiale de l'objet « vague de chaleur » a aussi été analysée (Oueslati et al. 2017, Barbier et al. 2018), croisant les distributions en fréquence, intensité et



extension spatiale, et différenciant « petites » et « grandes » vagues de chaleur par un seuil de 20% de la couverture sahélienne ( $\sim 60 \times 10^6 \text{ km}^2$ ). Des études synoptiques plus précises ont été réalisées. Un travail préliminaire au projet avait montré le rôle des ondes atmosphériques de Rossby par la présence d'une circulation cyclonique sur l'Afrique du Nord associée à des vagues de chaleur sur le Sahel Central (Fontaine et al. 2013). Nous avons étendu cette analyse d'une part par une approche générale en type de temps sur l'Afrique de l'Ouest (Moron et al. 2018), identifiant 9 régimes de temps associés soit à une dynamique des latitudes moyennes, soit à une dynamique d'ondes équatoriales, certains d'entre eux étant associés à des anomalies positives de température sur une partie du domaine. Nous avons ensuite poursuivi et confirmé les résultats de Fontaine et al. (2013) sur le Sahel Central par une étude longitudinale systématique (Barbier 2017), puis montré une structure atmosphérique de signe opposé pour les vagues de chaleur côtière du Sénégal associées à une circulation anticyclonique (Sambou et al. 2018). Ainsi notre zone d'étude (Sahel Ouest et Central) est concernée par deux structures spatiales opposées de vagues de chaleur associées à un dipôle zonal d'anomalies de température, et pilotées par une même dynamique d'ondes de Rossby des latitudes moyennes.

#### C.4.2 EVOLUTION HISTORIQUE, PRÉVISIBILITÉ ET PROJECTIONS CLIMATIQUES DES VAGUES DE CHALEUR

Plusieurs analyses sur les tendances historiques des 60 dernières années et depuis 1900 ont été réalisées à l'échelle régionale de l'Afrique de l'Ouest (Moron et al. 2016, Ringard et al. 2016, Rome et al. 2015, 2016, Barbier et al. 2018) ainsi qu'à l'échelle du Sénégal et du Burkina (Camara et Touré 2018, Sawadogo et Combere 2018, Banang 2018, Diouf 2018), et ont toutes montré à travers différents critères caractérisant la nature des vagues de chaleur une intensification significative de ces événements (fréquence, durée, extension spatiale, intensité) en parallèle d'un réchauffement des températures moyennes, concernant à la fois les vagues de chaleur de jour ( $T_x$ ) et de nuit ( $T_n$ ). Une analyse ponctuelle sur les vagues de chaleur au Sénégal montre que si les impacts en température se sont intensifiés sur les 40 dernières années, les structures atmosphériques sont restées stables (Sambou et al. 2018), signifiant ainsi que pour une même situation météorologique propice à l'occurrence d'une vague de chaleur, l'impact en termes de température est aujourd'hui nettement plus élevé.

L'augmentation moyenne des températures, déjà visible et significative sur le Sahel est évidemment amenée à se poursuivre au cours de ce siècle sous l'influence de la poursuite des fortes émissions de gaz à effet de serre. Nous avons mené plusieurs études à partir de l'analyse des simulations globales CMIP5 et régionales CORDEX du GIEC (Déqué et al. 2016, Diedhiou et al. 2018, Roucou et al. 2018), après avoir identifié des biais moyens modérés sur les températures par rapport aux observations (Barbier 2017). A un niveau de réchauffement global de  $+2^\circ\text{C}$ , le nombre de vagues de chaleur en Afrique tropicale se trouve multiplié par 10 en moyenne par rapport à la période de référence. Suivant la trajectoire de scénarios RCP4.5 et RCP8.5 au printemps, le rapport signal/bruit (« temps d'émergence ») est actuellement déjà significatif par rapport à la moyenne des 35 dernières années, le nombre de jours chauds appartenant à une vague de chaleur de 3 jours au moins au Sahel augmente nettement (entre 30 et 50 jours en 2100 par rapport à 10 actuellement), une sévérité moyenne de vague de chaleur (Ouzeau et al. 2016) se stabilisant autour d'une valeur de 15 en RCP4.5 pour environ 45 en RCP8.5 ( $\sim 5$  actuellement), la vague de chaleur exceptionnelle de 2010 étant dépassée en sévérité à partir de 2030. Plus localement au Sénégal par exemple, la température moyenne de Dakar en 2100 sera similaire à la température actuelle à Matam (zone la plus chaude du Sénégal).

En termes de prévisibilité des échelles synoptique à saisonnière, on a ouvert une option vers une prévision « seamless » (en continuité sur ces échéances) permettant une approche « Ready-Set-Go » (concept associant prévision saisonnière – prévision à moyenne échéance – prévision à courte échéance; IRI (International Research Institute for Climate and Society)) pour les plans de mise en action en cas d'alerte sanitaire. Après avoir démontré l'existence de téléconnexions entre les anomalies de températures de surface de mer (en particulier ENSO et Atlantique tropical) d'hiver et les indicateurs de vagues de chaleur au Sahel intégrés sur le printemps (Moron et al. 2016), un schéma statistique de prévision saisonnière a été construit, intégrant la tendance long terme associée au réchauffement

climatique, qui a démontré de bonnes performances en temps réel à partir du printemps 2016. Cette potentialité de prévision saisonnière a été confirmée par des ensembles de prévisions numériques opérationnelles à l'aide du modèle de climat du CNRM, démontrant un score significatif sur des indicateurs intégrés à l'échelle régionale, avec des résultats un peu meilleurs pour la température minimale que la température maximale (Batté et al. 2018). A une échelle sub-saisonnière au-delà de la semaine, un score modéré de réussite est obtenu, et dans une situation favorable comme l'hiver 2015-2016 avec un fort El Niño, un bon score a été obtenu.

#### C.4.3 PROCESSUS PHYSIQUES ASSOCIÉS AUX VAGUES DE CHALEUR

Différentes approches ont abordé l'analyse des processus dynamiques et thermodynamiques associés aux vagues de chaleur au Sahel au printemps. Le Sahel Central a été particulièrement étudié (couvrant ici à l'ouest excepté la zone restreinte côtière du Sénégal dont on a montré une structure de signe opposé des vagues de chaleur). Toutes ont convergé sur le fait de différencier les vagues de chaleur « sèches » de jour ( $T_x$ ) et « humides » de nuit ( $T_n$ ). Le cas de la vague de chaleur importante d'Avril 2010 a aussi servi d'objet d'investigation par des études diagnostiques et de simulations numériques.

Nous avons montré par des approches composites (Oueslati et al. 2017, Barbier et al. 2018) que les vagues de chaleur nocturnes font intervenir un flux d'air humide renforcé depuis la côte guinéenne et l'océan Atlantique (flux de mousson) qui induit une forte augmentation de l'effet de serre via l'impact radiatif de la vapeur d'eau dans les basses couches de l'atmosphère. Nous avons également montré que les vagues de chaleur diurnes sont liées à un flux solaire plus important dû potentiellement à une réduction de la couverture nuageuse, sont d'amplitude plus faible que celle observées dans les latitudes tempérées (e.g. Europe), qu'elles ne s'accompagnent pas d'une évolution temporelle aussi marquée de la structure de la couche limite convective diurne, probablement parce que le flux de chaleur sensible à la surface n'augmente pas pendant ces épisodes au printemps.

Les travaux autour de la vague de chaleur d'Avril 2010 ont permis de montrer que l'impact radiatif de la vapeur d'eau (et non l'advection d'air plus chaud) pilote le réchauffement cette vague de chaleur nocturne (Larger et al. 2018). Ils montrent également que la simulation numérique des vagues de chaleur est très sensible à l'utilisation d'une paramétrisation de la convection profonde (Tomasini et al., 2018 et Guichard et al. 2018, Conférence EGU et colloque final Saint Louis). Ainsi, ces résultats démontrent l'importance de l'utilisation d'une résolution horizontale suffisamment fine pour la simulation numérique de vagues de chaleur.

Une analyse plus générale d'un biais froid sur le Sahel en été dans le modèle du LMD a été réalisée à l'aide d'une série d'expériences de sensibilité visant le rôle de l'albédo de surface (Diallo et al. 2017, Diallo 2018). Les résultats ont mis en évidence le rôle clé joué par l'inertie thermique du sol, de l'efficacité du mélange turbulent, de l'albédo de surface et des effets radiatifs des aérosols désertiques et des nuages dans le bilan énergétique de surface et la représentation des variables météorologiques de basses couches.

#### C.4.4 QUANTIFICATION ÉPIDÉMIOLOGIQUE DE L'IMPACT DES VAGUES DE CHALEUR

En Afrique sub-saharienne les données d'état civil et de santé ont généralement une couverture faible de la population globale, en particulier en milieu rural. Pour pallier ce manque de données, les registres des centres de santé sont habituellement utilisés pour réaliser des analyses de santé publique. Or ces bases de données sont largement biaisées, une partie seulement de la population se rendant dans une structure de santé pour accoucher ou décéder. Le besoin de données fiables et de long terme a prévalu à la création de systèmes de suivi démographiques et de santé (HDSS en anglais) en Afrique, fournissant un ensemble d'opérations de terrain et de mise en place de bases de données longitudinales de l'ensemble des individus résidant sur un espace géographique clairement délimité, de leur ménage et de leur unité résidentielle. Un certain nombre de facteurs démographiques et de santé sont ainsi collectés. Nous avons exploité les données de trois de ces sites, deux situés en milieu rural (Niakhar (~ 43000 individus depuis 1984) au Sénégal, Nouna (~ 78000 individus depuis 1992) au Burkina) et un en milieu urbain (Ouagadougou (~ 90000 individus depuis 2008) au Burkina). La constitution d'une base de données unifiées (acquisition, harmonisation des

jeux de données et métadonnées concernant mortalité et morbidité) a été beaucoup plus longue que prévue, dû principalement à une faible disponibilité des services producteurs de données, à des pratiques de collecte et de codification souvent différentes entre les sites, et à la saisie nécessaire d'un certain nombre de registres (Dos Santos et al 2019). Nous avons aussi installé en 2016 des thermomètres-enregistreurs dans des chambres de différents types d'habitats pour la mesure intra-domiciliaire de la température et de l'humidité.

Dans ce volet aussi du projet, les recherches ont convergé assez rapidement sur le fait de définir deux types d'évènements de chaleur distincts, de jour définis à partir de la température maximale ( $T_x$ ) et de nuit à partir de la température minimale ( $T_n$ ), la différence étant que le facteur humidité a aussi été intégré via la température apparente. Ont donc été utilisées les variables  $Tap_x$ ,  $Tap_n$  et  $Tap_{moy}$ . Les travaux de modélisation sur les 3 sites ont été faits d'une part sur toute l'année, d'autre part sur le printemps uniquement.

*Analyse des relations température – mortalité à Ouagadougou, Nouna et Niakhar.* A Niakhar, les analyses ont utilisé les modèles additifs généralisés (GAM ; Ba 2015, Ndiaye 2017) et modèles linéaires généralisés (GLM ; Diene 2016, 2017). La modélisation de la relation température – mortalité selon les causes de décès a fait l'objet d'un mémoire de master d'ingénieur statisticien (Fall 2016). La série temporelle des évènements de mortalité étant assez courte à Ouagadougou, les analyses ont été essentiellement descriptives et une modélisation GAM a été appliquée (Bai 2016). A Nouna la relation température – mortalité a été analysée par des modèles linéaires et non-linéaires à effets retard (DLNM ; Diboulo 2018) et GAM (Ndiaye 2017). Enfin deux doctorants en mathématiques de l'UGB travaillent depuis cette année sur les effets seuils et les effets mémoires à partir des séries temporelles mortalité et température de Niakhar et de Nouna (Mbaye et Faye). Un étudiant en master (Niang) a estimé les effets de la température apparente sur la mortalité à partir d'un modèle autorégressif ARIMAX.

*Analyse des relations température – morbidité à Ouagadougou, Nouna et Niakhar.* Ces analyses encore exploratoires, sont largement tributaires de la disponibilité des jeux de données, en cours de constitution. Cette activité a été réalisé actuellement sur Niakhar (Thiandoum, 2018). Les analyses ont porté plus spécifiquement sur les problèmes de diarrhée, les maladies respiratoires, les maladies dermatologiques, les maladies cardiovasculaires (dont les AVC) et le paludisme.

*Enquête par questionnaire en population générale.*

En 2016-2017, nous avons élaboré les questionnaires de l'enquête vulnérabilité à la forte chaleur. Nous avons considéré trois catégories de la population : les enfants de moins de 5 ans et les femmes enceintes, les personnes âgées de plus de 55 ans et les personnes âgées entre 15 et 55 ans. Les échantillons aléatoires varient selon les sites entre 1000 et 1800 individus. Au cours des 18 derniers mois du projet, les bases de données ont été apurées et standardisées. Elles ont fait l'objet d'un premier rapport d'analyse sur la vulnérabilité des individus à la chaleur extrême (Yade 2018). D'autre part une enquête spécifique a été menée dans 6 départements du nord du Sénégal qui ont été fortement touchés par une vague de chaleur en Mai 2013. Cette enquête (Ba 2018, Barry 2018, Diallo 2018) a permis de confirmer et quantifier les impacts significatifs en termes de surmortalité et de surmorbidité des pathologies sensibles aux fortes températures.

Les principaux résultats obtenus sont résumés ici principalement sur Niakhar : Entre 1984 et 2014, la chaleur élevée a entraîné un excès de mortalité et de morbidité diagnostiquée.

- Le risque de mourir au cours de l'année augmente au-delà du seuil de  $37^{\circ}\text{C}$  de température apparente quotidienne maximale. Les décès ont ainsi augmenté de 1,3% par degré additionnel après  $37^{\circ}\text{C}$ . Pendant la saison sèche et chaude, le seuil s'est produit à la température maximale journalière de  $44^{\circ}\text{C}$  et le taux d'augmentation de la mortalité a été de 1,08% par degré additionnel.
- Une augmentation de 10% de la température apparente moyenne, sur plus d'un mois, provoque une augmentation de 9,3% du nombre de décès dans le même mois.
- La probabilité de visiter un établissement de santé a augmenté au-delà du seuil de  $36^{\circ}\text{C}$  et les consultations médicales ont augmenté de 7,4% par degré supérieur à  $36^{\circ}\text{C}$ . Sur l'ensemble de la période d'observation, l'augmentation de la chaleur le jour précédent produit une hausse des consultations pour la diarrhée (seuil :  $39^{\circ}\text{C}$ ,

RR=2,1%) et le paludisme (seuil 40°C, RR=2,3%). Ces probabilités augmentent très fortement avec la durée d'exposition, respectivement après 10 jours de forte chaleur : RR<sub>paludisme</sub> = 3,7% et RR<sub>diarrhée</sub> = 8,5%. Les maladies cardiovasculaires et les AVC augmentent également très fortement avec la chaleur.

Après 2008, les visites médicales ont augmenté plus rapidement (12,4%) par degré supplémentaire au-delà de 37°C, qu'avant 2008 (5,8%).

La santé des moins de 5 ans est affectée par la chaleur élevée à un seuil de température plus faible et après une exposition plus courte que pour les personnes âgées.

- Au-dessus de 35°C (température maximale journalière apparente), le risque de mourir pour les enfants de moins de 5 ans augmente de 1,2% par degré additionnel. D'autre part, une longue exposition (30 jours) à la chaleur ne produit pas de mortalité excédentaire significative.
- Les jeunes enfants réagissent très rapidement à un seuil de chaleur élevé (mais pas extrême), probablement en raison d'une plus grande facilité à se déshydrater, surtout en cas de diarrhée ou de forte fièvre.

La santé des personnes âgées (55 ans et plus) est principalement altérée par une chaleur extrême ; Ils sont donc plus vulnérables aux vagues de chaleur. La chaleur extrême influe sur le risque de mortalité des personnes âgées immédiatement (le même jour) et après une longue exposition. Enfin, les personnes de plus de 55 ans sont beaucoup plus sensibles à la chaleur humide que la chaleur sèche.

- À partir du seuil de 44°C (> 95e percentile), le risque de mourir le jour même des personnes âgées augmente de 12% par degré additionnel. Ce risque reste à un niveau élevé après une longue exposition à la chaleur extrême (une température moyenne mensuelle maximale de 40°C). Pendant la saison chaude et sèche, l'excès de mortalité des personnes âgées est moins important et augmente moins rapidement avec la chaleur (augmentation de 1,12% par degré ajouté).
- À Ouagadougou, les vagues de chaleur affectent principalement la survie des personnes âgées, surtout lorsqu'elles souffrent de maladies cardiovasculaires (OR = 2,5).
- Les personnes âgées sont sensibles à une période continue de chaleur extrême, probablement en raison de l'effet indésirable de l'accumulation de chaleur sur la santé. Une longue exposition à une chaleur très élevée affaiblit le corps et provoque un effet de décompensation lorsque l'état de santé de la personne âgée est déjà fragile.
- Les nuits chaudes (au-dessus de 21°C) augmentent le risque de mortalité de 1,13% par degré additionnel, probablement en raison de l'impossibilité pour les corps âgés de se rétablir pendant la nuit.

Le risque de visiter un établissement de santé pour les problèmes cardiovasculaires augmente avec une chaleur extrême et la durée d'exposition à cette chaleur extrême.

- Les consultations médicales augmentent : 1) de 9% par degré additionnel pour chaque jour au-dessus d'un seuil de 41°C ; 2) de 54% par degré additionnel pendant 5 jours continus au-dessus d'un seuil moyen de 45°C ; et 3) de 69% par degré additionnel pendant 10 jours continus au-dessus d'un seuil moyen de 44°C.

Les visites médicales dans un établissement de santé pour le paludisme sont d'autant plus fréquentes que le nombre de nuits très chaudes précédant la visite est élevé.

- Lorsque la température atteint une moyenne de 32°C pour les cinq nuits précédant la visite médicale, la probabilité de visiter un établissement de santé pour le paludisme augmente de 22% par degré supplémentaire au-dessus du seuil de 32°C pour la période de 5 jours.
- La survie des moins de cinq ans est également menacée par l'exposition à long terme à la chaleur nocturne, au-dessus d'un seuil mensuel moyen de 24°C.
- Ces résultats suggèrent un risque accru de transmission du paludisme pendant les nuits très chaudes. Les vecteurs anophèles se reproduisent plus rapidement et sont

plus agressifs lorsque la chaleur nocturne est élevée. De la même façon, l'utilisation de la moustiquaire diminue pendant les nuits extrêmement chaudes.

#### C.4.5 SYSTÈME D'ALERTE INTÉGRÉ DES VAGUES DE CHALEUR « READY-SET-GO »

Une plateforme d'échange en temps quasi-réel de cartes et de graphes issus de prévisions du Centre Européen et de Météo-France, d'observations et de diagnostics adaptés aux vagues de chaleur sahéliennes a initialement été mise en place depuis la saison de printemps 2014 et s'est enrichie progressivement au fil des résultats obtenus en amont. Un système d'alerte opérationnel fonctionne maintenant, délivrant des produits de prévision de l'échelle régionale à locale. Il a été développé par les agences météorologiques ANACIM du Sénégal et DGM du Burkina Faso en collaboration avec CNRM-GAME de Météo-France. Ce site a fonctionné chaque printemps (Mars à Juin) depuis 2015, s'appuyant sur des briefings hebdomadaires. Un bulletin technique très complet, intégrant analyses de la semaine écoulée et prévisions pour la semaine à venir, est constitué et diffusé par l'ANACIM. L'ANACIM et la DGM diffusent aussi un bulletin national de synthèse à destination d'un plus grand public et des acteurs nationaux. Les bulletins des prévisions saisonnières réalisées par le projet sont aussi mis à disposition. L'ensemble de ces produits et bulletins sont déposés sur le site <http://acasis.sedoo.fr/>.

Au-delà de la concrétisation d'un renforcement de capacités vers l'ANACIM et la DGM, le fonctionnement de ce site et l'évaluation régulière des produits a montré que la prévisibilité des vagues de chaleur au Sahel existe, et qu'un système de prévision « seamless » associant prévision saisonnière – prévision à moyenne échéance – prévision à courte échéance est envisageable. Le secteur d'échéances le moins prévisible reste l'échelle sub-saisonnière au-delà de la semaine, car c'est un enjeu important pour les plans de mise en action en cas d'alerte sanitaire, et car on a démontré dans les analyses épidémiologiques l'impact important de l'effet cumulé de l'excès de chaleur de la semaine au mois.

Un autre composant du système d'alerte est de finaliser le choix d'un indicateur biométéorologique prioritaire et d'un seuil de dépassement qui reste encore à préciser. Les délais qui ont été nécessaires pour la constitution et l'analyse des bases de données sanitaires ne nous ont pas permis d'aller totalement au bout de cette démarche, même si des indicateurs et seuils sont utilisés opérationnellement actuellement (par exemple à l'ANACIM le 90<sup>e</sup> percentile de Tx et de Tn sur 3 jours consécutifs au moins). Cet indicateur est d'autre part probablement fortement lié aux sites sur lesquels les modélisations épidémiologiques ont été quantifiées. Par exemple les modélisations sur Niakhar, situé dans la moitié sud du Sénégal, ne sont pas forcément transposables au secteur nord-est du Sénégal, pourtant le plus exposé aux événements de fortes chaleurs. Les données des SNIS (Système National d'Information Sanitaires), qui pourraient permettre de développer une approche nationale, ne sont pas accessibles aisément et souffrent très probablement d'une sous-estimation en termes de statistiques de mortalité et morbidité.

Enfin, pour qu'un système d'alerte sanitaire soit complet, il faut aussi pouvoir déclencher, en cas d'alerte météorologique, une mise en alerte sanitaire de suivi en temps réel d'un effet de sur-mortalité ou/et de sur-morbidité dans les dispensaires et les hôpitaux des zones concernées, ce qui n'est pas globalement en place actuellement.

### C.5 EXPLOITATION DES RÉSULTATS

La principale exploitation des résultats est la réalisation de l'objectif principal du projet, la mise en place d'un système d'alerte pré-opérationnel de vagues de chaleur sahélienne et la publication hebdomadaire de bulletins dédiées durant la saison chaude de printemps. Ce système est opérationnel dans sa structure mais nécessite une finalisation des travaux de modélisation épidémiologique, et, ce qui échappe au périmètre du projet, une structuration nationale plus forte des systèmes d'information sanitaires.

Les résultats déjà obtenus ont permis d'organiser des réunions associant services météorologiques et médecins-chefs de districts du nord du Sénégal pour échanger autour de la perception des vagues de chaleur et de leurs impacts visibles par ces médecins, leur présenter les produits de prévision ACASIS, ainsi que les enquêtes de terrain réalisées par le CSE dans ces districts. Ces échanges ont mis en évidence que le problème est clairement



perçu dans les services sanitaires, ont permis d'affiner le questionnaire utilisé pour les enquêtes sur les 3 sites de population, et de définir le format des bulletins hebdomadaires allégés qui ont été ensuite diffusés par l'ANACIM (sur le Sénégal) et la DGM (sur le Burkina).

La quantification des impacts sanitaires des excès de chaleur qui a déjà été réalisée est totalement nouvelle en Afrique sub-saharienne. Même si les résultats demandent à être finalisés et n'ont pas une couverture nationale, ils peuvent permettre un plaidoyer et la délivrance de messages clé auprès des Directions Générales de la Santé pour les alerter sur les impacts déjà présents et surtout sur les impacts à venir dans le contexte du réchauffement climatique qui sera particulièrement marqué sur le Sahel.

## C.6 DISCUSSION

*Discussion sur le degré de réalisation des objectifs initiaux, les verrous restant à franchir, les ruptures, les élargissements possibles, les perspectives ouvertes par le projet, l'impact scientifique, industriel ou sociétal des résultats.*

L'objectif initial était de produire un système d'alerte pré-opérationnel concernant les vagues de chaleur au Sahel. Cet objectif a été atteint. Cet objectif s'est construit par une intégration des différents volets d'analyse de l'objet « vague de chaleur », caractérisation, prévisibilité et projection climatique, processus physiques associés et leur modélisation, modélisation épidémiologique, et mise en œuvre d'un portail de prévision et production de bulletins par les agences météorologiques nationales du Sénégal et du Burkina Faso.

La quantification des impacts sanitaires des excès de chaleur qui a déjà été réalisée est totalement nouvelle en Afrique sub-saharienne, cependant ces travaux demandent à être finalisés. Cinq articles sur les résultats des modélisations épidémiologiques sont programmés dont le premier est en bonne voie de soumission. Les enquêtes de terrain sur la vulnérabilité qui ont été réalisées sur les trois sites demandent aussi à être analysées. Le passage de ces analyses locales de sites à une dimension nationale est un vrai challenge mais est dans les mains des autorités publiques sanitaires de ces pays. Le projet ACASIS compte déployer en 2019 des actions de plaidoyer pour faire prendre conscience aux autorités du réel problème posé par les excès de chaleur et du contexte de réchauffement climatique qui va exacerber la situation au Sahel. Nous allons aussi organiser un atelier Climat-Santé cette année, à destination des médecins et des autorités sanitaires, avec le soutien de la NOAA/USA qui a été très intéressée par notre projet. Au niveau international, ACASIS a été identifié comme le projet phare en Afrique sub-saharienne par le réseau GHHIN (Global Heat Health Information Network) de WHO/WMO, et nous allons poursuivre notre contribution à ce réseau.

Sur le volet géophysique, la généralisation de la caractérisation et la prévisibilité des vagues de chaleur reste à faire sur les autres saisons, c'est-à-dire l'automne (la saison la plus chaude après le printemps, et plus humide) et l'été (la saison de mousson). L'analyse de la prévisibilité aux échelles sub-saisonniers au-delà de la semaine est aussi un point prioritaire. L'impact des poussières désertiques et des aérosols de pollution urbaine sur la santé, en combinaison avec des épisodes de chaleur extrêmes, est un sujet qui mérite d'être développé. Nous avons commencé à l'aborder, et l'avons intégré dans la soumission d'un projet ANR (Alert-QAIRES, demande de financement en cours, programme ANR aapqq2019, porteur R. Lalou). Nous comptons aussi soumettre en Juin 2019 un dossier de JEAI (Jeune Equipe Associée de l'IRD) entre UGB/Saint Louis et l'UMR MERIT/Paris pour porter l'extension du projet ACASIS sur le volet Santé au Sénégal en incluant cette composante Aérosols (poussières et polluants). Des travaux préliminaires ont aussi été lancés sur l'impact des vagues de chaleur sur les consommations d'électricité, avec des résultats significatifs sur Cotonou et Abidjan (Ghafi et al. comm. Pers., soumission en cours). Les impacts des épisodes de chaleurs extrêmes sur l'agriculture et sur la santé animale sont aussi dans nos esprits.

Enfin, et ce n'est pas là le moins important, de nombreux jeunes chercheurs sénégalais et burkinabé ont été lancés et soutenus dans ce projet (stages de master, thèse, post-doctorat) ; voir la liste des publications et rapports, et l'agenda du colloque final du projet en annexe.

## C.7 CONCLUSIONS

Nous pouvons considérer que ce projet a été un succès même s'il reste certains points à finaliser. Il s'est appuyé et a contribué à valoriser et mettre en exergue l'importance des observatoires de suivi démographique et de santé long-terme. Il va permettre de développer un plaidoyer auprès des autorités sanitaires sur cet enjeu largement sous-estimé et délaissé de l'impact des vagues de chaleur sur la santé et de son aggravation dans les années et décennies à venir, en particulier concernant les populations les plus vulnérables.

## C.8 RÉFÉRENCES

- Ba Y.A., 2015 - Excès de mortalité imputable aux vagues de chaleur à Niakhar : Aide à la mise en place d'un système d'alerte canicule, Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du titre d'Ingénieur-statisticien, ENSAE-Dakar, Sénégal, 76p.
- Ba, D., 2018 : Incidences sanitaires de la vague de chaleur (Mai 2013) dans les départements de Matam et Bakel : Approche géographique. Mémoire de Master 2 Espace-Sociétés-Développement, UCAD, Sénégal, 116p.
- Bai, GM, 2016, Mortalité et vagues de chaleur au Sahel : cas de l'Observatoire de Population de Ouagadougou, mémoire de fin de cycle Ingénieur des Travaux Statistiques, Ecole Nationale de la Statistique et d'Analyse Economique (ENSAE), Dakar
- Banang, W., 2018 : Caractérisation des vagues de chaleur au Sénégal et au Burkina Faso dans un régime de changement climatique : détermination des indicateurs et seuils. Mémoire de Master 2 Mathématiques Appliquées, UGB, Sénégal, 102p.
- Barbier J., 2017 : Extrêmes climatiques : le cas des vagues de chaleur au Sahel. Doctorat de l'Université de Toulouse, ED SDU2E Océan-Atmosphère-Climat, 313p.
- Barbier J., F. Guichard, D. Bouniol, F. Couvreur, R. Roehrig, 2018: Detection of intraseasonal large-scale heat waves: characteristics and historical trend during the Sahelian spring. *Journal of Climate*, doi: 10.1175/JCLI-D-17-0244.1
- Barry, A., 2018 : Incidences sanitaires de la vague de chaleur (Mai 2013) dans les départements de Dagana et Podor : Approche géographique. Mémoire de Master 2 Espace-Sociétés-Développement, UCAD, Sénégal, 128p.
- Batté, L., C. Ardilouze, M. Déqué, 2018: Forecasting West African heat waves at subseasonal and seasonal time scales. *Monthly Weather Review*, 146, 889-907.
- Camara C.A.T. & Toure M., 2018 : Caractérisation et tendance des vagues de chaleur au Sahel : Cas du Sénégal. Rapport de fin d'études d'Ingénieur d'Etat de la Météorologie, IHFR Oran, Algérie, 118p.
- Déqué M., S. Calanti, O.B. Christensen, A. Dell Aquila, C.F. Maule, A. Hænsler, G. Nikulin, C. Teichmann, 2016: A multi-model climate response over tropical Africa at +2°C. *Climate Services*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cliser.2016.06.002>.
- Diallo, F.B., F. Hourdin, C. Rio, A.-K. Traore, L. Mellul, F. Guichard, L. Kergoat, 2017: The surface energy budget computed at the grid-scale of a climate model challenged by station data in West Africa. *JAMES*, doi: 10.1002/2017MS001081.
- Diallo, S., 2018 : Incidences sanitaires de la vague de chaleur (Mai 2013) dans les départements de Louga et Linguère : Approche géographique. Mémoire de Master 2 Espace-Sociétés-Développement, UCAD, Sénégal, 136p.
- Diboulou, E, A Sié, J Rocklov, L Niamba et al., 2012: Weather and mortality: a 10 year retrospective analysis of the Nouna Health and Demographic Surveillance System, Burkina Faso. *Glob Health Action*, 5, 19078 - <http://dx.doi.org/10.3402/gha.v5i0.19078>.
- Diedhiou, A., A. Bichet, R. Wartenburger, S.I. Seneviratne, D.P. Rowell, M.B. Sylla, I. Diallo, S. Todzo, N.E. Touré, M. Camara, B. Ngounou Ngatchah, N.A. Kane, L. Tall, F. Affholder, 2018: Changes in climate extremes over West and Central Africa at 1.5°C and 2°C global warming. *Environm. Res. Lett.*, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac3e5>.
- Diene D.A., 2016 – La relation température et mortalité à Niakhar, Sénégal. Synthèse de l'analyse descriptive par régression locale. 34p.
- Diene D.A., 2017 – Modélisation de la relation température et mortalité par des modèles GAM et GLM. Synthèse à partir des données de Niakhar, Sénégal, 21p.
- Diouf, N.S., 2018 : Evolution spatio-temporelle des vagues de chaleur en Afrique de l'Ouest et risques sanitaires associés. Rapport de Master 2 Physiques et Applications, UASZ, Sénégal, 59p.
- Dos Santos, S., G.M. Bai, W. Banang, Y. Compaore, A. Deme, E. Diboulo, A.K. Diongue, A. Diop, B. Diop, R. Lalou, D. Sene, A. Sié, A. Soura, S. Janicot, 2019: Association between temperatures and mortality in the Sahel: The use of health and demographic surveillance systems. *Environmental Research*, to be submitted.

Fall G., 2016 - relation température et mortalité suivant les causes spécifiques de décès dans les zones de Niakhar (Sénégal) et de Nouna (Burkina Faso), Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du titre d'Ingénieur-statisticien, ENSAE-Dakar, Sénégal, 84 p.

Fontaine, B., S. Janicot, P.A. Monerie, 2013 : Recent changes in air temperature, heat waves occurrences and atmospheric circulation in Northern Africa. *J. Geophysical Research*, 118, 1-17, doi:10.1002/jgrd.50667.

Guichard, F., L. Kergoat, F. Hourdin, C. Léauthaud, J. Barbier, E. Mougin, B. Diarra, 2017: Climate warming observed in the Sahel since 1950. In *Rural societies in the face of climatic and environmental changes in West Africa*, 23-42. IRD Eds.

Largeroy, Y., F. Guichard, R. Roehrig, F. Couvreur, J. Barbier, 2018: The April 2010 North African heatwave: when the water greenhouse effect drives nighttime temperatures. *Climate dynamics*, in review.

Ly M, SB Traore, A Alhassane, B Sarr, 2013 : Evolution of some observed climate extremes in the West African Sahel. *Weather Clim. Extremes*, 1, 19-25.

Moron V, B Oueslati, B Pohl, S Rome, S Janicot, 2016: Trends of mean temperatures and warm extremes in Northern Tropical Africa (1961-2014) from observed and PPCA-reconstructed time series. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121, 5298-5319. doi:10.1002/2015JD024303

Moron, V., B. Oueslati, B. Pohl, S. Janicot, 2018 : Daily weather types in February-June (1979-2016) and temperature variations in tropical North Africa. *J. Applied Meteorol. and Climatol.*, 57, 1171-1195, doi: 10.1175/JAMC-D-17-0105.1.

Ndiaye, P.C., 2017 : Modélisation statistique de la relation paramètres météorologiques – mortalité. Cas du Sénégal et du Burkina Faso. Mémoire de Master 2 Mathématiques Appliquées, UGB, Sénégal, 83pp.

Niang S.N., 2017 – Analyse de la relation Température – Mortalité à Niakhar (Sénégal) à partir de modèles autorégressifs (ARIMAX). Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du titre d'Ingénieur-statisticien, ENSAE-Dakar, Sénégal, 85 p.

Oueslati B, B Pohl, V Moron, S Rome, S Janicot, 2017: Characterization of heat waves in the Sahel and associated physical mechanisms. *Journal of Climate*, 30, 3095-3115. doi:10.1175/JCLI-D-16-0432.1

Ouzeau G, JM Soubeyroux, M Schneider, R Vautard, S Planton, 2016: Heat waves analysis over France in present and future climate: Application of a new method on the EURO-CORDEX ensemble. *Climate Services*, 4, 1-12.

Ringard, J., B. Dieppois, S. Rome, A. Diedhiou, T. Pellarin, A. Konare, A. Diawara, D. Konate, B.K. Dje, G.L. Katiellou, I. Seidou Sanda, B. Hassane, T. Vischel, G.F. Garuma, G. Mengistu, M. Camara, A. Diongue, A.T. Gaye, L. Descroix, 2016: The intensification of thermal extremes in West Africa. *Global and Planetary Change*, 139, 66-77, <http://dx.doi.org/10.1016/j.globplacha.2015.12.009>.

Roehrig R, Bouniol D, Guichard F, Hourdin F, Redelsperger JL, 2013: The present and future of the West African monsoon: A process-oriented assessment of CMIP5 simulations along the AMMA transect. *J. Climate*, 26, 6471-6505, doi : 10.1175/JCLI-D-12-00505.1

Rome, S, B Fontaine, V Moron, B Pohl, C Jarry, A Diedhiou, 2014 : Analyse sémantique des vagues de chaleur ; exemple dans le Sahel Ouest et Central. Rapport interne ACASIS Milestone M3.1c.

Rome, S., G. Caniaux, J. Ringard, B. Dieppois, A. Diedhiou, 2015 : identification de tendances récentes et ruptures d'homogénéité des températures : exemple en Afrique de l'Ouest et sur le golfe de Guinée. *XXVIII Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Liège 2015.

Rome, S., B. Oueslati, V. Moron, B. Pohl, A. Diedhiou, 2016 : Les vagues de chaleur au Sahel : Définition et principales caractéristiques spatio-temporelles (1973-2014). *XXIX Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Besançon 2016.

Roucou P, B Pohl, N Martiny, A Ullmann, 2018: Durée et sévérité des vagues de chaleur dans les simulations CMIP5 (RCP4.5 et RCP8.5) en Afrique de l'Ouest. *Colloque final d'ACASIS, Saint Louis, Sénégal*, 9-11 Octobre 2018.

Sambou, M.J.G, S. Janicot, B. Pohl, D. Badiane, A.L. Dieng, A.T. Gaye, 2018: Heat wave occurrences over Senegal during spring: regionalization and synoptic patterns. *Int. J. Climatol.*, in revision.

Savado S.I. & Combere W., 2018 : Caractérisation et tendance des vagues de chaleur au Sahel : Cas du Burkina Faso. Rapport de fin d'études d'Ingénieur d'Etat de la Météorologie, IHFR Oran, Algérie, 86pp.

Thiandoum O., 2018 – Analyse descriptive et modélisation de la relation température – morbidité à Niakhar, Sénégal. 36p.

sYade S., 2018 – Construction et évaluation d'un indicateur de vulnérabilité à la chaleur. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du titre d'Ingénieur-statisticien, ENSAE-Dakar, Sénégal, 66 p.

## LISTE DES LIVRABLES

Quand le projet en comporte, reproduire ici le tableau des livrables fourni au début du projet. Mentionner l'ensemble des livrables, y compris les éventuels livrables abandonnés, et ceux non prévus dans la liste initiale.

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
M58	1	Produce homogenized synoptic data of Senegal and Burkina stations	Studies and Data	<u>ANACIM</u> & <u>DGM</u> , <u>CRC</u>	Rome et al 2015 Banang 2018 Camara-Toure 2018 Sawadogo-Combere 2018
M28	2	Publications on the spatial organization of HW events over West Africa	Drafts to be published	<u>CRC</u> , <u>CNRM-GAME</u> , <u>LOCEAN</u>	Rome et al 2014 Rome et al 2016 Ringard et al 2016 Moron et al 2016 Oueslati et al 2017 Barbier et al 2018 Sambou et al 2018
M58	3	Complementary analyses of Heat Wave characteristics based on supplementary local data	Reports & draft to be published	<u>LPAOSF</u> , <u>ANAM</u> , <u>ANACIM</u> , <u>UGB</u>	Camara-Toure 2018 Sawadogo-Combere 2018 Diouf 2018
M28	4	Publications on synoptic/atmospheric configurations associated with Heat Wave events	Drafts to be published	<u>CRC</u> , <u>CNRM-GAME</u> , <u>LOCEAN</u>	Oueslati et al 2017 Moron et al. 2018 Barbier 2017 Barbier et al 2018 Sambou et al 2018
M24	5	Publications on teleconnections and relationships with remote regions	Drafts to be published	<u>CRC</u> , <u>LOCEAN</u>	Moron et al 2016 Batté et al. 2018
M36	6	Publication on weather types	Draft to be published	<u>CRC</u> , <u>LOCEAN</u>	Moron et al 2018
M58	7	Publications on Heat Wave in CMIP5 simulations	Draft in progress	<u>CRC</u> , <u>CNRM-GAME</u>	Ringard et al 2016 Barbier 2017 Diedhiou et al 2018 Sambou et al colloque Casaman-sum 2018 Roucou et al au colloque final de Saint Louis
M30	8	Publication on Heat Wave in CORDEX-Africa simulations	Draft to be published	<u>CNRM-GAME</u>	Déqué et al 2016
M60	9	Publications on Heat Wave predictability and uncertainties	Drafts to be published	<u>CNRM-GAME</u> , <u>CRC</u> , <u>LOCEAN</u> , <u>LPAOSF</u>	Moron et al 2016 Batté et al 2018 Sambou PhD 2019
M36	10	Publication on EUROSIP and SPECS stream 2 experiments	Draft to be published	<u>CNRM-GAME</u>	Batté et al 2018

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
M18	11	Influences of water vapour, clouds and aerosols on surface radiation: data-based local studies	Report	<u>CNRM-GAME</u> , GET	Diallo et al 2017 Largeron et al 2018 Diallo 2018
M19	12	Diurnal fluctuations, boundary layers and clouds of heat waves	Report	<u>CNRM-GAME</u> , LMD	Guichard et al & Tomasini et al au colloque final de Saint Louis
M48	13	Documentation of heat waves at larger scales with satellite and synop datasets	Report	CNRM-GAME, LMD	Guichard et al & Tomasini et al au colloque final de Saint Louis
M48	14	Evaluation of the simulations	Report	<u>CNRM-GAME</u> , CRC, LMD	Largeron et al 2018 Diallo et al 2017 Diallo 2018
M58	15	Report of the capabilities of models to simulate the Heat Wave and recommendations for forecast systems	Report	<u>CNRM-GAME</u> , CRC, LMD	Roehrig, Couvreur, Tomasini, au colloque final de Saint Louis
M58	16	Reports of the improvement due to the new physical parametrizations in ARPEGE and LMDZ	Report	<u>LMD</u> , CNRM-GAME	Diallo et al 2017 Hourdin au colloque final de Saint Louis
M58	17	Assessment of robust changes in future Heat Wave	Report	<u>CNRM-GAME</u> , CRC, LMD	Déqué et al 2016 Diedhiou et al 2018 Roucou et al au colloque final de Saint Louis
M18 à M48	18	Analysis report on modeling temperature / humidity - mortality relationship in Niakhar	Report and Master report	<u>LPED</u>	Ba YA 2015 Diene D 2016,2017 Niang SN 2017 Ndiaye 2017
M30	19	Analysis report on modeling temperature / humidity - mortality relationship in Ouagadougou	Master report	<u>ISSP</u>	Bai GM 2016 Ndiaye 2017
M54	20	Analysis report on modeling temperature / humidity - mortality relationship in Nouna	Report	<u>CRSN</u>	Ndiaye 2017 Diboulo 2018 au colloque final de Saint Louis
M42	21	Analysis report on modeling temperature / humidity – causes of death relationship in Niakhar	Master report	<u>LPED</u>	Fall G 2016
M48	22	Analysis report on modeling temperature / humidity – diagnosed	Report	<u>LPED</u>	Thiandoum O 2018



Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
		morbidity relationship in Niakhar			
M56	23	Analysis report on vulnerability factors associated to heat-related death risk	Master Report	<u>LPED</u>	Yade S 2018
-	24	Synthesis report on participatory workshop	Report	<u>LPED</u>	Annulé dû à des retards dans les autres tâches
-	25	HDSS site reports on knowledge and perceptions of EHE and synthesis report	Reports	<u>LPED, ISSP, CRSN</u>	Annulé : la mise à disposition tardive (M54) des bases de données du Burkina ne nous a pas permis de faire la synthèse annoncée. Une petite partie de ces analyses se trouve dans le livrable 23.
-	26	HDSS site reports on adaptative capacities and protective behaviors against extreme heat, and synthesis report	Reports	<u>LPED, ISSP, CRSN</u>	Annulé : ce livrable recoupe dans ses objectifs le livrable 23. Il est supprimé en raison de cette redondance.
M50	27	Reports on the surveys related to the heat wave episode of May 2013 in Senegal	Master Reports	<u>CSE</u>	<u>Nouveau livrable.</u> Diallo S 2018 Ba D 2018 Barry A 2018
M12	28	T0+12 First workshops	Report	<u>ANACIM &amp; DGM</u>	
M58	29	Report or publication of the added value of HW diagnostics and weekly syntheses along the MISVA platform for HW monitoring and forecast over Senegal and Burkina	Report	<u>CNRM-GAME, CRC, ANACIM &amp; DGM</u>	Présenté lors du colloque final de Saint Louis
M58	30	Final workshop	Report	<u>ANACIM &amp; DGM</u>	Présenté lors du colloque final de Saint Louis
M58	31	Analysis of multi-scale decision-making processes chain	Report	<u>ANACIM &amp; DGM</u>	Présenté lors du colloque final de Saint Louis
M58	32	Weekly bulletins of meteorological Heat Wave analyses and forecasts over Senegal and Burkina	Bulletins	<u>ANACIM &amp; DGM</u>	<u>Nouveau livrable.</u> Publié chaque semaine de printemps de 2015 à 2018

## D IMPACT DU PROJET

*Ce rapport rassemble des éléments nécessaires au bilan du projet et plus globalement permettant d'apprécier l'impact du programme à différents niveaux.*

### D.1 INDICATEURS D'IMPACT

#### **Nombre de publications et de communications (à détailler en D.2)**

*Comptabiliser séparément les actions monopartenaies, impliquant un seul partenaire, et les actions multipartenaires résultant d'un travail en commun.*

*Attention : éviter une inflation artificielle des publications, mentionner uniquement celles qui résultent directement du projet (postérieures à son démarrage, et qui citent le soutien de l'ANR et la référence du projet).*

		<b>Publications multipartenaires</b>	<b>Publications monopartenaies</b>
<b>International</b>	<b>Revue à comité de lecture</b>	8	5
	<b>Ouvrages ou chapitres d'ouvrage</b>		
	<b>Communications (conférence)</b>	10	17
<b>France</b>	<b>Revue à comité de lecture</b>	2	
	<b>Ouvrages ou chapitres d'ouvrage</b>		
	<b>Communications (conférence)</b>	1	
<b>Actions de diffusion</b>	<b>Articles vulgarisation</b>		
	<b>Conférences vulgarisation</b>	1	2
	<b>Autres</b>		

Note : Le colloque final du projet ACASIS s'est tenu 9 au 11 octobre 2018 à l'Université Gaston Berger de Saint Louis (Sénégal). Il était ouvert au public de l'université. Le programme est donné en annexe à la fin de ce rapport. Toutes les présentations et posters sont accessibles sur le site web du projet :

[https://acasis.locean-ipsl.upmc.fr/doku.php?id=sessions\\_et\\_exposes](https://acasis.locean-ipsl.upmc.fr/doku.php?id=sessions_et_exposes)

#### **Autres valorisations scientifiques (à détailler en D.3)**

*Ce tableau dénombre et liste les brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet, du savoir faire, des retombées diverses en précisant les partenariats éventuels. Voir en particulier celles annoncées dans l'annexe technique).*

	<b>Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)</b>
<b>Brevets internationaux obtenus</b>	
<b>Brevets internationaux en cours d'obtention</b>	
<b>Brevets nationaux obtenus</b>	
<b>Brevets nationaux en cours d'obtention</b>	
<b>Licences d'exploitation (obtention / cession)</b>	
<b>Créations d'entreprises ou essaimage</b>	
<b>Nouveaux projets collaboratifs</b>	Alert-QAIRES, demande de financement en cours, programme ANR aapqq2019, porteur R. Lalou. Soumission prévue en Juin 2019 d'un dossier de JEAI (Jeune

	Equipe Associée de l'IRD) entre UGB/Saint Louis et l'UMR MERIT/Paris pour porter l'extension du projet ACASIS sur le volet Santé au Sénégal en incluant la composante Aérosols (poussières et polluants). Nouvelle collaboration avec la NOAA/USA en soutien pour l'organisation d'ateliers Climat-Santé au Sénégal incluant les services de la DGS (Direction Générale de la Santé). Poursuite de la collaboration internationale entamée en fin de projet avec le GHHIN (Global Heat Health Information Network) de WHO/WMO.
<b>Colloques scientifiques</b>	
<b>Autres (préciser)</b>	Bulletins hebdomadaires d'alerte aux vagues de chaleur publiés par l'ANACIM et la DGM chaque printemps.

## D.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Répertorier les publications résultant des travaux effectués dans le cadre du projet. On suivra les catégories du premier tableau de la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** en suivant les normes éditoriales habituelles. En ce qui concerne les conférences, on spécifiera les conférences invitées.

### Publications à comité de lecture :

- Barbier J., F. Guichard, D. Bouniol, F. Couvreur, R. Roehrig, 2018: Detection of intraseasonal large-scale heat waves: characteristics and historical trend during the Sahelian spring. *Journal of Climate*, doi: 10.1175/JCLI-D-17-0244.1
- Batté, L., C. Ardilouze, M. Déqué, 2018: Forecasting West African heat waves at subseasonal and seasonal time scales. *Monthly Weather Review*, 146, 889-907.
- Déqué M., S. Calanti, O.B. Christensen, A. Dell Aquila, C.F. Maule, A. Hensler, G. Nikulin, C. Teichmann, 2016: A multi-model climate response over tropical Africa at +2°C. *Climate Services*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cliser.2016.06.002>.
- Diallo, F.B., F. Hourdin, C. Rio, A.-K. Traore, L. Mellul, F. Guichard, L. Kergoat, 2017: The surface energy budget computed at the grid-scale of a climate model challenged by station data in West Africa. *JAMES*, doi: 10.1002/2017MS001081.
- Diba I., M. Camara, A. Diedhiou, J. Basse, H. Sabaly, S. Rome, 2018: Land cover change and extreme temperatures in the Sahel. *Theor. Appl. Climatology*, submitted.
- Diedhiou, A., A. Bichet, R. Wartenburger, S.I. Seneviratne, D.P. Rowell, M.B. Sylla, I. Diallo, S. Todzo, N.E. Touré, M. Camara, B. Ngounou Ngatchah, N.A. Kane, L. Tall, F. Affholder, 2018: Changes in climate extremes over West and Central Africa at 1.5°C and 2°C global warming. *Environm. Res. Lett.*, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac3e5>.
- Dos Santos, S., G.M. Bai, W. Banang, Y. Compaore, A. Deme, E. Diboulo, A.K. Diongue, A. Diop, B. Diop, R. Lalou, D. Sene, A. Sié, A. Soura, S. Janicot, 2019: Association between temperatures and mortality in the Sahel: The use of health and demographic surveillance systems. *Environmental Research*, submitted.
- Largeroy, Y., F. Guichard, R. Roehrig, F. Couvreur, J. Barbier, 2018: The April 2010 North African heatwave: when the water greenhouse effect drives nighttime temperatures. *Climate dynamics*, in review.
- Moron V, B Oueslati, B Pohl, S Rome, S Janicot, 2016: Trends of mean temperatures and warm extremes in Northern Tropical Africa (1961-2014) from observed and PPCA-reconstructed time series. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **121**, 5298-5319. doi:10.1002/2015JD024303
- Moron, V., B. Oueslati, B. Pohl, S. Janicot, 2018 : Daily weather types in February-June (1979-2016) and temperature variations in tropical North Africa. *J. Applied Meteorol. and Climatol.*, **57**, 1171-1195, doi: 10.1175/JAMC-D-17-0105.1.
- Oueslati B, B Pohl, V Moron, S Rome, S Janicot, 2017: Characterization of heat waves in the Sahel and associated physical mechanisms. *Journal of Climate*, **30**, 3095-3115. doi:10.1175/JCLI-D-16-0432.1
- Ringard, J., B. Dieppois, S. Rome, A. Diedhiou, T. Pellarin, A. Konare, A. Diawara, D. Konate, B.K. Dje, G.L. Katiellou, I. Seidou Sanda, B. Hassane, T. Vischel, G.F. Garuma, G. Mengistu, M. Camara, A. Diongue, A.T. Gaye, L. Descroix, 2016: The intensification of thermal extremes in West Africa. *Global and Planetary Change*, **139**, 66-77, <http://dx.doi.org/10.1016/globplacha.2015.12.009>

Rome, S., G. Caniaux, J. Ringard, B. Dieppois, A. Diedhiou, 2015 : identification de tendances récentes et ruptures d'homogénéité des températures : exemple en Afrique de l'Ouest et sur le golfe de Guinée. *XXVIII Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Liège 2015.

Rome, S., B. Oueslati, V. Moron, B. Pohl, A. Diedhiou, 2016 : Les vagues de chaleur au Sahel : Définition et principales caractéristiques spatio-temporelles (1973-2014). *XXIX Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Besançon 2016.

Sambou, M.J.G, S. Janicot, B. Pohl, D. Badiane, A.L. Dieng, A.T. Gaye, 2018: Heat wave occurrences over Senegal during spring: regionalization and synoptic patterns. *Int. J. Climatol.*, in revision.

#### Rapports complémentaires de jeunes chercheurs africains :

Ba Y.A., 2015 - Excès de mortalité imputable aux vagues de chaleur à Niakhar : Aide à la mise en place d'un système d'alerte canicule, Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du titre d'Ingénieur-statisticien, ENSAE-Dakar, Sénégal, 76p.

Ba, D., 2018 : Incidences sanitaires de la vague de chaleur (Mai 2013) dans les départements de Matam et Bakel : Approche géographique. Mémoire de Master 2 Espace-Sociétés-Développement, UCAD, Sénégal, 116p.

Bai, GM, 2016, Mortalité et vagues de chaleur au Sahel : cas de l'Observatoire de Population de Ouagadougou, mémoire de fin de cycle Ingénieur des Travaux Statistiques, Ecole Nationale de la Statistique et d'Analyse Economique (ENSAE), Dakar

Banang, W., 2018 : Caractérisation des vagues de chaleur au Sénégal et au Burkina Faso dans un régime de changement climatique : détermination des indicateurs et seuils. Mémoire de Master 2 Mathématiques Appliquées, UGB, Sénégal, 102p.

Barry, A., 2018 : Incidences sanitaires de la vague de chaleur (Mai 2013) dans les départements de Dagana et Podor : Approche géographique. Mémoire de Master 2 Espace-Sociétés-Développement, UCAD, Sénégal, 128p.

Camara C.A.T. & Toure M., 2018 : Caractérisation et tendance des vagues de chaleur au Sahel : Cas du Sénégal. Rapport de fin d'études d'Ingénieur d'Etat de la Météorologie, IHFR Oran, Algérie, 118p.

Diallo, S., 2018 : Incidences sanitaires de la vague de chaleur (Mai 2013) dans les départements de Louga et Linguère : Approche géographique. Mémoire de Master 2 Espace-Sociétés-Développement, UCAD, Sénégal, 136p.

Diene D.A., 2016 – La relation température et mortalité à Niakhar, Sénégal. Synthèse de l'analyse descriptive par régression locale. 34p.

Diene D.A., 2017 – Modélisation de la relation température et mortalité par des modèles GAM et GLM. Synthèse à partir des données de Niakhar, Sénégal, 21p.

Diouf, N.S., 2018 : Evolution spatio-temporelle des vagues de chaleur en Afrique de l'Ouest et risques sanitaires associés. Rapport de Master 2 Physiques et Applications, UASZ, Sénégal, 59p.

Fall G., 2016 - relation température et mortalité suivant les causes spécifiques de décès dans les zones de Niakhar (Sénégal) et de Nouna (Burkina Faso), Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du titre d'Ingénieur-statisticien, ENSAE-Dakar, Sénégal, 84 p.

Ndiaye, P.C., 2017 : Modélisation statistique de la relation paramètres météorologiques – mortalité. Cas du Sénégal et du Burkina Faso. Mémoire de Master 2 Mathématiques Appliquées, UGB, Sénégal, 83pp.

Niang S.N., 2017 – Analyse de la relation Température – Mortalité à Niakhar (Sénégal) à partir de modèles autorégressifs (ARIMAX). Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du titre d'Ingénieur-statisticien, ENSAE-Dakar, Sénégal, 85 p.

Savadogo S.I. & Combere W., 2018 : Caractérisation et tendance des vagues de chaleur au Sahel : Cas du Burkina Faso. Rapport de fin d'études d'Ingénieur d'Etat de la Météorologie, IHFR Oran, Algérie, 86pp.

Thiandoum O., 2018 – Analyse descriptive et modélisation de la relation température – morbidité à Niakhar, Sénégal. 36p.

Yade S., 2018 – Construction et évaluation d'un indicateur de vulnérabilité à la chaleur. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du titre d'Ingénieur-statisticien, ENSAE-Dakar, Sénégal, 66 p.

#### Thèses publiées :

Barbier J., 2017 : Extrêmes climatiques : le cas des vagues de chaleur au Sahel. Doctorat de l'Université de Toulouse, ED SDU2E Océan-Atmosphère-Climat, 313p.

Diallo, F.B., 2018 : Simulations multi-échelles de la saisonnalité des vagues de chaleur et des pluies de mousson en Afrique de l'Ouest. Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, ED129 Sciences de l'Environnement, 136p.

### Conférences invitées :

- Barbier, J., Guichard, F., Bouniol, D., Couvreur, F., Roehrig, R., 2018: Spring Sahelian heat waves: detection, characteristics and trends. *8th GEWEX Open Science Conference: Extremes and Water on the Edge*. Canmore, Canada, 6-11 mai 2018.
- Guichard, F., Barbier, J., Bouniol, D., Couvreur, F., Kergoat, L., Léauthaud, C., Roehrig, R., 2017: Temperature and heat wave multidecadal trends in the Sahel during the pre-monsoon season. Sixth International Workshop on Monsoons (IWM-6). Singapour, 13-17 Novembre 2017.
- Janicot et al., 2015: The ACASIS Project: A early warning system on Sahelian heat waves and their impacts on health. *Conference « Our common future under climate change »*; Session « Facing climate change in Sub-Saharan Africa ». Paris, 7-10 July 2015.
- Janicot S, V Moron, B Oueslati, B Pohl, S Rome, L Batté, 2016: Analysis of trends of mean temperatures and warm extremes in Northern Tropical Africa (1961-2014) and development of seasonal forecast schemes. *CLIVAR Open Science Conference*, Qingdao, China, 18-25 September 2016
- Janicot S., V. Moron, B. Oueslati, B. Pohl, S. Rome, R. Lalou, S. Dos Santos, 2017: Heat waves in Africa and India: a multidisciplinary approach. *European Geosciences Union*, Vienna, Austria, 23-28 April 2017
- Janicot, S. et al., 2018: The ACASIS project. *First Global Forum on Heat and Health*, organized by WHO/WHO Climate and Health Joint Office, Hong Kong, December 17-20, 2018.
- Oueslati B, B Pohl, V Moron, S Rome, 2015: Characterizing and understanding the Sahelian heat waves. *Conference « Our common future under climate change »*; Session « Facing climate change in Sub-Saharan Africa ». Paris, 7-10 July 2015
- Rome S, V Moron, B Oueslati, B Pohl, B Fontaine, A Diedhiou, 2015: Uses and limits of thermal indices: the case of Sahel. *Conference « Our common future under climate change »*; Session « Facing climate change in Sub-Saharan Africa ». Paris, 7-10 July 2015

### Conférences (autres) :

- Barbier J., F. Guichard, F. Couvreur, D. Bouniol, R. Roehrig, E. Mougine and C Leauthaud, 2015: Phenomenology and Thermodynamical Characteristics of West African Heat Waves 2014 AGU Fall Meeting, 14-18 dec 2015, San Francisco, USA
- Barbier et al., 2017 : Sahelian springtime heat waves and their evolution over the past 60 years. EGU2017-9496. EGU General Assembly 2017
- Barbier, J, Guichard F, Bouniol D, Couvreur F, Roehrig R, 2018 : Spring Sahelian heat waves: detection, characteristics and trends. 8<sup>e</sup> GEWEX Open Science Conference : Extremes and water on the edge. 6-11 May 2018, Canmore, Canada.
- Barbier, J, Guichard F, Bouniol D, Couvreur F, Roehrig R, 2018 : Spring Sahelian heat waves: detection, characteristics and trends. European Geoscience Union (EGU), General Assembly 2018, 8-13 April 2018, Vienna, Austria.
- Diene, D.A., Lalou, R., Diongue, AK, Deme A, Dos Santos S., 2018 : Heat-related mortality in the Sahel. Who is sensitive to short- and long-term heat exposures ?. In *EGU General Assembly Conference*, Vienna (Austria), 8-13 April 2018.
- Guichard F., J. Barbier, D. Bouniol, F. Couvreur, O. Geoffroy, R. Roehrig, M. Tomasini, C. Leauthaud and L.Kergoat, 2014: Physical Processes Shaping Sahelian Heat Waves: Analysis Of Selected Case Studies. 2014 AGU Fall Meeting, 15-19 dec 2014, San Francisco, USA.
- Guichard et al. Temperature in the Sahel, 2015 : mean climate and multi-decadal warming in observations and climate simulations CMIP5. *Conférence « Our common future under climate change »*; session « Facing climate change in Sub-Saharan Africa ». Paris, 7-10 July 2015.
- Guichard F, Barbier J, Bouniol D, Couvreur F, Kergoat L, Léauthaud C, Roehrig R, 2017 : Temperature and heat wave multidecadal trends in the Sahel during the pre-monsoon season. 6<sup>e</sup> International Workshop on Monsoons (IWM-6), 13-17 November 2017, Singapore.
- Guichard F, Tomasini M, Couvreur F, Barbier J, Llargeron Y, Roehrig R, Kergoat L, Léauthaud C, 2018 : Numerical simulations of an observed Sahelian heat wave: surface energy budget and sensitivity to the representation of convection. European Geoscience Union (EGU), General Assembly 2018, 8-13 April 2018, Vienna, Austria.
- Janicot et al. Le projet ACASIS. Journées Portes Ouvertes du Laboratoire Mixte International ECLAIRS, Dakar, 13 décembre 2014.
- Janicot, S et al., 2018 : Le projet ACASIS. *Journées Climat et Impacts*. Session Climat-Santé. Université Paris-Sud Orsay, 29-30 Novembre 2018.
- Lalou, R., Diene DA, Thiandoum, O., Janicot, S., 2018: Is Heat stress really a health problem for those who live in hot countries? Heat acclimatization and vulnerabilities people in the Sahel. The case of Senegal. *First Global Forum on Heat and Health*, Hong-Kong, 17-20 December 2018.



Leauthaud et al., 2015: Observed multidecadal changes in air temperature from 1950 to 2010 in the Sahel. Conférence « Our common future under climate change »; session « Facing climate change in Sub-Saharan Africa ». Paris, 7-10 July 2015.

Oueslati B, 2015 : Train du climat, mini-conférence sur les vagues de chaleur au Sahel, Dijon, France

Oueslati B, 2015 : Journée grand public de l'Expérimentarium, Dijon, France

Oueslati B, B Pohl, V Moron & S Rome, 2016: Characterization of Heat Waves in the Sahel and associated mechanisms. *European Geosciences Union*, Vienna, Austria, 17-22 April 2016

Oueslati B, M-J G Sambou, B Pohl, S Rome, V Moron, S Janicot, 2016 : Les vagues de chaleur au Sahel : caractérisation, mécanismes, variabilité. *XXIXème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Oueslati B, B Pohl, V Moron, S Rome, 2016: Characterization of Heat Waves in the Sahel and associated mechanisms. *European Geosciences Union*, Vienna, Austria, 17-22 April 2016

Besançon, France, 6-8 July 2016

Perraud J, H. Brogniez and S. Bastin, 2015: Sahelian heat waves and their links with tropospheric humidity and large-scale transport. International Conference on the "Water and Energy cycles in the Tropics", Paris, octobre 2015

Rome, S., G. Caniaux, J. Ringard, B. Dieppois, A. Diedhiou, 2015 : identification de tendances récentes et ruptures d'homogénéité des températures : exemple en Afrique de l'Ouest et sur le golfe de Guinée. *XXVIII Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Liège 2015.

Rome, S., B. Oueslati, V. Moron, B. Pohl, A. Diedhiou, 2016 : Les vagues de chaleur au Sahel : Définition et principales caractéristiques spatio-temporelles (1973-2014). *XXIX Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Besançon 2016.

Sambou, M-J G, S Janicot, D Badiane, B Pohl, A L Dieng & A T Gaye, 2017: Heat waves in Senegal : detection, characterization and associated processes. *European Geosciences Union*, Vienna, Austria, 23-28 April 2017

Sambou, M-J G, S Janicot, D Badiane, B Pohl, A L Dieng & A T Gaye, 2018: Heat wave evolution in Senegal under climate change. *Colloque Casamansum*, Ziguinchor, Sénégal, 3-5 Mai 2018

Tomasini, M., F. Guichard, F. Couvreur, 2016: Evaluation de la simulation 3D d'un cas réel de canicule d'avril 2010 sur l'Afrique de l'Ouest. Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère 2016. 18-22 janvier 2016.

Tomasini, M., F. Guichard, F. Couvreur, Barbier J, 2018: Simulation of the heat wave episode observed in April 2010 over the Sahel with a mesoscale model. European Geoscience Union (EGU), General Assembly 2018, 8-13 April 2018, Vienna, Austria.

### D.3 LISTE DES ÉLÉMENTS DE VALORISATION

*La liste des éléments de valorisation inventorie les retombées (autres que les publications) décomptées dans le deuxième tableau de la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** On détaillera notamment :*

- brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet.
- logiciels et tout autre prototype
- actions de normalisation
- lancement de produit ou service, nouveau projet, contrat,...
- le développement d'un nouveau partenariat,
- la création d'une plate-forme à la disposition d'une communauté
- création d'entreprise, essaimage, levées de fonds
- autres (ouverture internationale,..)

*Elle en précise les partenariats éventuels. Dans le cas où des livrables ont été spécifiés dans l'annexe technique, on présentera ici un bilan de leur fourniture.*

Produits de prévision développés par les agences météorologiques ANACIM et DGM du Sénégal et du Burkina Faso pour un système d'alerte opérationnel avec diagnostics adaptés aux vagues de chaleur au Sahel. Développé en collaboration avec CNRM-GAME de Météo-France. Disponibilité sur le site web : <http://acasis.sedoo.fr/>  
De ces produits, des bulletins hebdomadaires ont été publiés chaque semaine de printemps de 2015 à 2018.

## D.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTÉS EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Ce tableau dresse le bilan du projet en termes de recrutement de personnels non permanents sur CDD ou assimilé. Renseigner une ligne par personne embauchée sur le projet quand l'embauche a été financée partiellement ou en totalité par l'aide de l'ANR et quand la contribution au projet a été d'une durée au moins égale à 3 mois, tous contrats confondus, l'aide de l'ANR pouvant ne représenter qu'une partie de la rémunération de la personne sur la durée de sa participation au projet.

Les stagiaires bénéficiant d'une convention de stage avec un établissement d'enseignement ne doivent pas être mentionnés.

Les données recueillies pourront faire l'objet d'une demande de mise à jour par l'ANR jusqu'à 5 ans après la fin du projet.

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
OUESLAT I Boutheina	F	boutheina.oueslati-khalfaoui@ipsi.fr		Doctorat	Tunisie puis France	Post-doc (LMD 21 mois)	CRC	Post-doc	20	15/06/2016	Post-doc	SA EDF	Chercheur	-	Oui
DIALLO Binta	F	Binta.diallo@lmd.jussieu.fr		M2	Côte d'Ivoire puis France		LOCEAN		42		Post-doc	EPST	Chercheur	Oui	Oui
BARBIER Jessica	F	Jessica.barbier@meteo.fr		Ingénieur ENSEEIHT	France		CNRS	Doctorat	36	31/10/2017	Ingénieur Météo-France	EPA	Ingénieur	Oui	Oui
MIERE Arnault	H	Arnault.miere@obs-mip.fr		Licence informatique	France	IE	OMP	IE	13						
LARGERON Yann	H	Yann.largeron@meteo.fr		Thèse	France	Post-doc CNRM	CNRM	Post-doc	11	31/03/2017	Post-doc	EPA	Chercheur	Oui	Oui
SENE Daouda Amad	H	daoudaamad@gmail.com		Master	Hors UE	1 an	LPED	Ingénieur statisticien	36	31/12/2018	Ingénieur, Performance Group, Sénégal	PME	Ingénieur	Non	Oui
TOULAO Grâce-à-Dieu	H	grace-a-dieu.toulao@ird.fr		Master	Hors UE	6 mois	LPED	Technicien	48	31/12/2018					
MBAYE Demba	H	mbayedemba87@gmail.com		Master	Hors UE		LPED	Doctorant	36	01/09/2019	En cours de thèse				

FAYE Mbaye	H	mbyebabacar0807@g48mail.com		Master	Hors UE		LPED	Doctorant	36	01/09/2019	En cours de thèse				
NDIAYE Mamadou	H	Mamadou-yatoudeme.ndiaye@ird.fr		Baccalauréat	Hors UE	25 ans	LPED	Gestionnaire	60	31/12/2018					
OUMY Thiandoum	F	oumythiandoum@yahoo.fr		Master	Hors UE	1 an11	LPED	Ingénieur statisticien	36	30/06/2018	Ingénieur ANSD	Autre Public	Ingénieur	Non	Non

### **Aide pour le remplissage**

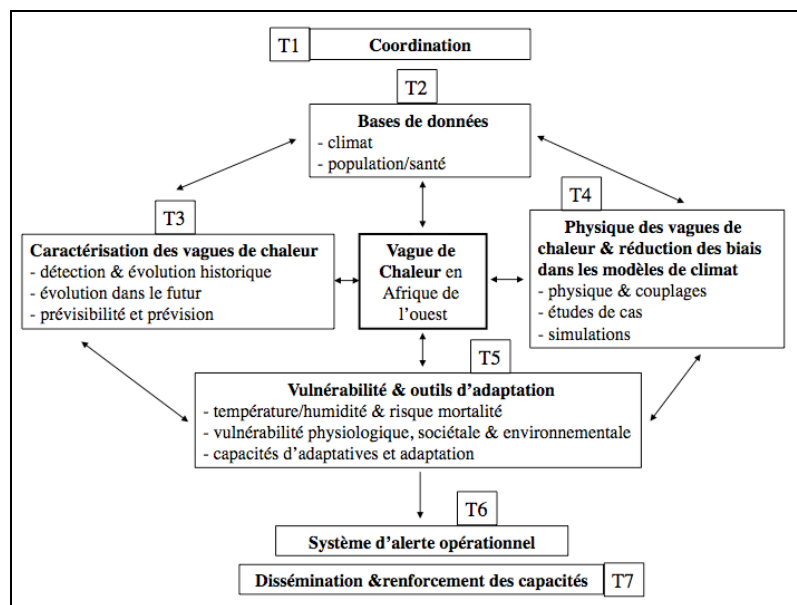
- (1) **Adresse email** : indiquer une adresse email la plus pérenne possible
- (2) **Poste dans le projet** : post-doc, doctorant, ingénieur ou niveau ingénieur, technicien, vacataire, autre (préciser)
- (3) **Durée missions** : indiquer en mois la durée totale des missions (y compris celles non financées par l'ANR) effectuées sur le projet
- (4) **Devenir professionnel** : CDI, CDD, chef d'entreprise, encore sur le projet, post-doc France, post-doc étranger, étudiant, recherche d'emploi, sans nouvelles
- (5) **Type d'employeur** : enseignement et recherche publique, EPIC de recherche, grande entreprise, PME/TPE, création d'entreprise, autre public, autre privé, libéral, autre (préciser)
- (6) **Type d'emploi** : ingénieur, chercheur, enseignant-chercheur, cadre, technicien, autre (préciser)
- (7) **Lien au projet ANR** : préciser si l'employeur est ou non un partenaire du projet
- (8) **Valorisation expérience** : préciser si le poste occupé valorise l'expérience acquise pendant le projet.

*Les informations personnelles recueillies feront l'objet d'un traitement de données informatisées pour les seuls besoins de l'étude anonymisée sur le devenir professionnel des personnes recrutées sur les projets ANR. Elles ne feront l'objet d'aucune cession et seront conservées par l'ANR pendant une durée maximale de 5 ans après la fin du projet concerné. Conformément à la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée, relative à l'Informatique, aux Fichiers et aux Libertés, les personnes concernées disposent d'un droit d'accès, de rectification et de suppression des données personnelles les concernant. Les personnes concernées seront informées directement de ce droit lorsque leurs coordonnées sont renseignées. Elles peuvent exercer ce droit en s'adressant l'ANR (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Contact>).*



Pour mener ce projet à bien, un consortium international et pluridisciplinaire a été constitué, rassemblant climatologues, modélisateurs du climat, météorologistes, biostatisticiens, démographes, épidémiologistes, médecins et géographes, issus de laboratoires de recherche et d'agences météorologiques de France, Sénégal et Burkina Faso. Un certain nombre de jeunes chercheurs de ces pays ont aussi été fortement impliqués dans le projet.

Le projet a été organisé en plusieurs axes d'investigation. Un travail spécifique a été développé pour l'acquisition, l'analyse de qualité et la mise en place de bases de données climatiques et épidémiologiques qualifiées (T2). La caractérisation des vagues de chaleur sur le Sahel et de leurs structures atmosphériques a été réalisée, ainsi que leur évolution durant les dernières décennies (T3). Leur prévisibilité à court et moyen terme a été évaluée à partir d'ensembles multi-modèles de prévision. Pour les échéances plus longues, les simulations climatiques historiques et futures qui servent de base aux rapports du GIEC ont été analysées pour évaluer l'évolution des vagues de chaleur dans les décennies à venir sur le Sahel (T3). Les processus physiques à l'origine des biais dans ces modèles de climat ont été étudiés plus précisément (T4). En parallèle, des études épidémiologiques associées à des enquêtes de terrain ont été menées sur les sites de suivi démographique et de santé au Sénégal et au Burkina afin d'évaluer la vulnérabilité physiologique et sociale des populations aux caractéristiques physiques des vagues de chaleur et de définir des indicateurs biométéorologiques adaptés (T5). Enfin un système d'alerte a été mis en place, fruit d'une collaboration entre les agences météorologiques (T6). Des recommandations spécifiques à l'arrivée de tels épisodes de canicule pourront être diffusées jusqu'aux services sanitaires et aux populations.



## Objectifs du colloque

L'objectif de ce colloque de clôture est de présenter les résultats obtenus après 5 années de travaux, et de proposer des recommandations aux autorités institutionnelles présentes pour une meilleure anticipation et adaptation à ces vagues de chaleur qui sont amenées à se renforcer sous l'influence du réchauffement climatique.

## Résultats attendus

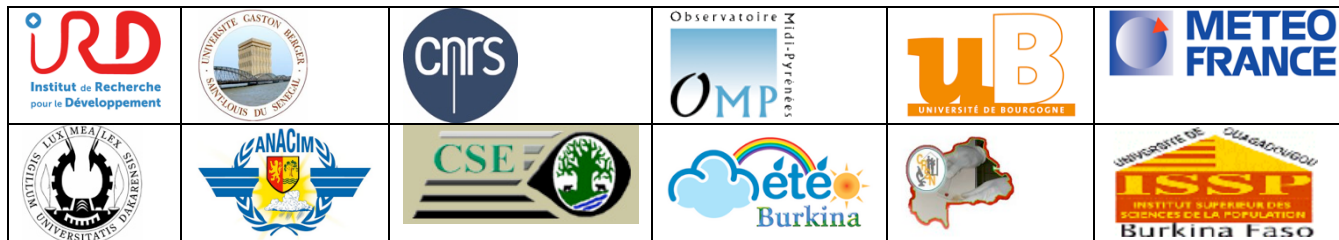
Le colloque permettra de présenter les principaux résultats de recherche obtenus, de présenter le fonctionnement du système de prévision mis en place, de dialoguer avec les autorités institutionnelles autour de ces résultats et des recommandations qui en découlent, et de fixer des perspectives pour poursuivre et étendre ces recherches.

**Institut financeur :** Agence Nationale de la Recherche



**Laboratoires et Universités partenaires :**

France : IRD, CNRS, OMP, UB, METEO-France ; Sénégal : ANACIM, UCAD, UGB, CSE ;  
Burkina Faso : ANAM, CRSN, ISSP.





## MARDI 9 OCTOBRE

**08:30-09:00 : Accueil des participants, badges et documents de travail**

**09:00-09:50 : Séance d'ouverture**

- Représentant de l'IRD à Dakar
- Représentant du Ministère de la Santé
- Chef de projet ACASIS
- Mot de bienvenue (Recteur de l'UGB)

**09:50-10:00 : Le déroulé du colloque (S. JANICOT)**

**10:00-10:30 : Le climat au Sahel et son évolution future (F. HOURDIN)**

**10:30-11:00 : Pause-café**

**11:00-13:00 : T3 - Caractérisation des vagues de chaleur I – variabilité, prévision (B. POHL)**

**11:00-11:25** Benjamin POHL : Présentation générale du T3 + Synthèse de travaux des absents

**11:25-11:50** Françoise GUICHARD (travail de Jessica BARBIER) : Vagues de chaleur au printemps sahélien: détection, caractéristiques et tendances climatiques

**11:50-12:15** Marie-Jeanne Gnacoussa SAMBOU-CISSOKHO : Vagues de chaleur printanières au Sénégal : régionalisation, variabilité synoptique et prévisibilité météorologique

**12:15-12:40** Lauriane BATTE : Prévision des vagues de chaleur sahéliennes de printemps aux échelles saisonnière et sous-saisonnière

**12:40-13:00** Wassila THIAW : Prévisions sous-saisonnières expérimentales de vagues de chaleur en Afrique

**13:00-14:30** : *Pause-déjeuner*

**14:30-16:30** : **T3 - Caractérisation des vagues de chaleur II – tendances et changement climatique** (B. POHL)

**14:30-14:50** Kiswendsida H GUIGMA : Vagues de chaleur sahéliennes: comparaison d'indices de confort thermique au Sahel

**14:50-15:10** Wendlasida Sandrine COMBERE et Sidikieta Idrissa SAVADOGO : Les caractéristiques et la tendance des vagues de chaleur au Burkina-Faso

**15:10-15:30** Mory TOURE et Cheikh Ahmet Tidiane CAMARA : Caractérisation statistique des vagues de chaleur au Sénégal

**15:30-15:50** Lauriane BATTE (travail de Michel DEQUE) : Vagues de chaleur en Afrique tropicale dans un monde à +2°C

**15:50-16:10** Arona DIEDHIOU : Variabilité intrasaisonnière des températures extrêmes dans les modèles CORDEX

**16:10-16:30** Présentation des posters (T3, T4, T5, T6)

**16:30-17:00** *Pause-café*

**17:00-18:00** : **T3 – Perspectives, débats** (B. POHL)

Débat & perspectives

## **MERCREDI 10 OCTOBRE**

**08:30-10:30** : **T5 - Caractérisation et mesure des Impacts de la chaleur extrême sur la santé des populations I** (R. LALOU)

**08:30-08:50** Richard LALOU : La relation Température santé : quels enjeux pour l'Afrique tropicale. Une synthèse introductive

- Thème 1 : Caractérisation de la relation température et morbidité -

**08:50-09:10** Stéphanie DOS SANTOS, Guy Martial BAI, Yacouba COMPAORE, Abdramane SOURA: Chaleur et fréquentation des structures sanitaires en milieu urbain, le cas de Ouagadougou

**09:10-09:30** Ibrahima SY : Anomalies de températures et risques sanitaires dans les régions Nord du Sénégal

**09:30-09:50** Oumy THIANDOUM : Changements climatiques, santé et maladies infectieuses au Sénégal

- Thème 2 : Exposition des populations à la chaleur intra-domiciliaire -

**09:50-10:10** Kassoum DIANOU, Yacouba COMPAORE, Stéphanie DOS SANTOS, Abdramane SOURA: Le cas de Ouagadougou, Burkina Faso

**10:10-10:30** Richard LALOU: Le cas de Niakhar, Sénégal

**10:30-11:00** *Pause-café*

**11:00-13:00 : T5 - Caractérisation et mesure des Impacts de la chaleur extrême sur la santé des populations II** (Pr Abdou Ka DIONGUE)

- Thème 3 : Modélisation de la relation température – mortalité : Effet de la durée d'exposition, effet retards, effets des vagues de chaleur -

**11:00-11:25** Daouda DIENE : La mortalité associée à la chaleur au Sénégal : qui est sensible à une exposition à la chaleur de courte et de longue durée ?

**11:30-11:55** Mbaye FAYE : Impact de la canicule sur la mortalité journalière selon différentes définitions des vagues de chaleur

**11:55-12:20** Eric DIBOULO : Détection des effets retards dans de l'association entre la chaleur et la mortalité au Burkina Faso (présentée par Daouda DIENE)

**12:20-12:50** Demba MBAYE : La relation température – mortalité : une application d'un modèle de Poisson conditionnel autorégressif

**12:50-13:00** **Photo souvenir**

**13:00-14:30** : *Pause-déjeuner*

**14:30-16:30 : T5 - Caractérisation et mesure des Impacts de la chaleur extrême sur la santé des populations III**  
(Ibrahima SY)

- Thème 4 : Vulnérabilité des populations à la chaleur extrême -

**14:30-14:55** Stéphanie DOS SANTOS, Yacouba COMPAORE, Kassoum DIANOU, Abdramane SOURA: Perceptions des risques, vulnérabilité et adaptation à la chaleur extrême à Ouagadougou

**14:55 - 15:20** Pascal ZABRE : Vulnérabilité, perceptions des risques liés aux vagues de chaleurs et les mesures d'adaptation dans le SSDS de Nouna, Burkina Faso

**15:20 – 15:40** Sambade YADE: Elaboration et évaluation d'un indicateur de vulnérabilité physiologique à la chaleur (sensibilité, exposition et adaptation) à partir de 3 enquêtes (Niakhar, Nouna, Ouagadougou)

**15:40-17:00**      **Session Posters de la conférence**

**16:30-17:00**      *Pause-café*

**17:00-18:00 : T5 – Perspectives, débats (R. LALOU)**  
Débat, partage d'expériences & perspectives

**JEUDI 11 OCTOBRE**

**08:30-10:30 : T4 – Physique des vagues de chaleur et réduction des biais des modèles (F. GUICHARD & F. HOURDIN)**

**08:30-08:40** Françoise GUICHARD : Présentation générale du T4

**08:40-08:50** Kiswendsida H GUIGMA : Analyse des processus physiques associés aux vagues de chaleur au Sahel

**08:50-09:00** Françoise GUICHARD : Etudes observationnelles - Analyse statistique de vagues de chaleur sahéniennes (réanalyses et données satellitaires)

**09:00-09:10** Romain ROEHRIG : Analyse du cas d'étude d'Avril 2010 : Présentation générale

**09:10-09:25** Mireille TOMASINI : Analyse du cas d'étude d'Avril 2010 : Simulation numérique du cas d'étude avec MesoNH: sensibilité à la représentation de la convection précipitante

**09:25-09:40** Fleur COUVREUX : Analyse du cas d'étude d'Avril 2010 : Intercomparaison des simulations du cas d'études (modèles régionaux et globaux)

**09:40-09:55** Binta DIALLO: Modélisation climatique : Simulations LMDZ

**09:55-10:05** Frédéric HOURDIN : Introduction à la discussion

**10:05-10:30 : T4 – Perspectives, débats (F. GUICHARD & F. HOURDIN)**

Débat & perspectives

**10:30-11:00** *Pause-café*

**11:00-13:00 : T6 – Systèmes d'alerte opérationnels (P. NGOR NDIAYE)**

**11:00-11:30** Romain ROEHRIG : Suivi et prévision des vagues de chaleur au Sahel grâce à la plateforme MISVA

**11:30-12:00** Papa NGOR NDIAYE : Vers un système d'alerte précoce des vagues de chaleur au Sénégal (ANACIM)

**12:00-12:30** Alfred DANGO : Vers un système d'alerte précoce des vagues de chaleur au Burkina Faso (ANAM)

**12:30-13:00 : T6 - Perspectives, débats (P. NGOR NDIAYE)**

Discussion sur la suite à donner, la pérennisation de ces activités, le lien avec les autres institutions

**13:00-14:30 : Pause-déjeuner**

**14:30-15:45 : Discussion finale (S. JANICOT & TBD)**

Discussion générale prospective et recommandations/messages

### 15:45-16:00 : Clôture du colloque (TBD)

- Mot de clôture du chef de projet ACASIS
- Mot de clôture du représentant du Ministère de la Santé
- Mot de clôture du représentant UGB

### Liste Posters

- P3.1** MJG. SAMBOU-CISSOKHO, S. JANICOT, B. POHL, D. BADIANE, AT. GAYE : Mean temperature extremes evolution in Senegal under climate change
- P3.2** P. ROUCOU, B. POHL, N. MARTINY, A. ULLMANN : Durée et sévérité des vagues de chaleurs dans les simulations CMIP5 (RCP4.5 et 8.5) en Afrique de l'Ouest
- P3.3** M. TOURE, CAT. CAMARA, H. ABANE, M. HAOUARI : Caractérisation Statistique des vagues de chaleur au Sénégal
- P3.4** WS. COMBERE, SI. SAVADOGO : Characterisitcs and evolution of heat waves in Burkina Faso
- P4.1** M. TOMASINI, F. GUICHARD, F. COUVREUX, J. BARBIER : Simulation of the heat wave episode observed in April 2010 over the Sahel with a mesoscale model
- P4.2** F. GUICHARD, M. TOMASINI, F. COUVREUX, J. BARBIER, Y. LARGERON, R. ROEHRIG, L. KERGOAT, C. LEAUTHAUD : Simulation numérique d'une vague de chaleur observée au Sahel: bilan d'énergie à la surface et sensibilité à la représentation de la convection atmosphérique
- P4.3** J. BARBIER, F. GUICHARD, D. BOUNIOL, F. COUVREUX, R. ROEHRIG : Vagues de chaleur au printemps sahélien: détection, caractéristiques et tendances climatiques
- P4.4** FB.DIALLO, F. HOURDIN, C. RIO, AK. TRAORE, L. MELLUL, F. GUICHARD, L. KERGOAT : Using in-situ observations to identify sources of surface energy biases in climate models: focus on West Africa
- P4.5.** K. GUIGMA, M. TODD, Y. WANG : Heatwaves in the Sahel : Comparison of thermal indices and physical processes
- P5.1** B. CISSE, I. SY, JA. NDIONE, A. BARRY, D. BA, S. DIALLO : Vagues de chaleur et risques sanitaires dans les départements du nord et nord-est du Sénégal