



Ministère de l'Enseignement supérieur
et de la Recherche Scientifique

REPUBLIQUE DU MALI
Un Peuple – Un But – Une Foi

Université des Sciences, des Techniques
et des Technologies de Bamako

Faculté de Médecine et d'Odontostomatologie

DER de Santé Publique et Spécialités

N° DERSP/FMOS/USTTB

Mémoire

Master en Santé Publique

Option Épidémiologie

Année Universitaire 2018 - 2019

Sujet

**Facteurs associés à la fluctuation du paludisme en zone
désertique, cas du district sanitaire de Bourem, Gao, Mali
de 2014 à 2018**

Présenté et soutenu le

Par :

Dr IBRAHIMA BERTHE

Président :
Membre :
Directeur : Pr ISSAKA SAGARA
Co-directeur : Dr MOCTAR TOUNKARA

Table des matières

Table des matières	I
Remerciements	II
Abréviations	III
Summary	III
1. Introduction	1
2. Objectifs	3
2.1. Objectif Général :	3
2.2. Objectifs spécifiques :	3
3. Cadre conceptuel	3
5. Matériels et Méthodes	11
5.1. Cadre de l'étude :	11
5.2. Type d'étude :	12
5.3. Période d'étude :	12
5.4. Population d'étude :	12
5.5. Échantillonnage :	13
5.6. Techniques et outils de collecte des données :	13
5.6.1. Techniques de collecte des données :	13
5.6.2. Outils de collectes des données :	15
5.7. Saisie et analyse des données :	15
5.7.1. Saisie des données :	15
5.7.2. Analyse des données :	15
5.8. Définitions de certains termes :	17
5.9. Considérations éthiques :	17
6. Résultats	18
6.1. Description des séries temporelles	18
6.2. Analyse en composante principale	22
6.3. Modélisation de l'incidence du paludisme avec les facteurs météorologiques et la hauteur du fleuve	24
6.4. Distribution spatio-temporelle des clusters à haut risque de transmission	26
6.5. Explication des clusters à haut risque de transmission du paludisme	29
7. Discussions	30
8. Conclusion - Recommandations	34
Références bibliographiques	36
Annexes	i

Remerciements

Nous remercions Dieu pour nous avoir donné l'énergie et la santé de mener à terme cette formation.

Tout d'abord, nous tenons à remercier notre Directeur de mémoire, le Pr Issaka SAGARA, Maître de Recherche, Enseignant Chercheur au MRTC, pour nous avoir accordé son temps et ses connaissances malgré ses multiples occupations ; notre co-directeur, le Dr Moctar TOUNKARA, Maître-assistant, Enseignant chercheur au DERSP, pour sa disponibilité, sa confiance et pour nous avoir initié à la recherche qualitative.

Nous remercions tout le personnel et enseignants de la Faculté de Médecine et d'Odontostomatologie (FMOS), notamment ceux du Département d'Études, de Recherche en Santé Publique et Spécialités pour les connaissances transmises.

Nous remercions sincèrement le Pr Jean GAUDART, Enseignant Chercheur à Aix-Marseille Université, pour la transmission des outils nécessaires à la réussite de ce mémoire.

Nous remercions le Pr Hamadoun SANGHO, Chef de DERSP pour nous avoir encouragé à faire ce Master et pour toutes les connaissances transmises.

Nos remerciements vont aussi à l'endroit du Dr Cheick Abou Coulibaly, Dr Oumar SANGHO, Dr Fatou DIAWARA pour leur écoute attentive et apports à la réalisation de ce document.

Nous remercions également l'équipe du MRTC Bamako dont le Pr Nafomon SOGOBA, M. Makan KEITA, M. Mathias DOLO et le Dr Mady CISSOKO pour leurs accompagnements.

Nos remerciements vont à l'endroit de toutes les personnes qui ont contribué à ce travail, notamment tous les directeurs techniques des CSCOM du cercle de Bourem, le chargé SLIS de Bourem, l'équipe de la direction régionale de la santé de Gao et l'équipe de la direction nationale de l'hydraulique pour la collecte des données.

A toute l'équipe de la section surveillance épidémiologique de la Direction Générale de la Santé Publique (DGSP), nous disons merci pour l'accompagnements.

Un grand merci à tous les camarades du master, promotion 7M2 pour votre soutien tout au long de cette formation.

Enfin un remerciement particulier à notre famille pour leur soutien et sacrifice : Mme BERTHE Fatoumata SISSOKO, notre fille Aichata et son frère Abdrahamane, notre mère Aichata COULIBALY, nos frères et sœurs dont Abou, Mohamed, Abdoul Karim, Bintou.

Abréviations

AGL/LGA	Zone de Gouvernement Local
CPS	Chimio prévention du paludisme saisonnier
CSCom	Centre de Santé Communautaire
CSRéf	Centre de Santé de Référence
dm	décimètre
DTC	Directeur Technique de Centre
GAM	Modèle général additif
GE	Goutte Épaisse
Hbts	Habitants
HFIQR	Hauteur interquartile hebdomadaire du niveau du fleuve
HFmax	Hauteur maximale hebdomadaire du niveau du fleuve
HFmax	Hauteur du niveau du fleuve maximale hebdomadaire
HFmed	Hauteur médiane hebdomadaire du niveau du fleuve
HFmed	Hauteur du niveau du fleuve moyenne hebdomadaire
HFmin	Hauteur minimale hebdomadaire du niveau du fleuve
HFmin	Hauteur du niveau du fleuve minimale hebdomadaire
Hfmoy	Hauteur moyenne hebdomadaire du niveau du fleuve
HRIQR	Humidité relative interquartile hebdomadaire
Hrmax	Humidité relative maximale hebdomadaire
Hrmed	Humidité relative médiane hebdomadaire
Hrmin	Humidité relative minime hebdomadaire
Hrmoy	Humidité relative moyenne hebdomadaire
IC	Intervalle de confiance
Km	Kilomètre
MILD	Moustiquaire imprégnée d'insecticide de longue durée
mm	Millimètre
MRTC	Malaria Research and Training Center
Nb_pluie	Nombre d'événement pluvieux
NDVI	Indice de Végétation par Différence Normalisée
OCHA	Office for the Coordination of Humanitarian Affairs

OMS	Organisation Mondiale de la Santé
OR	Odds Ratio
PNLP	Programme National de Lutte contre le Paludisme
PTF	Période de transmission faible
PTH	Période de transmission haute
PTI	Période de transmission intermédiaire
QGIS	Quantum Geographic Information System
RGPH	Recensement Général de la Population et de l'Habitat
RR	Risque Relatif
SLIS	Système Local d'Information Sanitaire
TDR	Test de Diagnostic Rapide du paludisme
TmaxIQR	Température interquartile hebdomadaire de la température maximale
Tmaxmax	Température maximale hebdomadaire de la température maximale
Tmaxmed	Température médiane hebdomadaire de la température maximale
Tmaxmin	Température maximale hebdomadaire de la température minimale
TminIQR	Température interquartile hebdomadaire de la température minimale
Tminmax	Température minimale hebdomadaire de la température maximale
Tminmed	Température médiane hebdomadaire de la température minimale
Tminmin	Température minimale hebdomadaire de la température minimale
TmoyIQR	Température interquartile hebdomadaire de la température moyenne
Tmoymax	Température maximale hebdomadaire de la température moyenne
Tmoymed	Température médiane hebdomadaire de la température moyenne
Tmoymin	Température minimale hebdomadaire de la température moyenne
VmoyIQR	Vitesse de vent interquartile hebdomadaire de la vitesse de vent moyenne
Vmoymax	Vitesse de vent maximale hebdomadaire de la vitesse de vent moyenne
Vmoymed	Vitesse de vent médiane hebdomadaire de la vitesse de vent moyenne
Vmoymin	Vitesse de vent minimale hebdomadaire de la vitesse de vent moyenne

Liste des tableaux et figures

Liste des tableaux :

Tableau I : Zones épidémiologiques du paludisme.....	6
Tableau II : Différents fasciés de transmission du paludisme au Mali	6
Tableau III : Variables météorologiques et sources.....	14
Tableau IV : Facteurs météorologiques et hauteur du fleuve retenus par composante.....	23
Tableau V : Analyse uni variée et multivariée avec le modèle additif général	25
Tableau VI : Partie paramétrique de l'analyse multivariée avec le modèle additif général.....	25
Tableau VII : Facteurs associés aux hot-spots.....	30
Tableau VIII : Liste des superviseurs et enquêteurs	viii

Liste des figures :

Figure 1 : Cadre relationnel entre l'incidence du paludisme et les facteurs	4
Figure 2 : Carte sanitaire du district de Bourem.....	12
Figure 3 : Évolution de l'incidence hebdomadaire du paludisme pour 10 000 personnes en fonction des facteurs météorologiques / hauteur du fleuve de 2014 à 2018.	19
Figure 4 : Variation intra, inter-annuelle de l'incidence hebdomadaire du paludisme pour 10 000 personnes de 2014 à 2018.	20
Figure 5 : Tendances de l'incidence hebdomadaire pour 10 000 personnes chez les moins de 5 ans et les 5 ans et plus de 2014 à 2018.....	21
Figure 6 : Analyse en composante principale.....	22
Figure 7 : corrélation entre l'incidence du paludisme et le mois.....	24
Figure 8 : Relation entre les facteurs météorologiques / hauteur du fleuve et l'incidence du paludisme	26
Figure 9 :Variation de la moyenne d'incidence hebdomadaire du paludisme pour 10 000 personnes dans le district sanitaire de Bourem de 2014 à 2018.....	27
Figure 10 : Incidence mensuelle agrégée du paludisme dans le district sanitaire de Bourem de 2014 à 2018.....	28
Figure 11 : Distribution spatio-temporelle des hot-spots de 2014 à 2018.....	29
Figure 12 : Variation de la moyenne et de la variance de l'incidence du paludisme pour 10 000 personnes-semaine dans le district sanitaire de Bourem de 2014 à 2018.....	viii

Résumé

Les facteurs météorologiques et environnementaux, constituent des entraves dans la lutte contre le paludisme dans les pays en développement. Cette étude avait pour objectif d'analyser les facteurs associés à la fluctuation des cas de paludisme dans le district sanitaire de Bourem de 2014 à 2018.

Il s'agissait d'une analyse des données historiques hebdomadaires de 2014 à 2018, issues des registres de consultations des établissements de santé, de la direction nationale de l'hydraulique, des sites web de Nasa Giovanni et USGS. La modélisation de l'incidence avec les différentes composantes a été réalisée avec le modèle additif généralisé et les hot-spots ont été recherchés par la statistique de Kulldorff en utilisant SaTScan.

L'incidence du paludisme a montré une saisonnalité tantôt uni modale, tantôt bimodale, avec des pics significativement corrélés au mois de septembre ($p < 0,000$). La combinaison de précipitation, nombre d'événement pluvieux et humidité relative était significativement associée au paludisme avec un décalage de 4 semaines, de même que la température avec un décalage de 11 semaines ($p < 0,000$). La hauteur du fleuve n'avait pas une association significative avec le paludisme ($p = 0,067$). Les hot-spots, significativement associés à la distance du CSCom au fleuve ($OR = 0,1873$; $p = 0,0023$), au taux de fréquentation du service de consultation ($OR = 1,0114$; $p = 0,014$), étaient situés au sud et variaient dans le temps.

Ces résultats contribueront à déterminer localement les stratégies de lutte contre le paludisme qui pourront être précisées davantage par une étude socio-économique et comportementale.

Mots clés

Paludisme, Fluctuation, Facteurs associés, Zone désertique, Hot-spots, Bourem, Mali.

Summary

The meteorological and environmental factors are barriers the fight against to malaria in developing countries. This study aimed to analyze the factors associated with the fluctuations of malaria cases in the Bourem health district from 2014 to 2018.

It was a matter of an analysis of the weekly records data of 2014 to 2018, from the consultations of health facilities, the National Direction of Hydraulics, websites of Nasa Giovanni and USGS. The modeling of the incidence with the various components selected was carried out with the generalized additive model and the hot-spots were searched by Kulldorff statistics by using SaTScan.

The incidence of malaria showed a seasonality that was sometimes uni modal, sometimes bimodal, with peaks significantly correlated with September ($p<0.000$). The combination of precipitation, rain frequency and relative humidity was significantly associated with malaria with a lag of 4 weeks, as well as temperature with a lag of 11 weeks ($p<0.000$). The height of the river was not significantly associated with malaria ($p=0.067$). The hot-spots, significantly associated with the distance from the CSCom to the river (OR= 0.1873, $p=0.0023$), to the attendance rate of the consultation service (OR=1.0114, $p=0.014$), were located in the south and varied over time.

These results will contribute to local identification of malaria control strategies that could be further refined by a socio-economic and behavioral study.

Keywords

Malaria, Fluctuation, Associated Factors, Desert Zone, Hot-spots, Bourem, Mali.

1. Introduction

De toutes les maladies transmissibles par les moustiques, le paludisme reste la plus redoutable et la plus compliquée à contrôler malgré le tournant marqué dans la lutte en 2000 à travers l'initiative «Faire reculer le paludisme» et du programme de développement plus large axé sur les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD) [1,2]. Dans son « Rapport sur le paludisme » publié en décembre 2016, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) estime qu'au cours des 15 dernières années les taux d'incidence et de mortalité liés au paludisme au niveau mondial sont réduits respectivement de 18% et 48% [3]. Depuis 2015, ce progrès connaît un ralentissement sur le plan mondial, marqué par une augmentation progressive de l'incidence au cours des trois dernières années dont 214 millions (IC à 95% : 149-303 millions) en 2015, 217 millions (IC à 95% : 200-259 millions) en 2016 et 219 millions (IC à 95% : 203-262 millions) en 2017 [3,4]. La région Afrique de l'OMS reste la plus touchée avec, 92 % des cas de paludisme et 93 % des décès associés en 2017 [4].

Le Mali ne fait pas exception à ce regain de cas de paludisme, qui demeure la première cause de consultation, d'hospitalisation et de mortalité dans les formations sanitaires malgré la mise en œuvre des stratégies de lutte inspirées des orientations de l'OMS adoptées en mai 2015, qui sont :

- la prise en charge correcte et précoce des cas de paludisme dans les formations sanitaires et au niveau communautaire,
- la chimioprévention du paludisme saisonnier,
- la lutte anti vectorielle,
- la préparation et la réponse aux épidémies de paludisme et aux situations d'urgence [5].

Dans les rapports de l'annuaire statistique du Système Local d'Information Sanitaire (SLIS) de 2017 et 2018, les formations sanitaires ont enregistré respectivement 2 097 797 cas avec 1 050 décès et 2 345 481 cas de paludisme avec 1001 décès [6,7]. Selon les relations hommes/vecteurs/biotopes naturels ou modifiés, il existe des faciès épidémiologiques primaires et secondaires au Mali. Au sein des faciès primaires la transmission du paludisme est stable en régions humides du sud (Sikasso, Koulikoro, Ségou et une partie de Kayes), instable en régions arides du nord (Tombouctou, Gao,

Kidal, Ménaka, Taoudéni et une partie de Kayes) et intermédiaire à cheval entre les deux précédentes (région de Mopti) [1].

Les régions du nord du Mali sont des zones désertiques à transmission instable dont l'éco-épidémiologie du paludisme est encore mal connue, caractérisée par des épidémies de temps en temps [1]. La région de Gao, située dans ces zones, a enregistré des fluctuations des cas de paludisme au cours des cinq dernières années, qui ont été plus importantes dans le district sanitaire de Bourem [8–12]. Dans ce district, Il a été notifié 16 038 cas en 2014, 24 080 cas en 2015, 10 608 cas en 2016, 13 669 cas en 2017 et 16 559 cas en 2018 [13–17]. En plus du phénomène de l'ensablement du fleuve Niger dont sont victimes tous les cercles de la région de Gao, le district sanitaire de Bourem reçoit peu de partenaires techniques et financiers et abrite les travaux de construction du barrage hydroélectrique de Taoussa. Ce dernier peut bouleverser le faciès épidémiologique dans l'avenir. Les fluctuations des cas de paludisme dans le district sanitaire de Bourem ont été attribuées essentiellement au niveau des précipitations. La contribution des autres facteurs comme le vent, la température, l'humidité relative, la végétation, la hauteur du fleuve Niger et l'utilisation du sol n'est pas connue. Pourtant, la compréhension de l'implication de tous ces facteurs pourrait mieux orienter localement les stratégies de lutte contre le vecteur et le parasite pour plus de résultat dans un contexte de ressources rares.

Ainsi, cette étude a été menée pour analyser les facteurs associés à la fluctuation des cas de paludisme des 5 dernières années dans le district sanitaire de Bourem. Elle s'inscrit dans le cadre de la formation en Master 2 option épidémiologie du Département d'Études et de Recherche en Santé Publique et Spécialités (DERSP) de la Faculté de Médecine et d'Odonto-Stomatologie de Bamako.

Question de recherche :

Les facteurs météorologiques, hydrauliques et d'utilisation du sol sont-ils associés à la fluctuation des cas de paludisme dans le district sanitaire de Bourem ?

2. Objectifs

2.1. Objectif Général :

Analyser les facteurs associés à la fluctuation des cas de paludisme dans le district sanitaire de Bourem de 2014 à 2018

2.2. Objectifs spécifiques :

- Déterminer les variations (intra-annuelle, interannuelle) de l'incidence du paludisme dans le district sanitaire de Bourem de 2014 à 2018,
- Déterminer le lien entre les facteurs météorologiques, hydrauliques et l'incidence du paludisme dans le district sanitaire de Bourem de 2014 à 2018,
- Identifier les clusters à haut risque de transmission du paludisme dans le district sanitaire de Bourem de 2014 à 2018,
- Expliquer les clusters à haut risque de transmission du paludisme dans le district sanitaire de Bourem de 2014 à 2018.

3. Cadre conceptuel

3.1. Description du cadre :

3.1.1. Facteurs météorologiques

- Précipitation : Influence la disponibilité et la qualité des gîtes larvaires favorables à l'abondance de l'anophèle femelle, vecteur du paludisme [18].
- Humidité relative : Influence la survie des anophèles adultes, favorable pour une humidité qui varie entre 70 à 80%. Une humidité moyenne relative de plus de 50% est indispensable pour l'accomplissement du cycle sporogonique du *Plasmodium (P) falciparum*, parasite le plus fréquent au Mali [18].
- Température : Influence la durée du développement du parasite dans le moustique, la durée de développement aquatique initial du moustique et la survie de sa forme adulte. Pour le *P. falciparum*, une température comprise entre 18 et 35°C est favorable au développement sporogonique. Le *P. vivax* supporte des températures plus modérées,

jusqu'à 15°C. Les températures minimales tolérées par les larves d'*Anophèle (A) gambiae* et d'*A funestus* sont respectivement de 19°C et 16°C [18].

- Vitesse du vent : Joue un rôle favorable ou défavorable à la dispersion des anophèles selon leur direction et leur vitesse [18].
- Végétation : la végétation naturelle ou l'agriculture rendent les collections d'eau plus ou moins propices au développement des vecteurs [19].

3.1.2. Facteurs hydrauliques

Les effets des variations climatiques sont modulés par les réseaux hydrographiques et la durée de persistance des plans d'eau. Ces facteurs expliquent probablement les variations des populations d'*A. gambiae* et d'*A. funestus* et de leurs indices sporozoïtiques [18].

3.1.3. Utilisation du sol

L'extension des rizicultures favorise la production des gîtes larvaires et la construction d'ouvrages de retenue d'eau permettent aux anophèles de continuer à se multiplier en saison sèche et d'être à l'origine d'une profonde modification de la durée et de l'intensité de la transmission du paludisme [18].

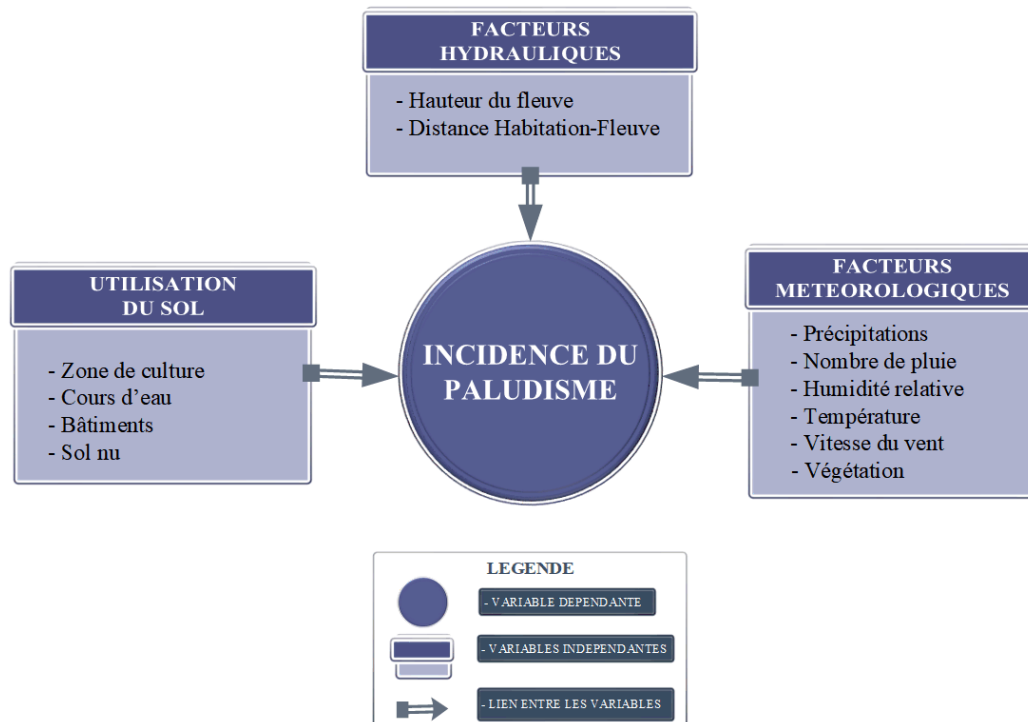


Figure 1 : Cadre relationnel entre l'incidence du paludisme et les facteurs

4. Revue de la littérature

4.1. Rappel sur le paludisme :

Parasitose due à des hématozoaires du genre *Plasmodium*, le paludisme est transmis par des moustiques du genre *Anophèles*. Cinq espèces plasmodiales peuvent être responsables de l'infection chez l'homme. Il s'agit de *P. vivax*, *P. ovale*, *P. malariae*, *P. knowlesi* et *P. falciparum*, ce dernier est le plus largement répandu à travers le monde et est responsable des formes cliniques potentiellement mortelles. Ces plasmodies sont des protozoaires intracellulaires obligatoires dont la multiplication est asexuée (ou schizogonique) chez l'homme et sexuée (ou sporogonique) chez le moustique (anophèle femelle) [19,20]. Les larves d'anophèles se développent dans des collections d'eau naturelle ou d'origine anthropique de tailles variables. Le cycle de vie des anophèles comporte quatre stades successifs : l'œuf, la larve, la nymphe et l'adulte. Les trois premiers stades se déroulent au-dessous de la surface de l'eau, et le dernier stade est aérien [21]. De très nombreux facteurs climatiques et/ou environnementaux, naturels (sécheresses, variations de température...) ou dus à l'activité humaine (assèchement de marécages, construction de barrages, irrigations, construction de routes...) peuvent modifier la répartition des anophèles dans une région donnée et par conséquent influencer la transmission du paludisme. Si les conditions favorables de réimplantation dans des foyers actuellement éradiqués survenaient, la transmission pourrait s'y établir de nouveau [19].

La distribution des anophèles, leur capacité vectorielle, les caractéristiques biologiques des différentes espèces de *Plasmodium*, le rôle de l'immunité et les facteurs humains (l'accessibilité aux soins, les systèmes de soins, les mesures de prévention et les types d'habitats), tant au niveau individuel que populationnel, influent sur la distribution géographique et la dynamique spatio-temporelle du paludisme [19,21]. La variation de la transmission d'une région à l'autre permet de définir des zones épidémiologiques décrites dans les tableaux I et II [19,22].

Tableau I : Zones épidémiologiques du paludisme

Zone	Transmission	Immunité chez l'adulte	Type de paludisme
Holoendémique	Intense toute l'année	Solide	Paludisme stable
Hyperendémique	Intense avec variation saisonnière	Significative	Paludisme stable
Mésoendémique	Variable	Non significative	Paludisme instable
Hypoendémique	Faible	Nulle	Paludisme instable

Tableau II : Différents fasciés de transmission du paludisme au Mali

Faciès	Transmission	Endémicité	Région	Caractéristiques
Épidémiologique	Paludisme	Indice plasmodique		
Faciès soudano guinéen	-Intense (6 mois/an)	Holoendémique IP > 75 %	Sikasso	Prémunition acquise 5 ans.
Faciès nord soudanien et Sahel	-Intense (3-4 mois/an)	Hyperendémique IP : 50 – 75 %	Ségou, Koulikoro, Mopti	Prémunition 9 ans. Neuropaludisme, fréquent à 1-9 ans.
Faciès saharien	-Sporadique -voire Épidémique	Épidémique IP < 10 %	Gao, Kidal, Tombouctou	Adultes aussi exposés risque paludisme grave
Faciès des barrages	-Bimodale (Plurimodale)	Méso endémique IP : 26 – 50 %	Sélingué, Manantali, Markala	Anémie palustre élevée chez moins 9 ans.
Faciès urbain Bamako,		Hypoendémique IP < 10 %	Mopti ville	Adultes bamakois risque paludisme grave.

4.2. Étude sur la dynamique spatio-temporelle du paludisme à Ouagadougou, Burkina Faso de 2011 à 2015 par Boukary Ouédraogo et al

La rareté des ressources dans la lutte contre le paludisme dans les pays en développement oblige de nouvelles stratégies adaptées à chaque localité, et à l'évolution de la maladie dans le temps, d'où cette étude pour déterminer la dynamique spatiotemporelle du paludisme dans la région centrale du Burkina Faso [23].

Il s'agissait d'une étude rétrospective analytique basée sur la collecte des données hebdomadaires du paludisme des aires de santé et des données météorologiques de la station météo pour une période de 5 ans allant de 2011 à 2015 [23].

Les résultats ont révélé une association entre la saisonnalité classique et la périodicité annuelle sèche / pluvieuse. Malgré la mise en œuvre de la politique de contrôle nationale au cours de cette période, aucune tendance à la baisse n'a été observée. La combinaison des facteurs météorologiques a permis d'identifier 3 composantes principales. La première (constituée de pluie et d'humidité) et la deuxième (constituée de température minimales et maximales) étaient corrélées avec l'incidence du paludisme avec respectivement un décalage de 2 semaines et de 14 semaines. La vitesse moyenne du vent hebdomadaire constituait la troisième composante. L'incidence du paludisme avait une relation non linéaire avec la température. Trois périodes de transmission ont été détectées : faible (16,8 à 29,9 cas / 10 000 personnes semaines), élevée (51,7 à 84,8 cas / 10 000 personnes semaines) et intermédiaire (26,7 à 32,2 cas / 10 000 personnes semaines) [23].

4.3. Étude sur l'interaction entre les changements climatiques et les effets de l'intervention sur la dynamique spatio-temporelle du paludisme en Ouganda de 2013 à 2017 par Julius Ssempiira et al

Bien que le poids du paludisme à Ouganda ait diminué depuis 2009 suite à l'intensification des interventions, la maladie reste la principale cause d'hospitalisation et de décès. Dans la crainte que les gains d'intervention ne soient annulés par les changements climatiques dans le pays, cette étude a été conduite pour déterminer les effets des facteurs climatiques sur les tendances spatio-temporelles de l'incidence du paludisme de 2013-2017, en tenant compte des effets des interventions contre les maladies [24].

Il s'agissait d'une analyse rétrospective des cas de paludisme, des données météorologiques, des données d'enquêtes allant de 2013 à 2017.

Les résultats ont indiqué que l'incidence avait initialement diminué régulièrement entre 2013 et 2015, puis avait repris en 2016. Au cours de la même période, les précipitations ont augmenté régulièrement, la température à la surface du sol de nuit et de jour et l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) a diminué de façon constante. Le déclin initial a été attribué à l'effet des interventions antipaludiques renforcées, tandis que la résurgence a été expliquée par la résistance aux insecticides, la migration de la population non immune en tant que réfugiés et par le rôle croissant des changements climatiques sur la transmission du paludisme. Une association positive a été observée entre l'incidence du paludisme et la température à la surface de la terre, les précipitations et le NDVI. La relation entre le paludisme et les précipitations était non linéaire, l'excès de pluie a été associé à une réduction du paludisme, car il peut chasser les larves de moustiques et réduire la température. L'incidence plus élevée du paludisme dans les zones de grandes cultures par rapport aux zones boisées peut être expliquée par la transformation des sols et les mauvaises pratiques agricoles. Les résultats ont montré une interaction significative entre le climat et les effets de l'intervention. Pour atténuer les effets climatiques sur le paludisme, les Programmes Nationaux de Lutte contre le Paludisme (PNLP) devraient créer des synergies avec l'Autorité Météorologique Nationale (ANM) [24].

4.4. Étude sur les tendances de la transmission du paludisme et son association tardive avec les facteurs climatiques dans les hauts plateaux de l'État du Plateau, au Nigéria en 2017 par N Nanvyat et al :

De nombreux chercheurs associent l'augmentation du nombre de cas de paludisme à plusieurs facteurs qui interagissent, et rendent difficile la distinction de l'effet singulier de chacun d'entre eux, d'où cette étude pour décrire les tendances de la transmission du paludisme, et d'analyser l'impact des facteurs climatiques sur la transmission du paludisme dans les hauts plateaux de l'État du Plateau, dans le centre du Nigéria [25].

Il s'agissait d'une étude rétrospective impliquant l'utilisation des données d'archives des paramètres climatiques (1980 à 2015), et des cas médicaux sur le paludisme (2003 à 2015)

dans des hôpitaux sélectionnés, situés dans trois Zones de Gouvernement Local (LGA) de l'État de Plateau dans le centre au Nigeria [25].

Les résultats ont montré une tendance cyclique significative de l'incidence du paludisme dans toutes les zones de l'étude ($p < 0,001$). L'association entre les cas de paludisme mensuels et la température, les précipitations, et l'humidité relative mensuelles moyennes était significative à différents décalages dans le temps et en différents lieux. Dans l'agglomération de Bassa, le décalage est retardé de 3 mois pour la précipitation et de 1 mois pour l'humidité relative. Dans l'LGA de Jos-North le décalage est de 1 mois pour la température, 6 mois pour l'humidité relative. Dans la région LGA de Barkin Ladi, la température et les précipitations étaient associées de manière significative à la survenue de la maladie après 3 et 5 mois de retard, respectivement [25].

4.5. Études sur les facteurs socioéconomiques et environnementaux associés aux points chauds du paludisme dans la zone de surveillance démographique de Nanoro, Burkina Faso de 2010 à 2014 par Rouamba et al

Avec des ressources limitées et une hétérogénéité spatiotemporelle du paludisme dans les pays en développement, il est encore difficile d'évaluer l'impact réel des facteurs socioéconomiques et environnementaux, afin de mettre en place des campagnes ciblées contre le paludisme à une échelle précise. L'objectif de ce travail était de détecter les points chauds du paludisme dans les zones rurales et d'évaluer dans quelle mesure le statut socioéconomique des ménages et les enregistrements météorologiques pouvaient expliquer l'occurrence et l'évolution de ces points chauds [26].

Il s'agissait d'une cohorte longitudinale par observation dont les données, sur les cas de paludisme de 2010 à 2014 et sur les facteurs socioéconomiques et météorologiques, ont été obtenues auprès de quatre établissements de santé situés dans la zone de surveillance démographique de Nanoro [26].

Cette étude a montré le schéma saisonnier annuel de l'incidence du paludisme, mais avec une période de transmission intermédiaire entre la transmission faible classique et la transmission élevée. Les précipitations et la température étaient positivement et significativement associées à l'incidence du paludisme, avec un décalage de 9 et 14 semaines, respectivement. Les points chauds significatifs, était relativement stable

pendant toute la période de l'étude. De plus, les ménages à faible statut socioéconomique étaient associés aux points chauds du paludisme (OR = 1,21, IC à 95% : 1,03–1,40) [26].

4.6. Étude sur la dynamique temporelle du paludisme dans une zone suburbaine le long du fleuve Niger de 2008 à 2012 par Mahamadou Soumana Sissoko et al

En dehors des précipitations et la température connues classiquement associées au paludisme, on en sait peu sur les autres facteurs météorologiques, leur variation, leur combinaison en association avec les variations de hauteur des rivières. Le but de ce travail était d'évaluer l'impact de facteurs environnementaux, météorologiques et hydrologiques combinés sur l'incidence du paludisme dans le contexte de l'urbanisation [27].

Il s'agissait d'une analyse basée sur des données de consultation externe et de laboratoire de Malaria Research and training Center Sotuba (SMRC) de mai 2008 à décembre 2012. Les facteurs météorologiques et hydrologiques ont été mesurés quotidiennement. L'urbanisation a été estimée chaque année en évaluant l'imagerie par satellite et les enquêtes sur le terrain [27].

Malgré un bon accès aux soins, au diagnostic, au traitement conformément aux recommandations internationales et l'urbanisation croissante, l'évolution temporelle de l'incidence clinique du paludisme n'a pas changé au cours des années. Un décalage entre les périodes de faible transmission du paludisme et les saisons sèches a été observé, ainsi qu'entre les périodes de forte transmission et les saisons des pluies. Une meilleure concordance et un décalage plus court ont été observés entre l'incidence du paludisme et la configuration de la hauteur des rivières (décalage de 6 semaines). Le principal facteur météorologique associé au paludisme était une combinaison d'évaporation, d'humidité et de précipitations, corrélation positive avec un décalage d'environ 3 mois. La température était positivement corrélée à l'incidence du paludisme avec un décalage de 3,25 mois [27].

5. Matériels et Méthodes

5.1. Cadre de l'étude :

Cette étude a été conduite dans le district sanitaire de Bourem dans un contexte de regain de cas de paludisme et de ressources rares. Comparativement aux autres cercles de la région de Gao, Bourem reçoit peu de partenaires techniques financiers et abrite les travaux de construction du barrage hydroélectrique de Taoussa. D'une superficie de 42 000 Km² et d'une population de 154 749 hbts (RGPH 2009 actualisée en 2018), il relève administrativement de la septième région du Mali (Gao). Géographiquement il est situé, entre la latitude 16° et 20° Nord et la longitude 2° Ouest et -2° Est. Il est traversé par le fleuve Niger sur une longueur de 240 Km de Tondibi à Abakoira.

Le cercle de Bourem comprend cinq (5) communes dont quatre (4) riveraines du fleuve Niger (Bamba, Bourem, Temera, Taboye) et Tarkint. Le climat est de type sahélo-désertique caractérisé par l'harmatan avec deux saisons :

- une saison sèche allant d'octobre à juin,
- une saison pluvieuse de juillet à septembre.

La moyenne annuelle des précipitations est de 100 mm environ, les températures varient entre 45°C en saison chaude et 10°C en saison froide. La végétation est composée essentiellement par des arbustes rabougris *Acacia raddiana*, *Balanites aegyptia*, *Maerua crassifolia*, *Salvadora persica*, *Ziziphus mauritania*, *Boscia senegalensis*, *Leptadenia pyrothecnica*.

Le cercle comprend un seul district sanitaire qui couvre un système de santé à deux échelons conformément à la politique sectorielle de santé au Mali :

- Les Centres de santé communautaire (CSCoM) sont des formations sanitaires de premier niveau créée sur la base de l'engagement d'une population définie et organisée au sein d'une Association de Santé Communautaire (ASACO) ;
- Le Centre de santé de référence (CSRéf) situé au chef-lieu de cercle représente le deuxième échelon et assure le paquet complémentaire d'activité avec une antenne chirurgicale.

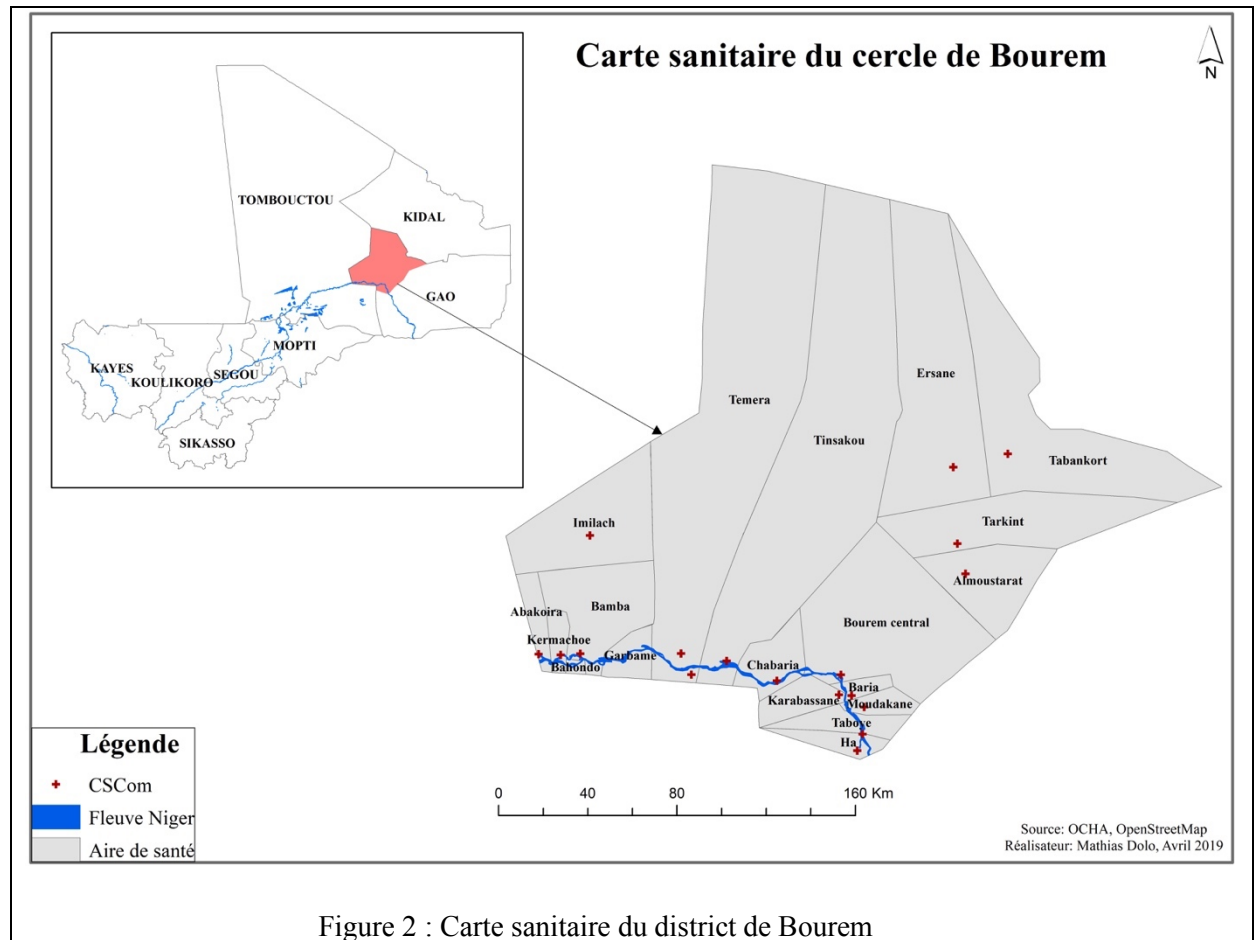


Figure 2 : Carte sanitaire du district de Bourem

(Source : OCHA 2015, OpenStreetMap)

5.2. Type d'étude :

Il s'agissait d'une étude rétrospective à visée analytique utilisant les cas de paludisme, les données météorologiques, hydrauliques et utilisation du sol.

5.3. Période d'étude :

Cette étude a été réalisée sur une période de 8 mois allant de janvier à août 2019. Elle a utilisé les données de 2014 à 2018.

5.4. Population d'étude :

Les cas de paludisme clinique du district sanitaire de Bourem représentaient la population de cette étude.

- **Critère d'inclusion** : Tout cas de paludisme clinique confirmé par la Goutte Epaisse (GE) ou le Test de Diagnostic Rapide (TDR) de paludisme dans les établissements de santé de la période allant de 2014 à 2018.
- **Critère de non inclusion** : Tout cas de paludisme clinique confirmé par la Goutte Epaisse (GE) ou le Test de Diagnostic Rapide (TDR) de paludisme dans les établissements de santé et non enregistré dans les registres de consultations.

5.5. Échantillonnage :

Tous les cas de paludisme clinique confirmés et enregistrés au niveau des établissements de santé de premier niveau (Centre de Santé Communautaire : CSCCom) ont constitué notre échantillon soit un total de 78 672 cas. L'unité d'échantillonnage était les établissements de santé (CSCCom), au nombre de 19 en 2014. Dans le souci de maintenir le même nombre de CSCCom de 2014 à 2018 afin de faciliter les interprétations, les données des CSCCom créés après 2014, ont été comptabilisées au compte des CSCCom dont sa population dépendait en 2014.

5.6. Techniques et outils de collecte des données :

5.6.1. Techniques de collecte des données :

- Exploitation des registres :

- Les registres de consultation externe des centres de santé communautaires (CSCCom) et de laboratoire du centre de santé de référence pour les données de paludisme des années 2014 à 2018 ont été exploités afin de collecter tous les cas de paludisme avec TDR positif et/ou GE positif.
- Le taux d'utilisation des services de consultation curative par aire de santé a été estimé en divisant le nombre total de nouvelles consultations de la période par la population de l'aire de santé, multiplié par 100.
- Les registres d'enregistrement de la direction nationale de l'hydraulique ont été utilisés pour recueillir les données journalières de la hauteur du fleuve Niger au niveau du site de Taoussa situé à 25 kilomètres du chef-lieu de cercle ;

- **Exploitation du site web de Nasa-Giovanni :**

L'utilisation des coordonnées Nord, Sud, Ouest et Est du système de Positionnement Géographique par Satellite (GPS) du cercle de Bourem a permis d'extraire des données météorologiques en série (Température, Précipitation, Humidité relative, Végétation, Vitesse du vent) de 2014 à 2018 sur le site de Nasa-Giovanni (Tableau III).

Tableau III : Variables météorologiques et sources

Variabes	Unités	Sources	Résolution spatiale
Température	°C	(MERRA-2 Model)	0,5 * 0,625°
Précipitation	Mm	(TRMM)	0,25°
Humidité relative	%	(AMSR-E)	25 km
Végétation	NDVI	(MODIS-Terra)	0,05°
Vitesse du vent	m/s	(FLDAS Model)	0,25°

- **Exploitation du site web de Nasa USGS :**

Les informations sur l'occupation du sol ont été obtenues par télédétection des images de Landsat 8 OLI / TIRS C1 sur le site web de Nasa USGS (United States Geological Survey). Les images ont été téléchargées à une résolution de 30 mètres dans les mois de septembre des années d'études correspondant à la période de germination des rizicultures dans le cercle de Bourem. Les dates de capture des images étaient le 28 septembre en 2014, le 15 septembre en 2015, le 17 septembre en 2016, le 20 septembre en 2017 et le 07 septembre en 2018. Les images téléchargées ont ensuite bénéficié d'une classification supervisée basée sur le maximum de vraisemblance afin de déterminer les types d'occupation du sol (zones de culture, cours d'eau, les bâtiments et les zones non occupées).

- **Exploitation du logiciel QGIS**

Compte tenu de l'insuffisance de temps et de moyen pour estimer la distance qui sépare les habitations du fleuve, les CSCom ont été pris comme repère par le fait qu'ils sont proches des habitations. A Bourem 87% de la population vie dans un rayons de 15 km

autour d'un CSCoM. Les distances euclidiennes des CSCoM au fleuve en kilomètre ont été extraites avec le logiciel QGIS après l'enregistrement de la couche des CSCoM sous la projection WGS84/UTM, zone 30 nord.

- **Méthode utilisée pour agréger les données hebdomadaires :**

Les numéros des semaines allant de 2014 à 2018 en fonction des dates ont été déterminés par la formule **N0.semaine.iso(date)** sur Microsoft Excel. Les données collectées ont été agrégées hebdomadairement sur la base de ces dates.

5.6.2. Outils de collectes des données :

Une fiche d'enquête a été élaborée sur la base des semaines déterminées et mise à disposition du chargé SLIS et des Directeurs Techniques des Centres de santé (DTC).

5.7. Saisie et analyse des données :

5.7.1. Saisie des données :

Après la collecte, les données ont été saisies sur Microsoft Excel, puis elles ont fait l'objet d'épuration pour corriger les erreurs.

5.7.2. Analyse des données :

Les logiciels R version 3.5.2 et SaTScan version 9.6 ont été utilisés pour analyser les données. Le logiciel Arc GIS version 10.3 a été utilisé pour la classification des images d'utilisation du sol, produire des cartes d'incidence et représenter les hot-spots.

- **Estimation des séries chronologiques**

L'incidence hebdomadaire du paludisme, le cumul de précipitations hebdomadaires, les événements pluvieux hebdomadaires, les moyennes, maximum, minimum, médianes, interquartile hebdomadaires des variables humidité relative, végétation, température, vitesse du vent et hauteur du fleuve ont été estimés de 2014 à 2018.

- **Analyse en Composante Principale (ACP)**

Cette analyse a permis de réduire les dimensions des variables météorologiques / hauteur du fleuve, afin de retenir les axes selon le critère de kaiser et d'éviter une colinéarité entre les variables.

- **Modèle Additif Généralisé (GAM) uni varié et multivarié**

Le modèle additif généralisé a été utilisé pour estimer les décalages entre la série temporelle des cas de paludisme et les composantes principales issues de l'ACP. Ensuite l'impact des facteurs météorologiques / hauteur du fleuve présentant une corrélation croisée significative après décalage sur l'incidence du paludisme a été mesuré. La fonction de lissage (spline) a été utilisée pour prendre en compte la relation non linéaire entre l'incidence du paludisme et les facteurs météorologiques / hauteur du fleuve à travers les axes retenus dans l'ACP. Une distribution quasi-poisson en remplacement d'une distribution de poisson a été utilisée, vu la dispersion excessive du nombre de cas de paludisme. Le terme offset a été introduit dans le modèle pour prendre en compte l'effet de la population par rapport au cas.

Les interventions de campagnes de chimioprévention du paludisme saisonnier ont été mises dans le modèle multivarié afin de déterminer leur effet sur l'incidence du paludisme. Une approche progressive a été également utilisée sur la base du critère de validation croisée généralisée (GCV).

- **Méthode de change points analysis :**

Les périodes de transmission du paludisme ont été déterminées par la fonction de Change Point Analysis (CPA). Une transformation logarithmique de l'incidence du paludisme a été faite pour normaliser la série. La fonction du CPA du logiciel R a permis de détecter les changements significatifs de la moyenne de l'incidence de la série pendant 260 semaines..

- **Méthode de balayage de Kulldorff :**

Pour chaque période de transmission générées par l'Analyse des Points de Changement (CPA) de la moyenne d'incidence , la statistique d'analyse spatiale de Kulldorff a permis d'identifier les clusters spatiaux à haut risque (hot-spot) avec un algorithme utilisant des fenêtres circulaires centrées sur les différentes aires de santé, à un rayon allant de 1 à 50% de la population de l'aire de santé. Le cluster à haut risque a été déterminé par l'observation d'un excès de cas dans une fenêtre, et le risque relatif était estimé par le rapport du risque absolu à l'intérieur de la fenêtre sur le risque absolu de l'extérieur de la fenêtre.

- **Modèle de régression logistique :**

La régression logistique a permis d'expliquer les hot-spots du paludisme en fonction des facteurs qui sont : taux d'utilisation de la consultation curative, la distance qui sépare chaque CSCom au fleuve, les pourcentages d'occupation des cours d'eau et des zones de culture. La loi logistique était la fonction de lien utilisé compte tenu du caractère binomial de la variable à expliquer (hot-spot).

5.8. Définitions de certains termes :

- Cas confirmé de paludisme : Tout cas suspect de paludisme testé positif par la GE ou le TDR de paludisme,
- Incidence pour 10 000 personnes-semaine : L'incidence pour 10 000 personnes-semaine a été déterminé en rapportant le nombre de cas de la semaine sur la population totale de la même période, multiplié par 10 000,
- Site web Nasa Giovanni : Site web de la Nasa qui dispose des données issues du programme du système d'observation de la terre et enregistrées à partir des satellites afin de faire avancer la recherche scientifique ;
- Site web USGS (United States Geological Survey) : Site web de l'institut d'études géologiques des États-Unis, qui est un organisme gouvernemental américain qui se consacre aux sciences de la Terre ;
- Décalage : Écart entre l'exposition aux facteurs météorologiques et la survenue de l'événement (augmentation ou diminution de l'incidence du paludisme) ;
- Cluster : Ensemble d'unité spatiale qui forme une zone à risque qui peut être faible ou élevé ;
- Hot-spots : Appelés points chauds en français désignent les clusters à haut risque.

5.9. Considérations éthiques :

Des autorisations administratives ont été obtenues pour l'utilisation des données des formations sanitaires. L'anonymat a été observé au cours de la collecte des données, aucun détail lié à l'identification des dossiers des patients n'a été collecté.

6. Résultats

6.1. Description des séries temporelles

6.1.1. Variations de l'incidence du paludisme en fonction des facteurs météorologiques et hauteur du fleuve :

L'évolution temporelle de l'incidence du paludisme de 2014 à 2018 a été marquée par une saisonnalité classique et une tendance annuelle (figure 3). La saisonnalité a été caractérisée par une période de transmission haute et brève, allant d'août à septembre avec un pic en septembre, correspondant à la période pluvieuse et une transmission faible d'octobre à juillet, correspondant à la période sèche. Un second pic moins important a été constaté au cours de la période de transmission faible sauf en 2016, situé entre décembre et février selon les années, correspondant aux périodes froides et de hautes eaux. Le niveau des pics de septembre avait une tendance à la hausse entre 2014 et 2015 puis entre 2017 et 2018, alors qu'elle était à la baisse de 2015 à 2017. La hauteur du fleuve atteignait son plus haut niveau entre décembre et janvier selon les années. La précipitation annuelle la plus élevée a été enregistrée en 2017 soit environ 452 mm suivi de 2015, qui était environ à 448 mm. L'année 2014 a enregistré la faible précipitation annuelle soit environ 237 mm. Les températures fortes, pouvant aller à 47°C ont été enregistrées en avril, mai et juin et correspondaient aux périodes de faible incidence de paludisme (figure 3).

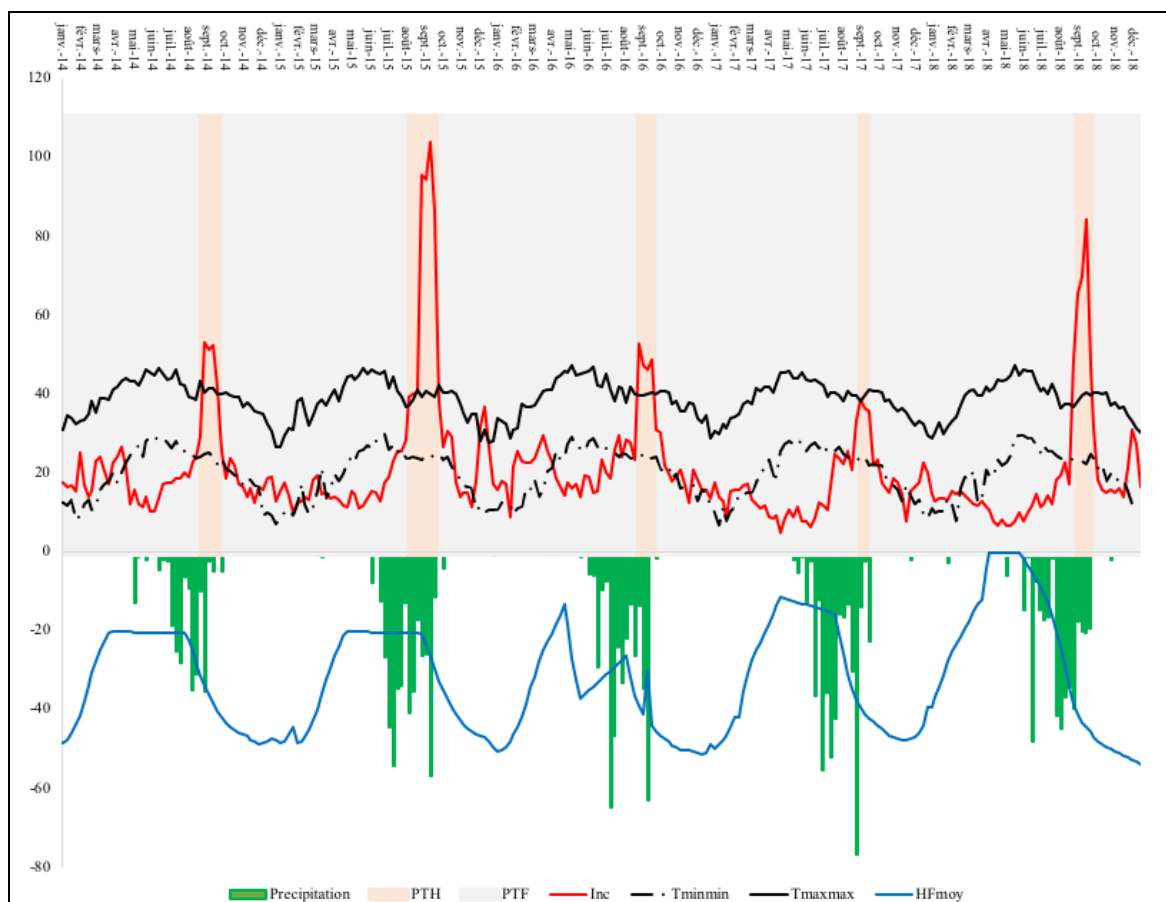


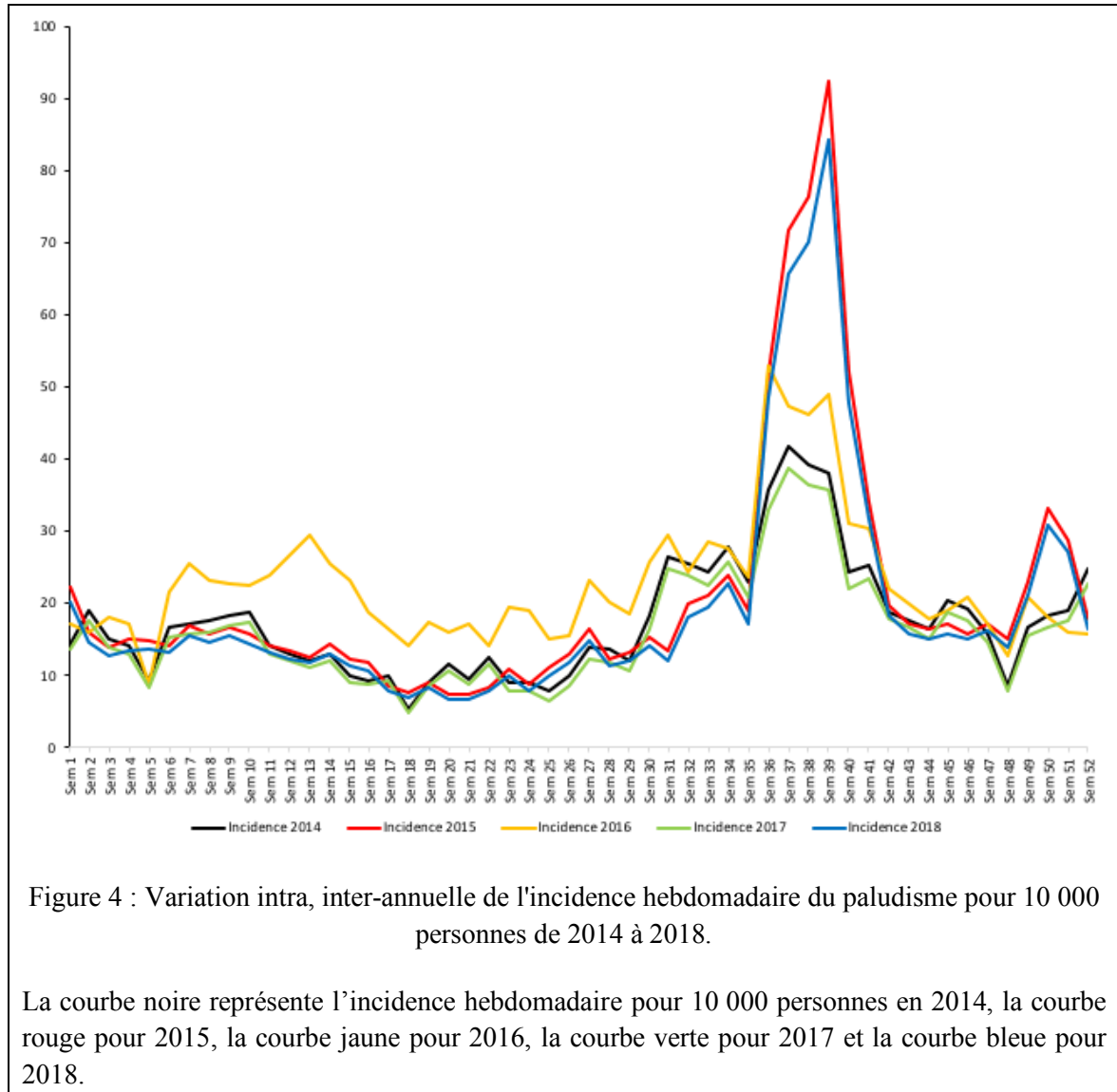
Figure 3 : Évolution de l'incidence hebdomadaire du paludisme pour 10 000 personnes en fonction des facteurs météorologiques / hauteur du fleuve de 2014 à 2018.

La courbe rouge représente l'incidence hebdomadaire pour 10 000 personnes (Inc) ; la courbe noire représente la température en °C (maximale en courbe continue : Tmaxmax et minimale en courbe discontinue : Tminmin) ; le fond gris / orange représente les périodes de transmissions issues de la variation de l'incidence en moyenne et en variance (gris pour la transmission faible : PTF et orange pour la transmission haute : PTH) ; Sur l'axe des ordonnées inférieur, l'histogramme vert représente la précipitation hebdomadaire en mm, la courbe bleue représente la moyenne hebdomadaire de la hauteur du fleuve en dm (HFmoy).

6.1.2. Variation inter et intra-annuelle de l'incidence du paludisme :

Les différentes courbes d'incidence hebdomadaire pour 10 000 personnes de 2014 à 2018 ont montré deux périodes de transmission (faible et haute) et deux pics. Le premier pic débutait à la semaine 35 pour finir à la semaine 42, puis le second commençait à la semaine 48 et se poursuit jusqu'à la semaine 4, voire 7 de l'année qui suit (figure 4). L'incidence hebdomadaire pour 10 000 personnes des périodes de transmission faible était plus élevée en 2016 par rapport aux autres années (figure 4). Les pics des périodes de transmission

haute étaient tantôt forts avec 103,87 et 84,33 cas pour 10 000 personnes-semaine respectivement en 2015 et 2018, tantôt moins forts avec une incidence hebdomadaire pour 10 000 personnes de 53 cas en 2014, 52,94 cas en 2016, 38,75 cas en 2017 (figure 4).



6.1.3. Évolution de l'incidence du paludisme par tranches d'âge :

Les années 2014 et 2015 ont été marquées par une incidence hebdomadaire pour 10 000 personnes, légèrement plus élevée chez les moins de 5 ans qu'à celui des 5 ans et plus, avec un écart plus marqué pendant les périodes de forte transmission (figure 5). A partir de 2016, l'incidence hebdomadaire pour 10 000 personnes chez les deux tranches d'âge sont restés presque similaires quel qu'en soit les périodes de transmission jusqu'à la période

de forte transmission de 2018, à partir de laquelle lesdites incidences deviennent plus élevées chez les 5 ans et plus par rapport au moins de 5 ans (figure 5).

La CPS a débuté en 2016 dans le district sanitaire avec un retard de deux mois de la période de forte transmission. Sa mise en œuvre a été irrégulière avec un passage en 2016, quatre en 2017 dont deux en début d'année et deux pendant la période de forte transmission, et quatre passages en 2018 (figure 5).

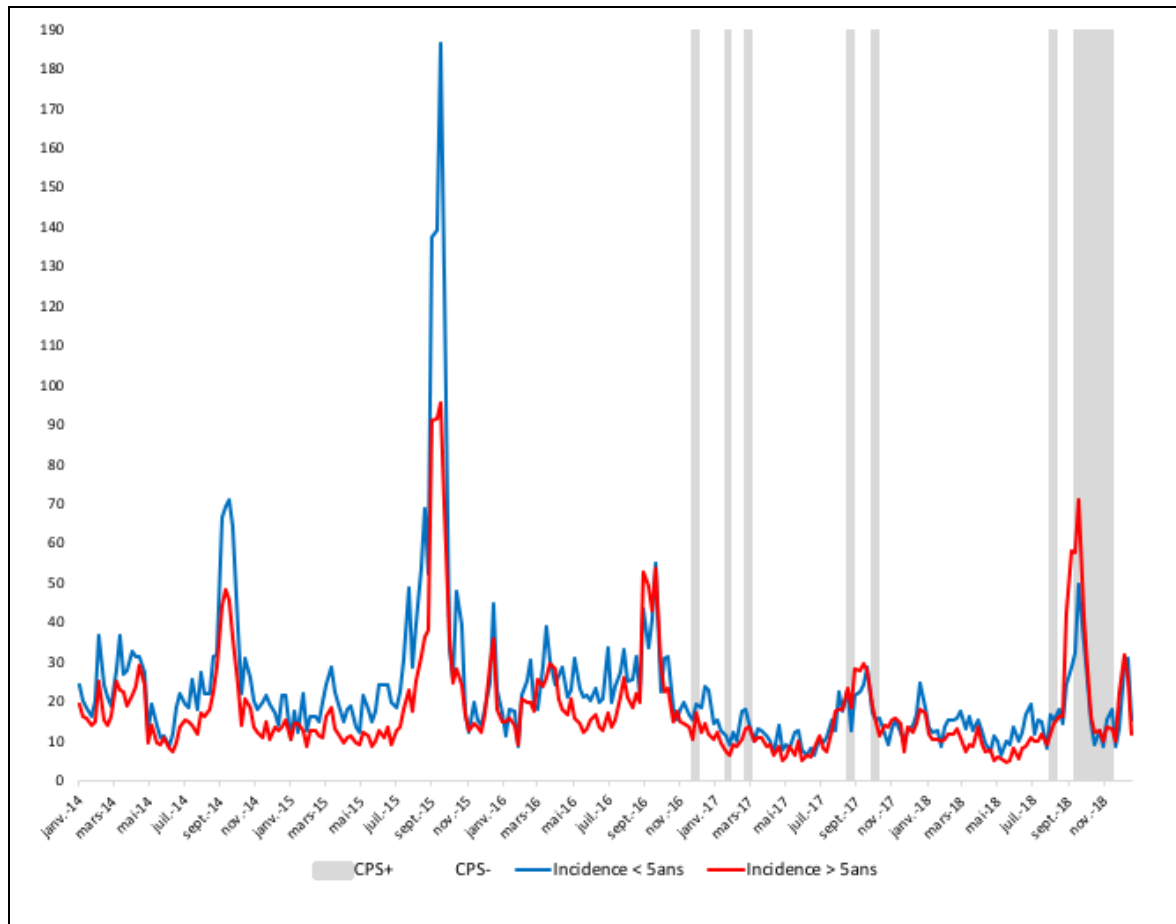
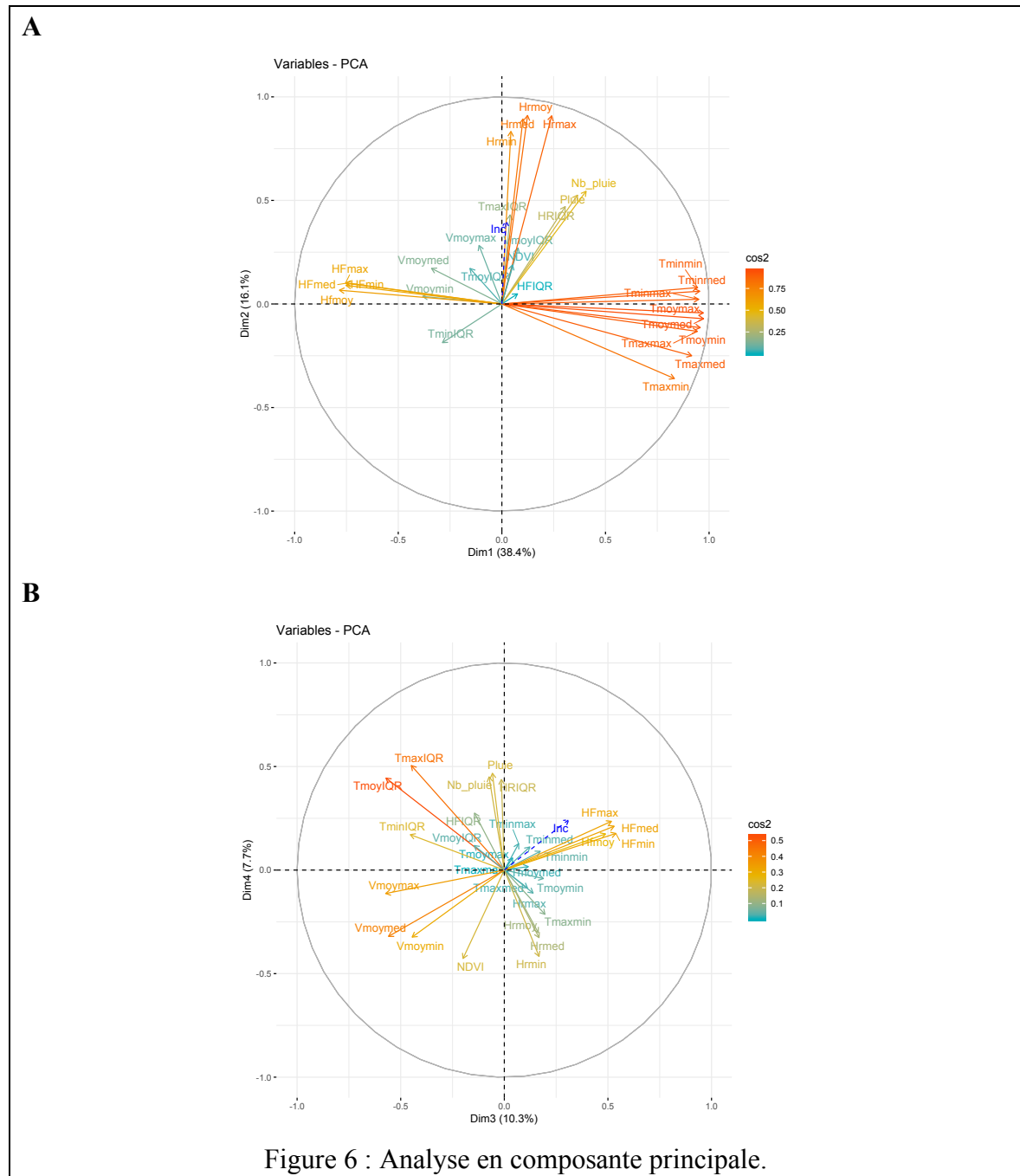


Figure 5 : Tendence de l'incidence hebdomadaire pour 10 000 personnes chez les moins de 5 ans et les 5 ans et plus de 2014 à 2018.

La courbe bleue représente l'incidence pour 10 000 personnes-semaine chez les moins de 5 ans, la courbe rouge représente l'incidence pour 10 000 personnes-semaine chez les plus de 5 ans, le fond clair représente les périodes sans CPS et le fond gris représente les périodes avec CPS.

6.2. Analyse en composante principale

La combinaison des facteurs météorologiques et la hauteur du fleuve a permis de retenir quatre axes appelés Dim 1, Dim 2, Dim 3, Dim 4 (figure 6). Les axes Dim 1 et Dim 3 sont horizontaux et ceux de Dim 2 et Dim 4 sont verticaux. Sur chaque axe, nous avons déterminé de nouvelles variables appelées composantes, représentant le regroupement des variables initiales qui sont liées avec une corrélation supérieure à 0,5 (figure 6).



Les composantes retenues à l'issue de l'ACP ont été nommées Meteo1, Meteo2, Meteo3 et Meteo4.

La composante Meteo1 était composée des variables ayant une corrélation significative et supérieur à 0,5 sur l'axe 1. Elle était composée de la température (maximale, minimale, moyenne), corrélée positivement et de la hauteur hebdomadaire du fleuve (minimale, maximale, médiane, moyenne), corrélée négativement (Tableau IV).

La composante Meteo2 était composée des variables ayant une corrélation significative et supérieur à 0,5 sur l'axe 2. Elle représentait l'humidité relative hebdomadaire (minimale, maximale, médiane, moyenne), la précipitation moyenne hebdomadaire et le nombre d'événement pluvieux, toutes corrélés positivement (Tableau IV).

La composante Meteo3 était composée des variables ayant une corrélation significative et supérieur à 0,5 sur l'axe 3. Elle était composée de la hauteur hebdomadaire du fleuve (minimale, maximale, médiane), corrélée positivement et de la vitesse moyenne hebdomadaire du vent (médiane, maximale), la variation de la température moyenne hebdomadaire, corrélée négativement (Tableau IV).

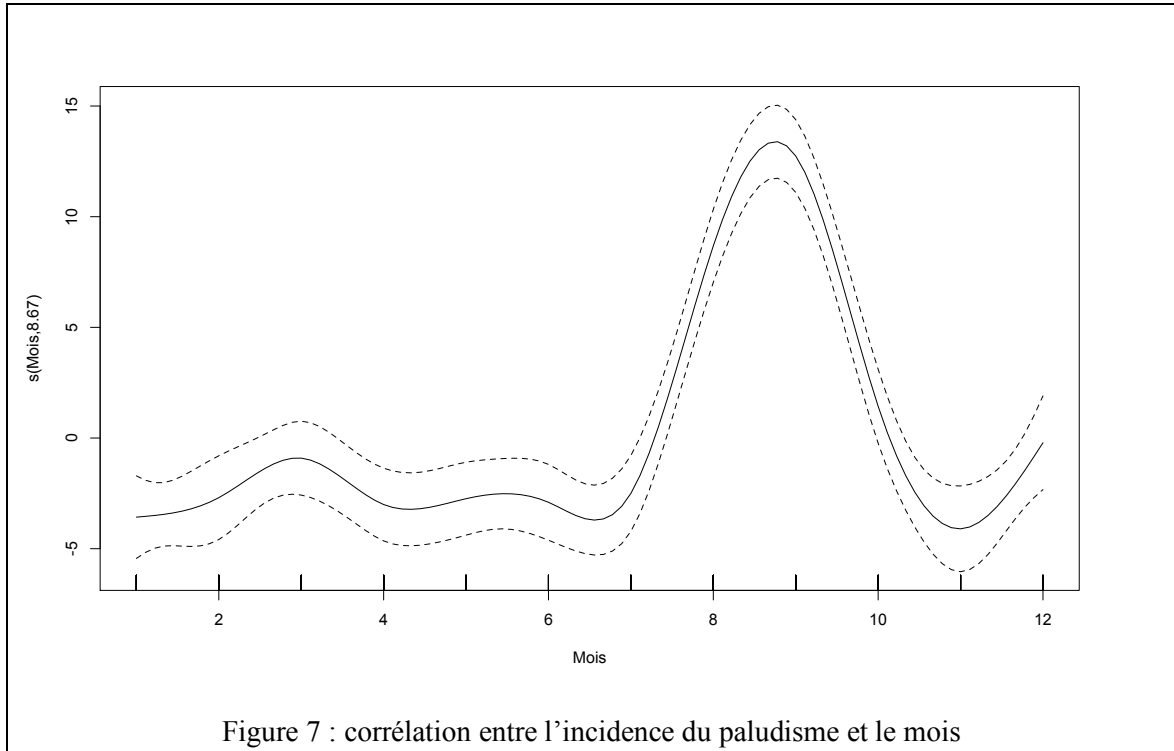
La composante Meteo4 était composée des variables ayant une corrélation significative et supérieur à 0,5 sur l'axe 4. Elle représentait la variation de la température maximale hebdomadaire, corrélée positivement sur l'axe (Tableau IV).

Tableau IV : Facteurs météorologiques et hauteur du fleuve retenus par composante

Meteo1 (38,4%)		Meteo2 (16,1%)		Meteo3 (10,3%)		Meteo4 (7,7%)		p-value
Facteurs	Cor	Facteurs	Cor	Facteurs	Cor	Facteurs	Cor	< 0,000
Tmoymed	0,97	Hrmoy	0,91	HFmin	0,54	TmaxIQR	0,50	
Tmoymax	0,97	Hrmax	0,90	HFmed	0,53			
Tmoymin	0,96	Hrmed	0,89	HFmax	0,52			
Tminmed	0,96	Hrmin	0,83	Vmoymed	-0,56			
Tminmax	0,95	Nb_pluie	0,54	TmoyIQR	-0,57			
Tminmin	0,94	Preci	0,52	Vmoymax	-0,57			
Tmaxmax	0,94							
Tmaxmed	0,92							
Tmaxmin	0,83							
HFmin	- 0,75							
HFmed	-0,75							
HFmax	-0,75							
HFmoy	-0,78							

6.3. Modélisation de l'incidence du paludisme avec les facteurs météorologiques et la hauteur du fleuve

La modélisation de l'incidence du paludisme avec les mois a montré une corrélation significative et supérieure à 0,5 pour les mois d'août et septembre (figure 7).



Le Modèle Additif Généralisé a permis d'estimer les décalages entre l'incidence du paludisme et les composantes météorologiques associées. Le décalage définissait l'écart de temps entre l'exposition aux facteurs météorologiques / hauteur du fleuve et l'augmentation ou la diminution de l'incidence du paludisme selon la nature de la relation. Le décalage était de onze (11) semaines pour la composante Meteo1, quatre (4) semaines pour la composante Meteo2, vingt (20) semaines pour la composante Meteo4 et pas de décalage pour la composante Meteo3 (Tableau V). En considérant les décalages, toutes les composantes météorologiques étaient significativement associées à l'incidence du paludisme dans l'analyse uni variée ($p < 0,000$) (Tableau V). Dans le modèle multivarié ajusté sur la CPS et l'année, seulement la composante Meteo3 n'était pas statistiquement significative avec une relation non linéaire ($p = 0,067$) (Tableau V).

Tableau V : Analyse uni variée et multivariée avec le modèle additif général

Composantes	décalage	Analyse uni variée après	Analyse multivariée après
		décalage	décalage
		<i>p-value</i>	<i>p-value</i>
Meteo1	11	< 0,000	< 0,000
Meteo2	4	< 0,000	< 0,000
Meteo3	0	0,0019	0,067
Meteo4	20	< 0,000	< 0,000

En tenant compte des facteurs météorologiques et hauteur du fleuve, l'incidence annuelle du paludisme n'était pas significativement différente au cours des 5 ans. Aussi la CPS n'avait pas un effet significatif sur la réduction de l'incidence du paludisme (Tableau IV).

Tableau VI : Partie paramétrique de l'analyse multivariée avec le modèle additif général

Variables	OR ajusté	IC	<i>p-value</i>
Année	1,001	[0,95 ; 1,06]	0,955
CPS	0,92	[0,79 ; 1,08]	0,320

La relation entre l'incidence du paludisme et la composante Meteo1 était significativement non linéaire, quand la température augmente, l'incidence du paludisme augmente dans un premier temps à un délai de 11 semaines (décalage), à une température forte, l'incidence du paludisme diminue ensuite dans le même délai (figure 8).

La composante Meteo2 avait une relation quasi-linéaire et significativement positive avec l'incidence du paludisme. L'augmentation de cette composante augmentait l'incidence du paludisme à un délai de 4 semaines (figure 8).

La relation avec la composante Meteo4 était significativement positive et linéaire (figure 8).

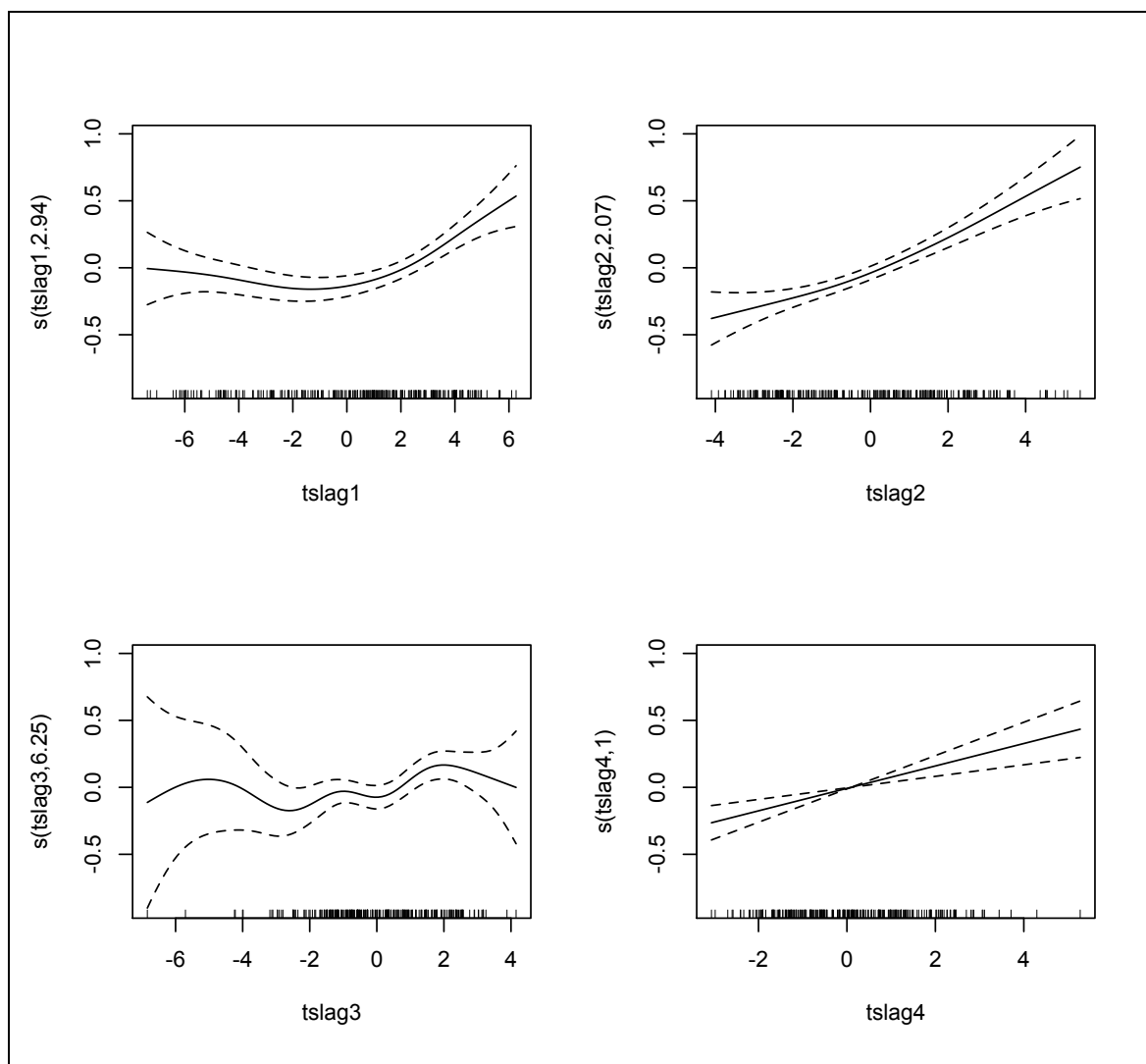


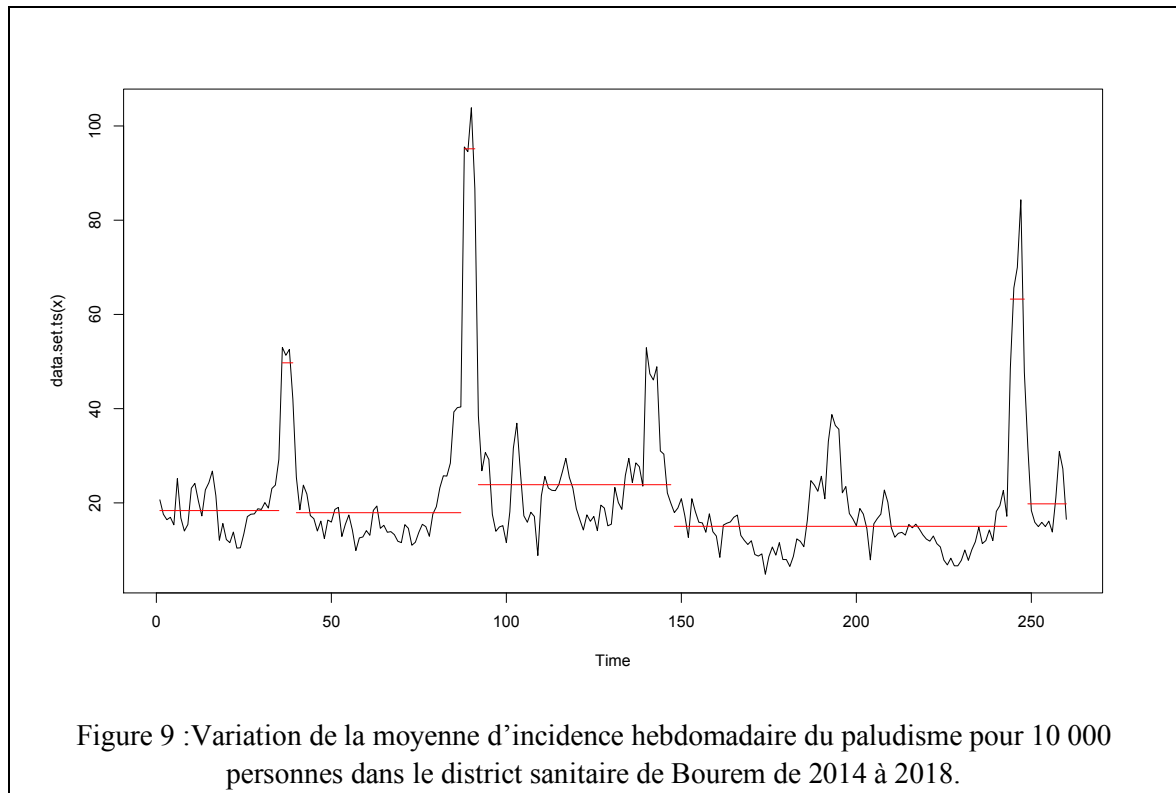
Figure 8 : Relation entre les facteurs météorologiques / hauteur du fleuve et l'incidence du paludisme

tslag1 représente la première composante après décalage, tslag2 représente la deuxième composante après décalage, tslag3 représente la troisième composante après décalage et tslag4 représente la quatrième composante après décalage.

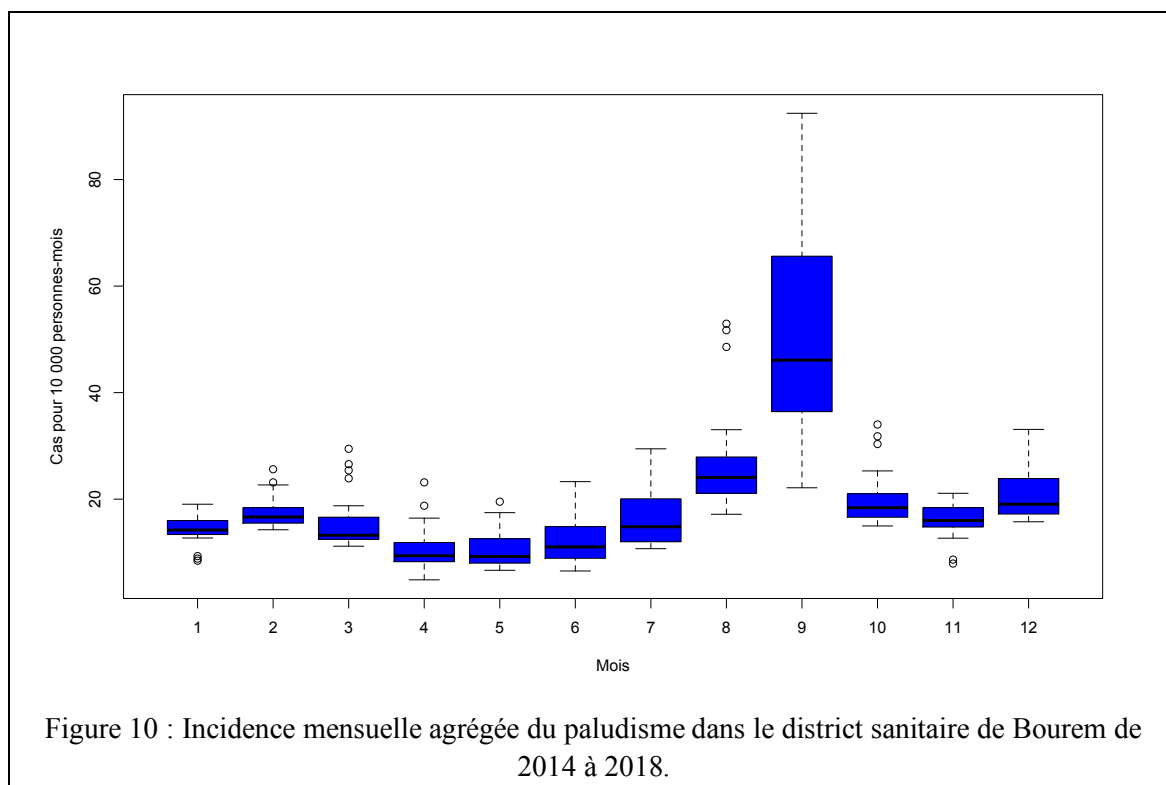
6.4. Distribution spatio-temporelle des clusters à haut risque de transmission

L'analyse de point de changement significatif de la moyenne d'incidence du paludisme de 2014 à 2018 a permis d'identifier huit (8) séries chronologiques composées de cinq (5) périodes à transmission faible et trois (3) à transmission haute. La moyenne d'incidence hebdomadaire du niveau de transmission faible variait de 18 à 25 cas / 10 000 personnes.

Pour le niveau de transmission haute, la moyenne d'incidence hebdomadaire variait de 30 à 95 cas / 10 000 personnes-semaine (figure 9).



La médiane d'incidence mensuelle agrégée des 5 ans des périodes de transmission faible variait de 10 à 20 cas pour 10 000 personnes. Pour les périodes de transmission haute (août, septembre), elle variait de 25 à 45 cas pour 10 000 personnes (figure 10).



Pour chaque série chronologique les hot-spots ont été détectés (Figure 11).

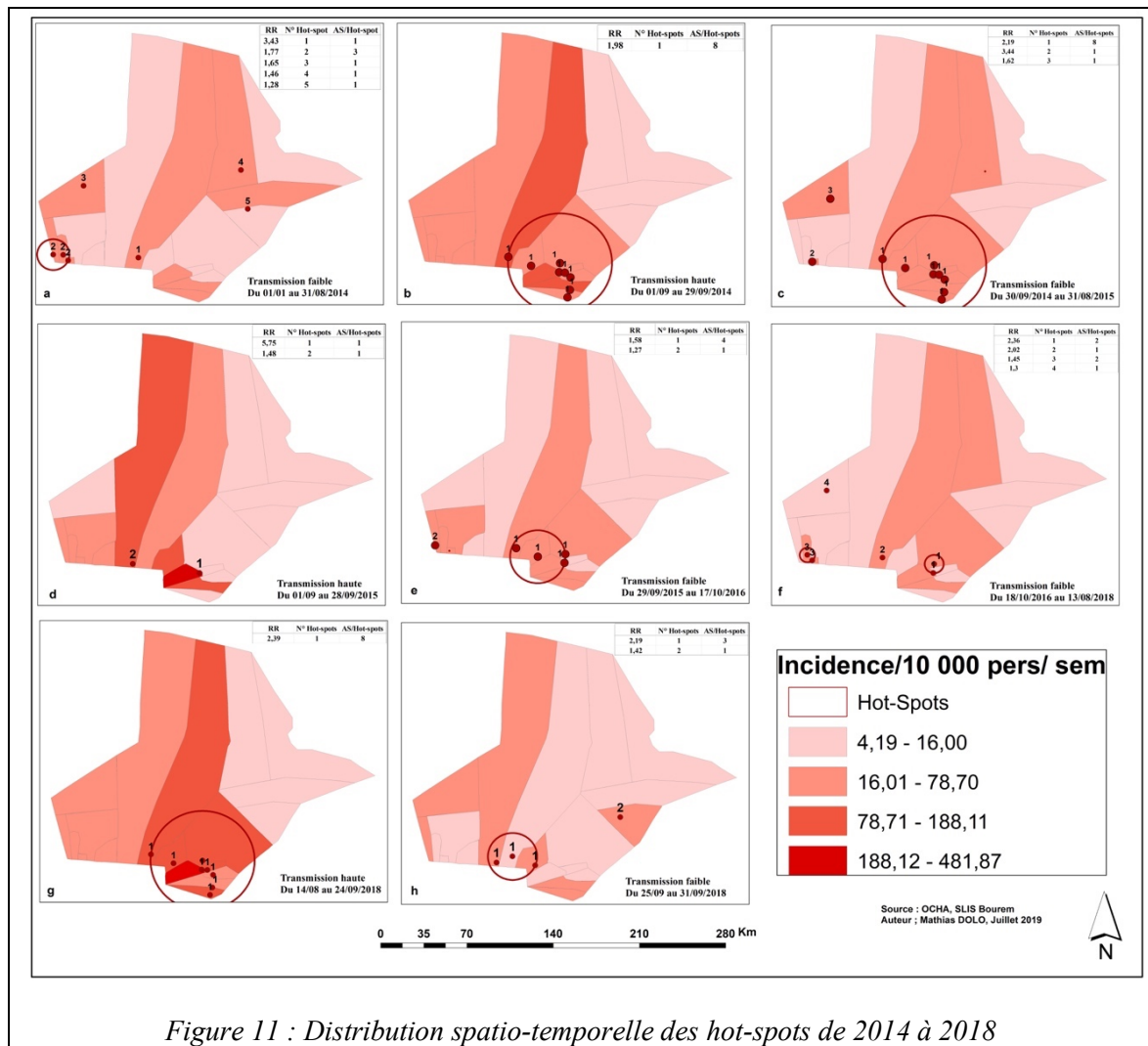
6.4.1. *Transmission faible :*

L'incidence globale du district sanitaire des périodes de transmission faible variait de 14,92 à 23,9 cas / 10 000 personnes tandis que l'incidence des hot-spots significatifs ($p < 0,05$) identifiés variait de 29,43 à 59,55 cas / 10 000 personnes (figure 11a, 11c, 11e, 11f et 11h). D'une période à l'autre, les hot-spots identifiés étaient différents et ont concerné quatorze (14) aires de santé au total, parmi onze (11) situées au sud, non loin du fleuve Niger. Le plus grand hot-spot était composé de huit (8) aires de santé avec 3,44 fois de risque de paludisme comparé aux aires de santé de la même période situées en dehors de cet hot-spot (RR = 3,44) (figure 11c, N°1). Cet hot-spot représentait 48,5% de la population totale du district sanitaire. L'aire de santé de tinsakou était à risque pendant toutes les périodes de transmission faible avec un risque relatif qui variait de 1,58 à 3,43.

6.4.2. *Transmission haute :*

L'incidence globale du district sanitaire des périodes de transmission haute variait de 21,9 à 94,96 cas pour 10 000 personnes pendant que l'incidence des hot-spots significatifs (p

< 0,05) identifiés variait de 36,95 à 480,56 cas pour 10 000 personnes (figure 11b, 11d et 11g). Pour quatre (4) hot-spots identifiés pendant ces périodes, deux (2) étaient relativement identiques et constituaient le plus grand hot-spot avec huit (8) aires de santé chacun, mais de risques relatifs différents et toutes situées non loin du fleuve Niger (figure 11b, 11g). L'hot-spot présentant le risque relatif le plus élevé était constitué de l'aire de santé de Karabassane avec 5,75 fois de risque de paludisme comparé aux autres aires de santé de la période (RR = 5,75) (figure 11d, N°1).



6.5. Explication des clusters à haut risque de transmission du paludisme

La modélisation de la probabilité d'être hot-spot de paludisme ou non en fonction de certains facteurs a été faite avec le modèle de régression logistique. A l'analyse uni variée, la distance qui sépare le CSCoM au fleuve, était significativement associées à la survenue

des hot-spots avec un OR de 0,2727 (Tableau VII). Aucune association significative n'a été identifiée entre la survenue des hot-spots de paludisme, le cours d'eau et les zones de culture (Tableau VII). Les facteurs ayant un taux de significativité de 0 à 20% à l'analyse uni variée ont été mis dans le modèle multivarié. Dans ce modèle, la distance qui sépare les CSCom au fleuve et le taux d'utilisation du service de consultation étaient significativement associés à la survenue des hot-spots de paludisme avec respectivement un OR de 0,1873 et 1,0114 (Tableau VII). Plus le CSCom était situé loin du fleuve, plus le risque de survenue de l'hot-spot de paludisme diminue, par contre l'augmentation du taux de fréquentation de la consultation favorisait la survenue de l'hot-spot.

Tableau VII : Facteurs associés aux hot-spots

Variables	OR non ajustés			OR ajustés		
	OR	IC 95%	<i>p-value</i>	ORa	IC 95%	<i>p-value</i>
Distance entre CSCom et fleuve	0,2727	[0,11 ; 0,70]	0,0072	0,1873	[0,06 ; 0,55]	0,0023
Taux de fréquentation de la consultation	1,0069	[0,99 ; 1,02]	0,1024	1,0114	[1,00 ; 1,02]	0,014
Zone de culture	1,0148	[0,98 ; 1,05]	0,4394			
Cours d'eau	0,9992	[0,97 ; 1,02]	0,9501			

7. Discussions

Cette étude avait pour objectif d'analyser les facteurs associés à la fluctuation des cas de paludisme dans le district sanitaire de Bourem de 2014 à 2018.

La non obtention des données météorologiques et de la hauteur du fleuve par aire de santé ont constitué une limite dans cette analyse, cependant il faut noter qu'elles pourraient présenter très peu de variabilité dans le cercle de Bourem car les facteurs géographiques sont proches (Altitude, latitude, étendue des cours d'eau, végétation, relief) [28]. Aussi, l'insuffisance d'archivage des données de paludisme a contraint de fixer la période des données collectées à 5 ans.

L'analyse de l'incidence hebdomadaire pour 10 000 personnes a mis en évidence une évolution tendancielle annuelle, saisonnière uni modale (sèche/pluvieuse) pour 2016 et bimodale pour les années 2014, 2015, 2017, 2018. La saisonnalité annuelle était caractérisée par des périodes pluvieuses à transmission élevée et des périodes sèches à transmission faible. Pour les années 2014, 2015, 2017, 2018, en plus de la transmission liée à la période pluvieuse, un autre pic a été observé entre décembre et février marqué par la montée des eaux du fleuve Niger et la saison froide. Des publications faites en 2017 au Mali et au Burkina Faso respectivement par Sissoko et al et par Ouédraogo et al trouvent une saisonnalité classique uni modale (sèche/pluvieuse) sans notion de tendance [23,27]. Le caractère bimodal dans notre étude pourrait s'expliquer par la présence du fleuve Niger, susceptible de favoriser la production des gîtes larvaires. La tendance annuelle pourrait s'expliquer d'une part, par la quantité de pluie tombée qui était déficitaire en 2014 comparée à 2015, soit 237 contre 448 mm annuelle et d'autre part, par les effets conjugués de nouvelles stratégies de lutte qui ont débuté à partir de novembre 2016 dans le district sanitaire. Il s'agissait de la chimioprévention du paludisme saisonnier (CPS) chez les enfants de 3 à 59 mois et de la campagne de distribution de masse des moustiquaires imprégnées d'insecticide (MILD), cette dernière a été réalisée en 2016 seulement.

Dans notre série la CPS n'avait pas un effet significatif sur la réduction de l'incidence du paludisme (ORa = 0,92 ; IC 95% : 0,79 ; 1,08). Diawara et al trouvent au Mali en 2017 dans une étude quasi-expérimentale avant-après et ici-ailleurs, un effet significatif de la CPS sur la réduction de la prévalence du paludisme chez les enfants âgés de 3 à 59 mois à Kita (DD : OR = 0,20 ; IC 95% : 0,04 - 0,94) [29]. Notre résultat pourrait s'expliquer par le fait que la CPS n'avait pas été implémentée dans les conditions optimales dans le district sanitaire de Bourem. Sa mise en œuvre n'était pas continue ni superposée aux périodes de haute transmission pour des raisons de retard de mobilisation des ressources financières.

Une étude faite à Madagascar sur 18 sites sentinelles en 2017 par Girond et al montrent que, comparativement à la première année après une campagne de distribution de masse de MILD, la probabilité d'une alerte au paludisme dans les sites de surveillance a augmenté de façon spectaculaire au cours de la deuxième année (OR = 36,9) et a davantage augmenté au cours de la troisième année (OR = 53,9) [30]. La réduction de

l'incidence du paludisme en 2017 puis son augmentation à partir de 2018 pourrait s'expliquer par cet effet, si toutefois les MILD ont été utilisées après la campagne de distribution de 2016.

Les périodes de transmission haute étaient courtes variant de 1 à 2 mois selon les années et significativement corrélées à août et septembre. A Sotuba, situé au sud, au Mali, Sissoko et al trouvent une période de transmission haute qui dure 5 à 6 mois [27]. L'insuffisance de la pluviométrie dans notre site d'étude pourrait expliquer cette différence.

La tranche d'âge des moins de 5 ans était autant touchée que celle des 5 ans et plus en dehors des périodes de forte transmission. Ce résultat corrobore avec la littérature qui explique que dans les zones hypo-endémiques à transmission sporadique voire épidémique, l'immunité chez les adultes est nulle comme chez les enfants [19]. Pour les périodes de forte transmission, la tranche d'âge des moins de 5 ans était la plus touchée en 2014 et 2015 contrairement à 2018 dont celle des 5 ans et plus était la plus atteinte. Cette tendance pourrait s'expliquer par les effets de la CPS qui avait bénéficié de quatre passages pour la première fois en 2018.

La composante Meteo1 (Température minimale, moyenne, maximale, en opposition la hauteur moyenne du fleuve) avait une corrélation positive non linéaire et significative avec l'incidence du paludisme à un délai de 11 semaines. Ce résultat est comparable à celui de Ouédraogo et al qui trouvent en 2017 à Ouagadougou une corrélation positive non linéaire avec un décalage de 14 semaines [23]. Aussi, au Nigéria dans les états du plateau, Nanvyat et al montrent que la température est significativement associée à la survenue du paludisme après 1 mois dans LGA de Jos-North et 3 mois dans la région de LGA de Barkin Ladi [25]. D'autres études confirment l'impact de la température sur l'incidence du paludisme influençant ainsi la durée du développement du parasite dans le moustique, la durée de développement aquatique initial du moustique et la survie de sa forme adulte [31,32].

L'augmentation de l'incidence du paludisme étaient significativement associées à la composante Meteo2 (Combinaison précipitation, nombre d'événement pluvieux et humidité relative) qui avait une relation quasi-linéaire à 4 semaines de retard. Au Burkina Faso, Ouédraogo et al trouvent en 2017 avec les mêmes facteurs météorologiques une

relation similaire avec un décalage de 2 semaines [23]. La présence de plusieurs masses d'eau (barrages) dans leur site d'étude par rapport au nôtre pourrait expliquer le décalage relativement long dans notre étude. Cependant en Ouganda, Ssempiira et al trouvent en 2018 une relation non-linéaire avec la précipitation allant de 1 à 3 mois chez les moins de 5 ans et liée à l'excès de pluie [24]. La rareté de l'excès de pluie à Bourem pourrait expliquer la relation quasi-linéaire dans notre étude.

La composante Meteo4 (variation de la température maximale) avait une corrélation positive et linéaire avec l'incidence du paludisme après 20 semaines. Il est reconnu par certaines études que les variations climatiques influencent la reproduction larvaire et la densité des adultes, avec une incidence directe sur l'intensité de la transmission du paludisme [18]. Une étude de Zhao et al conduite en Chine de 2004 à 2009 montre que la corrélation entre l'incidence du paludisme et la température moyenne dépend des fluctuations de température quotidiennes [31].

La composante Meteo3 (hauteur du fleuve), sans décalage avait une relation non linéaire et non significative avec le paludisme dans le modèle multivarié. Sissoko et al trouvent en 2017 à Sotuba une relation linéaire significative avec la hauteur de la rivière à un décalage de 6 semaines [27].

Les hot-spots de paludisme variaient selon les périodes de transmission et étaient situés au sud du district sanitaire le long du fleuve Niger. Rouamba et al en 2019 au Burkina Faso, trouvent des hot-spots de paludisme relativement stables pendant toute la période de l'étude et associés aux ménages à faible statut socioéconomique [26]. L'accessibilité des établissements de santé variant selon les saisons et la diversité culturelle pourraient expliquer notre résultat. La rareté des hot-pots au nord du cercle pourrait s'expliquer par la faible densité qui est aggravée par le déplacement de la population de cette zone vers le sud du cercle pendant les périodes sèches à la recherche de pâturage pour les animaux.

La distance qui sépare les CSCom au fleuve était significativement associée aux hot-spots dans le sens que, plus le CSCom est proche du fleuve, plus le risque d'être un hot-spot augmentait. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que 73,7% des CSCom étaient situées au sud, le long du fleuve Niger dont 87% de la population y vivait, autour d'un rayon de 15 km. Aussi les villages au sud du cercle sont situés au long du fleuve Niger dans le souci

de satisfaire les besoins quotidiens et les activités génératrices de revenu (élevage, jardinage, pêche,...).

Le taux d'utilisation du service de consultation était significativement associé aux hot-spots. Ce résultat pourrait s'expliquer par une augmentation de la morbidité diagnostiquée avec une bonne fréquentation du service de consultation. Plus le service de consultation est utilisé, plus les chances de diagnostiquer les malades dans la communauté augmentent. Des études réalisées au Burkina Faso par Rouamba et al de 2010 à 2014, en Thaïlande par Saita et al en 2017 montrent que la densité de la population, la distance qui sépare les populations des structures de santé et les mouvements des populations étaient associées à des points chauds de paludisme [26,33].

Les aires de santé de Tinsakou et de Karabassane sont celles qui étaient les plus exposées au risque de paludisme pendant les 5 ans. Leur accessibilité aux nomades qui suivaient le pâturage gonflant ainsi leur population pourrait expliquer cette situation en plus des facteurs météorologiques.

Aucune association n'a été établie entre les hot-spots et les zones de culture contrairement à l'étude de Ssempiira et al qui trouve en 2018 en Ouganda, des zones de grandes cultures associées à l'incidence plus élevée du paludisme [24]. Notre résultat pourrait s'expliquer à la superficie étroite des zones de culture à Bourem.

8. Conclusion - Recommandations

8.1. Conclusion

Cette étude a mis en évidence une évolution saisonnière uni modale et bimodale du paludisme. La combinaison des facteurs de précipitation, d'humidité relative et du nombre d'événement pluvieux était significativement associée à l'incidence du paludisme avec un décalage de quatre (4) semaines de même que la température qui avait un décalage de onze (11) semaines. La hauteur du fleuve n'avait pas une association significative avec l'incidence du paludisme. Les hot-spots de paludisme étaient associés à la distance du CSCCom au fleuve et au taux d'utilisation du service de consultation.

8.2. Recommandations

- Intégrer le secteur de la météorologie dans la planification des activités de lutte contre le paludisme ;
- Implémenter les campagnes de chimioprévention du paludisme saisonnier chez les enfants de moins de 5 ans d'août à janvier soit 5 passages ;
- Réaliser la sensibilisation sur l'utilisation des MILD dans les radios de proximité à tout moment ;
- Renforcer la surveillance épidémiologique et la disponibilité des intrants en priorisant les aires de santé les plus exposées à la transmission du paludisme d'août à février ;
- Réaliser une étude socio-économique et comportementale pour mieux appréhender d'autres facteurs associés à l'incidence du paludisme dans le district sanitaire de Bourem.

Références bibliographiques

1. Fane M. Impact du climat sur l'écologie et la transmission du paludisme : analyse du risque palustre dans le septentrion malien, PhD Thesis, Université de Grenoble. 2011.
2. Bhatt S, Weiss DJ, Cameron E, Bisanzio D, Mappin B, Dalrymple U, *et al.* The effect of malaria control on *Plasmodium falciparum* in Africa between 2000 and 2015. *Nature* 2015; **526**:207.
3. WHO/HTM/GMP/2016.2. Rapport sur le paludisme dans le monde 2015, résumé. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/205422/WHO_HTM_GMP_2016.2_fre.pdf;jsessionid=95E73075352227A3B8508331DC775F7C?sequence=1 (accessed 17 Jul2019).
4. OMS | Le rapport de cette année en un clin d'oeil. WHO. <http://www.who.int/malaria/media/world-malaria-report-2018/fr/> (accessed 14 Mar2019).
5. Mogeni P, Omedo I, Nyundo C, Kamau A, Noor A, Bejon P. Effect of transmission intensity on hotspots and micro-epidemiology of malaria in sub-Saharan Africa. *BMC medicine* 2017; **15**:121.
6. Direction nationale de la santé. Annuaire statistique du Système Local d'Information Sanitaire, version de 2017. Ministère de la santé et de l'hygiène publique; 2018.
7. Direction Nationale de la Santé. Annuaire statistique du Système Local d'Information Sanitaire, version de 2018. Bamako: Ministère de la santé et de l'hygiène publique; 2019.
8. Equipe cadre régional de la santé de Gao. Rapport annuel des activités de paludisme de la région de Gao selon le Canevas PNLP en 2014. Gao: Direction régionale de la santé; 2015.
9. Equipe cadre régional de la santé de Gao. Rapport annuel des activités de paludisme de la région de Gao selon le Canevas PNLP en 2015. Gao: Direction régionale de la santé; 2016.
10. Equipe cadre régional de la santé de Gao. Rapport annuel des activités de paludisme de la région de Gao selon le Canevas PNLP en 2016. Gao: Direction régionale de la santé; 2017.
11. Equipe cadre régional de la santé de Gao. Rapport annuel des activités de paludisme

de la région de Gao selon le Canevas PNLP en 2017. Gao: Direction régionale de la santé; 2018.

12. Equipe cadre régional de la santé de Gao. Rapport annuel des activités de paludisme de la région de Gao selon le Canevas PNLP en 2018. Gao: Direction régionale de la santé; 2019.

13. Equipe cadre du district sanitaire de Bourem. Rapport annuel des activités de paludisme du district sanitaire de Bourem selon le canevas PNLP en 2014. Bourem: District sanitaire; 2015.

14. Equipe cadre du district sanitaire de Bourem. Rapport annuel des activités de paludisme du district sanitaire de Bourem selon le canevas PNLP en 2015. Bourem: District sanitaire de Bourem; 2016.

15. Equipe cadre du district sanitaire de Bourem. Rapport annuel des activités de paludisme du district sanitaire de Bourem selon le canevas PNLP en 2016. Bourem: District sanitaire; 2017.

16. Equipe cadre du district sanitaire de Bourem. Rapport annuel des activités de paludisme du district sanitaire de Bourem selon le canevas PNLP en 2017. Bourem: District sanitaire; 2018.

17. Equipe cadre du district sanitaire de Bourem. Rapport annuel des activités de paludisme du district sanitaire de Bourem selon le canevas PNLP en 2018. Bourem: District sanitaire; 2019.

18. Delmont J. Paludisme et variations climatiques saisonnières en savane soudanienne d'Afrique de l'Ouest. *Cahiers d'Études africaines* 1982; **22**:117–133.

19. Université Médicale Virtuelle Francophone (UMVF), Association française des enseignants de parasitologie et mycologie (ANOFEL): Cours Paludisme, 2014. <http://campus.cerimes.fr/parasitologie/enseignement/paludisme/site/html/cours.pdf> (accessed 12 May 2019).

20. Gentilini. Gentilini M. Le paludisme dans Médecine Tropicale. Paris : Flammarion, 1990;91:122. - Recherche Google. https://www.google.com/search?q=Gentilini+M.+Le+paludisme+dans+M%C3%A9decine+Tropicale.+Paris+%3A+Flammarion%2C+1990%3B91%3A122.&rlz=1C5CHFA_e

nFR719FR719&oq=Gentilini+M.+Le+paludisme+dans+M%C3%A9decine+Tropicale.+ Paris+%3A+Flammarion%2C+1990%3B91%3A122.&aqs=chrome..69i57.1341j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8 (accessed 12 May2019).

21. Catry T, Pottier A, Marti R, Li Z, Roux E, Herbreteau V, *et al.* Apports de la combinaison d'images satellites optique et RADAR dans l'étude des maladies à transmission vectorielle : cas du paludisme à la frontière Guyane française – Brésil. *Confins* Published Online First: 24 September 2018. doi:10.4000/confins.15027
22. Doumbo O. Epidémiologie du paludisme au Mali : étude de la chloroquinorésistance, essai de stratégie de contrôle basée sur l'utilisation de rideaux imprégnés de perméthrine associée au traitement systématique des accès fébriles. 1992. <http://www.theses.fr/1992MON20039> (accessed 12 May2019).
23. Ouedraogo B, Inoue Y, Kambiré A, Sallah K, Dieng S, Tine R, *et al.* Spatio-temporal dynamic of malaria in Ouagadougou, Burkina Faso, 2011-2015. *Malar J* 2018; **17**:138.
24. Ssempiira J, Kissa J, Nambuusi B, Mukooyo E, Opigo J, Makumbi F, *et al.* Interactions between climatic changes and intervention effects on malaria spatio-temporal dynamics in Uganda. *Parasite Epidemiol Control* 2018; **3**:e00070.
25. Nanvyat N, Mulambalah CS, Barshep Y, Ajiji JA, Dakul DA, Tsingalia HM. Malaria transmission trends and its lagged association with climatic factors in the highlands of Plateau State, Nigeria. *Trop Parasitol* 2018; **8**:18–23.
26. Rouamba T, Nakanabo-Diallo S, Derra K, Rouamba E, Kazienga A, Inoue Y, *et al.* Socioeconomic and environmental factors associated with malaria hotspots in the Nanoro demographic surveillance area, Burkina Faso. *BMC Public Health* 2019; **19**:249.
27. Sissoko MS, Sissoko K, Kamate B, Samake Y, Goita S, Dabo A, *et al.* Temporal dynamic of malaria in a suburban area along the Niger River. *Malar J* 2017; **16**. doi:10.1186/s12936-017-2068-5
28. Anonyme. Climat et facteurs géographiques - Météo 45. https://www.meteo45.com/climat_et_facteurs_geographiques.html (accessed 4 Aug2019).
29. Diawara F, Steinhardt LC, Mahamar A, Traore T, Kone DT, Diawara H, *et al.* Measuring the impact of seasonal malaria chemoprevention as part of routine malaria

control in Kita, Mali. *Malar J* 2017; **16**:325.

30. Girond F, Randrianasolo L, Randriamampionona L, Rakotomanana F, Randrianariveლოსია M, Ratsitorahina M, *et al.* Analysing trends and forecasting malaria epidemics in Madagascar using a sentinel surveillance network: a web-based application. *Malar J* 2017; **16**:72.

31. Zhao X, Chen F, Feng Z, Li X, Zhou X-H. Characterizing the effect of temperature fluctuation on the incidence of malaria: an epidemiological study in south-west China using the varying coefficient distributed lag non-linear model. *Malaria Journal* 2014; **13**:192.

32. Robert V. Les changements globaux aggravent le risque d'expansion du paludisme. The Conversation. <http://theconversation.com/les-changements-globaux-aggravent-le-risque-dexpansion-du-paludisme-115951> (accessed 6 Jun2019).

33. Saita S, Pan-ngum W, Phuanukoonnon S, Sriwichai P, Silawan T, White LJ, *et al.* Human population movement and behavioural patterns in malaria hotspots on the Thai–Myanmar border: implications for malaria elimination. *Malaria Journal* 2019; **18**:64.

Annexes

1. Fiches d'enquêtes

1.1. Fiche de collecte des cas de paludisme

Année =							
Mois	Semaines	TDR/GE	Moins de 5 ans	5-14ans	15 ans et plus	Féminin	Masculin
Janvier	Semaine 1						
	Semaine 2						
	Semaine 3						
	Semaine 4						
	Semaine 5						
Février	Semaine 6						
	Semaine 7						
	Semaine 8						
	Semaine 9						
Mars	Semaine 10						
	Semaine 11						
	Semaine 12						
	Semaine 13						
Avril	Semaine 14						
	Semaine 15						
	Semaine 16						
	Semaine 17						
	Semaine 18						
Mai	Semaine 19						
	Semaine 20						
	Semaine 21						
	Semaine 22						
Juin	Semaine 23						
	Semaine 24						
	Semaine 25						
	Semaine 26						
Juillet	Semaine 27						
	Semaine 28						
	Semaine 29						
	Semaine 30						
Août	Semaine 31						
	Semaine 32						
	Semaine 33						
	Semaine 34						
	Semaine 35						
Septembre	Semaine 36						
	Semaine 37						
	Semaine 38						

Année =							
Mois	Semaines	TDR/GE	Moins de 5 ans	5-14ans	15 ans et plus	Féminin	Masculin
	Semaine 39						
Octobre	Semaine 40						
	Semaine 41						
	Semaine 42						
	Semaine 43						
Novembre	Semaine 44						
	Semaine 45						
	Semaine 46						
	Semaine 47						
	Semaine 48						
Décembre	Semaine 49						
	Semaine 50						
	Semaine 51						
	Semaine 52						

6.6. Fiche de collecte des données météorologiques

Année =						
Mois	Semaines	Température maximum (°c)	Température minimum (°c)	Température moyenne (°c)	Précipitation cumulative (mm)	Nombre d'évènement de pluie
Janvier	Semaine 1					
	Semaine 2					
	Semaine 3					
	Semaine 4					
	Semaine 5					
Février	Semaine 6					
	Semaine 7					
	Semaine 8					
	Semaine 9					
Mars	Semaine 10					
	Semaine 11					
	Semaine 12					
	Semaine 13					
Avril	Semaine 14					
	Semaine 15					
	Semaine 16					
	Semaine 17					
	Semaine 18					
Mai	Semaine 19					
	Semaine 20					
	Semaine 21					
	Semaine 22					
Juin	Semaine 23					
	Semaine 24					

Année =						
Mois	Semaines	Température maximum (°c)	Température minimum (°c)	Température moyenne (°c)	Précipitation cumulative (mm)	Nombre d'événement de pluie
	Semaine 25					
	Semaine 26					
Juillet	Semaine 27					
	Semaine 28					
	Semaine 29					
	Semaine 30					
Août	Semaine 31					
	Semaine 32					
	Semaine 33					
	Semaine 34					
	Semaine 35					
Septembre	Semaine 36					
	Semaine 37					
	Semaine 38					
	Semaine 39					
Octobre	Semaine 40					
	Semaine 41					
	Semaine 42					
	Semaine 43					
Novembre	Semaine 44					
	Semaine 45					
	Semaine 46					
	Semaine 47					
	Semaine 48					
Décembre	Semaine 49					
	Semaine 50					
	Semaine 51					
	Semaine 52					

1.2. Fiche de collecte des données météorologiques (suite)

Année =				
Mois	Semaines	Vitesse du vent (m/s)	Humidité relative (%)	Hauteur du fleuve Niger (cm)
Janvier	Semaine 1			
	Semaine 2			
	Semaine 3			
	Semaine 4			
	Semaine 5			
Février	Semaine 6			
	Semaine 7			
	Semaine 8			
	Semaine 9			
Mars	Semaine 10			
	Semaine 11			

Année =				
Mois	Semaines	Vitesse du vent (m/s)	Humidité relative (%)	Hauteur du fleuve Niger (cm)
	Semaine 12			
	Semaine 13			
Avril	Semaine 14			
	Semaine 15			
	Semaine 16			
	Semaine 17			
	Semaine 18			
Mai	Semaine 19			
	Semaine 20			
	Semaine 21			
	Semaine 22			
Juin	Semaine 23			
	Semaine 24			
	Semaine 25			
	Semaine 26			
Juillet	Semaine 27			
	Semaine 28			
	Semaine 29			
	Semaine 30			
Août	Semaine 31			
	Semaine 32			
	Semaine 33			
	Semaine 34			
	Semaine 35			
Septembre	Semaine 36			
	Semaine 37			
	Semaine 38			
	Semaine 39			
Octobre	Semaine 40			
	Semaine 41			
	Semaine 42			
	Semaine 43			
Novembre	Semaine 44			
	Semaine 45			
	Semaine 46			
	Semaine 47			
	Semaine 48			
Décembre	Semaine 49			
	Semaine 50			
	Semaine 51			
	Semaine 52			

1.3. Fiche de collecte des données d'utilisation du sol

Périodes	Date de capture	Zone de culture en %	Zone de végétation naturelle en %	Cours d'eau en %
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

1.4. Script R utilisés pour produire les résultats

- *Analyse en composante principale :*

```
> PCA.res <- PCA(dataset[,c(9:38)], quanti.sup = 1, graph = FALSE)
> plot(PCA.res, axes = c(1,2), choix = "var")
> plot(PCA.res, axes = c(1,3), choix = "var")
> plot(PCA.res, axes = c(2,3), choix = "var")
> plot(PCA.res, axes = c(1,4), choix = "var")
> plot(PCA.res, axes = c(2,4), choix = "var")
> dimdesc(PCA.res, axes=(1:4), proba = 0.05)
> dataset <- cbind.data.frame(dataset, PCA.res$ind$coord[,1:4])
> colnames(dataset)[42:45] <- c("Meteo1", "Meteo2", "Meteo3", "Meteo4")
```

- *Estimation des séries temporelles :*

```
> dataset$Cas <- ts(dataset$Cas, start = c(2014, 1, 1), frequency = 52)
> dataset$Sem <- ts(dataset$Sem, start = c(2014, 1, 1), frequency = 52)
> dataset$Mois <- ts(dataset$Mois, start = c(2014, 1, 1), frequency = 52)
> dataset$Annee <- ts(dataset$Annee, start = c(2014, 1, 1), frequency = 52)
> dataset$Pop <- ts(dataset$Pop, start = c(2014, 1, 1), frequency = 52)
> dataset$Inc <- ts(dataset$Inc, start = c(2014, 1, 1), frequency = 52)
> dataset$Meteo1 <- ts(dataset$Meteo1, start = c(2014, 01, 01), frequency = 52)
> dataset$Meteo2 <- ts(dataset$Meteo2, start = c(2014, 01, 01), frequency = 52)
```

```

> dataset$Meteo3 <- ts(dataset$Meteo3, start = c(2014, 01, 01), frequency = 52)
> dataset$Meteo4 <- ts(dataset$Meteo4, start = c(2014, 01, 01), frequency = 52)
- Décalage entre Incidence et composante Meteo (Exemple du cas de Meteo1) :
> Meteo1 <- dataset$Meteo1
> Ntot <- length(Meteo1)
> Mod1 <- gam(Cas ~ offset(log(Pop)) + s(Meteo1) , data = dataset, family =
quasipoisson())
> Res <- summary(Mod1)$dev.expl
> GCV <- Mod1$gcv.ubre
> lagmax <- 20
> for (i in 1:lagmax) {
+ Clag <- dataset$Cas[-c(1:i)]
+ Poplag <- dataset$Pop[-c(1:i)]
+ lag <- Meteo1[-c((Ntot-(i-1)):Ntot)]
+ Mod <- gam(Clag ~ offset(log(Poplag)) + s(lag), family = quasipoisson())
+ summary(Mod)
+ plot(Mod)
+ Res <- cbind(Res, summary(Mod)$dev.expl)
+ GCV <- cbind(GCV, Mod$gcv.ubre)
+ }
- Modélisation incidence et composante Meteo en uni variée après décalage (Exemple
Meteo1) :
> lag <- 11
> Meteo <- dataset$Meteo1
> Clag1 <- dataset$Cas[-c(1:lag)]
> Poplag1 <- dataset$Pop[-c(1:lag)]
> lag1 <- Meteo[-c((260-(lag-1)):260)]
> Mod1 <- gam(ClagFin~offset(log(PoplagFin))+s(lagFin), family = quasipoisson())
> summary(Mod1)
> plot(Mod1)

```

- ***Modélisation incidence et composante Meteo en multi variée après décalage :***

```
> Ilag <- dataset$Inc[-c(1:20)]
> Clag <- dataset$Cas[-c(1:20)]
> Poplag <- dataset$Pop[-c(1:20)]
> Anneelag <- dataset$Annee[-c(1:20)]
> Moislag <- dataset$Mois[-c(1:20)]
> CPSlag <- dataset$CPS[-c(1:20)]
> length(Clag)
> tsIlag <- ts(Ilag, start = c(2014,01,01), frequency = 52)
> tslag1 <- ts(lag1, start = c(2014,01,01), frequency = 52)
> tslag2 <- ts(lag2, start = c(2014,01,01), frequency = 52)
> tslag3 <- ts(lag3, start = c(2014,01,01), frequency = 52)
> tslag4 <- ts(lag4, start = c(2014,01,01), frequency = 52)
> ModMult<- gam(Clag ~ offset(log(Poplag)) + s(tslag1) + s(tslag2) + s(tslag3) +
s(tslag4) + Anneelag + CPSlag, family = quasipoisson())
> summary(ModMult)
> par(mfrow=c(2,2))
> plot(ModMult)
```

- ***Change point analysis selon le changement de la moyenne et de la variance de l'incidence du paludisme :***

```
> Cpt <- cpt.meanvar(dataset$Inc, penalty="MBIC", method="PELT")
> plot(Cpt, ylab="Inc", xlab="Sem")
```

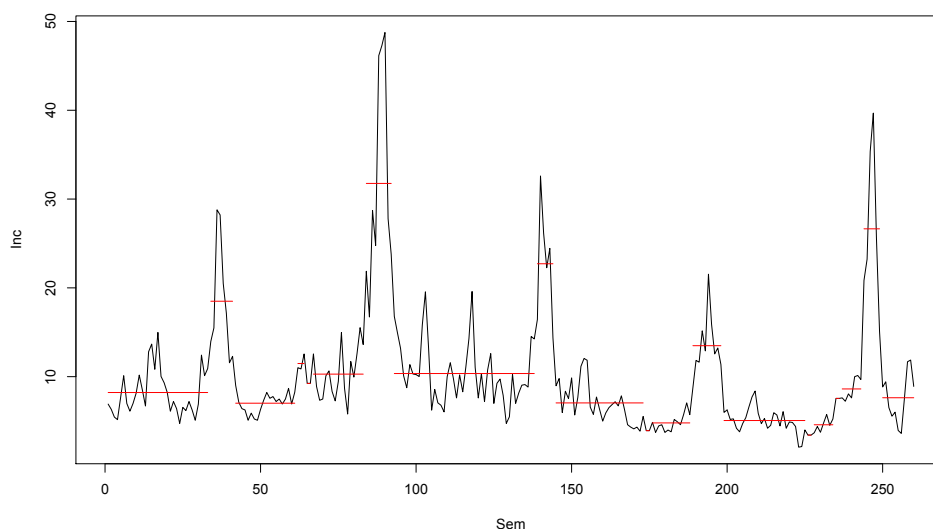


Figure 12 : Variation de la moyenne et de la variance de l'incidence du paludisme pour 10 000 personnes-semaine dans le district sanitaire de Bourem de 2014 à 2018.

- Modélisation Hot-spots et facteurs d'exposition (Exemple uni variée et multivariée)

```
>Mod1<- glm(Hospot~Taux_util, data = dataset, family = binomial(link = logit))
```

```
>Modmult<- glm(Hospot~Taux_util + Distance, data = dataset, family = binomial(link = logit))
```

Tableau VIII : Liste des superviseurs et enquêteurs

Nom et Prénom	Fonction	Contact
Saloum Alhad	Superviseur	99569064 / 79407053
Abdramane Konaté	Superviseur	75244875
Ismaïel Bagayogo	Enquêteur	66756929 / 79614560
Alassane Moussa	Enquêteur	77791791
Mancho Attaher	Enquêteur	92806119
AbdoulKader Maiga	Enquêteur	79425925
Moussa Goro	Enquêteur	76326046
Abdoulaye Maiga	Enquêteur	78519767 / 66756939
Djibril Coulibaly	Enquêteur	78417754 / 66756941
Ibrahima Kelly	Enquêteur	75396231
Seydou Kanté	Enquêteur	75204136
Hamsatou Kanté	Enquêteur	74421287

Nom et Prénom	Fonction	Contact
Amidou Togola	Enquêteur	95274583
Alassane Touré	Enquêteur	79334767
Almoustapha Issoufi	Enquêteur	76194300
Djibrilla Touré	Enquêteur	74427128
Alassane Maiga	Enquêteur	98732391
Mohamed Maiga	Enquêteur	64489717
Oulamine Ag Ottoya	Enquêteur	64117316
Albachar Harouna	Enquêteur	67621542 / 75113250