

# Université Assane Seck de Ziguinchor



U.F.R Sciences et Technologies

Département de Physique

**Mémoire de Master**

Mention : Physique et Applications

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

## **Observation et Modélisation de l'Occurrence du paludisme dans la Région de Ziguinchor (Basse Casamance) avec le Modèle VECTRI**

Présenté par : **Lamine KONTE**

Encadrant : **Dr. Samo DIATTA**

Co-Encadrant : **Dr Ibrahima DIOUF**

Soutenu publiquement le 05 Novembre 2021 devant le jury composé de :

M. Bamol Ali SOW	Maître de Conférences CAMES	UASZ/UFR ST	Président
M. Ibrahima MBAYE	Maître de Conférences CAMES	UASZ/UFR ST	Rapporteur
M. Mamadou Lamine MBAYE	Maître Assistant CAMES	UASZ/UFR ST	Examineur
M. Joseph Samba Sène DIATTA	Maître Assistant CAMES	UASZ/UFR ST	Examineur
M. Samo DIATTA	Maître de Conférences CAMES	UASZ/UFR ST	Encadrant
M. Ibrahima DIOUF	Chercheur	NOAA	Co-Encadrant

Année Académique 2020/2021



## Dédicaces

À la mémoire de mon père Saloum Konté, à titre posthume je vous dédicace ce mémoire. Papa repose en paix, qu'ALLAH vous accueille dans son plus haut PARADIS.

À ma mère Diénéba Thiam

À mes oncles et tantes

À mes frères et soeurs

Je dédicace ce memoire à tous mes chers parents pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.

## Remerciements

D'abord je remercie ALLAH sans fin pour m'avoir donné la force d'accomplir ce travail.

J'exprime ma reconnaissance et mon respect envers mes encadrants Dr. Samo DIATTA enseignant chercheur à l'Université Assane Seck de Ziguinchor et Dr. Ibrahima DIOUF, chercheur à la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) pour leur disponibilité et leur compréhension. Ils m'ont toujours orienté et aidé à trouver des solutions pour avancer dans mon travail.

Je remercie également le Président de jury et l'ensemble de ses membres d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je remercie tous les **enseignants chercheurs du département de Physique** : Pr. Moctar Camara, Dr. Bamol Ali Sow, Dr. Mamadou Lamine Mbaye, Dr. Ababacar Ndiaye, Pr. Lat Grand Ndiaye, Dr. Moustapha Thiame, Pr. Diouma Kobor, Dr. Modou Tine, Dr. Joseph Samba Sène Diatta, Dr Habib Dieng pour leurs encouragements.

Je remercie aussi les chercheurs du Laboratoire d'Océanographie, des Sciences de l'Environnement et du Climat (LOSEC) :

**les docteurs:** Dr. Ibrahima Diba et Dr. Alioune Badara Sarr ;

**les doctorants:** M. Hamady Ngansou Sabaly, M. Cheikh Waly Diédhiou, M. Jules Basse; M. Yousouph Coly et M. Moustapha Sow ;

**les Post-Master** : M. Jacques Daman Diouf, M. Amadou Diouf, M. Assane Ndiaye, M. Dioumacor Faye, M. Adama Thiandoum, Mme Fatou Khoulé, M. David Sagna pour leur apport.

**Mes camarades de promotion** : Arame Dièye, Birane Ndom, Sérigne Mbacké Coly, Pierre Malang Sadio, Yousouph Badji, Yousoupha Cissé, Samba Laye Diop, Mamadou Ndour, Khadidiatou Sy, Malick Mbengue, Marie André Faye, Amadou Barro pour leur amitié, leur apport et leur fraternité.

Je remercie Papa Fall, doctorant au département de physique à l'Université Gaston Berger de Saint-Louis.

Je remercie mon grand frère Dr Ansoumana Bodian, enseignant chercheur au département de géographie à l'Université Gaston Berger de Saint-Louis pour ses encouragements et conseils.

J'adresse mes sincères remerciements particuliers à ma famille pour leur soutien moral et matériel, il s'agit de:

- **mes oncles:** Ibrahima Konté, Kalilou Konté, Ansoumana Konté, Adama Fofana, Moussa Fofana, Abdoulaye Fofana;
- **mes tantes:** Fatou Konté, Khadidiatou Dramé, Fatoumata Sarr;
- **mes sœurs:** Bintou Konté, Aissatou Konté, Founé Konté, Awa Fofana, Ndèye Fatou Fofana; Khadiatou Cissé, Mariama Diédhiou ;
- **mes frères:** Mamadou Sonko, Nfaly Badara Konté, Aboulaye Konté, Moustapha Konté;
- **mes amis:** Papis Thecagne, Janvier Tendeng, Jean Pierre Gomis, Ibrahima Khalil Sow;

## Résumé

Le paludisme est un problème majeur de santé publique en Basse Casamance, une maladie sensible au climat, à l'environnement et aux conditions socio-économiques, mais dont la relation précise avec ces facteurs reste incertaine. Une meilleure compréhension de la relation entre la maladie et ses moteurs permet de bien agir pour sa prévention. Nous avons utilisé le modèle VECTRI (*VECTor borne disease community model of ICTP, Trieste*) pour étudier la variabilité spatio-temporelle des modes de transmission du paludisme dans les communes de la Basse Casamance. Les données climatiques telles que la température ERA5 (*European Center for Medium Range Weather Forecast reanalysis version 5*) et les précipitations CHIRPS (*Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Stations*) de 2000 à 2016 ont été utilisées comme entrée pour simuler les paramètres du paludisme. Les données d'observation de cas de paludisme de 2010 à 2015 sont utilisées pour valider le modèle. La capacité du modèle VECTRI à simuler la saisonnalité de l'incidence du paludisme à l'échelle locale est évaluée. Le modèle révèle une période de forte transmission de paludisme entre août et novembre avec un maximum d'EIR (*Entomological Inoculation Rate*) de 540 (piqûres de moustiques infectieux par personne et par mois) atteint au mois de septembre. Les résultats révèlent que la variabilité en termes d'intensité et de durée de la transmission du paludisme est principalement contrôlée par les précipitations. Les résultats confirment que le risque de transmission du paludisme est principalement lié aux variables climatiques telles que les précipitations et la température ainsi qu'aux caractéristiques spécifiques du paysage. La capacité de représenter les relations dans des modèles dynamiques de maladie permettrait de contribuer à son atténuation et à la planification de l'adaptation. Les résultats de cette étude devraient être utiles aux décideurs pour un meilleur accès aux prévisions climatiques et l'application sur la santé dans le cadre de la lutte contre le paludisme en Basse Casamance.

**Mots clés :** Paludisme ; Basse Casamance; Modélisation; VECTRI

## Abstract

*Malaria is a major public health problem in Low Casamance, a disease that is sensitive to climate, environment, and socio-economic conditions, but whose precise relationship with these factors remains uncertain. A better understanding of the relationship between the disease and its drivers forces allows for effective prevention. We used the VECTRI model (VECTor borne disease community model of ICTP, Trieste) to study the spatio-temporal variability of malaria transmission patterns in the communes of the Low Casamance. Climate data such as ERA5 (European Center for Medium Range Weather Forecast reanalysis version 5) temperature and CHIRPS (Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Stations) rainfall from 2000 to 2016 were used as input to simulate malaria parameters. Observed malaria cases data from 2010 to 2015 are used to validate the model. The ability of the VECTRI model to simulate the seasonality of malaria incidence at the local level is assessed. The model reveals a period of high malaria transmission between August and November with a maximum Entomological Inoculation Rate (EIR) of 540 (infectious mosquito bites per person per month) reached in September. The results reveal that the variability in intensity and duration of malaria transmission is mainly controlled by rainfall. The results confirm that the risk of malaria transmission is mainly related to climatic variables such as rainfall and temperature as well as to specific landscape characteristics. The ability to represent the relationships in dynamic disease models would contribute to its mitigation and adaptation planning. The results of this study should be useful to decision makers for better access to climate predictions and application on health in the context of malaria control in Low Casamance.*

**Keywords:** *Malaria; Low Casamance; Modeling; VECTRI*

## Liste des abréviations

**A:** Anophèle

**AVC:** Accident Vasculaire Cérébral

**CC:** changements climatiques

**CCNUCC:** Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques

**CDO:** Climate Data Operators

**CHIRPS:** Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Stations

**CS:** Centre de Santé

**EIR:** Entomological Inoculation Rate

**ENSO:** El Nino Southern Oscillation

**ERA5:** European Center for Medium Range Weather Forecast reanalysis version 5

**GIEC:** Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat

**ICTP:** International Centre for Theoretical Physics

**Lat:** Latitude

**Lon:** Longitude

**OMM:** Organisation Météorologique Mondiale

**OMS:** Organisation Mondiale de la Santé

**P:** Plasmodium

**PIDD :** Plan Interdépartemental de Développement

**PNLP:** Programme National de Lutte contre le Paludisme

**PS:** Poste de Santé

**RGPHAE:** Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Elevage

**RP:** Ratios de Parasites

**VECTRI:** VECTor-borne disease Community model of ICTP, TRIeste

# Table des matières

Dédicaces .....	i
Remerciements .....	ii
Résumé .....	iv
Abstract .....	v
Liste des abréviations .....	vi
Table des matières .....	vii
Listes des figure .....	ix
Liste des tableaux .....	x
Introduction générale.....	1
Chapitre 1: Climat, Environnement et Santé.....	3
1.2 Changements climatiques.....	3
1.3 Impacts des changements environnementaux et climatiques sur la santé .....	3
1.3.1 Impacts des changements environnementaux sur la santé .....	4
1.3.2 Impact du changement climatique sur la santé.....	5
1.4 Facteurs métrologiques .....	6
1.4.1 Précipitations .....	6
1.4.2 Température.....	7
1.5 Facteurs environnementaux.....	7
1.5.1 Masses d'eau temporaires et permanentes .....	7
1.5.2 Irrigation.....	8
1.6 Facteurs humains.....	8
1.6.1 Densité de population.....	8
1.6.2 Immunité .....	9
1.7 Cycle biologique de l'anophèle.....	9
1.7.1 Phase aquatique ou pré-imaginale.....	9
1.7.2 Phase aérienne : émergence, accouplement et cycle gonotrophique.....	10
1.8 Généralités sur le paludisme .....	11
1.8.1 Les parasites responsables de l'infection palustre chez l'Homme .....	12
1.8.2 Le vecteur de transmission.....	12
1.8.3 Le cycle évolutif du Plasmodium.....	12
Chapitre 2: Données et Méthodes .....	14
2.1 Présentation de la zone d'étude .....	14
2.2.1 Données climatiques .....	16
2.2.2 Données de population .....	16
2.3. Méthodes .....	17

2.3.1 Analyse des données de cas cliniques .....	17
2.4.2 Modélisation des cas de paludisme .....	18
2.4.2.1 Modèle de paludisme VECTRI .....	18
2.4.2.2 Approche méthodologique pour tourner le modèle VECTRI .....	20
2.4.2.3 Les paramètres de sortie VECTRI.....	21
2.4.2.4 Les options de calibration dans VECTRI.....	21
Chapitre 3: Résultats et Discussions .....	23
3.1 Analyse spatio-temporelle des cas de paludisme en Basse Casamance .....	23
3.1.1 Cycle saisonnier des précipitations en Basse Casamance .....	24
3.1.2 Cycle saisonnier des températures en Basse Casamance .....	25
3.2 Modélisation du paludisme par le modèle VECTRI .....	26
3.2.1 Modélisation spatiale de paludisme .....	26
3.2.2 Modélisation par point village.....	31
3.2.2.1 Anomalies des précipitations, de la température, des cas observés et de l'EIR simulé dans les communes d'Oulampane, de Sindian, d'Ouonck et de Bignona .....	31
3.2.2.2 Comparaison de la saisonnalité de l'EIR simulé et des cas de paludisme observés dans 16 communes de la région de Ziguinchor.....	32
Conclusion.....	36
Bibliographie.....	38
Annexes.....	42

## Listes des figure

<b>Figure 1</b> : Cycle biologique des anophèles (Carnevale et al.2009)	10
<b>Figure 2</b> : Cycle de reproduction du plasmodium (Source: CDC, 2002)	13
<b>Figure 3</b> : Représentation de la région de Ziguinchor	15
<b>Figure 4</b> : Structure du modèle VECTRI	19
<b>Figure 5</b> : Les différentes étapes de la modélisation avec le modèle VECTRI	20
<b>Figure 6</b> : Carte de la répartition spatiale des cas de paludisme observé dans les communes de la Basse Casamance (2014-2015)	23
<b>Figure 7</b> : Cycle saisonnier de la précipitation en Basse Casamance (2000-2016)	25
<b>Figure 8</b> : Cycle saisonnier de la température en Basse Casamance (2000-2016)	26
<b>Figure 9</b> : Distribution spatiale de l'EIR dans la Basse Casamance (2000-2016)	27
<b>Figure 10</b> : Cycle saisonnier du taux d'inoculation entomologique (2000-2016)	28
<b>Figure 11</b> : Diagramme Hovmöller de l'EIR (2000-2016)	29
<b>Figure 12</b> : Diagramme intra et interannuel de l'EIR (2000-2016)	30
<b>Figure 13</b> : Variation méridienne de l'EIR (2000-2016)	31
<b>Figure 14</b> : Anomalies des précipitations, de la température, des cas observés et de l'EIR simulé dans les communes d'Oulampane (a), de Sindian (b), d'Ouonck (c) et de Bignona (d) (2010-2015)	32
<b>Figure 15</b> : Diagramme Hovmöller des précipitations mensuelles (a), des simulations mensuelles de l'EIR (b) et des cas de paludisme observés mensuels (c) dans 16 communes de la Basse Casamance (2014-2015)	35

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : Données de paludisme recueillies dans les différentes structures de Santé dans la région de Ziguinchor .....	16
<b>Tableau 2</b> Les différents types de données météorologiques utilisées .....	16
<b>Tableau 3</b> : Données de populations, des superficies, des densités de populations des différentes Communes.....	17
<b>Tableau 4</b> : Bloc de synthèse pour la modélisation du paludisme.....	20
<b>Tableau 5</b> : Les sorties de VECTRI.....	21
<b>Tableau 6</b> : run control parameters .....	22
<b>Tableau 7</b> : interventions .....	22
<b>Tableau 8</b> : population.....	22
<b>Tableau 9</b> : sheme choice parameters.....	42
<b>Tableau 10</b> : larvae parameters (version 1.2.6) .....	42
<b>Tableau 11</b> : larvae parameters (version 1.3.5 onwards) .....	42
<b>Tableau 12</b> : hydrology (version 1.2.6, a new beta scheme is available in 1.3.0).....	43
<b>Tableau 13</b> : biting parameters .....	43
<b>Tableau 14</b> : gonotrophic and sporogenic .....	43
<b>Tableau 15</b> : toy climate .....	43

## Introduction générale

Le paludisme est une maladie à transmission vectorielle dont la présence et la transmission dépendent de trois facteurs primordiaux : le parasite plasmodium, l'anophèle vecteur et l'hôte humain. En dehors de ces facteurs essentiels, le risque de transmission du paludisme peut être maintenu ou renforcé par des conditions environnementales, climatiques, ou des facteurs socio-économiques. Le paludisme reste l'un des problèmes de santé publique urgents en Afrique (Guerra et al., 2008). La difficulté d'éliminer le paludisme en Afrique Subsaharienne est due à une interaction complexe de nombreux facteurs (Caminade et al., 2014). Le principal facteur étant l'adéquation du climat et de l'environnement de la région pour la transmission du paludisme qui permet la prédominance de vecteurs efficaces de la maladie (Sinka et al., 2010; Murray et al., 2012). La résistance des parasites antipaludéens (Gregson et al., 2005) et les vecteurs du paludisme aux insecticides (Choi et al., 2004 ; Fontenille et al., 2004) sont des défis supplémentaires. L'endémicité du paludisme au Sénégal a été étudiée dans les Niayes du Sénégal par Diouf et al (2017). Ces études ont révélé la disparition de l'espèce *funestus*, l'un des vecteurs déterminants du paludisme dans la zone sahélienne. Les changements climatiques sont donc considérés comme l'une des menaces les plus graves posées au développement durable avec des effets défavorables attendus entre autres sur : la santé humaine, la sécurité alimentaire, l'activité économique, les ressources en eau et les autres ressources naturelles. De nombreuses études permettent de mieux comprendre l'influence des facteurs climatiques sur l'épidémiologie du paludisme (Gupta et al., 1998). Ainsi, la forte présence du paludisme dans les régions Sud du Sénégal montre une certaine dépendance vis-à-vis des paramètres du climat. La fréquence d'événements météorologiques extrêmes tels que des inondations ou des sécheresses peuvent modifier la distribution du paludisme. Les changements climatiques peuvent favoriser la transmission du paludisme à travers l'augmentation de la température (Freeman et al., 1996). Des températures élevées diminuent aussi la durée du cycle de reproduction du parasite à l'intérieur du moustique. La pluviométrie est également un facteur clé qui détermine l'existence des espèces anophèles, leur abondance et la durée de la saison de transmission de paludisme (Lindsay et al., 1996). Dans tout le territoire sénégalais de manière générale, depuis les années 70, les précipitations ont diminué de près de 30% avec des sécheresses persistantes en 1972, 1983 et 1991 à 1992 (Hulme et al., 1992 ; Janicot et al., 1993 ; Lebel et al., 2009). La baisse d'occurrences de paludisme est probablement liée à la disparition des anophèles *funestus* et la diminution de la population des anophèles *gambiae*, attribuée à des changements

environnementaux occasionnés par des activités humaines selon Le Masson et al (1997). En revanche, depuis le début des années 2000, les saisons des pluies plus humides que précédemment ont favorisé la multiplication de vecteurs du paludisme dans le Sahel. Il a été même constaté dans certaines régions le retour de l'espèce *funestus* beaucoup plus tôt (Mouchet et al., 1993 ; Dia et al., 2008). Cependant, quelques phénomènes climatiques exceptionnels comme des inondations qui contrastent avec les années de faibles pluviométries, peuvent déclencher des épidémies de paludisme notamment au sein des populations vulnérables. Le paludisme reste toujours un problème pour la santé publique. En 2015, au niveau mondial, il y a 212 millions de cas et 429 000 décès liés au paludisme. L'Afrique subsaharienne est de loin la zone plus touchée avec 90 % des cas de paludisme (191 millions de cas) et 92 % des décès liés au paludisme (395 000 décès). Les enfants de moins de cinq ans ont représenté près de 70 % de l'ensemble des décès (OMS, 2016). Au niveau national, le Sénégal a enregistré 265624 cas et 500 décès. La région de la Basse Casamance a eu 8706 cas (PNLP, 2015). Sur le plan économique il a également engendré une perte dans l'ordre de 12 milliards de FCFA au PIB ce qui a causé de lourdes dépenses d'environ 25% sur les revenus des ménages. Cela constitue 40% des dépenses de santé publique (OMS, 2018).

Dans ce travail, il s'agit de modéliser l'occurrence du paludisme dans la région de Ziguinchor (Basse Casamance) avec le modèle VECTRI et de valider les résultats avec des données de cas de paludisme. Cet objectif général se traduit par des objectifs spécifiques ci-après :

Dans un premier temps analyser la répartition spatio-temporelle des cas de paludisme en Basse Casamance.

Puis simuler la répartition spatiale du paludisme en Basse Casamance.

Enfin faire une simulation par point village en Basse Casamance.

Le chapitre 1 parle des généralités sur le climat, la santé et l'environnement, puis une description sommaire des données et de la méthodologie utilisée est fait au chapitre 2. Le chapitre 3 est réservé à l'analyse et à la discussion des résultats obtenus. Enfin, la dernière partie est consacrée à la conclusion et aux perspectives.

# **Chapitre 1: Climat, Environnement et Santé**

Dans ce chapitre, nous abordons d'abord les notions de climat et de changements climatiques. Ensuite, nous présentons les impacts des changements environnementaux et climatiques sur la santé, les facteurs météorologiques, les facteurs environnementaux et les facteurs humains. La dernière partie du chapitre parle du cycle biologique de l'anophèle et la généralité sur le paludisme.

## **1.1. Notion de climat et météorologie**

Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), le climat correspond à l'ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un lieu donné (température, précipitations, ensoleillement, humidité de l'air, vitesse des vents, etc.) sur des périodes longues (au minimum 30 ans). Il se distingue de la météorologie qui est basée sur l'observation et la prévisibilité des phénomènes physiques. La météorologie désigne également l'étude du temps à court terme et dans des zones ponctuelles. La caractérisation du climat est effectuée à partir de mesures statistiques annuelles et mensuelles et sur des données atmosphériques locales.

## **1.2 Changements climatiques**

Selon la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), les changements climatiques (CC) sont des changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours des périodes comparables.

D'après le Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Évolution du Climat (GIEC), les changements climatiques se réfèrent à une variation statistiquement significative dans l'état moyen du climat ou dans sa variabilité, variation persistant sur une longue période de temps (décennies ou plus). Les changements climatiques peuvent être dus aux processus naturels internes, à des forçages exogènes, à des changements anthropogéniques persistants dans l'atmosphère et dans l'utilisation des terres.

## **1.3 Impacts des changements environnementaux et climatiques sur la santé**

### 1.3.1 Impacts des changements environnementaux sur la santé

Les changements environnementaux ont un impact négatif sur la santé d'une manière générale. Parmi ces impacts, nous pouvons citer ceux liés aux inondations. Avec les inondations, l'eau est à risque d'être contaminée. En effet, l'eau peut inonder des terres agricoles parsemées de selles d'animaux d'élevage, des fosses septiques, des terres où sont répandus des pesticides et autres produits chimiques agricoles. L'eau peut ainsi être contaminée par des micro-organismes contenus dans les selles d'animaux, des produits toxiques, des métaux lourds ou du monoxyde de carbone. Cette eau sous l'effet d'une forte pluie, peut ruisseler jusqu'au cours d'eau souterrain, aussi appelé nappe phréatique. Les personnes qui vont boire l'eau provenant de cette nappe risquent de contracter des infections associées aux micro-organismes contenus dans les selles des animaux et des humains menant à des symptômes gastro-intestinaux diarrhéiques comme le choléra au Bangladesh (Rodo et al., 2002) et en Afrique de l'Ouest (Magny et al., 2007). Elles peuvent être à l'origine de blessures et de décès, en raison d'électrochocs, mais aussi de noyades et de traumatismes qui sont majoritairement secondaires à des accidents d'automobiles dont l'eau rend le contrôle ardu (Anderman et al., 2012). La pollution de l'air traditionnellement considérée comme un problème urbain est désormais bien comprise comme affectant toutes les populations vivant en dehors des centres urbains, et ayant un impact sur la vie de ceux qui vivent dans les zones rurales ou périurbaines. Les risques sanitaires que pose la pollution de l'air sont particulièrement néfastes pour les populations les plus vulnérables (par exemple les pauvres, les personnes âgées, les enfants, les femmes et les personnes travaillant à l'extérieur). L'OMS (2017) estime également que la pollution de l'environnement est, chaque année, à l'origine du décès de 1,7 million d'enfants de moins de 5 ans. Les canicules sont plus fréquentes et durent plus longtemps. Ainsi, les impacts négatifs sur la santé liée aux canicules y sont aggravés. Par ailleurs, les hausses de températures associées aux canicules et aux îlots de chaleur urbaine amplifient les effets des polluants aériens sur la santé. D'abord, les températures élevées augmentent les réactions chimiques entre les différents polluants aériens qui sont impliqués dans la création de smog (un mélange de brouillard et de fumées formant une nappe épaisse, grisâtre ou jaunâtre, irrespirable), qui est associé aux maladies cardiovasculaires comme les infarctus cardiaques et les AVC et aux problèmes respiratoires comme l'asthme (Reeves, 2011). Une telle infection représente des risques de complications non négligeables pour la santé notamment pour le système nerveux (troubles neurologiques), le système cardiaque (inflammation des tissus cardiaques), les jointures et la peau (Lindsay et al., 2016).

### 1.3.2 Impact du changement climatique sur la santé

Le rapport de 2013 du GIEC a catégoriquement conclu que le changement climatique est réel et les activités humaines en sont la cause principale. La concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère est directement liée à la température globale moyenne de la planète. Depuis la révolution industrielle, la moyenne des températures mondiales ne fait qu'augmenter de façon constante, en parallèle avec l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre. Une considération de ces faits scientifiques en leur ensemble permet d'affirmer que les changements climatiques représentent l'enjeu le plus déterminant, pressant et décisif du 21<sup>e</sup> siècle. Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS, 2015), entre 2030 et 2050, les effets du changement climatique pourraient être à l'origine de 250 000 décès prématurés supplémentaires par an dans le monde (malnutrition, paludisme, diarrhée, fortes chaleurs, etc.). Or, le changement climatique agit sur les déterminants environnementaux et sociaux de la santé : la qualité de l'air, la qualité et la disponibilité de l'eau potable, la sécurité alimentaire, etc. Les études des influences climatiques sur les maladies infectieuses ont principalement mis l'accent sur l'influence de l'ENSO. Ce phénomène ENSO est liée à l'incidence du paludisme en Amérique du Sud, la fièvre de la vallée du rift en Afrique de l'Est, la dengue en Thaïlande, le syndrome pulmonaire à hantavirus dans le sud-ouest des États-Unis, les maladies diarrhéiques infantiles en Pérou et le choléra au Bangladesh (Patz et al., 2005). Les facteurs climatiques sont un déterminant important de diverses maladies à transmission vectorielle, de grand nombre de maladies entériques et de certaines maladies d'origine hydrique. La relation entre les variations d'année en année du climat et des maladies infectieuses est particulièrement évidente chez les populations vulnérables et lorsque les variations climatiques sont marquées. Dans les pays en développement, les populations exemptes d'immunité sont plus exposées à des épidémies quand les conditions météorologiques favorisent la transmission (Patz et al., 2006). Il est à présent admis que la santé de la planète est liée à celle de sa population. Le réchauffement du climat éprouve les écosystèmes qui semblent supporter difficilement les changements écologiques rapides. L'augmentation des températures a déjà déclenché des changements de météo avec des canicules et des sécheresses qui affectent durement la santé des populations. La propagation des maladies dépendra d'une gamme de facteurs écologiques et sociétaux bien plus large que la pluie et le beau temps (Patz et al., 2002). La température, les précipitations et le niveau de la mer sont des facteurs capitaux influençant la survie, la reproduction et l'activité du vecteur. En effet, la petite taille de ces organismes limite leur capacité de thermorégulation, faisant en sorte que le climat influence directement leur température corporelle. Par ailleurs, la

fluctuation saisonnière des maladies à transmission vectorielle n'est pas une hypothèse née avec l'avènement des changements climatiques, mais une composante des cycles de transmission justifiant la recherche et la surveillance du lien entre le climat et ces infections. Par exemple, le paludisme et la fièvre dengue voient leur transmission augmenter durant les périodes très pluvieuses (McMichael et al., 2003). La transmission du protozoaire responsable du paludisme dans la région de Ziguinchor (Basse Casamance) intervient aussi sur des modalités identiques. Cette interdépendance entre le développement des insectes vecteurs et les agents microbiens ou parasitaires qu'ils véhiculent en fonction notamment de la température environnementale. En effet, le réchauffement climatique rend ces études encore plus importantes pour tenter de prédire l'évolution de la distribution géographique de la maladie. Les maladies à transmission vectorielle comme le paludisme apparaissent particulièrement sensibles aux changements climatiques. Le parasite passe la moitié de sa vie au sein d'un hôte invertébré (moustique), dont le cycle de vie est particulièrement dépendant des conditions climatiques telles que la température (Paaijmans et al., 2010). De plus, le parasite lui-même dépend fortement de la température. Concernant le paludisme, la température minimale pour le développement du *Plasmodium P. falciparum* est de 18 °C (Patz et al., 2001). Il apparaît donc clairement qu'une augmentation globale de la température peut augmenter la surface de distribution du parasite (Reisen et al., 2001 ; Olson et al., 2006).

## **1.4 Facteurs métrologiques**

### **1.4.1 Précipitations**

Les précipitations sont liées au paludisme depuis les premiers jours de la recherche sur la maladie (Gill, 1920). Les précipitations fournissent les sites aquatiques nécessaires aux vecteurs du paludisme pour pondre leurs œufs et devenir des vecteurs adultes à travers les stades larvaires et nymphes (Reiter, 2001). Les adultes émergents se dispersent ensuite en fonction de leur distance de vol (Kar et al., 2014). En outre, les précipitations fournissent en toute connaissance de cause l'humidité (au moins 60%) nécessaire à la survie des vecteurs (Thompson et al., 2005). Des études ont rapporté une corrélation entre le début de la saison des pluies et une augmentation de l'abondance des vecteurs (Craig et al., 1999). Une pluie modérée est bénéfique pour les moustiques immatures (stades liés à l'eau) qui luttent pour leur survie. Mais des pluies excessives peuvent entraîner des niveaux d'eau plus élevés, des vitesses d'écoulement élevées et l'inondation des retenues d'eau, ce qui nuit à leur survie (Martens et al., 1995 ; Paaijmans et al., 2007).

## 1.4.2 Température

La température régule le taux de développement et de survie du vecteur et du parasite (Beck-Johnson et al., 2013). La température minimale requise pour le développement du *P. falciparum* et du *P. vivax* est d'environ respectivement 18 °C et 15 °C (Craig et al., 1999). Des températures élevées (basses) raccourcissent (allongent) le temps nécessaire à la maturation des moustiques et des parasites (Le Sueur et al., 1991). Le développement larvaire peut prendre plus de 45 jours à 16 °C. Le cycle sporogonique peut prendre environ 9 à 10 jours à des températures de 28 °C mais cesser à des températures inférieures à 16 °C (Craig et al., 1999). D'autres études ont suggéré que la vitesse du cycle gonotrophique qui détermine la fréquence des moustiques et les proportions des moustiques infectieux est également contrôlée par les températures (Bayoh et al., 2004) . En ce qui concerne la survie des vecteurs, Craig et al. (1999) ont avancé que la survie quotidienne des vecteurs est d'environ 90 % à des températures comprises entre 16 °C et 36 °C, avec un pic de survie entre 28 °C et 32 °C. Les températures supérieures à 40 °C sont souvent fatales aux moustiques (Kirby et al., 2009).

## 1.5 Facteurs environnementaux

### 1.5.1 Masses d'eau temporaires et permanentes

Les retenues d'eau temporaires et permanentes sont censées servir d'habitat potentiel pour les vecteurs du paludisme (Kar et al., 2014). Les sites de reproduction temporels comme les flaques d'eau et les étangs ne reçoivent de l'eau pour la reproduction que pendant la saison des pluies. Les sites de reproduction permanents comme les rivières contiennent de l'eau de toute l'année et ont tendance à favoriser la transmission du paludisme toute l'année (Gianotti et al., 2009). Les sécheresses peuvent ralentir ou arrêter les écoulements de l'eau dans les plans d'eau permanents, ce qui accroît leur capacité de soutenir la reproduction des vecteurs (Haque et al., 2010). L'inondation des plans d'eau due à des précipitations excessives pourrait aussi former des flaques et des étangs en bordure du bassin de retenue, ce qui va constituer un deuxième canal par lequel l'effet d'extension de la maladie du réservoir pourrai agir (Lautze et al., 2007). L'humidité du sol autour des plans d'eau permanents due à l'élévation du niveau de la nappe phréatique et à la réduction des pertes dues aux infiltrations, peut accroître les zones de reproduction des vecteurs en augmentant la durée de vie des mares et des étangs temporaires (Tompkins et al., 2013).

## **1.5.2 Irrigation**

Les systèmes d'irrigation des cultures poseraient un risque considérable de paludisme, en particulier dans les zones épidémiques (Kibret et al., 2014). Les champs irrigués sont connus pour fournir des sites de reproduction à de nombreuses espèces de moustiques telles que *A. gambiae* et *A. arabiensis* qui préfère se reproduire dans des bassins en plein soleil (Carnevale et al., 1999). La culture irriguée peut donc prolonger la saison de reproduction, augmentant ainsi la durée annuelle de transmission des maladies. L'irrigation peut également accroître l'humidité relative dans les régions sèches, ce qui favorise la survie des vecteurs (Lindsay et al., 2001). Il n'y a pas de schéma clair de transmission du paludisme entre les villages irrigués et non irrigués. Cela suggère que l'irrigation peut fréquemment générer des nombres élevés de vecteurs mais ne se traduit pas nécessairement par un risque accru d'exposition au paludisme.

## **1.6 Facteurs humains**

### **1.6.1 Densité de population**

La densité de population différencie l'intensité de transmission du paludisme entre les zones rurales, périurbaines et urbaines (Tompkins et al., 2013). Parmi ces milieux, une tendance générale à l'augmentation de la transmission du paludisme des centres urbains aux centres périurbains et ruraux a été signalée (Hay et al., 2005). Par exemple, dans les villes d'Afrique subsaharienne, une étude a montré que l'EIR annuel moyen passait de 7,1 dans les centres urbains à 45,8 dans les zones périurbaines et à 167,7 en milieu rural (Robert et al., 2003). Cette tendance s'explique par le fait que l'augmentation de la densité de population de la campagne vers les villes entraîne une diminution des taux de piqûres (McKenzie et al., 2009). En outre, la pollution des zones de reproduction et l'accès aux services de santé publique dans les zones urbaines réduisent également la transmission (Hay et al., 2005). Selon Marshall et al., (2012) le taux élevé de paludisme dans les zones urbaines pourrait être dû à un statut socio-économique faible et à l'adaptation des vecteurs du paludisme à l'environnement urbain. En outre, la plupart des villes africaines se développent vers l'extérieur avec des établissements de santé relativement sous-développés ou mal desservis dans les zones périurbaines (Byrne, 2007). Ces activités de développement s'accompagnent de fosses à ciel ouvert et de terriers qui servent de source de reproduction de vecteurs conduisant à un paludisme élevé. Certains habitants des banlieues peuvent s'adonner à l'agriculture qui fournit des aires de reproduction aux moustiques en raison de la formation d'eau peu profonde (De Silva et al., 2012).

## **1.6.2 Immunité**

La réponse immunitaire humaine à une infection palustre est l'une des caractéristiques essentielles de la dynamique de la maladie en Afrique subsaharienne (Molineaux et al., 1988). La charge du paludisme est plus élevée chez les enfants de moins de 5 ans et les femmes enceintes que chez les adultes dans la région (OMS, 2015). Le fardeau différentiel de la maladie est dû à leur système immunitaire et au temps passé dans la région (Mandal et al., 2011). La réduction du risque chez les enfants plus âgés et les adultes d'acquérir une immunité protectrice résultante du produit cumulatif de nombreuses années de forte exposition à l'antigène. L'acquisition d'une immunité chez des personnes âgées peut être due à des facteurs intrinsèques liés à l'âge qui permettent une réponse immunitaire rapide que chez les enfants de moins de 5 ans (Baird et al., 2003). Les différents stades d'immunité contre le paludisme ont été signalés tels que l'immunité clinique, l'immunité contre les maladies et l'immunité contre les parasites (Doolan et al., 2009). L'immunité clinique se développe après cinq à quinze ans d'expositions continues (Bird, 2004). L'apparition de l'immunité antiparasitaire est cependant corrélée avec l'adolescence (Langhome et al., 2008 ; Doolan et al., 2009). Des intervalles de 4 à 6 infections palustres sont signalés comme le nombre requis d'exposition pour que l'immunité se développe (Baird, 1995).

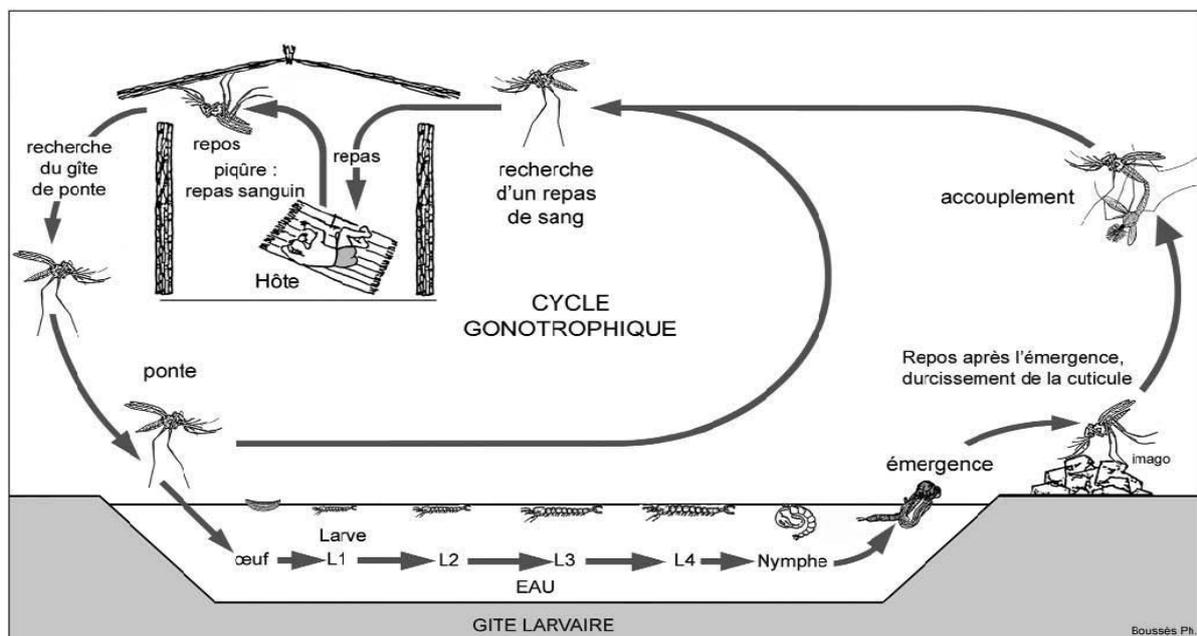
## **1.7 Cycle biologique de l'anophèle**

Les anophèles sont des insectes dont le cycle de vie comporte une métamorphose complète, ce sont des holométaboles. Ils ont une activité rythmée, nyctémérale et saisonnière. Leur développement est caractérisé par la succession de deux phases : une phase aquatique (œuf, larve et nymphe) et une phase aérienne (adulte). Leur cycle de développement est illustré sur la figure 1.

### **1.7.1 Phase aquatique ou pré-imaginale**

Les œufs d'anophèles pondus séparément sont munis de flotteurs qui leur permettent de rester à la surface de l'eau durant l'embryogenèse. Sous des conditions favorables de température, l'incubation des œufs dure 2 à 3 jours. Après éclosion, les œufs donnent naissance aux larves de stade I (L1) mesurant environ 1 mm qui vont évoluer par des mues successives pour donner

des larves de stades II (L2), III (L3) et IV (L4) mesurant de 5 mm à 1 cm. Comme tous les autres culicidés, les larves d'anophèles se nourrissent en filtrant les débris organiques et les micro-organismes de l'eau. De profonds changements morphologiques vont se produire au sein de la nymphe. Dans cette dernière, va émerger un adulte mâle ou femelle. A la température de 25 °C, la durée de la phase aquatique est d'une dizaine de jours pour l'*A. gambiae* et d'une trentaine de jours pour l'*A. funestus* (Coetzee et Fontenille, 2004). Elle s'allonge quand la température diminue et raccourcit quand cette dernière augmente (Robert, 2001). Les observations sur le terrain menées par (Goupeyou-Youmsi et al., 2018a), à une température d'environ 30 °C, les larves d'*A. funestus*, d'*A. mascarensis* et d'*A. coustani* prennent entre 15 et 22 jours environ pour atteindre le stade adulte, alors que celles d'*A. gambiae* se développent en 10 jours.



**Figure 1** : Cycle biologique des anophèles (Carnevale et al.2009)

### 1.7.2 Phase aérienne : émergence, accouplement et cycle gonotrophique

L'émergence a lieu à la surface du plan d'eau et dure quelques minutes. Sous l'effet de la pression interne, la cuticule nymphale éclate sur une ligne médio dorsale du céphalothorax, l'adulte se dégage rapidement de l'exuvie et s'envole dès que ses ailes ont séché. Après l'émergence, les femelles ont besoin de 12 à 24 heures et les mâles de 72 heures pour que leur cuticule durcisse et que les organes de reproduction mâles se mettent en place. Avant l'accouplement, les mâles peuvent former des essaims de quelques dizaines à plusieurs milliers

d'individus observables à quelques mètres du sol et généralement au crépuscule (Manoukis et al., 2009 ; Diabate et al., 2006). La copulation, de courte durée (quelques secondes), peut se dérouler entièrement en vol et se poursuivre lorsque le couple (la femelle accrochée par le mâle) est au sol (Carnevale et Robert, 2009). En règle générale, les femelles d'anophèles ne s'accouplent qu'une fois au cours de leur vie (Clements, 1999). Les mâles et femelles prennent ensuite du jus sucré, plus souvent le nectar des plantes, afin de satisfaire leurs besoins énergétiques pour le vol et maintenir les processus métaboliques. Pour assurer la survie de l'espèce, les femelles ont besoin de prendre du sang car les protéines du sang constituent une source d'acides aminés nécessaires au développement des œufs. La succession des phénomènes physiologiques qui se produisent chez la femelle entre deux repas de sang successifs constitue le cycle gonotrophique (Carnevale et Robert, 2009). Il est composé de trois phases :

- la première phase est la recherche de l'hôte vertébré et la prise du repas de sang ;
- la deuxième phase correspond à la digestion du sang et la maturation ovarienne ;
- la troisième phase consiste à trouver un lieu adéquat pour pondre.

La durée du cycle gonotrophique varie entre 2 et 3 jours pour les femelles pares (c'est-à-dire ayant effectué au moins une ponte) et jusqu'à 5 jours pour les femelles nullipares (n'ayant pas encore effectué une ponte). Deux à trois jours après la prise du repas de sang, l'anophèle femelle pond des œufs sur l'eau. La fécondité varie selon les espèces et d'autres facteurs comme l'âge et la saison. Pour l'*A. gambiae*, le nombre moyen d'œufs par ponte est de l'ordre de 150 et la fécondité diminue avec l'âge (Clements, 1992). De nombreuses espèces prennent d'abord un repas de sang avant de s'accoupler (Charlwood et al., 2003).

## **1.8 Généralités sur le paludisme**

Le paludisme est une maladie potentiellement mortelle due à des parasites du genre *Plasmodium*. Il se transmet à l'Homme par piqûres de moustiques anophèles femelles infectées. Toutefois, une contamination interhumaine directe est aussi possible par transmission congénitale par voie placentaire entre une femme enceinte et son enfant (Desai et al., 2007). Il se peut aussi qu'il se transmette par transfusion sanguine (Kitchen, 2006 ; Owusu-Ofori, 2010). D'après les écrits, le paludisme a affecté l'Homme depuis plus de 50 000 ans. Son émergence chez les humains a été remarquée à partir de la révolution néolithique, il y a 10 000 ans par une augmentation du nombre de cas et de décès (Mouchet, 1999). Le parasite responsable de la transmission du paludisme a été découvert par Laveran en Algérie en 1880 (Portraits de

médecins, 2014) et le vecteur de transmission par Ronald Ross en 1984 (O'Grady, 2012).

### **1.8.1 Les parasites responsables de l'infection palustre chez l'Homme**

Dans le monde, il existe 140 espèces de *Plasmodium* mais seulement cinq d'entre elles peuvent provoquer le paludisme chez l'Homme. Il s'agit du *P. falciparum*, *P. vivax*, *P. ovale*, *P. malariae* et *P. knowlesi* récemment découvert chez l'Homme. Les différences entre les cinq espèces reposent sur des critères biologiques, cliniques, leur répartition géographique et leur capacité à développer des résistances aux antipaludiques. Mais l'espèce la plus répandue et qui est la cause des formes cliniques potentiellement mortelles est le *P. falciparum* (Mohanty, 2003 ; Snow, 2004).

### **1.8.2 Le vecteur de transmission**

Le vecteur de transmission du paludisme est un moustique du genre anophèle (*Anopheles sp.*). Les espèces d'anophèles sont nombreuses mais les plus dangereuses sont celles qui transmettent le paludisme à l'Homme (Tantely, 2016). La transmission est assurée uniquement par les femelles au moment de leur repas sanguin par piqûre de personnes ou d'animaux. Elles ne piquent que la nuit entre le coucher et le lever de soleil avec une activité maximale entre 23h et 6h. Ils vivent dans ou hors des maisons (endophile/exophile), mais restent à moins de 300 m aux alentours de leur lieu de naissance (Aubry, 2015). Ces moustiques ont une espérance de vie de 3 à 12 semaines (Williams, 2012). Les endroits où l'eau stagne sont les lieux favorables au développement de leurs larves. Leur longévité dépend de l'altitude, de la température, qui est favorable entre 20 à 25°C (Chastel, 2006). En Afrique sub-saharienne, l'espèce la plus répandue est l'*A. gambiae* reconnue par sa longévité et sa préférence à piquer l'Homme. Elle provoque plus de 90% des cas de décès dus au paludisme (Greenwood, 2002).

### **1.8.3 Le cycle évolutif du Plasmodium**

Le cycle du *Plasmodium* comporte deux phases essentielles : une phase asexuée chez l'Homme et une phase sexuée chez l'anophèle (Robert, 2002 ; Wiser, 2009).

Chez l'Homme, après injection du parasite sous forme de sporozoïtes, il migre rapidement vers le foie via la circulation sanguine. Après quelques jours, il pénètre dans les cellules hépatiques et se multiplie en des dizaines de milliers de parasites appelés mérozoïtes. Suite à cette multiplication, les cellules du foie éclatent et les parasites se propagent dans le sang et

envahissent les globules rouges. À l'intérieur des globules rouges, ils continueront à se multiplier et ceux-ci ne résisteront pas et ils éclateront à leur tour. Les parasites circulent de nouveau dans le sang et affectent d'autres globules rouges. Les mérozoïtes continuent leur évolution et forment des parasites mâles et femelles appelés gamétocytes. Si à ce stade l'individu se fait piquer par un moustique, le cycle continue à l'intérieur de ce moustique qui deviendra vecteur de la maladie.

Chez l'anophèle femelle, les gamétocytes se transforment en gamètes qui fécondent les zygotes appelés oocystes. Ces derniers donneront des sporozoïtes qui vont migrer dans les glandes salivaires de l'anophèle et qu'il injecte à l'Homme ou l'animal lors de son prochain repas sanguin (figure 2).

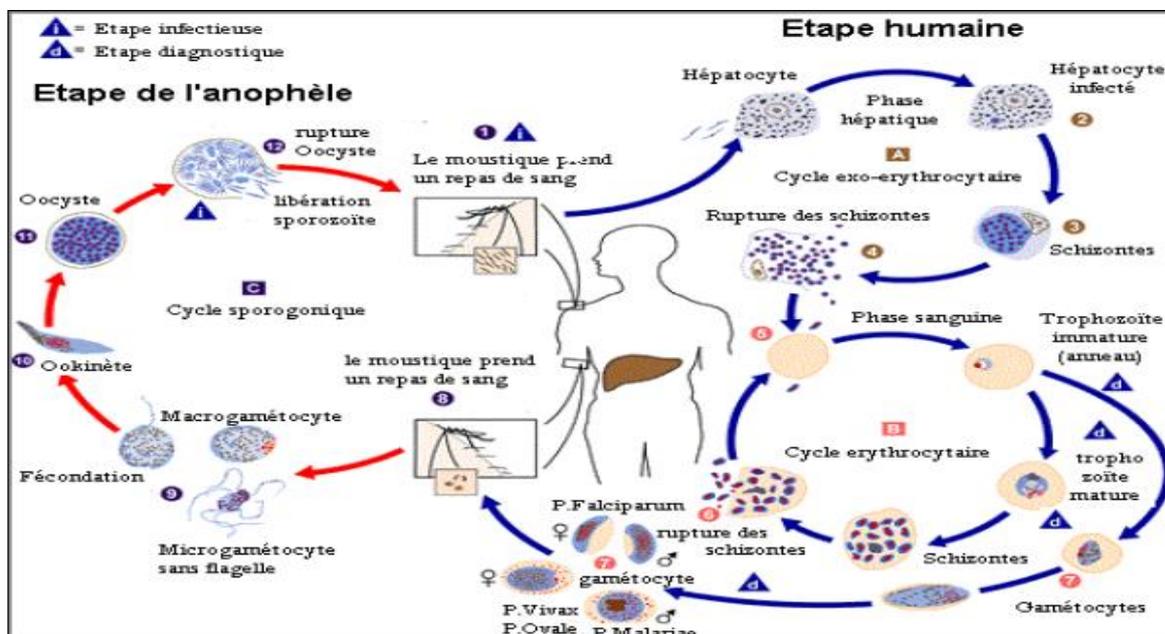


Figure 2 : Cycle de reproduction du plasmodium (Source: CDC, 2002)

## Chapitre 2: Données et Méthodes

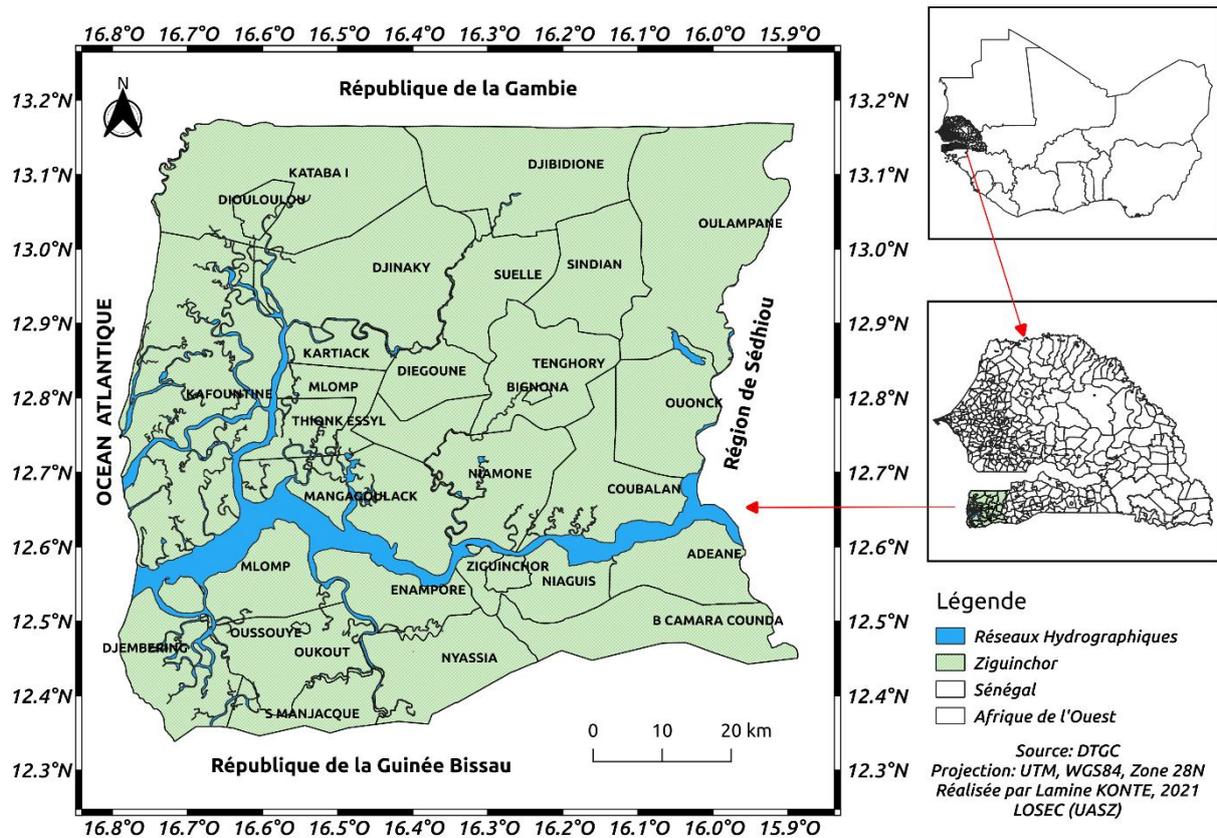
Dans ce chapitre, il sera tout d'abord question de faire la présentation de la zone d'étude qui sera suivie de l'analyse des données utilisées. Enfin, les différentes méthodes employées, faire une description ainsi que de voir les différents paramètres de sorties et de calibration du modèle VECTRI.

### 2.1 Présentation de la zone d'étude

L'étude s'intéresse à une partie de la zone sud du Sénégal (figure 3) située entre les latitudes 12°30' et 13°20' Nord et les longitudes 16°80' et 15°90' Ouest. La population de la région de Ziguinchor (Basse Casamance) est de 542 937 habitants soit une densité de 74 habitants par kilomètre carré (RGPHAE, 2013). Elle occupe une superficie de 7339 km<sup>2</sup> soit 3.73% du territoire national. La région de Ziguinchor est limitée au Nord par la République de Gambie, au Sud par la République de Guinée Bissau, à l'Est par la région de Sédhiou et à l'Ouest par l'Océan Atlantique. La région de Ziguinchor dispose d'une façade maritime de 85 km et d'un important réseau hydrographique, composé d'un fleuve axial de 300 km de long, auquel se rattachent de très nombreux bolongs. La région subit l'influence du climat soudano-guinéen qui se caractérise par une alternance d'une saison sèche de Novembre à Mai et une saison humide et chaude de Juin en Octobre. La pluviométrie moyenne annuelle suit un gradient décroissant entre les communes du Sud et celles du Nord. Ce gradient passe de 1600 mm pour les communes du Sud à 1000 mm pour les communes du Nord.

Dans le domaine sanitaire la région compte 228 infrastructures sanitaires publiques et parapubliques. Ces infrastructures sont majoritairement composées de poste santé. Les cases de santé viennent en deuxième position. Les centres de santé et les hôpitaux viennent respectivement en troisième et en quatrième position de l'ensemble des infrastructures sanitaires publiques et parapubliques de la région. La couverture en poste de santé est satisfaisante vis-à-vis de la recommandation de l'organisation mondiale de la santé (OMS). En effet, cette couverture est de 1 poste de santé pour 6 359 habitants dans la région de Ziguinchor là où la norme OMS prône 1 poste de santé pour 10 000 habitants. Par contre, la couverture en centre de santé est encore loin de la recommandation de l'OMS. En 2015, la région de Ziguinchor comptait un centre de santé pour 113 188 habitants alors que l'OMS propose un centre de santé pour 50 000 habitants. C'est le même cas que pour la couverture en hôpitaux. On dénombre dans la région de Ziguinchor un hôpital pour 282 970 habitants, ce qui est très loi

de la norme OMS qui est d'un hôpital pour 150 000 habitants (PIDD, 2020).



**Figure 3** : Représentation de la région de Ziguinchor

## 2.2 Données

Nous utilisons les cas mensuels de paludisme (tableau 1) issus de quatre districts sanitaires y compris les postes de santé de la région de Ziguinchor pour valider les résultats du modèle. Ces données sont constituées des cas de paludisme des enfants de moins des cinq (5) ans, des femmes enceintes et des patients âgés de cinq et plus.

**Tableau 1** : Données de paludisme recueillies dans les différentes structures de Santé dans la région de Ziguinchor

Structures de Santé	Périodes
DS_Ziguinchor	2014-2015
DS_Bignona	2010-2015
DS_Diouloulou	2014-2015
DS_Oussouye	2014-2015
PS_Tenghory	2014-2015
PS_Oulampane	2010-2015
PS_Djibidione	2014-2015
PS_Ouonck	2010-2015
PS_Niamone	2014-2015
PS_Coubalan	2014-2015
PS_Sindian	2010-2015
PS_Suelle	2014-2015
PS_Kataba 1	2014-2015
PS_Kafountine	2014-2015
PS_Oukout	2014-2015
PS_Djinaky	2014-2015
PS_Santhiaba Manjack	2014-2015
PS_Diembéring	2014-2015

Source : Région médicale, 2018

### 2.2.1 Données climatiques

**Tableau 2** Les différents types de données météorologiques utilisées

Données	Sources	Résolution	Variables et unités	Période
CHIRPS	<a href="ftp://chgftpout.geog.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPSlatest">ftp://chgftpout.geog.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPSlatest</a>	0.05° x 0.05°	Précipitation journalière (mm)	2000-2016
ERA5	<a href="https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5">https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5</a>	0.25° x 0.25°	Température minimale et maximale journalière (°C)	2000-2016

### 2.2.2 Données de population

Les densités de populations utilisées (tableau 3) ont été calculées à partir de l'équation (2.4) de la page 18.

**Tableau 3:** Données de populations, des superficies, des densités de populations des différentes Communes

Communes	Populations (hbts)	Superficies (Km2)	Densités (hbts/Km2)	Lon [°W]	Lat [°N]
Ziguinchor	248264	1868	133	-16.27	12.58
Djibidione	8452	164	52	-16.25	13.06
Oulampane	13620	606	22	-15.59	12.57
Sindian	11641	246.37	47	-16.17	12.96
Niamone	7581	268	28	-16.2	12.44
Bignona	125206	2292.29	55	-16.23	12.81
Ouonck	10292	287	36	-16.03	12.42
Tenghory	30743	315	98	-16.12	12.47
Suelle	9146	183	50	-16.28	12.95
Diouloulou	56780	1202.8	47	-16.32	13.05
Kafountine	34501	908	38	-16.39	12.52
Djembéring	20924	237	88	-16.46	12.28
Kataba I	23481	714	33	-16.13	12.47
Djinaky	21779	242	90	-16.27	12.56
Oukout	8352	180	46	-16.55	12.47
Oussouye	72246	1446.55	50	-16.4	12.29

Source : RGPFAE, 2013

## 2.3. Méthodes

### 2.3.1 Analyse des données de cas cliniques

#### ❖ La moyenne

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

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

où  $x_i$  représente la variable (température, précipitation (ou moyenne) d'une année (i) donnée de la série et N la longueur de la série.

#### ❖ L'écart-type

L'écart-type, en statistique, est une mesure de dispersion de données. Il est défini comme la racine carrée de la variance ou, de manière équivalente, comme la moyenne quadratique des écarts par rapport à la moyenne. L'écart-type est calculé ici dans le but de pouvoir calculer l'anomalie standardisée en conservant les mêmes variables. Il s'obtient par la formule suivante :

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

$x_i$ ,  $N$  sont respectivement la variable (température, précipitation, cas observé, EIR...) d'une année (i) donnée de la série, la longueur de la série.

#### ❖ L'anomalie

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

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

où  $x_i$  représente la variable (température, précipitation, cas observé, EIR...) d'une année (i) donnée de la série et  $\bar{x}$  la moyenne climatologique.

### 2.4.2 Modélisation des cas de paludisme

Nous avons calculé la densité de population en utilisant la formule suivante :

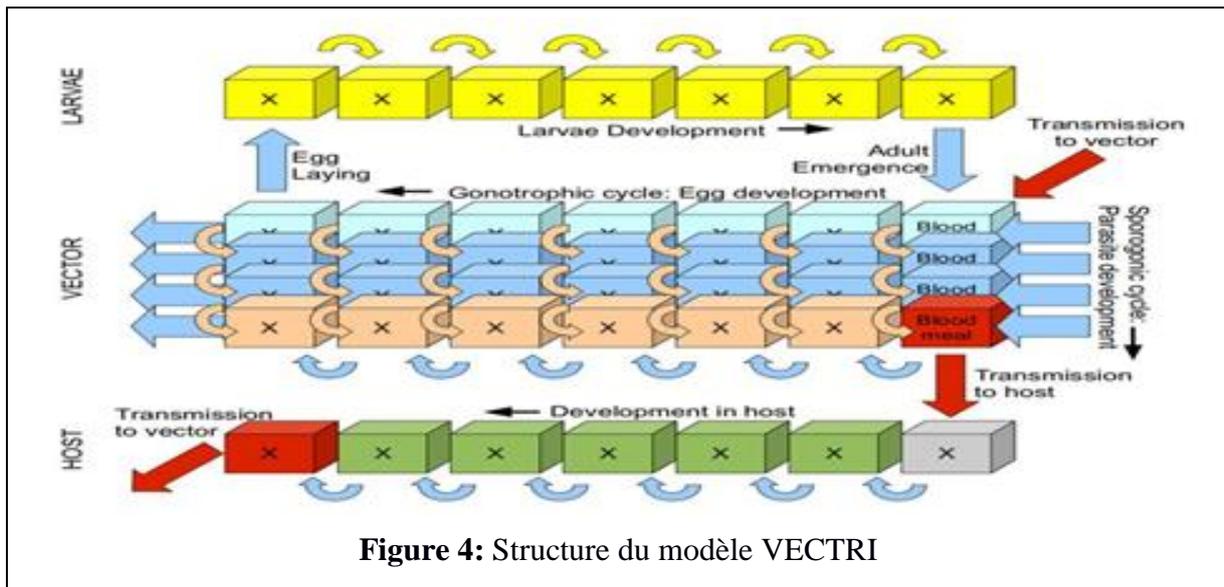
$$D_{pop} = \frac{N_H}{S} \quad (2.4)$$

$D_{pop}$  représente la densité de population,  $N_H$  est le nombre d'habitants,  $S$  est la superficie

#### 2.4.2.1 Modèle de paludisme VECTRI

Le modèle (figure 4) utilisé dans cette étude est développé à ICTP (*International Centre for Theoretical Physics*) Abdus Salam de Trieste en Italie et s'appelle VECTRI (*VECTOR-borne disease Community model of ICTP, TRIeste*) (Tompkins et al., 2013). C'est un modèle mathématique de transmission du paludisme qui prend en compte l'impact de la variabilité de la température et des précipitations sur les cycles de développement du vecteur du paludisme aux stades larvaire et adulte, ainsi que du parasite lui-même. Le modèle est conçu pour fonctionner à des échelles régionales ou continentales à des résolutions spatiales élevées allant d'environ 5 à 10 km avec un pas de temps quotidien pour l'intégration. Un élément particulier du modèle à l'échelle régionale c'est qu'il prend en compte la densité de population humaine dans le calcul des taux de piqûres. Des densités de population plus élevées conduisent à un effet de dilution entraînant des plus faibles Ratios de Parasites (RP) en milieu urbain et périurbain par rapport aux milieux ruraux environnants. A cet issue, le modèle est susceptible de reproduire la réduction des taux d'inoculation entomologique (EIR) et de la Prévalence (PR) avec une densité de population croissante qui a été observée en Afrique (Kelly Hope et al., 2009). Les paramétrisations pour les processus biologiques sont extraites de la littérature pour le vecteur *A. gambiae* et l'espèce *P. falciparum* du parasite. La température de l'eau, étroitement liée à la température de l'air, a une incidence sur le taux de croissance et la mortalité des larves. Les

précipitations ont un impact sur la transmission par la présence d'un modèle simple physique l'hydrologie de piscine de surface, caractérisé par des faibles taux de pluie conduisant une augmentation des sites de reproductions disponibles qui se décomposent par évaporation et par infiltration. Or les précipitations intenses diminuent le nombre de larves à un stade précoce par l'effet de rinçage (Paaijmans et al., 2007).



La rangée du haut montre le statut des larves divisé en une série de bacs représentant l'état de développement fractionnaire. Le "X" dans chaque casier représente la densité de larves dans un stade de croissance fractionnaire spécifique. Le bloc du milieu représente l'état du vecteur en deux dimensions : le développement de l'œuf chez la femelle et celui de l'état d'infection. La rangée inférieure modélise l'état d'infection de l'hôte. Les flèches courbées représentent le sens de la progression des larves, du vecteur et de l'état hôte, tandis que les flèches rouges droites indiquent le parasite par voies de transmission entre l'hôte et le vecteur, Source : (Tompkins et al., 2013).

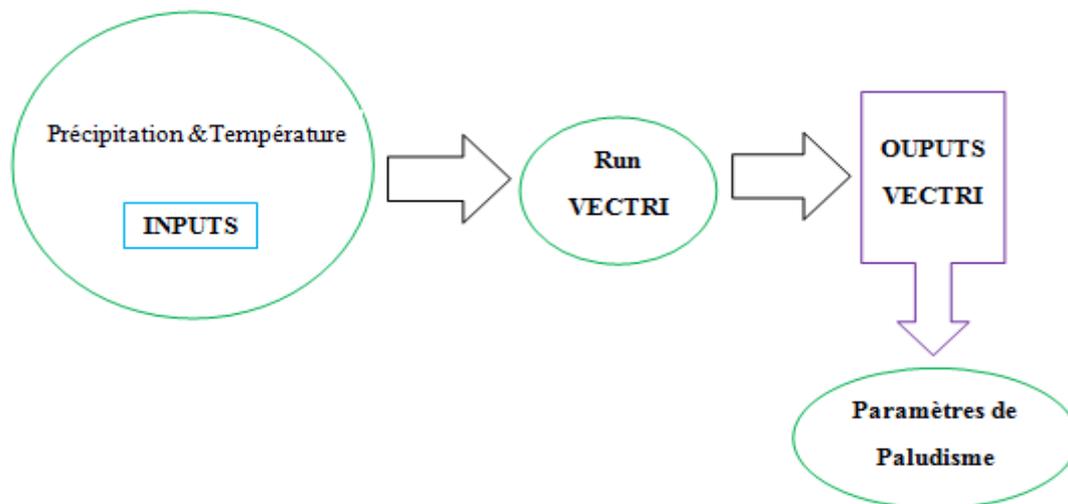
Le tableau 4 ci-contre représente une synthèse des données climatiques et de densité de population disponibles pour tourner le modèle VECTRI, le paramètre étudié est l'Entomological Inoculation Rate (EIR).

**Tableau 4 :** Bloc de synthèse pour la modélisation du paludisme

Modèle de paludisme	Paramètre étudié	Précipitation	Température	Densité de population
VECTRI	EIR (Entomological Inoculation Rate)	CHIRPS 2000-2016	ERA5 2000-2016	RGPHAE, 2013

#### 2.4.2.2 Approche méthodologique pour tourner le modèle VECTRI

Dans cette étude, les données de précipitation et de température moyennes journalières sont utilisées comme entrées (inputs) pour tourner le modèle de la version VECTRI v1.4.6. Les simulations ont été exécutées par le biais des programmes FORTRAN plus ou moins performants et avec une densité de population qui varie selon la localité.



**Figure 5:** Les différentes étapes de la modélisation avec le modèle VECTRI

A la fin de la simulation, plusieurs paramètres de paludisme se trouvent dans les sorties (outputs) obtenues dont nous verrons en détail dans la page suivante.

Le Taux d'Inoculation Entomologique ou Entomological Inoculation Rate (EIR) est l'un des paramètres extrait des sorties (outputs) pour estimer la transmission du paludisme dans notre travail. Pour le traitement de données et l'extraction du paramètre EIR, l'outil CDO (Climat Data Operators) a été utilisé et pour les figures nous avons utilisé les logiciels Matlab et gnuplot.

### 2.4.2.3 Les paramètres de sortie VECTRI

Dans ce tableau, tous les paramètres du paludisme obtenu comme sorties (outputs) à la fin de la simulation avec le modèle VECTRI sont définis avec leurs unités.

**Tableau 5** : Les sorties de VECTRI

Parameters	Definition	Units
population	population density	N.m <sup>2</sup>
rain	rainfall	mm day <sup>-1</sup>
Temp	Temperature	deg C
water_frac	fraction of grid box covered by breeding sites	
vector	mosquito density	N.m <sup>2</sup>
larvae	larvae density	N.m <sup>2</sup>
larvae biomass	larvae biomass	mg.m <sup>2</sup>
PRd	proportion of population with detectable malaria (day 10+)	
Hbr	humain bite rate	number person <sup>-1</sup> day <sup>-1</sup>
Cspr	Circum sporozoite protein ratio (fraction eir/hbr)	Fraction
Eir	entomological inoculation rate (number of infectious bites)	number person <sup>-1</sup> day <sup>-1</sup>
cases	Number of new cases	Fraction
immunity	proportion of immune population	Fraction

Source : (Tompkins et al., 2013).

### 2.4.2.4 Les options de calibration dans VECTRI

Nous pouvons, à notre préférence, faire des paramétrages dans le modèle VECTRI en fonction de ce que nous voulons étudier sur la transmission du paludisme. Cela est fait dans un fichier **vectri.options** qui sera enregistré dans l'entrée du sous-répertoire.

**Tableau 6:** run control parameters

parameter	Definition	default	Units
nyearspinup	length of spinup period discarded from output	0	Years

Source : (Tompkins et al., 2013).

**Tableau 7:** interventions

parameter	Definition	default	units
rnobednetuse	proportional of host NOT using bednet	1	
rdednettreat (IN-OPERATIVE)	proportion of bednet insecticide treated	0.0	

Source : (Tompkins et al., 2013).

**Tableau 8:** population

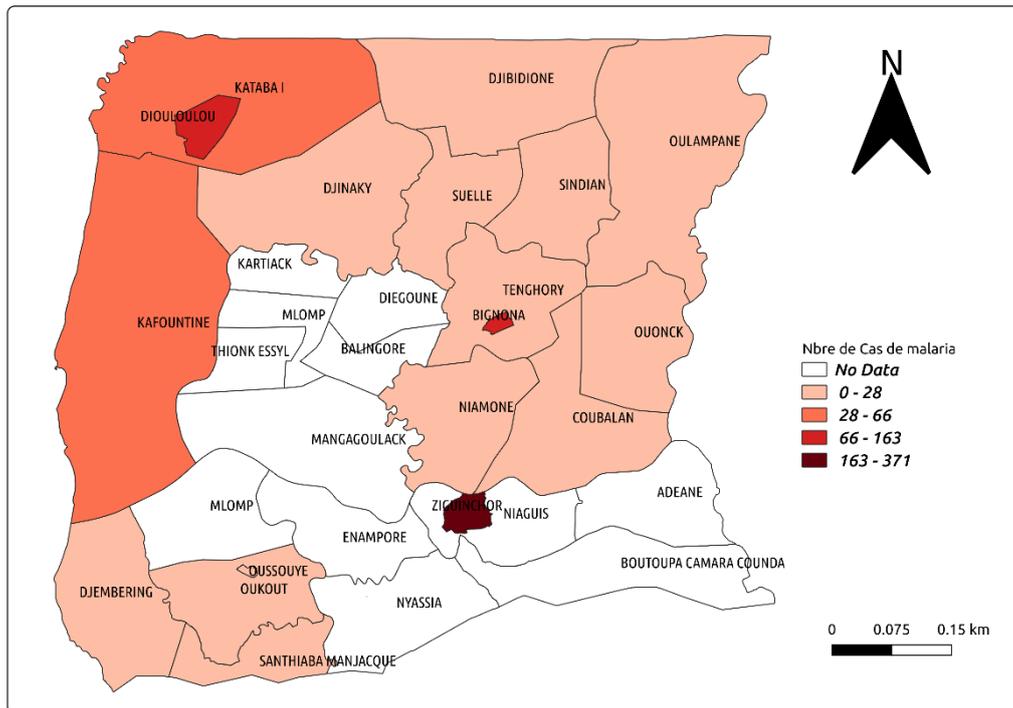
parameter	Definition	default	units
rpop_growth	population growth rate	1.0	ratio of population increase per year
rpop_death_rate	fraction of population renewed each year (birth=deaths)	0.02	
popdensity_min	minimum population density considered	$10^{-6}$	$N.m^{-2}$
migration	simple migration fraction imported cases	0.0	$year^{-1}$

Source : (Tompkins et al., 2013).

## Chapitre 3: Résultats et Discussions

Dans ce chapitre, nous allons faire la répartition spatiale des cas du paludisme, ensuite analyser, interpréter et discuter les résultats de la modélisation du paludisme avec le modèle VECTRI en utilisant comme paramètre de paludisme le taux d'inoculation entomologique (EIR) dans la Basse Casamance.

### 3.1 Analyse spatio-temporelle des cas de paludisme en Basse Casamance



**Figure 6:** Carte de la répartition spatiale des cas de paludisme observés dans les communes de la Basse Casamance (2014-2015)

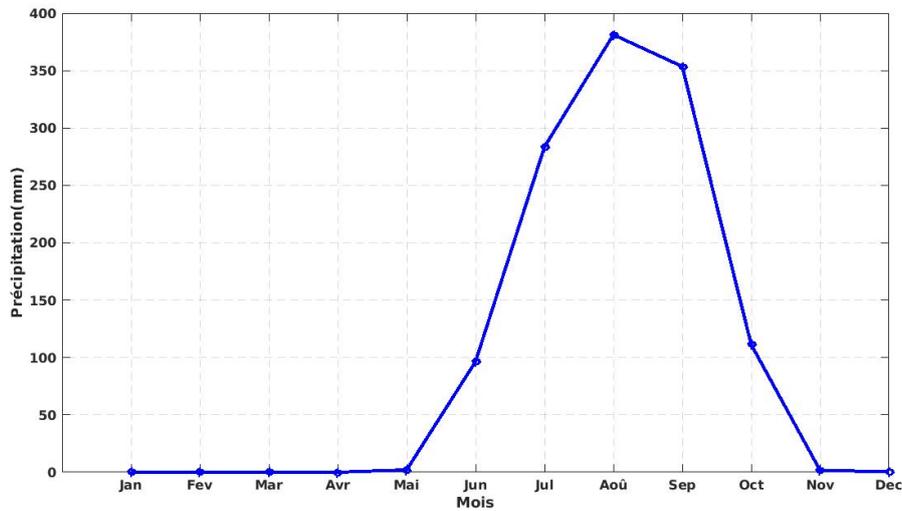
La figure 6 montre la distribution spatiale des cas de paludisme en Basse Casamance. L'analyse révèle une répartition spatiale inégale et hétérogène entre les différentes communes de la région. En première place, la commune de Ziguinchor compte en moyenne 371 cas de paludisme. En seconde position, viennent des communes de Bignona et de Diouloulou avec 163 et 161 cas en moyenne. Les communes de Kafountine et de Kataba I occupent la troisième place avec 66 et 60 cas. En quatrième position viennent des communes de Djinaky, Djibidione, Sindian, Oulampane, Niamone, Coubalan, Ouonck, Djembéring, Tenghory, Oukout, Santhiaba Manjacque et Oussouye qui ont des cas de paludisme compris entre 0 et 28. Les cas de paludisme sont plus élevés dans les milieux urbains excepté Oussouye par rapport aux

communes situées en milieux ruraux. Cette différence serait due à plusieurs facteurs comme la disponibilité de l'eau et des déchets plastiques dans les canaux qui serviront de sites de reproductions des moustiques. Mais aussi la campagne de sensibilisation telle que celle du Programme National de Lutte contre le Paludisme (PNLP) pourrait être la cause d'une augmentation du nombre de personnes qui se rendent dans les structures de santé publique pour se faire soigner. Ceci a augmenté le nombre de cas de paludisme signalés pendant la dernière année. La Basse Casamance est caractérisée par un climat de type soudano-guinéen avec deux saisons, une saison sèche et une saison des pluies qui dure 5 mois. Les paramètres météorologiques sont étroitement liés à la variation du paludisme, les impacts climatiques sur la transmission du paludisme doivent être explorés pour expliquer la réduction ou l'augmentation significative des cas de paludisme. Ces paramètres climatiques accentuent en fait le risque de propagation et d'expansion du paludisme. Cette présence accrue de la transmission du paludisme dans la région est également due au renforcement des conditions environnementales favorables telles que la couverture végétale, au cours de cette période. Cependant, il existe de grandes disparités dans la transmission du paludisme entre les différentes communes de la région. Ces disparités sont principalement liées à des caractéristiques locales spécifiques des terres telles que les rivières, les mangroves, les étangs et les basses terres. La disponibilité limitée des services de santé publique et la distance entre les zones rurales reculées et les hôpitaux sont également des paramètres importants ayant un impact sur le risque de paludisme dans cette région. Si l'utilisation des moustiquaires était relativement courante dans toutes les communes, la plupart d'entre eux étaient vieux, avec des trous et probablement pas plus traités par des insecticides. La perte de l'effet protecteur insecticide pourrait aussi expliquer le risque accru de piqûres de moustiques et l'augmentation de cas du paludisme au cours de ces années.

### **3.1.1 Cycle saisonnier des précipitations en Basse Casamance**

La figure 7 montre le cycle saisonnier des précipitations dans la Basse Casamance. Le climat qui couvre la Basse Casamance comporte un régime de précipitations unimodal. C'est un régime qui présente un seul maximum dans l'année c'est-à-dire un régime à deux saisons dont une sèche et une pluvieuse, une saison sèche plus longue (sept mois) de novembre à mai et une

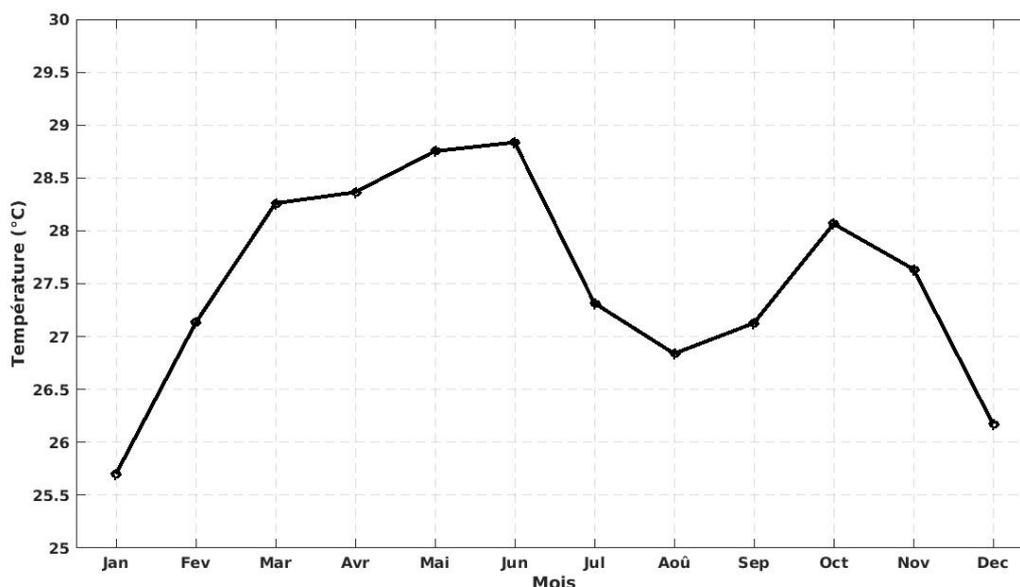
saison humide ou pluvieuse (cinq mois) de juin en octobre. Le pic des précipitations atteint 380 mm au mois d'août dans la Basse Casamance.



**Figure 7 :** Cycle saisonnier de la précipitation en Basse Casamance (2000-2016)

### 3.1.2 Cycle saisonnier des températures en Basse Casamance

La température moyenne mensuelle en Basse Casamance est de 27,32°C. L'analyse de l'évolution mensuelle de la température de 2000 à 2016 indique que les mois les plus chauds sont mars, avril, mai, juin, octobre et novembre avec une température supérieure à 27,5°C. Le mois de juin est le plus chaud avec une température supérieure à 28,5°C. Il représente le maximum thermique de cette série chronologique. En revanche, la température est relativement basse en juillet, août et septembre avec des valeurs comprises entre 26,6 et 27,4°C du fait de l'influence de la couverture nuage et des fortes précipitations de la saison des pluies. Les températures demeurent élevées la plupart des mois de l'année.



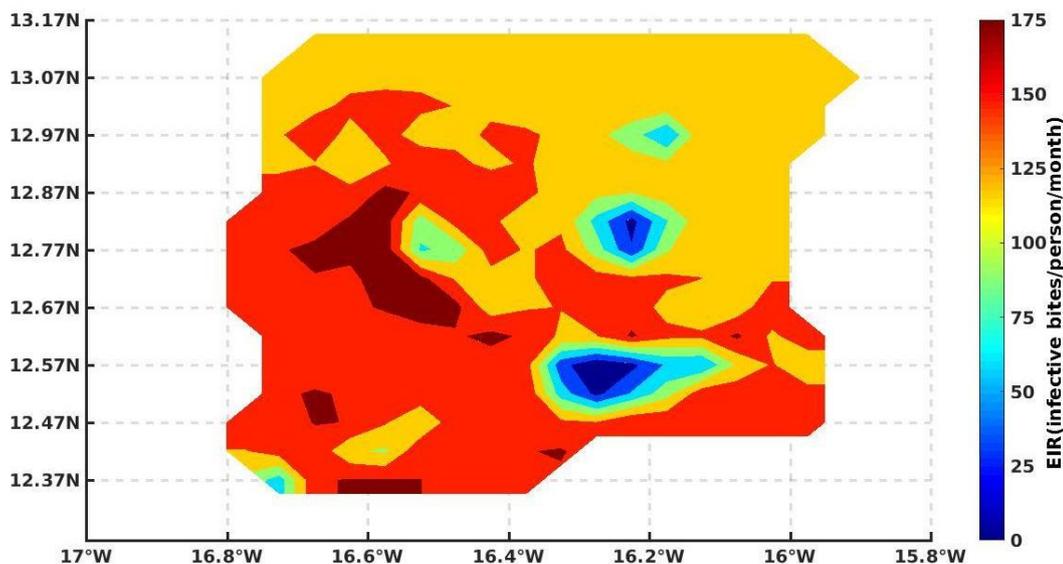
**Figure 8 :** Cycle saisonnier de la température en Basse Casamance (2000-2016)

## 3.2 Modélisation du paludisme par le modèle VECTRI

### 3.2.1 Modélisation spatiale de paludisme

#### a. Variation spatiale du taux d'inoculation entomologique ou EIR

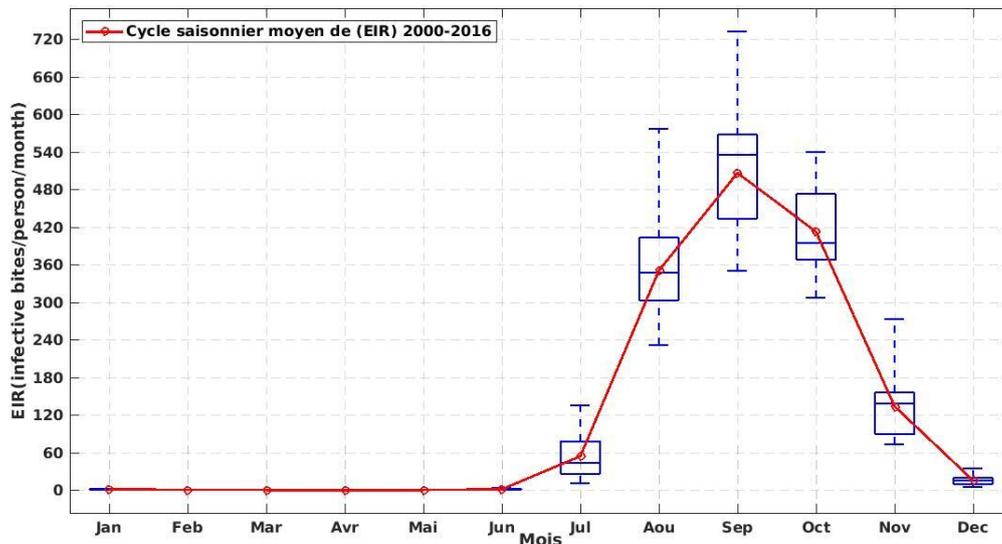
La variation spatiale de l'EIR simulée en Basse Casamance est présentée sur la figure 9. L'analyse de la répartition spatiale montre un taux d'inoculation dans presque la totalité de la région (Basse Casamance) avec un gradient latitudinal entre les communes situées au Sud et celles situées au Nord. En effet, nous constatons que la partie Sud-Ouest présente un taux d'inoculation entomologique plus élevé que la partie Nord. Il en est de même pour les communes près des côtes où le EIR varie entre 140 et 175 (nombre de piqûres infectieuses par personne et par mois) et celles à l'intérieur des terres où l'EIR est beaucoup plus faible. Des études menées avec le modèle VECTRI (Tompkins., 2013; Ernest et al., 2017) ont montré des résultats similaires aux nôtres, notamment en ce qui concerne la différence sur la répartition spatiale du paludisme qui est plus importante dans les parties les plus humides que dans les parties moins humides. La répartition géographique du paludisme et l'épidémiologie sont fortement influencés par la variabilité climatique.



**Figure 9** : Distribution spatiale de l'EIR dans la Basse Casamance (2000-2016)

### **b. Cycle saisonnier du taux d'inoculation entomologique ou EIR**

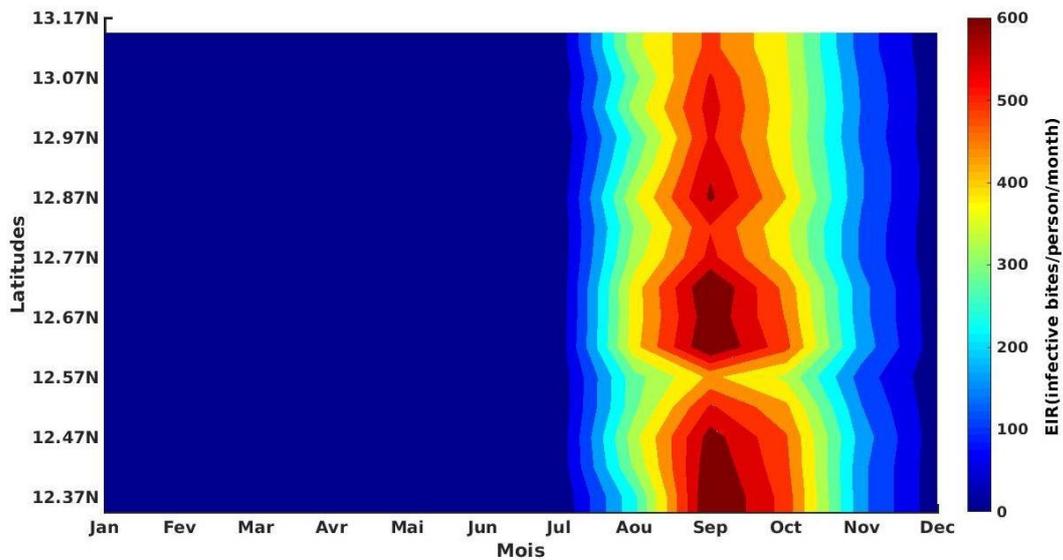
Le cycle saisonnier de l'EIR est représenté sur la figure 10. L'analyse de l'évolution saisonnière montre un EIR quasi nul au cours des mois de janvier à juin. A partir de juin, nous constatons une augmentation du taux d'inoculation entomologique (EIR) qui atteint le pic médian maximal au mois de septembre avec un taux de 540 [piqûres de moustiques infectieux par personne par mois]. La transmission du paludisme suit le rythme des précipitations. La saison des pluies est la période de forte densité de moustiques. Les études de (Ernest et al., 2017), ont montré que le pic du EIR suit pour la plupart du temps le pic des précipitations. Ainsi, la saison de haute transmission du paludisme a un maximum décalé d'un mois par rapport à celui des précipitations. Ce décalage pourrait être dû au fait que la saison des pluies maintient l'élaboration et la persistance des étangs d'eaux qui servent d'abris pour les moustiques anophèles (Bomlies, 2012).



**Figure 10** : Cycle saisonnier du taux d'inoculation entomologique (2000-2016)

### c. Diagramme Hovmöller du EIR

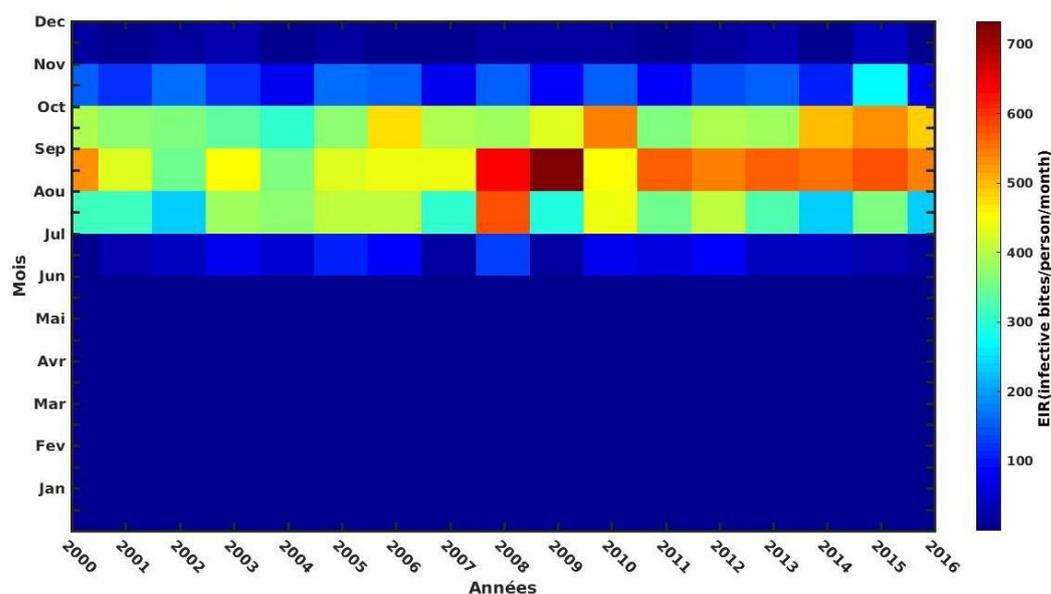
L'analyse du diagramme Hovmöller (figure 11) de l'EIR révèle que le maximum de l'EIR est observé au mois de septembre. La saison de haute transmission du paludisme reste de juillet à Novembre. Le paludisme est présent dans toute la zone avec une répartition inégale dont les localités les plus touchées sont au Sud (latitudes inférieures à 12,67 N) par rapport celles du Nord (latitude supérieure à 12,67N). Cette différence est aussi favorisée par des saisons humides et chaudes, de couverture végétale importante et la température optimale pour la transmission du paludisme favorisant les conditions climatiques. Les fluctuations de température affectent à la fois l'espérance de vie ou l'achèvement du cycle de vie du moustique et le développement des stades sporogoniques dans le corps du paludéen (Abiodem et al., 2016). Les moustiques augmentent le taux de transmission parasitaire, atteignent plus tôt leur maturité sexuelle en s'approvisionnant plus de sang humain à des températures chaudes. D'après Altizer et al (2006), et Diouf et al (2017), les températures élevées accélèrent le taux de développement des parasites dans le vecteur et augmente le nombre de repas de sang ce qui conduit alors une augmentation du nombre d'œufs pondus car le sang humain permet l'anophèle de mûrir des œufs.



**Figure 11 :** Diagramme Hovmöller de l'EIR (2000-2016)

#### **d. Diagramme intra et interannuel de l'EIR**

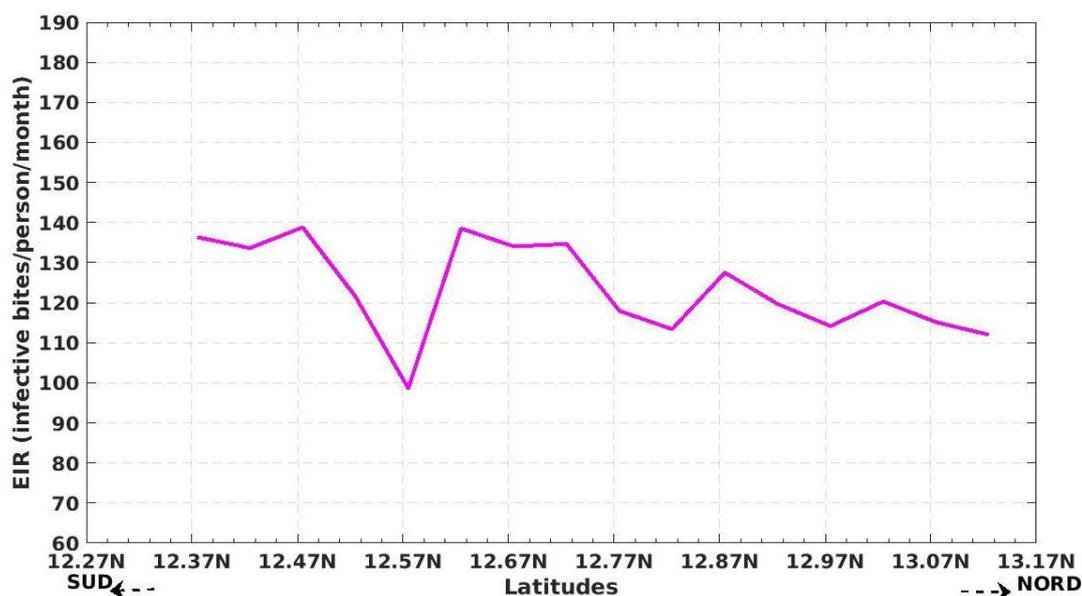
La figure 12 montre la variation intra et interannuelle du taux d'inoculation entomologique qui exprime le nombre de piqûres infectieuses par personnes et par mois au cours des années. On note que le maximum d'EIR est systématiquement observé pendant le mois de septembre, sauf pour les années 2006 et 2010. Notons également que les valeurs de l'EIR sont plus importantes pendant les dernières décennies (2008 à 2016). La saison des pluies est le moment pendant lequel la transmission du paludisme s'effectue mais par endroit. Pendant les années de fortes pluviométries, la transmission peut aller jusqu'en début de la saison sèche. Elle est assurée par la reproduction du vecteur anophèle qui continue à s'améliorer grâce à la forte chaleur du mois d'octobre, de la présence de gîtes et de la couverture végétale. Ce qui fait que les œufs restent latents dans le sol humide et résistent à la sécheresse (Gbenga et al., 2015)



**Figure 12 :** Diagramme intra et interannuel de l’EIR (2000-2016)

**e. Variation méridienne du EIR**

Nous remarquons une variation méridienne du paludisme avec un EIR ou taux d’inoculation entomologique faible dans les communes du Nord comparé à celles du Sud. Le fort gradient observé sur la transmission du paludisme entre les communes situées du Sud et celles du Nord s’explique en grande partie par la répartition inégale des précipitations dans la région. En plus, la couverture végétale et la température de la transmission optimale du paludisme est de 25 °C selon Mordecai et al (2015).



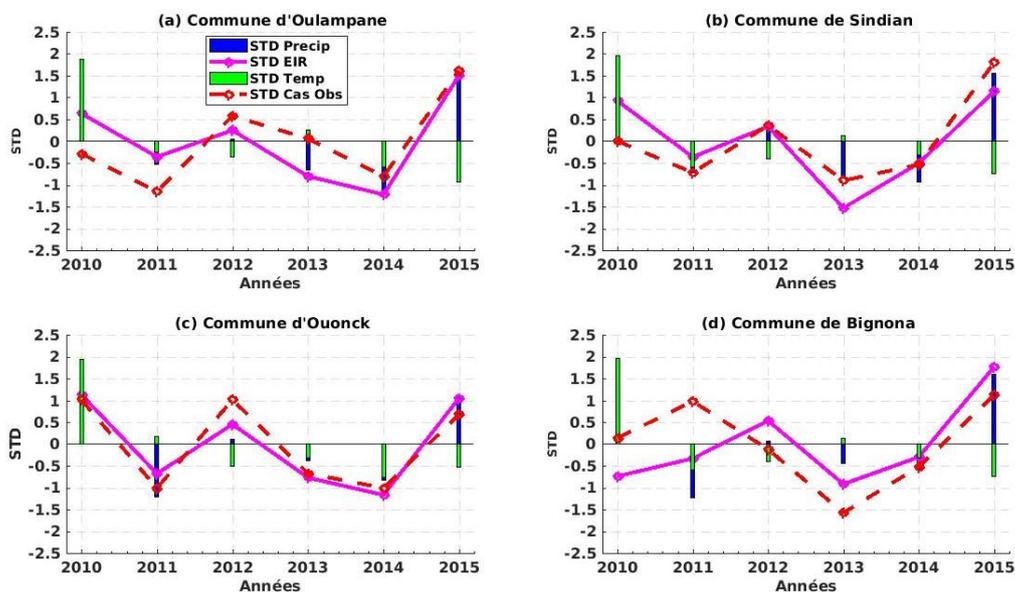
**Figure 13 :** Variation méridienne de l’EIR (2000-2016)

### 3.2.2 Modélisation par point village

#### 3.2.2.1 Anomalies des précipitations, de la température, des cas observés et de l’EIR simulé dans les communes d’Oulampane, de Sindian, d’Ouonck et de Bignona

La figure 14 montre les anomalies standardisées des précipitations, de la température, de l’EIR simulé et celle des cas de paludisme observé dans quatre communes de la Basse Casamance, la commune d’Oulampane, de Sindian, d’Ouonck et celle de Bignona. Les anomalies des taux d’inoculation entomologique (EIR) et les cas de communes sont en accord avec une légère différence pour la commune de Bignona. Cette différence entre le taux d’inoculation entomologique et les cas de paludisme pourrait être attribuée à l’augmentation des précipitations qui produisent les sites de reproductions du vecteur du paludisme. On note une discordance entre la température, les cas observés et de l’EIR simulé dans les quatre communes. La température aurait un impact sur le cycle de vie des larves et des vecteurs matures. D’après Le Sueur et al (1991) les températures élevées raccourcissent le temps nécessaire pour la maturation des moustiques et des parasites alors que les températures basses allongent la durée qu’il faut pour leur maturation. Dans ces communes les conditions météorologiques, environnementales et les facteurs socio-économiques favorisent le développement et une augmentation de cas de paludisme. Bignona étant une commune qui se trouve en milieu urbain, elle a une population importante. Or la plupart de celle-ci vit dans la périphérie avec des modes

de vie précaires et pas d'accès aux services de santé publique entraînant une augmentation des cas. Cependant, la couverture végétale et des plans d'eau permanents dans ces quatre communes, ce qui pourrait servir d'habitats potentiels pour la reproduction des anophèles femelles pendant la saison sèche pour soutenir la transmission du paludisme est probablement plus élevé. L'EIR simulé est en phase avec les cas observés, qui soulignent l'importance cruciale des précipitations pour contrôler la distribution du paludisme dans ces communes de région basse casamançaise. Par contre, cet effet n'a pas été pris en compte dans le modèle, mais l'EIR simulé était également élevé pendant cette période à cause de la couverture végétale, de la disponibilité des sites de la reproduction des moustiques. Cela montre qu'il est nécessaire d'évaluer le potentiel des interventions de lutte contre le paludisme en cours dans la zone.



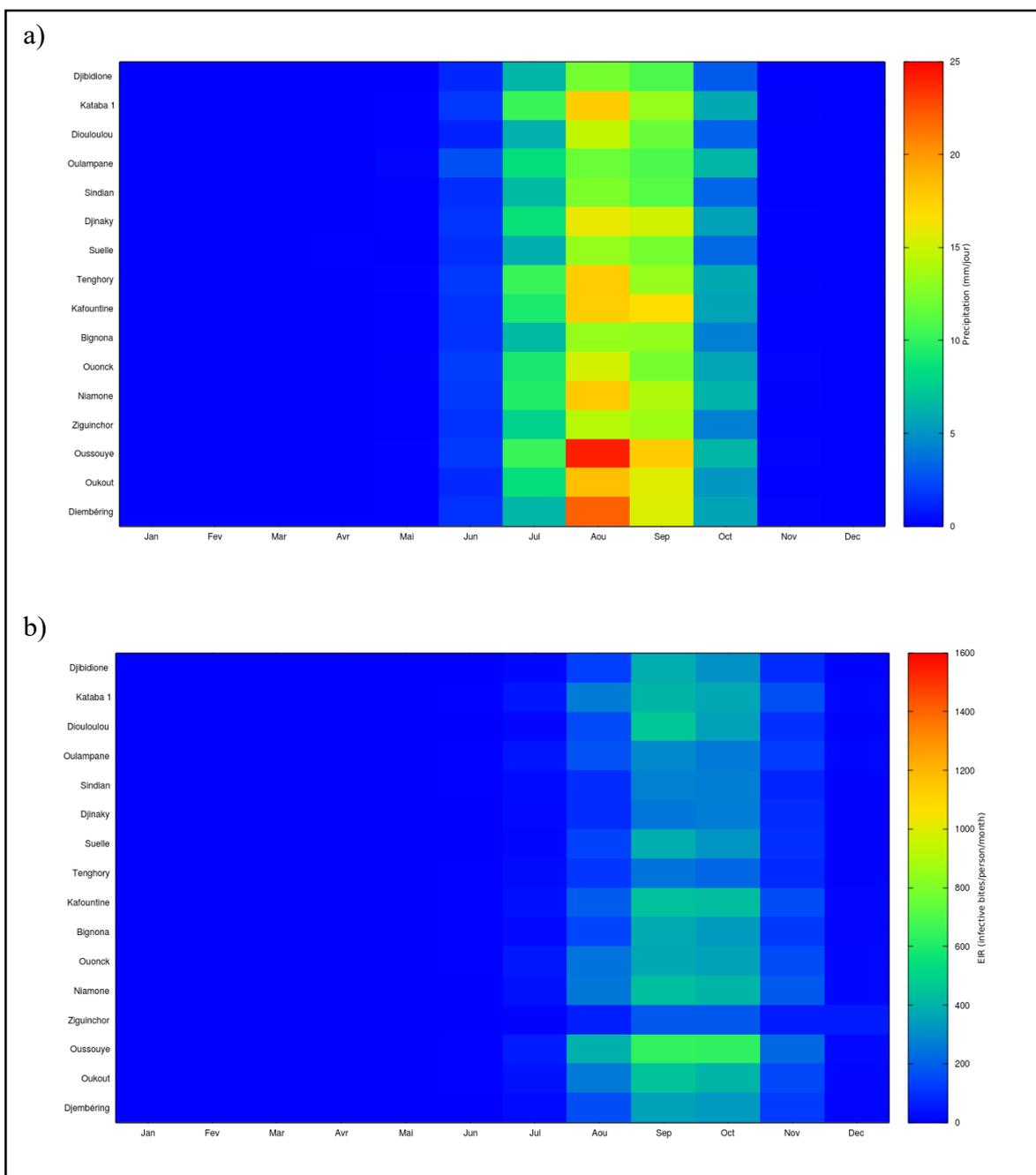
**Figure 14:** Anomalies des précipitations, de la température, des cas observés et de l'EIR simulé dans les communes d'Oulampane (a), de Sindian (b), d'Ouonck (c) et de Bignona (d) (2010-2015)

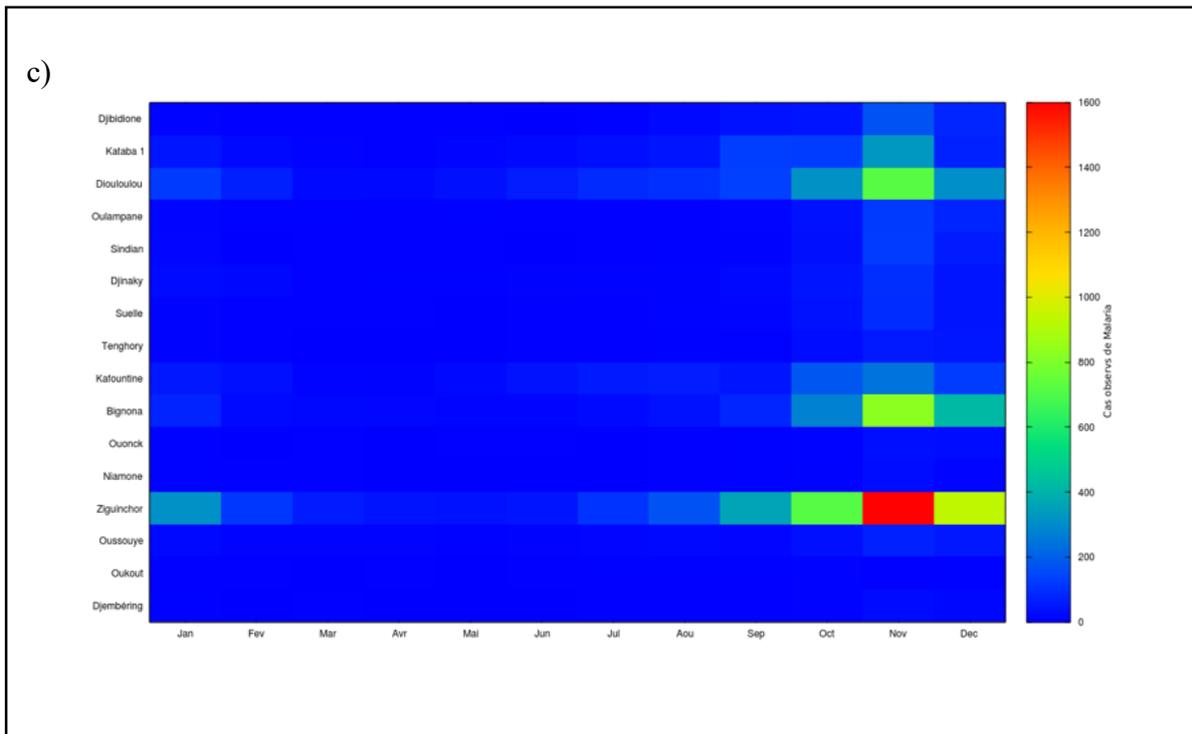
### 3.2.2.2 Comparaison de la saisonnalité de l'EIR simulé et des cas de paludisme observés dans 16 communes de la région de Ziguinchor

La figure 16 représente les observations des cas de paludisme, de l'EIR simulé et les précipitations mensuelles dans 16 communes de la région de Ziguinchor. L'analyse de la saisonnalité des cas de paludisme et de l'EIR simulé par le modèle montre que les cas de paludisme observé et de l'EIR du modèle suivent le rythme des précipitations. Pour les observations des cas de paludisme en milieux urbains, la commune de Ziguinchor a enregistré

le nombre maximum avec 1599 cas. Les communes de Bignona, de Diouloulou et d'Oussouye ont respectivement 827 cas, 714 cas et 65 cas. En milieux ruraux les communes de Kataba 1, de Kafountine, de Djibidione, de Sindian et celle d'Oulampane ont respectivement 325 cas, 239 cas, 167 cas, 118 cas et 115 cas de paludisme. Les communes de Djinaky, de Suelle et de Tenghory ont enregistré respectivement 92 cas, 88 cas, 51cas. Les communes d'Ouonck, de Niamone, de Djembéring et d'Oukout ont respectivement 28, 23, 19 et 6 cas paludisme (figure 16c). Dans les communes de la région Ziguinchor (Basse Casamance), un décalage de trois mois est généralement observé entre le pic des précipitations en août (figure 16a) et le nombre maximum de cas de paludisme signalé en novembre. Ce décalage de trois mois pourrait être dû au cycle de développement du moustique vecteur, au moment où ce moustique devient infectieux, au moment où il infecte un hôte sain et au temps nécessaire pour incuber le parasite chez l'homme avant que ce dernier ne présente des symptômes cliniques de paludisme. Cette saison de transmission élevée du paludisme a généralement lieu d'août à décembre dans la région de Ziguinchor et correspond au deuxième pic de température. Bien que la saison sèche se caractérise par de faibles valeurs de cas de paludisme, une transmission élevée est toujours observée vers la fin de la saison des pluies. Au mois de novembre, des paramètres climatiques tels que la température et l'humidité sont élevés, mais aussi une importante couverture végétale, ce qui est favorable au développement de moustiques vecteurs du paludisme. Vers la fin de la saison des pluies, les plans d'eau et les vecteurs matures sont disponibles (Traoré et al., 2001). Pour les simulations, le taux d'inoculation entomologique (EIR) est distribué de façon hétérogène dans les 16 communes de la région avec un maximum de l'EIR observé au mois de septembre (figure 16b). En effet, la commune de Ziguinchor a un taux d'inoculation entomologique moins important, 180 piqûres infectieuses par personne par mois. Les communes de Tenghory, Djinaky, Oulampane et Sindian ont un EIR qui se trouve entre 200 et 300 piqûres infectieuses par personne par mois. Dans les communes de Djembéring, de Djibidione, de Bignona, d'Ouonck et de Suelle l'EIR est compris entre 300 et 400 piqûres infectieuses par personne par mois. Les communes de Niamone, d'Oukout, de Kafountine, de Diouloulou, de Kataba 1, le taux d'inoculation entomologique (EIR) se situe entre 400 et 500 [piqûres infectieuses par personne par mois]. La commune d'Oussouye a un nombre du taux d'inoculation entomologique le plus élevé 632 [piqûres infectieuses par personne par mois]. L'EIR suit le rythme des précipitations avec un décalage d'environ un mois. Le maximum des précipitations est observé au mois d'août (figure 16a). Le modèle VECTRI simule bien la saisonnalité et la présence du paludisme à l'échelle locale. Le modèle montre un décalage d'un mois à l'avance par rapport à l'observation, sur l'occurrence des cas maximum de paludisme. Il

surestime la présence des cas de paludisme dans toutes les communes sauf pour les communes de Ziguinchor, Bignona et Diouloulou (figure 16c) où le modèle a tendance à le sous-estimer. La variabilité saisonnière observée de l'EIR correspond à la variabilité des cas de paludisme signalés, avec un nombre élevé de cas observés pendant et après la saison des pluies.





**Figure 15:** Diagramme Hovmöller des précipitations mensuelles (a), des simulations mensuelles de l'EIR (b) et des cas de paludisme observés mensuels (c) dans 16 communes de la Basse Casamance (2014-2015)

## Conclusion

Dans cette étude, nous avons fait une répartition spatiale des cas de paludisme en Basse Casamance avec les données cliniques. Dans les communes de la Basse Casamance la répartition est hétérogène avec de cas élevés aux milieux urbains. Le régime des précipitations de la Basse Casamance est uni modal avec son maximum observé au mois d'août. La température est bimodale avec son premier maximum en juin et le second en octobre. Le modèle VECTRI est utilisé pour simuler la répartition spatiale du taux d'inoculation entomologique (EIR) en Basse Casamance. Le modèle révèle un taux d'inoculation entomologique (EIR) plus élevé dans les communes situées aux zones plus humides que celles situées des milieux les moins humides. L'étude montre que les gîtes larvaires, vecteur de la maladie, sont modulés par les précipitations, alors que la température agit sur les cycles de vie des larves et des adultes. Le maximum de l'EIR est observé au mois de septembre soit un mois après le maximum des pluies. La saison de haute transmission du paludisme reste de juillet à novembre. Les précipitations affectent la transmission du paludisme pour une variation intra-annuelle. Le fort gardien est observé sur la transmission du paludisme entre les communes situées du Sud et celles du Nord. Le modèle VECTRI montre un décalage d'un mois à l'avance par rapport à l'observation, sur l'occurrence des cas maximum de paludisme. Le modèle surestime la présence des cas de paludisme dans toutes les communes sauf pour les communes de Ziguinchor, de Bignona et de Diouloulou où le modèle a tendance à le sous-estimer. Un décalage de trois mois est généralement observé entre le pic des précipitations en août et le nombre maximum de cas de paludisme signalé en novembre. Les anomalies ont montré que des cas observés et l'EIR simulé sont en phase et suivent la variation des précipitations pour toute la série chronologique (2010-2015), alors qu'avec la température, c'est le contraire qui se produit pour la même série chronologique (2010-2015).

Cette étude a permis d'avoir une idée de la relation entre le paludisme et les paramètres climatique (température et précipitations) sur la transmission en Basse Casamance.

Nous comptons travailler avec les projections de modèles pour simuler l'évolution future du paludisme au Sud et au Sud-Est du Sénégal.

Nous comptons travailler avec le PNLP pour avoir un accès aux données cliniques des régions sud et Sud-Est du Sénégal.

Faire une étude comparative des résultats modèle VECTRI et le modèle ESP (Elimination Scenario Planning, WHO, 2014). Le modèle ESP est basé sur les inventions

socio-économiques, il a été publié par l’OMS en 2014 pour mieux aider les programmes nationaux de lutte contre le paludisme dans les pays à évaluer si la réduction ou son élimination sont réalisables.

## Bibliographie

- Bomblies A., Eltahir EA.** (2009). Évaluation de l'impact des changements climatiques sur la transmission du paludisme au Sahel. *Écosanté*, **6**, 426-437. doi : 10.1007/s10393-010-0274-5.
- Caminade, C., S. Kovats, J. Rocklov, Tompkins, AM, Morse, AP, Colon-Gonzalez, FJ, Stenlund, H., Martens, P. et Lloyd, SJ.** (2014). Impact du changement climatique sur la distribution mondiale du paludisme. *PNAS*, **111 (9)** : 3286 à 3291.
- Carnevale P., Robert V., Molez J.F., Baudon D.** (1984). Faciès épidémiologique des paludismes en Afrique sub-saharienne. *Etudes médicales*, **3**, 123-133.
- CJ, Menard, R. et Amino, RD** (2010). Développement du parasite du paludisme dans la peau du mammifère hôte. *Proc Natl Acad Sci USA*, **107 (43)**: 18640–185.
- Crompton, PD, J. Moebius, S. Portugal, S. Waisberg, G. Hart, Garver, LS, Miller, LH, Bar-Illas, C. et Pierce, SK** (2014). Immunité contre le paludisme chez l'homme et le moustique : perspectives non résolues mystères d'une maladie infectieuse mortelle. *Annu Rev Immunol*, **32**,157-187.
- Dia I., Konate, L., Samb B., Sarr, J-B, Diop A., Rogerie F., Faye M., Riveau G., Remoue F., Diallo M., Fontenille D,** (2008). Bionomics of malaria vectors and relationship with malaria transmission and epidemiology in three physiographic zones in the Senegal River Basin. *Acta Tropica*, **105**, 145-153.
- Diouf I., Deme, A., Ndione, J-A., Gaye, A.T., Fonseca, B.F. and Cisse, M.,** (2015). Determination of malaria parameters using meteorological data sets of Senegal stations and reanalyses products. *Comptes Rendus de l'Association Internationale de Climatologie*, XXVIIIe AIC colloquium, Juillet 2015, Liège (Belgique).
- Diouf, I., Fonseca, B.F., Deme, A., Caminade, C., Morse, A.P., Cisse, M., Sy, I., Dia, I., Ermert, V., Ndione, J.A. and Gaye, A.T.,** (2017). Comparison of malaria simulations driven by meteorological observations and reanalysis products in Senegal. *International journal of environmental research and public health*, **14(10)**, p.1119, <https://doi.org/10.3390/ijerph14101119>.
- Diouf, I., Fonseca, B.R., Caminade, C., Thiaw, W.M., Deme, A., Morse, A.P., Ndione, J.A., Gaye, A.T., Diaw, A. and Ndiaye, M.K.N.,** (2020). Climate Variability and Malaria over West Africa. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, **102(5)**, pp.1037-1047, <https://doi.org/10.4269/ajtmh.19-0062>.
- Diouf, I., Fonseca, B.R., Caminade, C., Thiaw, W.M., Deme, A., Morse, A.P., Ndione, J.A., Gaye, A.T., Diaw, A. and Ndiaye, M.K.N.,** (2020). Climate Variability and Malaria over West

Africa. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 102(5), pp.1037-1047, <https://doi.org/10.4269/ajtmh.19-0062>.

**Drakeley, C., Sutherland, C., Bousema, JT, Sauerwein, RW et Targett, GAT** (2006). L'épidémiologie des gamétocytes de *Plasmodium falciparum*: armes de dispersion massive. *Trends Parasitol*, 22 (9) : 424–430.

**Ermert, V., Fink, AH et Paeth, H.** (2013). Les effets potentiels du changement climatique sur le paludisme transmission en Afrique à l'aide de projections climatiques régionalisées corrigées des biais et d'une simple analyse du paludisme modèle de saisonnalité. *Changement climatique*, 120 : 741–754.

**Ermert, V., Fink, AH, Morse, AP et Paeth, H.** (2012). L'impact du changement climatique régional sur le risque de paludisme dû au forçage des gaz à effet de serre et aux changements d'affectation des sols en Afrique tropicale. *Environnement Santé Perspectives*, 120 : 77–84.

**Ernest O. Asare and Leonard K.** (2017). Amekudzi Assessing Climate Driven Malaria Variability in Ghana Using a Regional Scale Dynamical Model *Climat*, 5 (1), 20.

**Faye, O., Gaye, O., D. Fontenille, N. Sy, L. Konate, G., G. Hébrard, J. Hervé, J.-P., J. Trouillet, Diallo, S. et Mouchet, J.** (1995). Comparaison de la transmission du paludisme dans deux faciès épidémiologiques au Sénégal : la zone côtière sahélienne et la zone méridionale soudanienne. *Dakar Médical*, 40 (2) : 201-207.

**Fontenille D., Lochouarn L., Diagne N., Sokhna C., Lemasson JJ, Diatta M., Konate L., Faye F., Rogier C., Trape JF.** (1997). Variations annuelles et saisonnières élevées de la transmission du paludisme par les anophèles et composition des espèces vectrices à Dielmo, une zone holoendémique au Sénégal. *Un m. J. Trop. Med. Hyg*, 56, 247–253.doi :10.4269/ajtmh.1997.56.247.

**Fontenille, D., Lochouarn, L., Diatta, C., Sokhna, C., Dia, I., Diagne, N., Lemasson, J.-J., Ba, K., Tall, A., Rogier, C. et Trape, J.-F.** (1997a). Etude entomologique de quatre ans sur la transmission de paludisme saisonnier au Sénégal et la bionomie de *Anopheles gambiae* et *A. arabiensis*. *Un m. J. Trop. Med. Hyg*, 91 (6): 647–652.

**Freeman T., Bradley M.** (1996). Temperature is predictive of severe malaria years in Zimbabwe. *Trans R Soc Trop Med Hyg*, 90(3), 232.

**Gallup, JL et Sachs, JD** (2001). Le fardeau économique du paludisme. *Un m. J. Trop. Med. Hyg*, 64, 85–96.

**Gbenga J., Abiodun 1 Maharaj R., Witbooi P, Okosun K 0.** (2016). Modélisation de la température et des précipitations sur la population d'anophèle *arabiensis*, doi 10.1186/s12936-0161411-6.

- Gianotti, RL, Bomblies, A. et Eltahir, EAB** (2009). Modélisation hydrologique pour dépister les potentielles méthodes de gestion de l'environnement essentielles pour la lutte contre les vecteurs du paludisme au Niger. *Resour Water Resour*, 45 : W08438.
- Gouataine, S.R., et Ymba, M.** (2019). Variabilité climatique et émergence du paludisme à Bongor (Tchad). *Revue Espace, Territoires, Sociétés et Santé*, 1 (2), 143-156, <https://retssa-ci.com/index.php?page=detail&k=40>.
- Gupta S., Hill A.S.** (1998). Dynamic Interaction in Malaria: Host Heterogeneity Meets Parasite Polymorphism. *Proc R Soc Lond B*, 261, 361-370.
- Hamby, DM** (1994). Examen des techniques d'analyse de sensibilité des paramètres d'environnement des modèles. *Surveillance et évaluation de l'environnement*, 32: 135-154.
- Hoshen, MB et Morse, AP** (2004). Un modèle de transmission du paludisme basé sur les conditions météorologiques. *Paludisme Journal*, 3 (32).
- Hulme M.** (1992). Rainfall changes in Africa 1931-1960 to 1961-1990. *Int. J. Climatol*, 12, 685-699.
- Ihantamalala., H. F. A.** (2017). Modélisation de la dynamique du paludisme à Madagascar. Thèse de doctorat. Université de la Réunion. France.
- Janicot S., et Fontaine B.** (1993). L'Evolution des idées sur la variabilité interannuelle récente des précipitations en Afrique de l'Ouest. *La Météorologie*, 8, 28-58.
- Kanga., K.H.M., Kouassi., K., Brissy., O.A., Assi-Kaudjhis., J.P.** (2019). Variation saisonnière du paludisme et risque de perturbation du calendrier agricole dans le district sanitaire de Bouaké sud. *Revue Espace, Territoires, Sociétés et Santé*, 1 (2), 62-75.
- Lebel T., Ali A.** (2009). Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime 1990-2007. *Journal of Hydrology*, 375, 1-2.
- Lindsay S.W., Birley M.H.** (1996). Climate change and malaria transmission. *Ann. Trop. Med. Parasitol*, 6,573-588.
- Mbouna, A.D., Tompkins, A.M., Lenouo, A., Asare, E.O., Yamba, E.I., Tchawoua, C.** (2019). Modelled and observed mean and seasonal relationships between climate, population density and malaria indicators in Cameroon. *Malaria Journal*, 18:359, <https://doi.org/10.1186/s12936-019-2991-8>.
- McMichael AJ, Sloof RH, Kovats S.** (1996). *Changement climatique et santé humaine - Risques et mesures à prendre, Contribution à l'OMS. Organisation mondiale de la santé; Genève, Suisse.*
- Prost A.** (1991). Les faits de santé aux cours et décours des sécheresses. *Sécheresse*, 2, 40-47.
- Sachs J., Malaney P.** (2002). Le fardeau économique et social du paludisme. *La nature*, 415,

680– 685.doi:10.1038/415680a.

**Tompkins, A.M., Ermert. V.** (2013). A regional-scale, high resolution dynamical malaria model that accounts for population density, climate and surface hydrology. *Malar. J*, 12:65.

**Traoré LM, Fontenille D., Diallo M., Ba Y., Zeller HG, Mondo M., Adam F., Thonon J., Maiga A.** (2001). Surveillance des arbovirus de 1990 à 1995 dans la région de Barkedji (Ferlo) au Sénégal, un foyer naturel possible du virus de la fièvre de la vallée du Rift. *J. Med. Entomol*, **38**, 480– 492.doi :10.1603/0022-2585-38.4.480.

## Annexes

Les tableaux restants des options de calibrage dans le modèle VECTRI

**Tableau 9:** sheme choice parameters

parameters	Definition	default	units
nlarv_sheme	larvae water temperature sheme (1,2,3) 1=ermert :2011a,2=jepsen47,3=bayoh lindsey 2003	1	
nsurvival_shema	mosquito survival temperature sheme (1,2,3) 1=MartinsI,2=Martins II,3=Bayoh	2	

**Tableau 10:** larvae parameters (version 1.2.6)

parameter	Definition	default	Units
neggmn	eggs laid per female vector	120	
nlayingmax	maximum number of vector allow to lay (-ve no limit)	-99	
rlarv_tmax	maximum temperature for larvae survival	35	deg C
rlarv_egftime	time for egg hatching	1.0	days
rlarv_pupaetime	time for pupae stage	1.0	days
rlarv_flushmin	minimal daily survival L1 larvae after intense rainfall	0.4	
rlarv_flushtau	experimental decay of flushing with rain rate	50	mm day <sup>-1</sup>
rmasslarv_stage4	mass of L4 larvae	0.45	mg
biocapacity	larvae biomass carry capacity of pools	300	mg m <sup>-2</sup>
rlarvsurv	base survival rate due to predation	0.825	

**Tableau 11:** larvae parameters (version 1.3.5 onwards)

parameter	Definition	default	units
neggmn	eggs laid per female vector	80	
nlayingmax	maximum number of vector allow to lay (-ve no limit)	-99	
rlarv_tmin	minimum temperature for larvae survival	12.16	deg C
rlarv_tmax	maximum temperature for larvae survival	38	deg C
rlarv_egftime	time for egg hatching	1.0	days
rlarv_pupaetime	time for pupae stage	1.0	days
rlarv_flushmin	minimal daily survival L1 larvae after intense rainfall	0.4	

rlarv_flushtau	experimental decay of flushing with rain rate	20	mm day <sup>-1</sup>
rasslarv_stage4	mass of L4 larvae	0.45	mg
biocapacity	larvae biomass carry capacity of pools	300	mg m <sup>-2</sup>
rlarvsurv	base survival rate due to predation and non-climatic factors	0.987	

**Tableau 12:** hydrology (version 1.2.6, a new beta scheme is available in 1.3.0)

parameter	paper	Definition	default	units
ipud_vers		pudle parametrization version (126/130)	126	
rwaterfract_perm	$W_0$	permanent breeding site fraction	10 <sup>-6</sup>	
rwaterfract_max	$W_{max}$	maximum coverage by breeding site	0.2	
rwaterfract_rate	$K_w$	pond geometry factor	10 <sup>-3</sup>	mm <sup>-1</sup>
rwaterfract_evap126	$I + E$	infiltration and evaporation rate loss of ponds	250	mm day <sup>-1</sup>
rwater_tempoffset	$T_{wat}$	Temperature offset of pond to air	0	deg C

**Tableau 13 :** biting parameters

parameter	Definition	default	units
rzoophilie_tau	e-folding population density for zoophilic rate	30x10 <sup>-6</sup>	m <sup>-2</sup>
rzoophilie_min	Minimum anthropophilic bite rate at low population densities	0.1	

**Tableau 14 :** gonotrophic and sporogenic

parameter	Definition	default	units
rtgono	threshold temperature for egg development in vector	7.7	deg C
dgono	degree days for egg development in vector	37.1	days
rtsporo	threshold temperature for parasite development	16.0	deg C
dsporo	degree days for parasite development in vector	111	days

**Tableau 15:** toy climate

parameter	Definition	default	units
rtemperature_offset	temperature offset	0.0	deg C
rtemperature_trend	temperature trend	0.0	deg C
	ratio to scale rainfall by	1.0	