



**HAL**  
open science

# Impact du climat sur l'écologie et la transmission du paludisme : analyse du risque palustre dans le septentrion malien

Moussa Fane

► **To cite this version:**

Moussa Fane. Impact du climat sur l'écologie et la transmission du paludisme : analyse du risque palustre dans le septentrion malien. Médecine humaine et pathologie. Université de Grenoble, 2011. Français. NNT : 2011GRENS042 . tel-01178824

**HAL Id: tel-01178824**

**<https://theses.hal.science/tel-01178824>**

Submitted on 21 Jul 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

**THÈSE**

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE**

Spécialité : "**Modèles, méthodes et algorithmes en biologie, santé et environnement**"

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

**Moussa FANE**

Thèse préparée au sein du Laboratoire "**Techniques de l'Ingénierie Médicale et de la Complexité - Informatique, Mathématiques et Applications de Grenoble**" (TIMC-IMAG) - École Doctorale "**Ingénierie pour la santé, la Cognition et l'Environnement**" (EDISCE)

**Impacts du climat sur l'écologie et  
la transmission du paludisme :  
Analyse du risque palustre  
dans le Sahel malien**

Thèse soutenue publiquement le 21/12/2011, devant le jury composé de :

**Mr Umberto D'ALESSANDRO**

Professeur, Institute of Tropical Medicine-Antwerp

*Rapporteur*

**Mr Sékou F. TRAORE**

Professeur, Université de Bamako

*Rapporteur*

**Mme Muriel CORNET**

Professeur, UJF - Grenoble I

*Examineur*

**Mr Pascal ALLEMAND**

Professeur, UCB - Lyon I

*Examineur*

**Mme Renée GRILLOT**

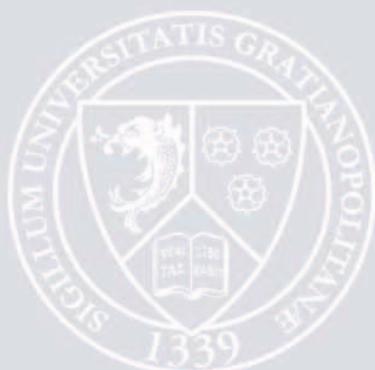
Professeur, UJF - Grenoble I

*Examineur*

**Mr Philippe SABATIER**

Professeur, VetAgroSup

*Directeur de thèse*



## Remerciements

---

**Je tiens à remercier vivement les membres du jury** : notamment,

Mme Muriel CORNET, Professeur de parasitologie à l'Université Joseph Fourier.

Chère madame, je vous suis très reconnaissant pour avoir accepté de présider ce jury. La réussite de cette thèse relève d'un "DÉFI" que je relève sous votre autorité et avec votre bénédiction.

Monsieur Umberto D'ALESSANDRO, Professeur de parasitologie/malariologie à l'Institut de Médecine Tropicale Prince Léopold d'Anvers-Belgique, "Theme leader disease control & elimination", Medical Research Council (MRC) the Gambia.

Très cher Umberto, les mots me manquent pour vous exprimer ma reconnaissance. Vous m'avez toujours soutenu aux moments difficiles, ce depuis que nous avons fait connaissance pendant le "Cours international francophone de paludologie de Bamako " en septembre 1998, où vous étiez le responsable de notre équipe de terrain à Yanfolila. Votre intervention a été déterminante à l'aboutissement de ce travail. Le Professeur Philippe SABATIER, engagé dans un partenariat inter-universitaire parallèlement à ses obligations pédagogiques avait besoin d'un appui de taille que vous avez valablement comblé au moment qu'il fallait. Je vous souhaite encore beaucoup de réussites dans votre carrière.

Le Professeur Cheick Fantamady TRAORE de l'université de Bamako,

Cher compatriote, vous avez guidé mes premiers pas dans la recherche bio médicale au laboratoire d'entomologie parasitaire de l'Ecole Nationale de Médecine et de Pharmacie (ENMP) dont les performances ont motivé la création du Malaria Research & Training Centre (MRTC) en 1992. De ces jours mémorables à la date d'aujourd'hui, malgré les multiples contraintes, votre loyauté et votre accompagnement ne m'ont jamais fait défaut.

Monsieur Pascal Allemand, Professeur des Systèmes Informatiques des Sciences de la Géographie, Université Claude Bernard de Lyon I.

Mon cher Pascal, je suis très heureux des relations qui ont pu s'établir entre nous à la faveur de cette thèse. J'en suis d'autant plus heureux que mes performances aujourd'hui en SIG ne sont que le résultat de votre détermination et de votre perspicacité. Homme intègre, modeste et efficace, vous n'hésitez pas à sacrifier vos heures de détente pour me donner des cours personnels ; cela je ne l'oublierai pas et vous assure d'un meilleur usage des connaissances acquises.

Le Professeur Philippe SABATIER,

Professeur, ce travail est le vôtre. Votre engagement en faveur de cette thèse ne s'est jamais démenti tout le long du processus malgré les multiples difficultés qui ont jalonné le parcours. Vous n'avez pas hésité un instant à intervenir auprès des plus hautes autorités maliennes pour la finalité de ce travail ! Cela représente pour moi une qualité humaine que je respecte vivement. Ma profonde gratitude va aussi à votre chère épouse, ma logeuse dévouée, Mme Cécile SABATIER, pour la chaleur de ses accueils et les encouragements for utiles aux moments de stress.

Madame Renée Grillot,

Chère Professeur, votre apport a du être déterminant au jury de cette thèse au regard de l'expérience accumulée le long d'une carrière professionnelle réussie. Permettez-moi de saluer

votre motivation scientifique, et de vous assurer de prêter une oreille attentive à vos sages conseils.

Je n'oublie pas les professeurs du cours master2 ISM 2006-2007, qui ont guidé mes premiers pas vers les sciences de l'environnement. Merci au Professeur De Gaudemaris, à mon professeur de statistique, monsieur Franck Balducci, à mon cher aîné Dominique Bicout.

Je tiens à remercier particulièrement les professeurs Fafré SAMAKE, Salikou SANOGO et Madame Siby Ginette Bellegarde, tous au Mali. Mention spéciale à toutes ces personnes, alors respectivement directeur de l'IPR/IFRA de Katibougou, ministre de l'Education de base et ministre de l'Enseignement supérieure et de la recherche scientifique. Leur concours est venu en temps opportun pour redonner espoir à un moment où la mise en œuvre de l'étude locale de Dèbo était menacée, faute de moyens financiers et logistiques.

Ce travail ayant été réalisé dans le laboratoire TIMC-IMAG, en particulier au sein de l'équipe EPSP dirigée par Philippe Sabatier, je tiens à remercier le directeur du TIMC IMAG, ainsi que celui de l'EDISCE de leur disponibilité constante. Je n'oublie pas leurs secrétariats respectifs pour les informations fort appréciables.

Une pensée spéciale à ces personnes pour leur volontarisme: Caroline Messina\_DOS Santos de l'IMAG-EDISCE, Catherine BARBET relations internationales VetAgroSup, Fereshteh FIROUZI du Département d'infectiologie VetAgroSup, Céline Legrenzi du Collège des Ecoles Doctorales de l'U.J.F.

Je remercie tous ceux avec qui j'ai partagé les bureaux des stagiaires et doctorants : Farzaneh Ahmadnejad de l'Iran, Alina Macacu de la Roumanie, Olivia TARDY de Valence France, NGUYEN DUC Thu Dung du Vietnam, MALEE SRIPROM de la Thaïlande, Rindra Vatosoa Randremanana de Madagascar, Aymen MAMLOUK de la Tunisie...

Je remercie Martine Meyer VetAgroSup, secrétaire particulière du professeur Philippe SABATIER de sa disponibilité.

Mes sincères remerciements aux compatriotes et amis du Rhône Alpe pour leur soutien fraternel. Cheick Konté, Cheick Haïdara et Soumaïla Doumbia à Grenoble, le Grand frère Mamadou TRAORE et sa famille, directeur des études de l'Ecole Supérieure de Chimie, Physique et Electronique de Lyon et le Professeur Angéli Kodjo, Département de l'infectiologie VetAgroSup, originaire de la Côte d'Ivoire. Grand merci à l'inoubliable Hamidou Moussa Maïga au rectorat de l'université de Bamako, véritable artisan de mon orientation scientifique. Je n'oublie pas mon maître modèle, Mr Bekou Pascal Koïta, directeur de l'école « A » de Beleko.

Une vive pensée à mes partenaires de terrain, Jean Gaudart, Nadine Dessay, Gaïba Diarra, Moussa Diabaté, le doyen Yaya Coulibaly. Mes remerciements vont aux populations des villages qui nous ont acceptés et accompagnés durant la collecte des données de l'étude.

Je tiens finalement à exprimer ma gratitude à l'Ambassade de France au Mali pour le financement de ma thèse.

Il y a ceux qui sont ma raison d'être et à qui je rends hommage. Il s'agit de ma mère Mantioh Sanogo, ma famille et mes enfants en particulier: Anna, Binta, Ibrahim, et Diouman Baby FANE durement sevrés par mes longues absences du foyer, mon frère Sadio FANE au village.

Hommage à mon père, le vieux forgeron feu Doumantier FANE. Que son esprit repose en paix sur la terre nourricière du **Beleko Noumouna (Dioïla)**.

## Table des figures

<b>Figure 1</b> : Carte des climats d'Afrique dans le journal Jeune Afrique Atlas.....	17
<b>Figure 2</b> : <b>Biotope</b> des interactions complexes Homme-Vecteur-Parasite.....	25
<b>Figure 3</b> : Cartes climatiques du Mali.....	26
<b>Figure 4</b> : Cartes de la région de Mopti montrant trois faciès distincts : inondé ; exondé et sableux. ....	27
<b>Figure 5</b> : Carte de la mare Dèbo serpentant entre les trois sous villages Dèbo .....	38
<b>Figure 6</b> : Spatial relations between infectious clusters, larval and human habitats location in Dèbo village.....	49
<b>Figure 7</b> : Evolution des populations de vecteurs adultes et de larves par rapport aux facteurs météorologiques.....	50
<b>Figure 8</b> : Evolutions des températures, de l'humidité et de la pluviométrie à Dèbo.....	51
<b>Figure 9</b> : Structure des gîtes larvaires.....	53
<b>Figure 10</b> : Evolution de l'incidence du paludisme au Mali (200-2006).....	59
<b>Figure 11</b> : Diagramme de la tâche de simulation de la dynamique des mares (Bicout et al., 2009).....	62
<b>Figure 12</b> : NDVI moyen calculé pour les 4 trimestres sur une période de 26 ans de 1982-2006. (Gaudart et al., 2009).....	66



<b>Figure 13</b> : Sites d'observations retenus en début de saison des pluies:.....	68
<b>Figure 14</b> : Méthode de collecte des moustiques : matériel, mode opératoire et tri des Captures.....	71
<b>Figure 15</b> : Procédure utilisée pour le traitement des données SPOT et QUICKBIRD (Gaudart et al., 2009).....	76

<b>Figure 16</b> : Cartographie des collections d'eau à partir d'images SPOT du 20/10/2006 et QUICKBIRD du 20/11/2004. (Gaudart et al., 2009).....	77
<b>Figure 17</b> : Cartographie du bâti, et de la végétation, à partir de l'image QUICKBIRD prise le 21/11/2004. (Gaudart et al., 2009).....	78
<b>Figure 18</b> : Risque palustre calculé à partir de la distance aux gîtes larvaires. Deux limites ont été retenues, 400 et 600 mètres à partir de chaque zone, (Gaudart et al., 2009).....	79
<b>Figure 19</b> : Fréquence et agressivité des vecteurs du paludisme par faciès (transect de Mopti) .....	79
<b>Figure 20</b> : Légende.....	82
<b>Figure 21</b> : Cartes climatologiques d'anomalies de précipitations basées sur les observations du CRU.(Mitchell et Jones, 2005).....	95
<b>Figure 22</b> : Différence (mm/jour) des précipitations estivales (JJA) entre 2020 – 2049 et 1960 – 1990 (Christensen et al., 2007).....	96
<b>Figure 23</b> : Haut : Champs de pluie moyen de Juillet à Septembre (JAS). Bas : Différences 2081-2099 et 1981-1999 en JAS En mm/jour (Bicout et al., 2009).....	98
<b>Figure 24</b> : Modèle couplé hydrologie et abondance vectorielle (Porphyre et al., 2005).	101
<b>Figure 25</b> : Données obtenues à partir d'images satellites (Bicout et al., 2009).....	102
<b>Figure 26</b> : Impact d'une séquence de pluie désagrégée sur trois mares de la région de Barkédji. (Bicout et al., 2009).....	102
<b>Figure 27</b> : Impact d'une séquence de pluie désagrégée sur trois index de résistance à la sécheresse.....	103
<b>Figure 28</b> : Arbre de diffusion du risque palustre par la dynamique des gîtes larvaires dans les contextes géo climatiques du Mali.....	114
<b>Figure 29</b> : Changement de l'endémicité du paludisme mondial depuis 1900.....	119

## Table des tableaux

---

<b>Tableau 1 :</b> Echantillon de moustiques capturés à traiter (ELISA).....	44
<b>Tableau 2 :</b> Examen cytogénétique des vecteurs du paludisme capturés durant la saison des pluies dans le Kaarta Mali (2009).....	45
<b>Tableau 3 :</b> Risque de transmission et formes chromosomiques représentant les vecteurs du paludisme pendant la période d'étude .....	48
<b>Tableau 4 :</b> Densités moyennes des larves d' <i>Anopheles gambiae</i> sl dans les habitats actifs successifs : à partir de l'étang vers les habitats générés par l'activité humaine .....	52
<b>Tableau 5 :</b> Impact de l'environnement sur l'abondance des populations de vecteurs ... ..	54
<b>Tableau 6 :</b> Impacts anthropiques sur l'abondance des populations de vecteurs adultes .....	55
<b>Tableau 7 :</b> Présentation des cinq sites d'étude.....	67
<b>Tableau 8 :</b> Images spatiales acquises par le consortium ACCIES.....	75
<b>Tableau 9 :</b> Dynamique de la productivité larvaire d'anophèles dans les strates prospectées. ....	80
<b>Tableau 10 :</b> Structure et productivité des gîtes d'anophèles au début de la saison des pluies.....	81
<b>Tableau 11 :</b> Structure des gîtes larvaires d'anophèles en saison sèche.....	82.
<b>Tableau 12. Paysage écologique, structure et productivité individuelle des gîtes larvaires et abondance des adultes d'anophèles en Août 2007 (début de saison des pluies)..</b>	<b>84</b>
<b>Tableau 13 :</b> Variables entomologiques de la transmission en zones inondée et exondée selon les trois saisons climatiques de l'année au Mali ( <i>A. gambiae</i> ).....	<b>85</b>

## Table des matières

---

<b>Remerciements</b>	<b>2</b>
<b>Table des Figures</b>	<b>4</b>
<b>Table des Tableaux</b>	<b>6</b>
<b>Table des matières</b>	<b>7</b>
<b>Resumé</b>	<b>12</b>
<b>Partie I. Problématique</b>	<b>12</b>
<b>1. Objectifs</b>	<b>14</b>
<b>2. Zones géo-climatiques d'Afrique</b>	<b>15</b>
2.1. Région équatoriale	15
2.2. Région tropicale	16
2.3. Région sahélienne	19
2.4. Région méditerranéenne	20
<b>3. Distribution du paludisme : faciès versus strates</b>	<b>20</b>
3.1. Classes d'endémicité de Christophers et al.	21
3.2. Classification de Wilson	21
3.3. Classification de Kampala	22
3.4. Classification de Mac Donald	22
3.5. Classification de Yaoundé	23
3.6. Faciès du paludisme selon Carneval et al.	23
<b>4. Strates du paludisme au Mali</b>	<b>25</b>
4.1. Strate centrale à l'intersection des régions Nord et Sud (Mopti)	26
4.1. Strate des régions arides du Nord (Tombouctou, Gao, Kidal et Kayes)	27
4.3. Strate des régions humides du Sud (Sikasso, Koulikoro, Ségou et Kayes)	27
4.4. Strate de faciès associés à des modifications environnementales	28
<b>5. Impacts du changement climatique sur le paludisme au Sahel</b>	<b>29</b>
<b>6. Résumé</b>	<b>31</b>

**Partie II. Impact du Climat sur la Transmission du Paludisme à l'Echelle Locale..... 34**

<b>1. Problématique</b>	<b>35</b>
<b>2. Matériel et méthodes</b>	<b>37</b>
2.1. Le site d'étude	37
2.2. Géolocalisation des concessions et des gîtes larvaires	38
2.3. Monitoring de l'environnement et du climat	41
2.4. Etude des populations de moustiques adultes	42
2.5. Estimation des paramètres de transmission	44
2.6. Détermination des espèces éco génétiques du complexe <i>A. gambiae</i>	45
2.7. Analyse statistique des données	46
<b>3. Résultats</b>	<b>47</b>
3.1. Evolution de la population de vecteurs adultes	47
3.2. Evolution des paramètres de la transmission du paludisme	47
3.3. Evolution de la population de larves	49
3.4. Evolution des variables climatiques	51
3.5. Disponibilité et productivité des gîtes larvaires	52
3.6. Impact local du climat sur l'abondance des vecteurs	54
3.7. Impact anthropique sur l'abondance des vecteurs	54
<b>4. Discussion</b>	<b>55</b>

**Partie III. Impact du Climat sur la Transmission du Paludisme à l'Echelle Régionale 58**

<b>1. Problématique</b>	<b>60</b>
<b>2. Matériel et méthodes</b>	<b>63</b>
2.1. Les sites d'étude	64
2.2. Etudes historiques de la distribution de la transmission au Mali	69
2.3. Enquête entomologique (5 sites d'étude)	69
2.4. Monitoring environnemental et climatique (3 sites d'étude)	71
2.5. Analyse spatiale d'un site (Bandiagara)	75
<b>3. Résultats</b>	<b>76</b>
3.1. Analyse du risque palustre à Bandiagara (faciès sahélien, Mopti)	76

3.2. Variabilité du risque de transmission : transect sahélien de Mopti	79
3.3. <b>Caractéristiques écologiques de la productivité individuelle des sites de ponte d'anophèles</b>	80
3.4. <b>Données historiques de la transmission du paludisme au Mali</b>	85
<b>4. Discussion</b>	<b>87</b>
<b>Partie IV. Discussion</b>	<b>93</b>
<b>1. Apports des scénarios climatiques au Sahel</b>	<b>94</b>
1.1. Pluviométrie et sécheresse au Sahel	94
1.2. Projection globale du climat futur (grande échelle)	96
1.3. Projection régionale du climat futur (petite échelle)	97
<b>2. Evaluation des impacts des scénarios climatiques sur le paludisme</b>	<b>98</b>
2.1. Impacts directs de l'humidité et de la température sur la transmission .....	99
2.2. Impacts indirects de la pluviométrie sur les habitats et la transmission vectorielle	100
2.3. Impacts anthropiques sur la transmission : agriculture et urbanisation	104
2.4. Impacts anthropiques sur la transmission : Risques d'exposition aux infections	105
<b>3. Contribution à un contrôle environnemental du paludisme</b>	<b>106</b>
3.1. Définir une stratégie de recherche	107
3.2. Développer et normaliser les réseaux de mesure	108
3.3. Tester des adaptations destinées à atténuer les effets négatifs du CC	109
<b>4. Mes recommandations de santé publique</b>	<b>111</b>
<b>Conclusion Générale</b>	<b>115</b>
<b>Références</b>	<b>121</b>
<b>Gîtes larvaires anthropiques</b>	<b>129</b>
<b>Cartes des données historiques de la transmission du paludisme au Mali</b>	<b>131</b>
<b>Pages annexes</b>	<b>133</b>

## Résumé

Le paludisme ou malaria est la plus persistante des maladies qui défient le monde. Le cycle biologique complet de l'anophèle, vecteur du *Plasmodium* passe par une phase aquatique (œufs, larves, nymphes) et une phase terrestre des adultes. La transmission est intense et continue dans les régions équatoriales de l'Afrique où les précipitations sont abondantes et les températures toujours élevées. Par contre, au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur la transmission est saisonnière et de courte durée.

Les facteurs environnementaux d'amplification des anophèles se résument à deux niveaux: 1) Les changements écologiques globaux comme le réchauffement de la terre et le changement climatique ; 2) Les changements écologiques locaux comme les précipitations et la montée des cours d'eaux qui remplissent les gîtes larvaires, respectivement de façon directe et par submersion des terres. Le changement climatique synonyme de dérèglement climatique, la dernière en date des menaces qui pèsent sur l'Afrique, est un nouveau facteur de complexité du paludisme. Dans la région sahélienne, le remplissage/vidange des gîtes larvaires d'anophèles suit étroitement la hauteur des pluies, le pic de multiplication des gîtes s'observe avec le pic des précipitations. Les cas cliniques et décès liés aux infections palustres se multiplient avec la hauteur des pluies. Durant la saison des pluies, les gîtes larvaires d'*Anopheles gambiae* sont largement distribués par la formation de nombreuses petites collections d'eau. Lorsqu'il tarde à pleuvoir, ces petites surfaces d'eau peuvent sécher rapidement du fait de l'évapotranspiration sous le soleil accablant du sahel. En saison sèche la transmission s'interrompt dans plusieurs localités par la disparition des anophèles. L'absence de pluies pendant des années peut entraîner une rupture prolongée de la transmission, comme les années 1970 à 1973, où le paludisme s'était retiré du sahel du fait de la sécheresse. Le sahel est caractérisé par une variabilité accrue du climat dont les bases sont encore mal cernées. Avec les pluviométries abondantes, l'équilibre des gîtes de production d'anophèles peut basculer facilement en faveur du paludisme et ses épidémies occasionnées par le manque d'immunité de la population. Si la santé publique demeure la seule contrainte humaine capable de limiter l'extension climato-géographique du paludisme, une connaissance suffisante des mécanismes climatiques de variabilité de la transmission est indispensable pour

nourrir les modèles de prédiction du risque dans la prise de décisions. Nous avons analysé l'évolution de la variabilité climatique par des modèles numériques en relation avec les données entomologiques intégrées aux données satellitaires du terrain.

A large échelle, l'étude a trouvé que la transmission du paludisme est globalement liée à la pluviométrie mais, que les autres variations éco-climatiques relèvent des contraintes topographiques locales (géofaciès). Nous avons observé une abondance des anophèles liée à la pluviométrie dans les zones exondées et une abondance des anophèles liée au routage des eaux de pluies dans les zones inondées. Dans la zone inondée, l'étude a prouvé un divorce entre la densité des moustiques et le risque de transfert du Plasmodium. *Anopheles gambiae s.l.* infligeait à lui seule 16 (4757,34/297) fois plus de piqûres en zone inondée qu'en zone exondée. Par contre, le taux d'infection de *gambiae* était 3,5 (3,85/1,10) fois plus élevé en zone exondée qu'en zone inondée de même que le risque de transmission 2,68 (5,55/2,07) fois plus élevé en zone exondée qu'en zone inondée.

A l'échelle réduite du village, les précipitations différaient significativement pendant l'hivernage, conduisant à une variabilité considérable de la productivité des anophèles. Bien qu'il pleuve seulement 2-3 mois sur 12 de l'année, *A. gambiae* était produit de façon continue dans la localité d'étude de Dèbo, écologiquement proche du Sahara. Cela, par le jeu d'une grande mare pérenne en relais avec les gîtes larvaires de pluies. Parallèlement, des moustiques infectés ont été trouvés toute l'année (avant, pendant et après la saison des pluies) dans les habitations humaines de Dèbo. La température, habituellement déterminante comme paramètre de développement larvaire n'était pas forcément utile dans la productivité des vecteurs du paludisme dans la même localité sahélienne.

Nous pensons que ces résultats aideront les acteurs de santé publique à mieux comprendre l'éco épidémiologie du paludisme et à orienter d'avantage la recherche, afin de trouver des outils additionnels de gestion environnementale pour combattre la propagation du paludisme. De plus, ils fournissent une piste prédictive du comment le changement climatique impactera la transmission du paludisme en Afrique.

**Mots clés :** Paludisme, environnement, sahel, variabilité climatique, éco faciès, géo faciès, diffusion du risque, modèles de prédiction, télé épidémiologie.

# Partie I

# PROBLEMATIQUE

Environ 40% de la population mondiale, vivant majoritairement dans les pays pauvres sont exposés au risque d'infection (Simon I et al. 2004). On estime plus de 500 millions de cas annuels dans 90 pays, dont 1,5 à 2,7 millions de décès (OMS, 1997 a). L'Afrique est le principal foyer endémique, "disons la niche écologique du Plasmodium infectieux", de la frontière du sud du Sahara (20°N) à l'Afrique du Sud et Namibie (30°S) (Mouchet J. & Carnevale P., 1988 ; Mouchet J. et al. 1993 ; Mouchet J. et al. 1998). Aujourd'hui, un enfant africain meurt de paludisme toutes les 30 secondes (OMS, 2009). La complexité spécifique du paludisme serait liée à la forte interaction du Plasmodium et son vecteur avec l'environnement. La capacité vectorielle de l'anophèle est fortement associée au climat (M.H. Craig, R.W. Snow and D. le Sueur, 1999 ; Saugeron C., Baldet T., Akogbeto M. 2009).

Les grandes sécheresses des années 70 à 80 avaient fortement réduit l'abondance, le taux d'infection et l'extension géographique des vecteurs du paludisme dans les zones sub-sahariennes (CIRDES, 2008). Sous l'effet de ce changement climatique, le paludisme s'était retiré du septentrion malien, au profit des zones les plus humides des régions Sud. La fréquence accrue des phénomènes extrêmes associés au changement climatique en cours, devraient faciliter la propagation de la maladie, et par conséquent, la reconquête des territoires du Nord. Il y aurait même une possibilité de migration retour de l'anophèle dans les zones abandonnées, voire une colonisation de nouveaux territoires situés très au Nord, pouvant aller jusqu'à Marseille. L'absence ou la baisse de l'immunité des populations nord-sahéliennes, due au caractère sporadique de la transmission est susceptible d'occasionner des phénomènes épidémiques de grande ampleur et à grande échelle, notamment en cas de pluies diluviennes.

## 1. Objectifs

Notre étude vise à « Evaluer les impacts du climat sur l'écologie et la transmission du paludisme : analyse de la diffusion du risque palustre dans le Sahel malien ». Elle comporte deux volets complémentaires (Le Menach A. et al. 2005):

(i) Etudier l'Impact du Climat sur la Transmission du Paludisme à l'Echelle Locale (100m- 1km) (Chapitre II). L'épidémiologie du paludisme est déterminée par les comportements des vecteurs et leur écologie. L'activité quotidienne des moustiques est rythmée par la ponte des œufs (au contact de gîtes aquatiques) et la prise du repas sanguin (au contact des hommes). Nous analysons comment la distribution spatiale des gîtes aquatiques et des habitats humains contrôlent la fréquence des pontes et des piqûres, qui assure le transfert du Plasmodium entre les populations humaines et vectorielles. La transmission est corrélée in fine aux variables climatiques locales.

(ii) Etudier l'Impact du Climat sur la Transmission du Paludisme à l'Echelle Régionale (100-1000km) (Chapitre III). Des modèles de circulation atmosphériques permettent de développer une prédiction du climat futur à long terme à l'échelle régionale. Dans le cadre du projet « Analyse du Changement Climatique et de ses Impacts sur l'Eau et la Santé » (ACCIES) nous développons une méthodologie intégrée d'études des impacts multi-échelle du changement climatique sur la transmission du paludisme.

En introduction de ce mémoire (Chapitre I), nous résumons la situation épidémiologique observée en Afrique sub-saharienne, depuis le début de la décennie 1970-80, et présentons les données bibliographiques permettant d'éclairer les liens fonctionnels existant entre les facteurs climatiques et les variables entomologiques dans la mise en place d'une analyse de risque. Cet effort vise à dégager un cadre conceptuel global des impacts de l'environnement sur le paludisme en nous appuyant sur des données externes issues de la bibliographie. Nous avons, à cette fin, passé en revue les articles publiés, les mémoires d'études, et les thèses, portant sur l'analyse du lien entre environnement et paludisme.

## **2. Zones géo-climatiques d'Afrique**

Située entre le 37<sup>e</sup> degré de latitude nord et le 34<sup>e</sup> degré de latitude sud, l'Afrique s'étend pour près de 75% dans une zone intertropicale (Jeune A., 1993). Seules ses deux extrémités nord et sud relèvent du domaine tempéré. La température moyenne annuelle est supérieure à 20°C dans toute la zone intertropicale, et les amplitudes thermiques annuelles ou journalières ne sont élevées que dans les déserts. C'est le régime des pluies qui détermine les principales variations climatiques (Cissé A., 1986). Le régime des pluies rythme des zones climatiques. Il est lié à l'harmattan (Alizé boréal) soufflant du Nord à l'Est du pays et la Mousson (Alizé austral) soufflant du Sud à l'ouest venant de la mer. La rencontre de l'harmattan (vent chaud et sec) et la Mousson (vent humide et frais) détermine le Front intertropical (FIT). Le FIT divise l'année en deux saisons : une saison pluvieuse plus ou moins longue, suivie d'une saison sèche. Il monte du Sud vers le Nord et déclenche progressivement les pluies ; la Mousson glisse sous l'harmattan. Le déplacement du FIT règle le début, la fin et la durée des pluies. Il en résulte que : (i) la saison des pluies commence de plus en plus tard du sud au nord et fini de plus en plus tôt du nord au sud rythmant une succession de zones climatiques ; (ii) la quantité des pluies ainsi que la durée des saisons des pluies varient de ce fait en direction Nord Sud ; (iii) la durée des pluies est de plus en plus courte lorsqu'on avance vers le Nord ; (iv) la quantité des pluies est de plus en plus réduite du Sud vers le Nord. Le continent se partage en quatre grands domaines climatiques qui se caractérisent sur tout par leur régime de pluies : équatorial, tropical, désertique et méditerranéen (Fig. 1).

### **2.1. Région équatoriale**

Elle s'étend sur la cuvette congolaise, de part et d'autre de la ligne de l'équateur. Les pluies tombent toute l'année et leur total dépasse 1 500, voir 2 000mm. Les températures sont toujours élevées (25°C de moyenne) et ne varient presque pas au cours de l'année. La forêt équatoriale (ou forêts denses équato-guinéennes) occupe les régions recevant plus de 1500 mm de pluies annuelles. La courte durée de la saison sèche (2 à 3 mois au plus) est le 1<sup>er</sup> facteur limitant pour l'existence de la forêt dense.

La moyenne annuelle de température est environ 25°C. L'amplitude thermique annuelle (différence entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid) est faible. L'air est toujours chargé de quantités relativement importantes de vapeur d'eau (humidité relative de l'air très élevée). La végétation est très dense fermée. Les grands arbres peuvent atteindre 40 à 60 mètres de haut. Ils gardent en général leurs feuilles toute l'année car l'activité végétative est continue toute l'année. La strate herbacée est très rare, discontinue c'est-à-dire pas de tapis herbacé. La densité de certaines espèces en forêt dense (mousses, fougères, lianes et épiphytes) est une conséquence de la forte humidité du milieu. Le sol est formé par une argile rouge. Il est gorgé d'eau, mal aéré en profondeur, riche en substances organiques dans les couches superficielles. Les variations climatiques et édaphiques font que la forêt dense n'est pas aussi uniforme. On distingue plusieurs types de forêt dense. Selon les variations climatiques on distingue : (i) Forêts denses humides sempervirentes ou forêts ombrophiles. Les arbres sont toujours verts, toujours feuillés, (ii) Forêts denses humides semi-caducifoliées. Ce sont les forêts tropicales, les forêts mésophiles. Beaucoup de feuilles tombent des arbres. Selon les variations édaphiques **on distingue** : 1) Forêts rupicoles, le long des cours d'eau, où l'excès d'humidité diminue la forêt par hibernation, 2) Forêts marécageuses (sur les marécages).

## 2.2. Région tropicale

Elle apparaît au sud de l'équateur. Les saisons sont décalées par rapport à l'hémisphère nord et la répartition des zones climatiques se fait dans le sens nord-sud. Les régimes aride et semi-aride sont limités à la région du Sud-ouest africain (Namibie et Kalahari), alors que la bordure côtière de l'océan Indien au sud-est connaît des climats très humides. Les températures sont en moyenne plus basses que dans l'hémisphère nord. Ces différences tiennent à la forme plus étroite de la partie méridionale du continent qui rend la mer plus proche et son influence plus sensible.

Le relief relativement élevé contribue également à l'abaissement des températures. A Madagascar, où l'altitude tempère le climat des "hautes terres" centrales, le versant oriental de l'île exposé aux alizés maritimes reçoit plus de 2 mètres de pluies par an, alors que le versant occidental "sous le vent" connaît un climat nettement plus sec. Dans les climats tropicaux, les amplitudes thermiques s'accroissent et le total des

précipitations diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur. L'alternance entre saison sèche et saison humide est la règle. En raison de la forme massive du continent, l'influence de la latitude est prépondérante dans l'hémisphère nord, où les différentes zones tropicales se succèdent en bandes parallèles à l'équateur.

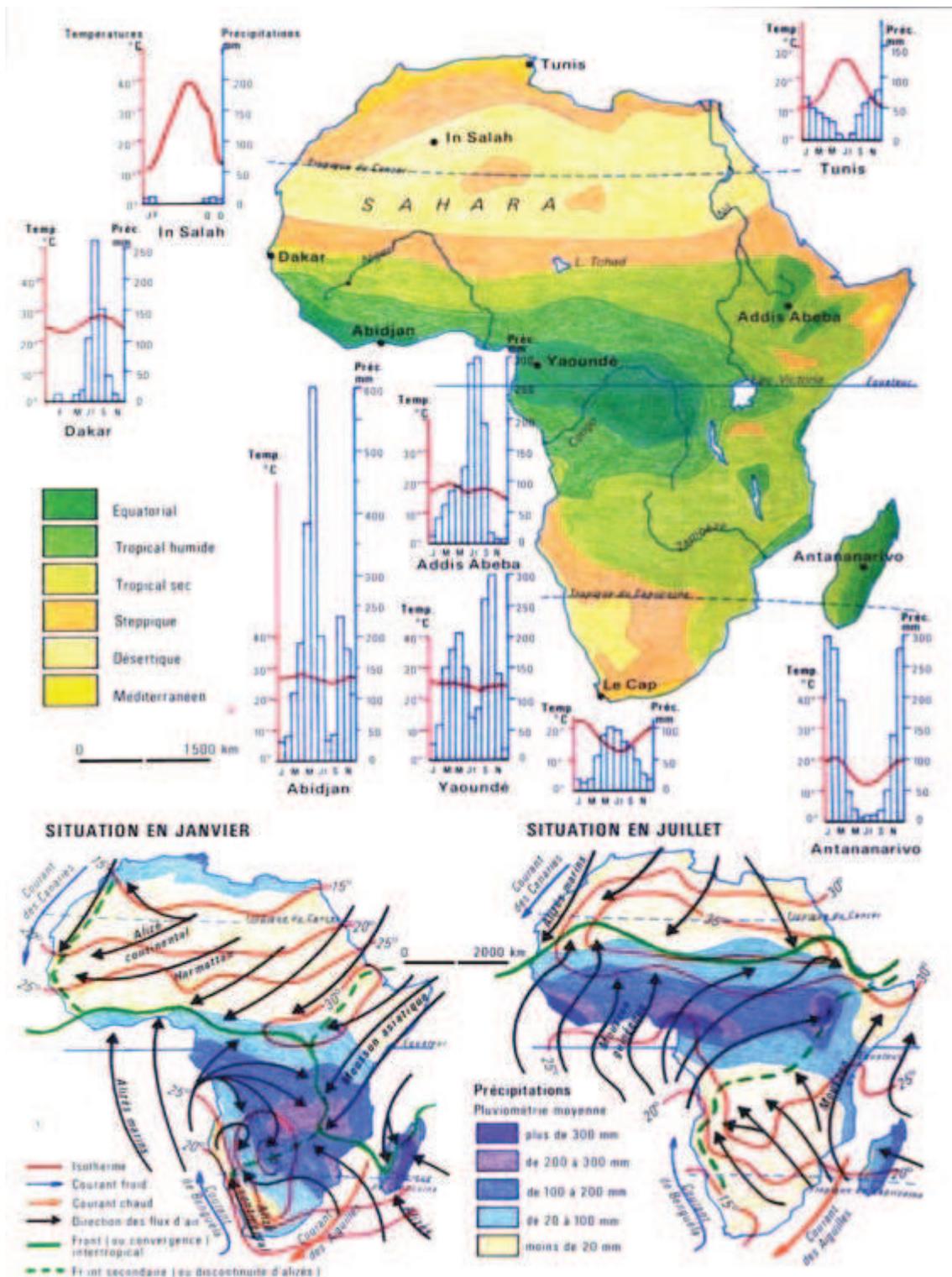


Figure 1. Carte des climats d'Afrique dans le journal Jeune Afrique Atlas.

**Le climat tropical humide** est encore proche du climat équatorial par l'abondance des précipitations, mais s'en distingue par l'existence de deux saisons sèches inégales "en août et de décembre à mars" pour ce qui concerne l'hémisphère nord. Le climat qui règne en particulier le long des côtes du golf de Guinée, de la Sierra Léone à la Côte d'Ivoire, dans la région des Grands Lacs et sur les côtes du Natal s'apparente au climat équatorial. Les pluies sont encore abondantes mais tombent de façon moins régulière qu'à l'équateur. On note cependant que dans la région des Grands Lacs les précipitations sont inférieures à 1500mm par an, sauf sur les reliefs élevés. Dans la **savane boisée (ou savane guinéenne=savanes + galeries forestières)**, la hauteur annuelle des pluies est supérieure à 1000mm. La saison sèche dure 5 à 6 mois. La végétation est la savane parcourue par des galeries forestières. Ces galeries sont des expansions de la forêt dense équatoriale le long des cours d'eau qui se prolongeaient dans la zone sahéenne il y a quelques dizaines d'années. L'homme a provoqué une dégradation générale de la végétation et on a presque partout une végétation ou forêt secondaire. Selon le niveau de cette dégradation, on peut distinguer ainsi deux types de forêts denses : (i) La forêt primitive est conçue naturellement avant toute action de l'homme, (ii) La forêt secondaire qu'est la reconstitution de forêts après l'action de l'homme. La zone guinéenne est la zone par excellence des plantes à tubercule, du bananier et du palmier à huile.

Dans le climat tropical sec, ou soudanien, la saison sèche s'allonge à mesure qu'on s'approche du tropique. La sécheresse est accentuée par l'Harmattan, vent chaud qui souffle du nord-est vers l'atlantique. La saison humide, appelée hivernage, se situe en été, quand le soleil passe au zénith. Le total des pluies annuelles dépasse 1000 mm au sud du Mali par exemple, mais reste inférieur à 800 mm au nord du Nigeria. La savane soudanienne est le paysage végétal le plus répandu en Afrique. La hauteur annuelle des pluies est comprise entre 500 à 1000mm. La saison sèche dure 7 à 8 mois. L'intervention de l'homme a provoqué partout une modification profonde de la végétation de savane ; il n'existe plus de végétation primitive à quelque part. Le type de végétation est la savane caractérisée par la présence d'un tapis herbacé continu comprenant : a) une strate haute formée par les graminées hautes et b) une strate basse formée d'herbacées annuelles. Les épiphytes sont rares ou absents et les lianes sont

peu nombreuses, représentées par *Saba senegalensis*, *Strophantus sp.* La zone subit l'effet desséchant de l'Harmattan venant du Sahara. En saison sèche, les herbes sont desséchées, les arbres et arbustes perdent leurs feuilles, les activités végétatives sont interrompues. On distingue deux types de savanes soudaniennes avec plusieurs variantes: 1) Les savanes Sud-soudaniennes où il pleut à peu près 1000mm de pluies environ par an, 2) Les savanes Nord-soudaniennes qui reçoivent à peu près 500 à 1000mm de pluies par an. Dans l'ensemble, les espèces arbustives dominent la savane. La hauteur des arbres augmente du Nord vers le sud et on peut atteindre jusqu'à 15m aux abords de la zone guinéenne. D'où les variantes de savanes : (i) La savane herbeuse constituée uniquement de plantes herbacées ; (ii) la savane arbustive formée d'herbes et d'arbustes ; (iii) La savane arborée formée d'un tapis herbacé parsemé d'arbres et d'arbustes. On parle de savane arborée si les arbres atteignent 6 à 8 m ; (iv) La savane boisée ou savane forestière. Les arbres et les arbustes sont nombreux et forment une strate ligneuse relativement dense ; (v) La forêt claire. Elle est formée d'arbres et d'arbustes dont les cimes (feuillages) sont plus ou moins jointives ; la strate herbacée est réduite. La forêt claire fait la transition Savanes et forêt dense.

**2.3. La région sahélienne** marque la transition vers le climat désertique. Les pluies sont de plus en plus rares, surtout, très irrégulières d'une année à l'autre. Le climat est caractérisé par 2 à 3 mois de saison pluvieuse et 9 à 10 mois de saison sèche. La moyenne annuelle de la pluie est 250-500mm. Les températures sont plus élevées que dans les régions humides et atteignent 40° C à la fin de la saison sèche. Le domaine désertique s'étend au niveau des deux tropiques. Les pluies sont très souvent inférieures à 100mm par an. Les hautes pressions atmosphériques, l'action des courants marins froids sont autant de facteurs de sécheresse dont les vents aggravent les effets. Les différences de température entre le jour et la nuit atteignent 50°C et l'amplitude thermique annuelle est de 25° à 30°C. La zone sahélienne est la zone des plantes annuelles (graminées). En saison des pluies il se développe un tapis graminée discontinu, les feux de brousse ne peuvent pas le parcourir. A l'approche des déserts, la steppe couvre les régions où les précipitations annuelles sont inférieures à 400 mm. Les arbres et les arbustes sont rabougris, isolés, largement dispersés et défeuillés en saison sèche. Les espèces du genre *Acacia* (présence d'épines), et d'autres telles que

*Boscia senegalensis*, *Euphorbia balsanifera*, *Balanites aegyptiaca*, et *Calotropis procera* dominant le sahel. La dégradation généralisée de la végétation est due à l'action anthropique (activités de l'homme), à la vie pastorale (élevage) mais à la sécheresse surtout.

**2.4. La région méditerranéenne** se localise aux extrémités nord et sud du continent. Les étés sont chauds et secs, les hivers doux et humides. Les écarts de températures s'accroissent vers l'intérieur où gel et chutes de neige sont fréquents. Au Maghreb, la moyenne thermique annuelle est de 18°C dans les plaines, mais de 14°C seulement dans les montagnes de l'Atlas.

### **3. Distribution du paludisme : faciès versus strates**

Le concept de strate<sup>1</sup> est utilisé pour désigner des aires géographiques de paludisme et doit son origine au climat. Chaque strate écologique du paludisme se spécifie par la nature du sol, la pluviométrie, la végétation, le mode de stagnation des eaux de surface, les gîtes larvaires d'anophèles, les espèces vectorielles présentes, le profil de transmission, le style d'habitat humain... Une strate de paludisme peut être ainsi globalement définie comme étant une zone climato écologique de même modalité ou système de transmission. On considère que la situation du paludisme varie très peu à l'intérieure d'une strate. Mais, on constate que des variantes micro épidémiologiques intra-strates peuvent être créées par des variations écologiques locales. D'où la notion de faciès, afin de prendre en compte toute la variabilité écologique du paludisme sur le terrain. En effet, le terme de faciès épidémiologique prend sa source dans les tentatives de définition de l'endémicité du paludisme en Afrique subsaharienne. La situation du paludisme varie selon les principaux faciès phytogéographiques: de la forêt primaire d'Afrique Centrale de plus en plus dégradée par l'action de l'homme, aux confins sahélo désertiques en passant par les savanes arborées et arbustives, le paysage écologique varie. Corrélativement l'épidémiologie des paludismes varie. La distribution des espèces de vecteurs selon le paysage écologique amène à diviser l'aire de distribution du paludisme en régions biogéographiques, déjà définies par Macdonald en 1957. A l'intérieur de ces régions, les facteurs climatiques, édaphiques et

---

<sup>1</sup> Strate = stratum = couche, bande.

hydrographiques permettent de déterminer des faciès épidémiologiques. On parle de paludisme endémique quand on constate une fréquence habituelle des cas cliniques et la persistance de la transmission naturelle pendant plusieurs années consécutives (OMS, 1964). La fréquence des cas cliniques est appréciable d'une région à l'autre, d'une localité à l'autre et d'une saison à l'autre. Plusieurs classifications ont été proposées pour caractériser les différentes "endémicités" du paludisme en Afrique.

### **3.1. Classes d'endémicité de Christophers et al. 1936**

Christophers et al. ont fait la reconnaissance des niveaux d'endémicité de paludisme aux Indes sur la base de l'indice splénique des enfants du groupe d'âge de 2-9 ans :

**a. Zones de faible endémicité (Low endemicity)** où l'indice splénique des enfants ne dépasse pas 10%.

**b. Zones méso-endémiques (Moderate Endemicity)** : l'indice splénique des enfants s'échelonne de 10 à 25%.

**c. Zones hyper-endémiques (High Endemicity)** : l'indice splénique des enfants varie entre 25 et 50%.

**d. Zones holo-endémiques:** l'indice splénique des enfants est constamment supérieur à 50%.

### **3.2. Classification de Wilson (in BOYD, 1949)**

Boyd (1949), on distingua quatre strates éco épidémiologiques principales de paludisme en Afrique selon les modalités (rythme, intensité) de la transmission. On note qu'au sein de chacune des principales strates existent des variations locales de niveau de transmission dues à des particularités écologiques locales naturelles (régions lagunaires où prédomine *An. melas*, oasis saharien...) ou artificielles dues à l'activité humaine (milieu urbain où le paludisme peut être instable et où la transmission est toujours plus faible que dans la zone rurale).

**a. Zone de forêt dégradée à transmission permanente.** La transmission est intense (pouvant atteindre 1000 piqûres infectées par homme et par an au Congo) et largement sursaturante. Le paludisme infection concerne tout le monde mais le paludisme maladie ne représente qu'environ 30% de la pathologie fébrile infantile enregistrée en dispensaire rural. *An. gambiae* est le vecteur présent dans ce type de faciès.

**b. Zone de savane à transmission saisonnière régulière longue** ( $\geq 6$  mois). La transmission est intense (jusqu'à 350 piqûres par personne et par an), très variable selon la situation locale et liée au rythme des pluies. Le paludisme parasitaire touche toute la population avec des variations saisonnières de la prévalence importante surtout chez les enfants. Le paludisme maladie, très variable selon la saison, touche essentiellement les enfants d'âge préscolaire et scolaire. Il représente 10 à 80% des pathologies fébriles respectivement en saison sèche et en fin de saison des pluies. Les vecteurs présents sont *An. gambiae* et *An. funestus* (en fin de saison).

**c. Zone de sahel à transmission épisodique saisonnière régulière courte** (2 mois). La transmission est assurée essentiellement par *Anopheles arabiensis*, et peut être faible (3-4 piqûres infectées par homme et par an à Podor, Sénégal). La prévalence plasmodiale varie fortement chez les enfants et chez les adultes selon la saison. Le paludisme maladie est concentré pendant la courte saison des pluies et peu concerner tous les groupes d'âge bien qu'affectant principalement les enfants.

**d. Zone subdésertique ou d'altitude à transmission sporadique.** La transmission survient à la suite de circonstances particulières (crues, moussons...) et le paludisme revêt un aspect épidémique (Ethiopie, 1958).

### 3.3. Classification de Kampala (1950)

Une conférence sur le paludisme (Kampala, novembre 1950) propose une classification des niveaux d'endémicité du paludisme en Afrique en fonction de la fréquence des splénomégalies des enfants du groupe d'âge de 2-10 ans :

- a. Paludisme hypo endémique** : indice splénique (ISp) des enfants va de 0-10%.
- b. Paludisme méso endémique** : indice splénique des enfants va de 11-50%.
- c. Paludisme hyper endémique** : indice splénique des enfants constamment supérieur à 50%, indice splénique chez les adultes élevé.
- d. Paludisme holo endémique** : indice splénique des enfants constamment supérieur à 75%, indice splénique chez les adultes faible. C'est dans ce type d'endémicité que l'on constate le plus haut degré de tolérance chez les adultes.

### 3.4. Classification de Mac Donald (1957)

La complexité épidémiologique du paludisme ne peut être définie dans un lieu donné par un simple paramètre, que ce soit pour planifier les opérations de santé

publique ou pour la lutte anti vectorielle. Selon Mac Donald, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble des facteurs connus pour obtenir une stratification du paludisme. Selon lui, les facteurs de diversité du paludisme se présentent à diverses échelles au plan géographique.

En 1957, Macdonald avait pris en compte la stabilité de la maladie, paramètre lié à la qualité des vecteurs locaux pour décrire le paludisme. Ce qui est certainement une très grande avancé en santé publique car ce paramètre permet de délimiter les aires de paludisme instables à risque épidémiques. Mac Donald propose de classer le paludisme comme endémique ou épidémique et dans ce cas comme stable ou instable selon le critère  $(a/-\log e p)$ . Le paludisme hypo-endémique peut être instable. Le paludisme hyper endémique peut avoir des variations mais, sans qu'il y ait des "épidémies" sévères. Le paludisme holo endémique est certainement stable (Metselaar et Van Thiel, 1959).

### **3.5. Classification de Yaoundé (1962)**

Une 3ème conférence sur le paludisme en Afrique (Yaoundé, juillet 1962) décide de prendre l'indice parasitaire (IP) et non l'ISp comme critère de classification des niveaux d'endémicité sur propositions de Metselaar et Van Thiel en 1959.

**a. Paludisme hypo endémique.** L'IP chez les enfants de 2 à 9 ans est généralement  $< 10\%$  bien que pouvant être supérieur pendant une partie de l'année.

**b. Paludisme méso endémique.** L'IP chez les enfants de 2 à 9 ans est de 11 à 50%, pouvant être plus élevé une partie de l'année.

**c. Paludisme hyper endémique.** L'IP chez les enfants de 2 à 9 ans constamment  $> 50\%$ .

**d. Paludisme holo endémique.** L'IP des enfants de 0 à 1 an constamment supérieur à 75%. La densité parasitaire diminue rapidement entre 2 et 5 ans puis plus lentement. L'indice splénique des adultes pouvant être faible

### **3.6. Faciès du paludisme selon Carneval et al. (1984)**

A défaut de pouvoir prendre en compte l'ensemble des facteurs impliqués dans l'épidémiologie du paludisme, il avait été accepté jusque là des méthodes simples de mesure de l'endémicité palustre basées sur les indices spléniques et ou la prévalence parasitaire. Facile à établir par examen sanguin d'un échantillon représentatif de la

population à risque, cette dernière division en zones hypo, méso, hyper et holo-endémiques, basée sur le pourcentage de porteurs de parasites n'avait qu'un intérêt limité en santé publique du fait de la faible ou non immunité de certaines populations par rapport à d'autres. La mortalité est beaucoup plus élevée lors des épidémies dans des zones hypo endémiques que dans des zones holo-endémiques où les manifestations cliniques n'apparaissent d'ailleurs qu'avec des charges parasitaires élevées, (> 10 000 parasites par mm<sup>3</sup> au Congo par exemple) et les faibles parasitémies ont peu de signification en santé publique. Le manque relatif de sensibilité des indices plasmodique et splénique amena Mouchet et Carnevale à avancer l'idée d'une révision des classifications habituelles.

Carnevale et al. définissent le faciès<sup>2</sup> épidémiologique en 1984 comme un ensemble de lieux où le paludisme, dans ses manifestations pathologiques, présente des caractères communs imprimés par les modalités (rythme, intensité) de transmission du parasite. Dans chacun de ces faciès primaires, des caractéristiques locales, reliefs, fleuves, lagunes, etc. créent des variantes locales. Dans un faciès, le mode de vie des habitants et les ethnies sont semblables, les populations pratiquent presque les mêmes activités professionnelles, les types d'habitat sont semblables. En effet le faciès est une vision physionomique partielle d'une dominance spécifique (un paramètre pivotant) de la complexité épidémiologique du paludisme. Les faciès n'ont de véritable définition que dans les modalités de transfert du Plasmodium (rythme et intensité) entre l'anophèle et l'homme selon les variantes climatiques. Il n'est donc pas question de faciès épidémiologiques, uniquement sur la base d'une seule dominance mais, que pour les deux paramètres réunis (faciès entomologiques = faciès de transmission + faciès parasitologique ou faciès d'infectivité de la population). L'IP varie de faciès en faciès. En prenant par exemple l'indice plasmodique (IP) comme dominance, on peut distinguer cinq faciès parasitaires du paludisme au Mali:

- a. **Le faciès parasitaire** des zones désertiques (IP **très faible** <5%),
- b. **Le faciès parasitaire** des milieux urbains (IP **faible** <10%),
- c. **Le faciès parasitaire** des zones inondées (IP **élevé** ≈40%),
- d. **Le faciès parasitaire** des savanes soudaniennes (IP **plus élevé** =50-75%),

---

<sup>2</sup> Faciès = vue de face.

**e. Le faciès parasitaire** de la zone soudano-guinéenne (IP >75%).

En 1993, Mouchet et al. combinent la notion de paludisme stable/instable de Mac Donald avec le concept écologique et entomologique développé par Carnevale et al. (1984) sous le vocable de "faciès épidémiologique" (Baudon D. 2000 ; Baudon D.2010). Dans la région afro tropicale, la seule où ce type de classification a été tentée, Mouchet et al. considèrent alors des faciès épidémiologiques primaires (naturels) et des faciès épidémiologiques secondaires essentiellement anthropiques. Au sein des faciès primaires le paludisme peut être stable (zone équatoriale, tropicales), intermédiaire (zone des savanes sèches sahéliennes) ou instable (zones des déserts et d'altitude). Plusieurs paramètres sont alors pris en considération: climatologiques, dynamique de la transmission et morbidité palustre et cette classification reflète les contextes des relations hôtes/vecteurs/parasites selon les biotopes naturels ou modifiés (fig.2).

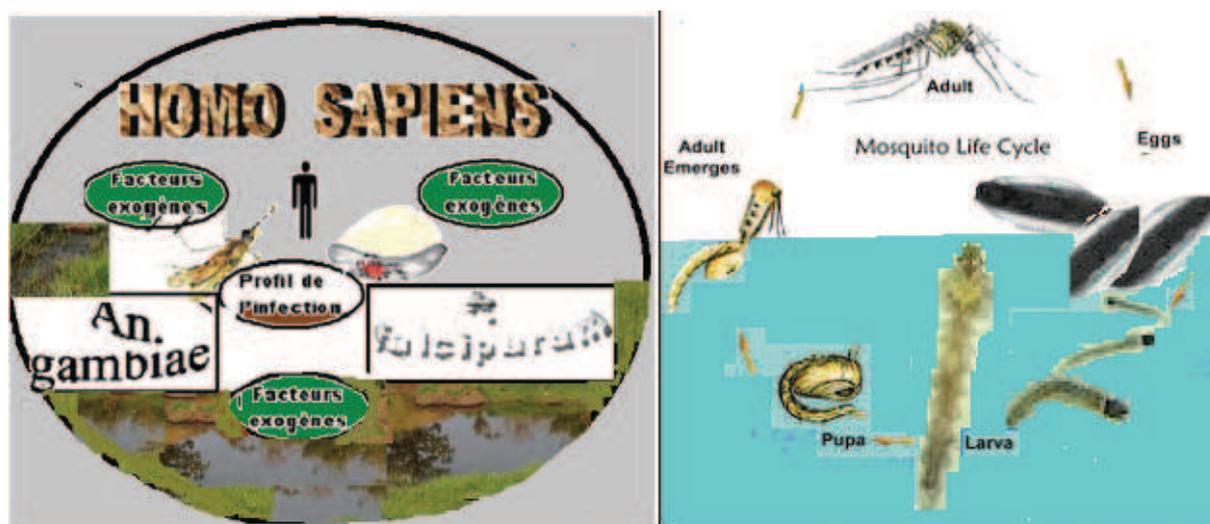


Figure 2. Biotopes des interactions complexes Homme-Vecteur-Parasites

#### 4. Strates du paludisme au Mali

Le climat et la végétation sont des éléments déterminants l'apparition, la fréquence et la distribution du paludisme (Fig. 3). La pluviométrie est globalement faible au Mali (200 à 1300mm) avec des périodes de sécheresse très variées. Les activités agricoles s'étendent sur cinq mois dans le sud, sur trois mois dans le nord et sur deux mois dans le Sahara.

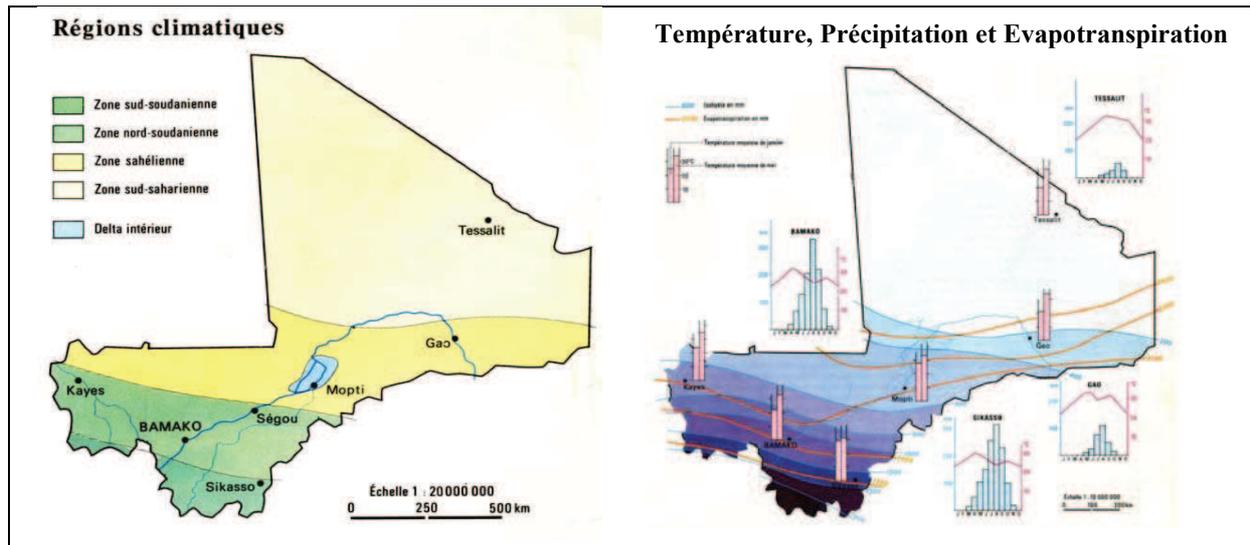


Figure 3. Cartes climatiques du Mali.

Le paludisme est endémique dans les régions du centre et du sud, et épidémique dans les régions du nord. Dans le cadre de cette étude, nous considérons trois grandes strates éco géographiques auquel il conviendra d'ajouter des faciès d'interfaces regroupés dans une quatrième strate.

#### 4.1. Strate centrale à l'intersection des régions Nord et Sud (Mopti)

La région de Mopti est une *strate sahélienne typique* située entre le 14<sup>ème</sup> et le 17<sup>ème</sup> degré de latitude Nord. C'est une région de faible altitude allant de l'isohyète 700mm à l'isohyète 200mm, trait d'union entre les régions du nord arides et les régions sud arrosées. Largement ouverte sur les frontières du Burkina Faso voisin, Mopti s'étend sur une superficie de 79017 km<sup>2</sup> (6% du territoire national) située entièrement dans la zone de Sahel. Mopti marque la limite inférieure du Sahel malien. Le climat est caractérisé par 2 à 3 mois de saison pluvieuse et 9 à 10 mois de saison sèche. La région reçoit peu de pluies sur une courte période allant de juin/juillet à août/Septembre. La moyenne annuelle de la pluie est 250 à 500 mm.

La région de Mopti, que nous avons retenu comme site d'étude, est caractéristique d'une grande diversité bioclimatique. Elle comptait 3 des 5 strates observées pendant l'étude. La zone présente : (i) une partie périodiquement inondée du delta (Diré-Mopti) ; (ii) une partie exondée, le Plateau Dogon au sol rocaillieux (Gourma) ; et (iii) une vaste plaine sablonneuse "Seeno" qui s'étend jusqu'au Burkina Faso.

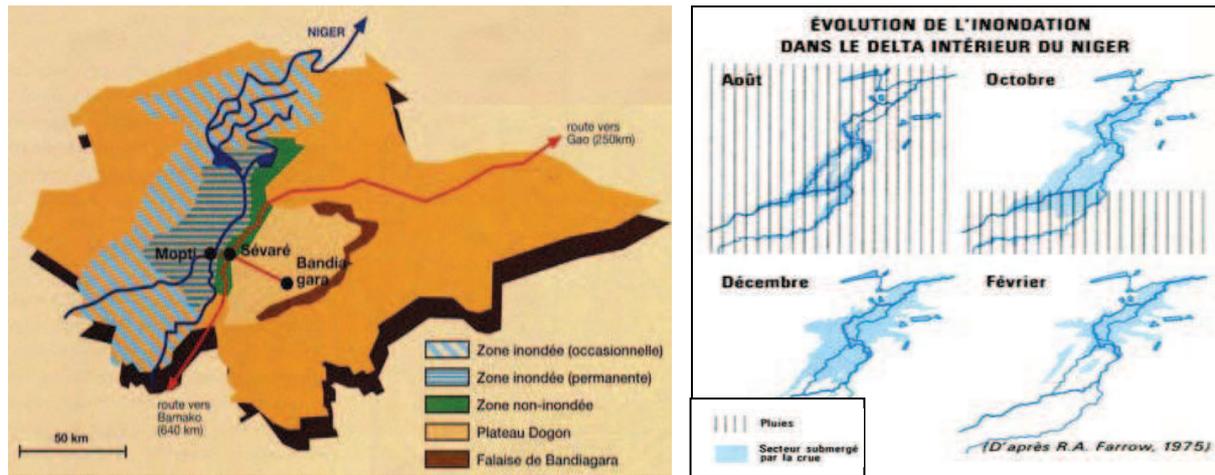


Figure 4. Cartes de la région de Mopti montrant trois faciès distincts : inondé ; exondé et sableux.

#### 4.2. Strate des régions arides du Nord (Tombouctou, Gao, Kidal et Kayes)

Ce sont les régions nord du Mali et certaines localités de la région de Kayes. Les précipitations sont rares et irrégulières. La rareté des pluies fait que la transmission est très instable. D'où la strate de **paludisme instable**. Les températures sont très élevées ( $50^{\circ}$  au milieu de la journée et parfois  $70^{\circ}\text{C}$ ), entraînant une évaporation importante. L'humidité atmosphérique est très faible et descend souvent jusqu'à 5% (aridité du milieu). Les vents sont violents. Le faciès typique correspondant est la zone de transmission sporadique voire épidémique. L'état immunitaire de la population est différent de la précédente. La population, impaludée par intervalle de temps irréguliers plus ou moins grands, est faiblement ou non immunisée. L'IP est inférieur à 5%. En générale tous les âges sont exposés au risque d'infestations grave et fatale. La présence d'une parasitémie, même très basse, se traduit en général par la maladie clinique. Les symptômes de paludisme apparaissent parfois avant que la parasitémie soit microscopiquement décelable. Les épidémies au Sahara surviennent à chaque fois que les précipitations avoisinent ou dépassent les 200 millimètres et lorsque le maximum tombe en août ou en septembre. Le nomadisme vers le sud des populations du Sahara plus fragiles au paludisme leur expose à l'infection.

#### 4.3. Strate des régions humides du Sud (Sikasso, Koulikoro, Ségou et Kayes)

Le **paludisme** est **stable** dans la totalité des régions du sud où il pleut en moyenne 4 à 6 mois dans l'année. L'intensité de l'infection suit une variation saisonnière en fonction de la pluviométrie mais la réponse immune demeure toujours adaptée à la parasitémie

de sorte qu'on n'enregistre pas d'épidémie palustre dans la zone. L'impaludation, les cas cliniques et décès palustres sont importants pendant la période pluvieuse (sauf quelques petites poches à transmission continue). L'immunité palustre ne s'acquiert avant l'âge de 5 ans et peut aller jusqu'à 10 ans. En raison de l'intensité de la transmission, c'est dans le jeune âge, ordinairement avant cinq ans, que s'observent l'essentiel de la mortalité et une bonne partie de la morbidité palustre. Les femmes enceintes et surtout les primigestes ont des taux de parasitémie élevés. Le paludisme est rarement fatal chez la mère mais le nouveau-né risque un faible poids de naissance et la survenue d'un décès intra-utérin est possible. Cette région du Sud du Mali est divisible en deux faciès bio-climatiques : **(i) Zone Soudano-Guinéenne**. La saison sèche dure 5 à 6 mois avec des précipitations annuelles >1000 mm. La végétation est la savane parcourue par des galeries forestières. La transmission du paludisme est saisonnière longue de 4 à 6 mois. L'IP est d'environ 85% de juin à novembre. La prémunition est acquise au tour de 5 ans et l'anémie est prévalent dans la population des enfants de moins de 5 ans. **(ii) Zone soudanienne ou zone des savanes** : Elle subit l'effet desséchant de l'harmattan venant du sahara. La saison sèche dure 7 à 8 mois. On distingue deux types de savanes avec plusieurs variantes: **Les savanes sud-soudaniennes** (1000 mm de pluies par an) et les **savanes nord-soudaniennes (et une partie du Sahel)** (500 à 1000mm de pluies par an). La transmission est saisonnière courte de 3 à 4 mois. Le paludisme y est hyper endémique avec un IP variant entre 50 et 75%. La prémunition est atteinte vers 9 ans; le neuro paludisme est une des complications les plus fréquentes entre 1 à 9 ans (M.S., 2000).

#### **4.4. Strate de faciès associés à des modifications environnementales**

L'homme par ses manipulations de l'environnement pour ses besoins crée de véritables **faciès anthropiques**, qui ont tendance souvent à se substituer aux faciès primaires. Au Mali, on peut distinguer entre autres: **(i) le delta intérieur du fleuve Niger et les zones de barrage et de riziculture** : Niono, Sélingué, Manantali et Markala. La transmission est bi ou plurimodale. L'IP se situe entre 40-50% et la prévalence de l'anémie palustre est très élevée dans la tranche d'âge de moins de 9 ans. **(ii) les faciès urbains comme les villes de Bamako et Mopti**. Par le manque d'hygiène et assainissement adaptés à la forte anthropisation, ce sont des milieux de pollution

environnementale au sud, peu propices à l'impaludation. Le paludisme y est **instable**. L'IP est  $\leq 10\%$  voir paludisme hypo endémique. Les adultes citadins courent aussi le risque de paludisme grave et compliqué.

## 5. Impacts du changement climatique sur le paludisme au Sahel

La question d'impact du changement climatique sur le paludisme est au cœur des motifs actuels de débats publics, scientifiques, politiques et économiques vu l'importance du problème. (Capelle A. 2007 ; CIRDES. 2008 ; Longstreth J.D. et Wiseman J. 1989 ; Suageon C. et al. 2009 ; Banque mondiale, 2010 ; OMS. 2010).

Le *Plasmodium* a un cycle complexe dont une partie se déroule chez le moustique et l'autre chez l'homme. L'espèce la plus courante et la plus virulente, *P. falciparum* est transmise principalement en Afrique par *Anopheles gambiae* sensu lato et *Anopheles funestus* Giles (Mouchet J. et al. 1993), deux vecteurs inféodés à l'Afrique. Les facteurs climatiques comme la température et les pluies déterminent la présence et la fréquence relative des espèces vectorielles (Lindsay et al. 1998 ; Craig M.H. et al. 1999 ; Bayoh M.N. et al. 2003 ; Small J. et al. 2003 ; Abose A.T. et al. 2003 ; Peng B.I. et al. 2003 ; Hoshen M.B. et al. 2004 ; Craig M.H. et al. 2004 ; Gemperli A. et al. 2006 ; Wenkosi M. et al. 2007). L'émergence des adultes d'anophèles dans les gîtes larvaires est le déterminant primordial de la présence et de l'abondance des vecteurs du paludisme (Minakawa N. et al. 2005 ; Francis M. et al. 2006). Sans l'eau, le cycle biologique du moustique serait interrompu. Hors le cycle de l'eau est affecté par le changement climatique à travers l'apparition d'événements extrêmes tels que les inondations, les grandes sécheresses etc.

L'influence de la température sur le développement larvaire est bien étudiée chez différentes espèces de moustiques, au moyen notamment de modèles de prédiction de durée des stades : *Anopheles quadrimaculatus* Say (Huffaker, 1944), *Aedes aegypti* Linnaeus (Bar-Zeev, 1958 ; Tun-Lin et al., 2000), *Culex and Anopheles sp* (Shelton, 1973), *Toxorhynchites brevipapilis* Theobald (Trips, 1972), *Wyeomyia smithii* Coquillett (Bradshaw, 1980).

A l'intérieur des seuils limites de faible température de développement et de température supérieure létale, le développement des stades aquatiques du moustique croît fortement avec l'augmentation de la température (Brust, 1967 ; Hagstrum & Workman ; 1971 ; Lyimo & Takken, 1993). Chez *An. gambiae s. l.*, les études ont montré que le développement d'un stade larvaire au stade suivant croit lorsque la température augmente jusqu'à un pic autour de 28°C et ensuite décroît. Que l'optimum d'émergence des adultes à partir des gîtes larvaires se situe entre 22 et 26°C et qu'aucune émergence ne s'observe sous le seuil limite de 18°C et au-delà de 34°C. Le taux de reproduction est l'un des facteurs clés, déterminant le taux d'accroissement des populations d'insectes. Ce taux dépend des facteurs de développement des stades immatures que la température gouverne tant que la nourriture ne fait pas défaut (Lassiter et als., 1995).

Les modèles d'effet de températures variées ont été utilisés pour prédire le temps de développement de l'insecte. Lorsque la température fluctue au cours de la journée les taux de développement heure par heure peuvent être accumulés et convertis en taux journaliers, et ensuite, convertis en temps de développement.

Paradoxalement, ce capital d'informations actuelles ne permet pas de comprendre certaines situations du terrain. Les données de la positivité et de la productivité individuelles des gîtes larvaires d'anophèles permettent juste de se faire des repères pour mener une lutte aquatique, mais sans pouvoir prédire une dynamique vectorielle à venir. La positivité larvaire n'explique pas toujours l'abondance des moustiques car les gîtes positifs n'ont pas la même capacité de production des adultes (Yaro A.S. et al. 2006; Sogoba N. et al. 2007). Les caractéristiques écologiques de gîtes d'*An. gambiae* peuvent changer radicalement d'une localité à l'autre et la fonctionnalité peut varier d'une période à l'autre selon le contexte.

C'est dire que la seule connaissance de l'influence des paramètres climatiques sur les stades immatures des anophèles ne permet pas d'expliquer systématiquement les situations épidémiologiques du paludisme sur le terrain. De tous les risques liés aux inondations, les risques sanitaires sont les plus immédiats que nous devons prévoir ou du moins apprendre à prévoir. Avec le réchauffement climatique, le risque des pathologies liées au climat aura plus que doublé en 2030, les inondations affecteront la

vie de 200 millions de personnes dans les années 2080 (Capelle A. 2007). En 2009, l'Afrique de l'Est notamment le Kenya était frappée par une sécheresse dévastatrice pendant que l'Afrique de l'Ouest était frappée de plein fouet par des inondations : inondations du 1er septembre 2009 à Ouagadougou (Burkina Faso), inondations dans le nord du Niger (Agadez), inondations au Nord du Mali (Gao, Tombouctou, Goundam), inondations dans le sud de l'Algérie, inondations au Bénin et au Sénégal. Paradoxalement la même année, des inondations ont relayé la sécheresse au Kenya au moment de Noël en décembre.

L'éco-épidémiologie du paludisme au Sahara est encore mal connu. Le système sporadique de la transmission fait que les épidémies surprennent de temps en temps la population faiblement ou non immunisée. En 1999, les excès de pluviométrie enregistrés dans les régions Nord du Mali entraîna une augmentation importante des cas de paludisme et des décès liés au paludisme (PNLP Mali, 2003). En août 2002, l'importante pluviométrie enregistrée à Goundam (201mm) dans la région de Tombouctou et à Labbézinga (101mm) dans la région de Gao laissa aussi présager des inquiétudes quant à la possibilité d'une recrudescence du paludisme (PNLP Mali, 2003).

## 6. Résumé

De toutes les maladies transmissibles par les moustiques, le paludisme est la plus redoutable et la plus compliquée. La variabilité spatio-temporelle du paludisme liée aux déterminants environnementaux dont les moustiques conduit certains à penser qu'« à chaque localité correspond une situation palustre spécifique ». *Anophèles gambiae* sensu lato et *Anophèles funestus* sont les principaux vecteurs rencontrés au Mali. *An. gambiae* s. l est composé d'*An. gambiae* sensu stricto et d'*Anopheles arabiensis*. *An. gambiae* s.s est composé à son tour de trois formes chromosomiques : *gambiae* forme chromosomique Mopti, *gambiae* forme Bamako et *gambiae* forme Savane) (Touré et al, 1986, 1998). *Anophèles arabiensis* et *An. gambiae* forme Mopti se rencontrent respectivement surtout dans les zones arides au Nord et les zones inondées centrales. Les formes Bamako et Savane se rencontrent dans les zones humides au Sud. Il est à noter que les membres du complexe *An. gambiae*, *An. arabiensis* et la forme Mopti

prédominant avant et après la saison des pluies, tandis que les formes Bamako et Savane dominant pendant la saison des pluies.

Nous pouvons distinguer six faciès de paludisme dont trois faciès épidémiques :

- **Paludisme stable**

1) **FACIES EQUATORIAL : Forêt et savanes post forestières**

Transmission du paludisme pérenne et de très forte stabilité.

Vecteurs présents : *An. gambiae s.s*, *An. arenbiensis*, *An. funestus* accessoirement *An. moucheti* et *An. nili*.

Immunité palustre acquise dès l'âge de cinq ans.

Morbidité atteint 30 à 50% des cas fébriles, étalée sur toute l'année.

**N.B** : il n'y a pas d'anophèles vecteurs dans le sous-bois et ils sont rares dans les huttes des Pygmées.

2) **FACIES TROPICAL : Savanes humides**

Transmission est saisonnière longue (>six mois) et d'une forte stabilité.

Vecteurs: *An. gambiae ss*, *An. arenbiensis*, *An. funestus*, *An. nili*.

Immunité est acquise entre cinq et 10 ans.

Morbidité : 30 à 50% des cas fébriles, mais surtout en saison de transmission.

---

- **Paludisme intermédiaire**

3) **FACIES SAHELIEN. Savanes sèches et steppes**

Transmission saisonnière courte (<six mois) d'une stabilité intermédiaire à localement variable.

Vecteurs présents : *An. gambiae ss*, *An. arenbiensis* et *An. funestus plus rare*.

Prémunition tardive et diminue avec l'intensité de la transmission

---

- **Paludisme instable**

4) **FACIES DESERTIQUE : Steppes sahélo-sahariennes ; déserts de la Corne de l'Afrique.**

Transmission est instable très courte, voire aléatoire, une grande différence d'une année à l'autre.

Vecteurs : *An. arenbiensis*, *An. gambiae* (forme mopti).

Immunité très faible. L'écotype (contexte) est mal connu d'où des régions d'épidémies.

**5) FACIES AUSTRAL : Plateaux du Sud de l'Afrique et Madagascar: *Afrique du Sud, Swaziland, Botswana, Namibie, Zimbabwe, Zambie, Mozambique.***

Transmission saisonnière et estivale. Interruption hivernale s'ajoutant à celle de la longue saison sèche.

Vecteurs : *An. arabiensis* et localement *An. funestus*.

Immunité faible. C'est un faciès d'épidémies.

**6) FACIES MONTAGNARD : Montagnes d'Afrique du Centre et de l'Est, entre 1000 et 2000 m.**

Transmission courte, irrégulière et limitée par la température (cap des 18°) et les pentes (gîtes).

Vecteurs présents : *An. arabiensis* et *An. funestus*.

Peu ou pas d'immunité.

Paludisme instable et épidémique : Epidémies violentes (Burundi, Madagascar).

Grandes variations interannuelles (température et pluies). Problème du réchauffement.

Pour prévenir le risque palustre, il faut être proactif. Et pour être proactif, il faut améliorer les services de santé publique en intégrant les paramètres du climat dans les modèles de prédiction du risque. L'utilisation de la géomatique par l'OMS permet d'ores et déjà de suivre la distribution géographique du paludisme (Health Mapper/Global Health). Le recours à la modélisation spatio-temporels, devrait permettre de prédire les impacts géo- et éco-climatiques sur la santé publique (morbidité et mortalité).

**Partie II**

**IMPACT DU CLIMAT SUR LA  
TRANSMISSION DU PALUDISME  
A L'ECHELLE LOCALE**

Alors que le développement de vaccins contre le paludisme tarde et que la résistance des parasites aux médicaments antipaludiques se développe rapidement, la lutte antivectorielle reste la stratégie la plus pratique et efficace pour réduire la transmission du paludisme dans les pays en développement (Trape et al. 2002, Killeen et al. 2004). Les stades immatures de moustiques sont des cibles potentiellement importantes de lutte contre les vecteurs (Killeen et al. 2002, et Fillinger al. 2003). Réduire la source par le biais d'une modification des gîtes larvaires a été un outil important de lutte contre le paludisme aux Etats-Unis, en Israël ou en Italie (Kitron et Spielman, 1989). La sécheresse sahélienne, qui a durablement affecté l'Afrique de l'Ouest, a aussi été à l'origine d'un recul décisif du paludisme en Afrique de l'Ouest (Trape & al. 2002). Aujourd'hui, la variabilité accrue du climat sahélien, dans le contexte du changement climatique (CC) est évidente et la réapparition de cas autochtones de paludisme dans les oasis du désert est prévisible. Cette situation, nécessite un nouvel effort de compréhension de l'écologie des moustiques vecteurs du paludisme en Afrique, car nos connaissances actuelles sont insuffisantes pour concevoir des méthodes efficaces de lutte anti-vectorielle au stade larvaire.

## 1. Problématique

L'objectif spécifique de cette étude vise à déterminer l'impact des paramètres climatiques sur la dynamique de la transmission vectorielle du paludisme à l'échelle réduite d'un village sahélien. Dans ce cadre : (i) nous caractériserons la dynamique spatio-temporelle des populations d'adultes et de larves de moustiques; puis nous relierons cette dynamique (ii) à la disponibilité et à la productivité des gîtes larvaires (remplissage / vidange des gîtes larvaires) ; (iii) au rythme des contacts homme-vecteur; (caractéristiques des peuplements humains) ; et (iv) aux paramètres climatiques locaux (pluviométrie, température et humidité).

Il est bien documenté que les principaux vecteurs du paludisme primaire en Afrique sub-saharienne, *Anopheles gambiae* Giles et *Anopheles arabiensis* Patton, sont fréquemment produites dans de petits gîtes temporaires comme les traces de dabas, traces de pneus, et empreintes d'animaux (Holstein 1954; Gillies et De Meillon 1968;

Minakawa et al. 1999, 2004; Gimnig et al. 2001). Ces deux espèces colonisent majoritairement ces habitats temporaires susceptibles d'accroître rapidement leur taille par la production larvaire. En général, la prédation des larves de moustiques dans les habitats temporaires est bien plus faible que dans de grands habitats permanents (Service 1977, Washburn 1995, Sunahara et al. 2002). Par ailleurs, la petite taille de ces habitats, généralement ensoleillés, favorise le réchauffement et la production d'algues alimentaires raccourcissent le temps de développement des larves.

Bien que les larves d'*A. gambiae s.l.* soient bien adaptées à ces petits gîtes temporaires, il faut au moins 6 jours à une larve pour produire une nymphe, même dans des conditions optimales (Gillies & DeMeillon 1968; Bayoh et Lindsay 2003, 2004). De nombreux petits habitats, tels que les flaques ou les empreintes d'animaux, qui se forment durant la saison des pluies, ne peuvent contribuer à la production de vecteurs du fait de leurs instabilités. Par conséquent, la stabilité des habitats aquatiques des larves, dont dépendent leurs durées de mise en eau, est essentielle pour le développement des larves. En Afrique sub-saharienne, les petits habitats peuvent, en effet, se sécher très rapidement en raison de l'évaporation rapide due à l'exposition à un soleil accablant (Minakawa et al. 2001). Les effets négatifs du réchauffement, mortalité larvaire due à la dessiccation ou dégradation de la chaîne trophique n'apparaissent que lorsque la température de l'eau s'élève au-dessus 30° C (Bayoh et Lindsay 2003, 2004). Par ailleurs, de fortes précipitations durant la saison des pluies, susceptibles de rincer les œufs et les larves de moustiques présentes dans les petites collections d'eau, peuvent gravement perturber les habitats aquatiques (Gimnig et al. 2001).

Cependant, les habitats aquatiques, susceptibles de retenir l'eau plus longtemps, sont aussi ceux dans lesquels la présence de prédateurs limite le plus le développement des larves (Service, 1977). Ces habitats pérennes ne sont pas nécessairement les plus productifs (Minakawa et al. 2005), mais ils peuvent interagir avec des habitats temporaires au sein d'un système d'habitats à la fois robuste et productif. La mise en évidence d'un relais de production entre gîtes larvaires pérennes et temporaires a été démontrée dans un village de savane guinéenne du Mali : Bancoumana, situé à 60 km de Bamako (Sogoba, 2007). Ce mécanisme permet d'expliquer comment la densité anophelienne peut augmenter brusquement à Bancoumana et pourquoi les gîtes y

deviennent actifs avec un léger retard sur Bozokin. Dans cette étude, nous analysons la dynamique des gîtes larvaires ainsi que les relations entre les types d'habitats, leurs tailles, leurs stabilités, et la transmission palustre à Dèbo, un village sahélien de la région de Kayes, situé à 400km environ, au Nord de Bancoumana.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Le site de l'étude.

Le village de Dèbo relève du cercle de Dièma dans la région de Kayes. Il est distant de 10km de Dièma et à 2Km de la route internationale (RN7) Mali-Sénégal. Dièma est à 340 Km de Bamako, capitale du Mali et à 271 km de la ville de Kayes allant à Dakar. Dèbo, nom commun de trois villages relève de la commune de Diangounte Camara. L'agglomérat porte le nom d'une mare qu'ils entourent: le "Dèbo". Débo-Bambara et Débo-Kagoro à l'Est longent la rive gauche du "Dèbo", tandis que Débo-Massassi est opposé à l'Ouest sur la rive droite. Le "Dèbo" serait un grand cours d'eau avec une forêt galérique où habitaient même des éléphants. Ce microfaciès en zone aride attira les premiers occupants du site qui le trouvèrent idéal pour s'installer. Le centre de santé de proximité est à Débo-Massassi. En période de crue la mare constitue une véritable barrière aux déplacements de population. Les malades de la rive gauche sont obligés de contourner la mare en empruntant la route Bamako-Kayes pour redescendre à Débo-Massassi. En période de retrait maximale des eaux comme au moment de notre passage, la mare se résume à un fond d'eau d'environ 100 mètres, fortement colonisé par les caïmans sacrés du village. L'hivernage dure en moyenne 2 mois. Les eaux de pluies coulent de l'Est en amont vers la mare, laissant sur les traces des poches d'eau temporaires que les anophèles peuvent utiliser pour leur oviposition. L'agriculture est fortement tributaire d'un sol pauvre et des pluies insuffisantes mal réparties. Le sol généralement sablonneux est occupé essentiellement par *Guiera senegalensis*, *Balanites aegyptiaca*, *Ziziphus mauritiana*, *Acacia nilotica*, *Cordia pinata*, *Prosopis africana*. Dans les bas-fonds où le sol a une texture lourde, il y a *Mitragina inermis*, *Bohinia* sp. L'exil des jeunes en Europe est fréquent dans le milieu. Il constitue la principale source de revenu de la population en compensation des maigres ressources agricoles.

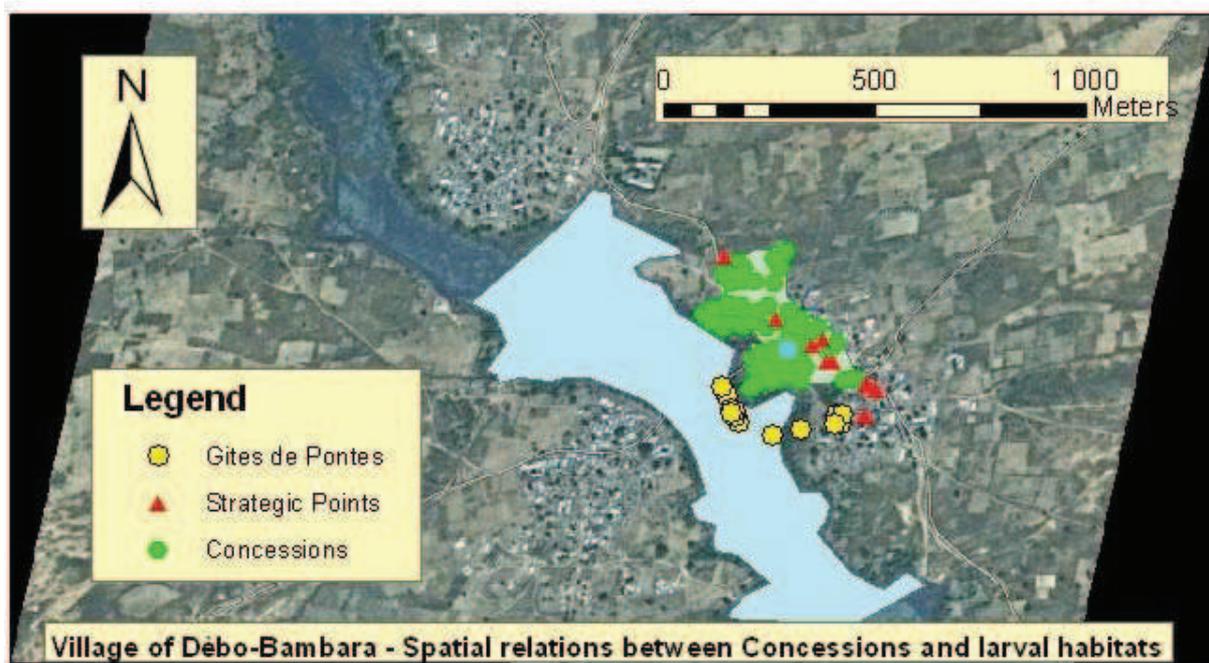


Figure 5. Carte de la mare Dèbo serpenteant entre les trois sous villages Dèbo (Google Earth).

## 2.2. Géolocalisation des concessions et des gîtes larvaires

Chaque concession de Dèbo-Bambara a été localisée dans le système géographique de positionnement WGS 84. Toutes les concessions ont été répertoriées dans le village en juillet 2009, début de l'hivernage. Par ailleurs, des points stratégiques du village ont été localisés en même temps que les concessions pour recaler d'éventuelles images satellites sur le site d'étude. Au total, 102 points GPS ont été réalisés sur le site d'étude: 66 pour identifier les concessions ; 14 points pour identifier les gîtes larvaires ; 13 points pour tracer la ligne du lit de la mare ; et 9 points stratégiques relevés à travers le village pour recaler des images satellites. Le village étant situé au bord d'une mare, les gîtes larvaires de saison sèche, puis de saison pluvieuse ont été reliés aux points du lit de la mare.

### a. Localisation des concessions

Les concessions du village numérotées de 1 à 66 étaient réparties en trois strates selon leur proximité à la mare. Une première stratification a été effectuée en début d'hivernage (juillet 2009) par rapport à la mare prise à l'époque comme la seule source de production d'anophèle : (i) la strate A composée de 12 concessions disposées aux abords immédiats de la mare (numérotées de 1 à 12) ; (ii) la strate B composée de 35

concessions intermédiaires entre A et C (numérotées de 13 à 47) ; (iii) la strate C composée de 19 concessions situées à l'extrémité opposée du village à l'Est (numérotée de 48 à 66). Puis une seconde stratification des mêmes concessions a été effectuée en au milieu de l'hivernage (septembre et octobre 2009) au moment de l'apparition des nouveaux gîtes temporaires de pluies pour être en conformité avec le paysage des gîtes de production au moment de l'échantillonnage des moustiques. La stratification de l'habitat humain suivait ainsi une dynamique de formation des gîtes d'anophèles. L'échantillonnage des moustiques, au sein du village, a été fait en prenant 80 à 90% des concessions du village. Considérant que le comportement des moustiques était homogène à l'intérieur d'une même concession, une chambre à coucher était choisie aléatoirement pour représenter chaque concession retenue lors d'une séance de captures. L'échantillon de moustiques collectés portait à son tour un numéro d'identification affilié à la concession qui l'abritait.

#### ***b. Localisation des gîtes larvaires d'anophèles***

Des prospections scientifiques en saison sèche ont permis d'identifier des gîtes au niveau de la mare. En dehors de ce site, nous n'avons pu trouver aucun autre lieu de ponte des anophèles dans un rayon de 7 kilomètres autour du village, du fait peut être des infiltrations rapides des eaux de surface dans le sous-sol. La rétraction d'eau de la mare laissait traîner dans son lit un chapelet de petites collections d'eaux qui, pour la plupart étaient colonisées par les larves d'anophèles et parfois des culex. C'est sur ces gîtes estivaux qu'a démarré l'application de notre protocole d'étude larvaire des anophèles en attendant la tombée de pluies suffisantes pour que se forment des nouveaux gîtes. En période pluvieuse, les anophèles pondaient surtout dans des "human made pits" dont la stabilité suivait le rythme des pluies.

Les surfaces de ponte identifiées dans les eaux résiduelles de la mare ont été localisées avant la tombée des pluies. En saison des pluies, les gîtes étaient localisés au fur et à mesure qu'ils apparaissaient avec la pluviométrie. Après chaque épisode de pluies importantes, l'équipe d'entomologie procédait à une promenade scientifique pour identifier les nouveaux gîtes formés. Le matin à 07H, les collections d'eau contenant des larves d'anophèle et celles susceptibles d'être choisies par l'anophèle pour la ponte étaient observées de façon individuelle pour la caractérisation écologique à partir d'un

questionnaire guide. Des waypoints ont été portés le long du lit de la mare de manière à couvrir les trois villages de Dèbo (Dèbo Bambara, Dèbo Kagoro et Dèbo Massassi). La projection perpendiculaire de chaque waypoint était répertoriée par des attributs sur l'une des deux rives de la mare.

Le monitoring des gîtes larvaires consistait à des mesures micro hydrologiques du volume d'eau et de la surface de ponte et à des caractérisations écologiques de la productivité individuelles des gîtes larvaires. Un protocole de gîte mis à la disposition de l'équipe servait de guide de caractérisation environnementale en termes de végétation aquatique, de conditions physiques du gîte et d'occupation par les larves d'anophèles et d'autres organismes vivants. Les stades de développement larvaires étaient notés à chaque passage. Larval data were expressed in terms of abundance by larval site and by observation.

Le suivi de températures d'eau des gîtes portait sur trois des meilleurs gîtes productifs du moment. Les mesures de températures des gîtes larvaires étaient effectuées à de thermomètres de piscine. L'opérateur plongeait le bout du thermomètre dans l'eau pendant 2 à 3 mn avant la lecture. Pour chaque gîte retenu pour le suivi, les mesures micro hydrologiques de températures étaient ainsi faites tous les jours de 7H du matin à 19H du soir et à chaque jusqu'à tarissement du gîte qui dans certains cas peut redevenir négatif plus tard.

### **c. Calcul de distances des concessions entre elles et des concessions aux gîtes larvaires**

Au total 14 gîtes larvaires d'anophèles ont été suivis durant la période d'étude: 8 gîtes numérotés de 1 à 8 (G<sub>1</sub> à G<sub>8</sub>) en saison sèche, 2 gîtes de soudure entre la saison sèche et la pleine saison des pluies et 4 autres (G<sub>14</sub> to G<sub>17</sub>) en saison des pluies. Les gîtes peuvent être globalement localisés en deux groupes du fait de leur proximité formant un agrégat par saison. Les 2 groupes de gîtes ont été ramenés à deux points A et B. Le point A, de coordonnées 9°22'001" ; 14°34'923" représente les gîtes observés avant les pluies, le point B de coordonnées 9°21'630" ; 14°34'654" représente les gîtes observés au moment des pluies. Pour le calcul des distances chacune des concessions du village devra être mesurée à chacun de ces deux points. Les coordonnées *format GPS* ont été

d'abord converties au *format de degrés décimaux* puis, au *format UTM (zones 29,30,31 pour le Mali)* pour obtenir des *coordonnées cartésiennes* ou métriques  $x, y$ . Pour calculer une distance entre deux points  $pt_1$  et  $pt_2$  il suffit d'appliquer la formule:

$$((pt_{1x}-pt_{2x})(pt_{1x}-pt_{2x})+(pt_{1y}-pt_{2y})(pt_{1y}-pt_{2y}))^{0.5}$$
 ( $\wedge 0.5$  pour racine carrée). Par exemple la distance de la concession 1 au gîte 1 était estimée à: 919,5m  $[((1840369,4-1841268,1)^2+(1648096,9-1648293,7)^2)^{0.5}]$  selon nos mesures.

### **2.3. Monitoring de l'environnement et du climat**

#### **a. Relevées météorologiques**

Les températures ambiantes du milieu, les jours de pluies, les quantités de pluies, et la caractérisation des pluies étaient recherchés comme informations météorologiques en relation avec la productivité des anophèles. Ces mesures étaient faites parallèlement aux observations micro hydrologiques des gîtes de ponte et aux captures d'adultes. Ce qui permettrait d'établir une corrélation heure par heure entre l'ensoleillement et la température d'eau des gîtes larvaires.

Une station météorologique de l'équipe était installée au village, afin d'avoir les conditions microclimatiques locales du site d'étude. Les mesures de températures au sol étaient effectuées à l'aide d'un thermomètre de cabane. Un pluviomètre de cabane était fixé à environ 100m du pluviomètre agro-météo local du village. Un appareil météo installé au logement de l'équipe, avec capteur à l'extérieur donnait les mêmes températures que les installations agro météorologiques du village. Un (1) opérateur était chargé des relevées météorologiques sur chaque site d'étude. Une prise quotidienne de données a été faite. Une fiche de relevées quotidiennes des données a été mise à la disposition de l'opérateur. A chaque heure, l'agent prend les températures ambiantes externes au niveau de trois stations météo que l'équipe a installé sur place. Au même moment, il passe aux relevées de température de l'eau au niveau de trois gîtes larvaires d'anophèles très productifs qui ont été retenus par l'équipe d'entomologie. Ces observations qui permettront d'établir une corrélation heure par heure entre l'ensoleillement et la température d'eau des gîtes larvaires. Une station météorologique locale installée au village à des faims agronomiques nous a servi pour les relevées de hauteur des pluies.

Les nuages étaient annoncés d'avance par trois stations météorologiques sans câble installées parallèlement dans des chambres du logement de l'équipe. Sur ces stations on pouvait mesurer la température extérieure ( $-20^{\circ}\text{C} \sim +60^{\circ}\text{C}$ ) au sol, la température intérieure ( $0^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ ) des chambres. Au même appareil était incorporé un hygromètre (20%-99%) qui a servi d'instrument de mesure de l'humidité dans l'air pendant l'étude. Une fiche de notifications était utilisée tous les jours de nuages et de pluies.

#### **2.4. Etude des populations de moustiques adultes**

Des enquêtes entomologiques ont été menées par quinzaine deux fois par mois. Nous estimions faire un sondage de 80 à 90% des concessions du village pour une bonne estimation de la distribution des clusters de moustiques infectés dans les concessions. Un numéro d'identification a été attribué à chaque chambre prospectée lors d'une séance de captures. Les 3 premières lettres indiquaient le nom du village, suivi de 2 chiffres identifiant la concession. Les 2 derniers chiffres étaient le numéro d'ordre des dix chambres à prospecter dans la strate pendant la séance de captures. Ex : BAM5206 signifie: village de Débo-Bamara (BAM); 52<sup>ième</sup> concession du village (52); 06 = 6<sup>ième</sup> chambre traitée dans la strate C pendant la séance de captures.

##### **a. Méthode de captures des moustiques.**

Deux méthodes de captures sont courantes au Mali pour l'échantillonnage des moustiques: la méthode de captures sur appât humain ou "Landing Catch" et la méthode de captures à l'insecticide ou "Indoor Residual Spray Catch". Le choix de la méthode de collecte a été particulièrement difficile Débo-Bambara. Les jeunes du village n'étaient pas si nécessairement pour accepter de veiller toute la nuit à des captures de moustiques moyennant de l'argent. Par ailleurs, le style d'habitat ne s'y prête pas au spray catch. L'habitat est un studio avec véranda munie de plusieurs ouvertures d'aération et un couloir conduisant à une toilette à ciel ouvert hors du studio. Les chambres à coucher sont comblées de matériels et les habitants dorment pratiquement sous véranda. Néanmoins, nous avons adopté les captures à l'insecticide. Le matériel de captures était composé de 15 draps blancs, torche, bombe insecticide, boîtes de pétri

avec chambre froide (papier buvard faiblement imbibé d'eau dans une boîte de pétri), pinces, étiquettes.

### **b. Choix aléatoire des chambres à traiter**

Pour avoir un échantillon représentatif du village on considère que la distance des gîtes est le premier facteur de distribution des anophèles dans les concessions humaines. Pour la collecte des moustiques, dix chambres à coucher étaient choisies au hasard par séance de captures dans chacune des trois strates de concessions et traitées à l'insecticide. Une chambre à coucher était choisie au hasard pour représenter chacune des 30 concessions retenues. L'échantillon de moustiques collectés portait à son tour un numéro d'identification affilié à la concession qui l'abrite.

### **c. Technique du Spray Catch**

Le spray était organisé le matin soir de 14H à 16H et consistait à :

- Débarrasser la chambre à traiter de tous les éléments posés sur le sol (sauf le lit)
- Etaler des draps blancs de manière à couvrir tout le sol de la chambre ;
- Fermer hermétiquement toutes les ouvertures pouvant servir d'échappatoire aux moustiques ;
- Asperger l'insecticide en commençant par les coins et recoins de la chambre, afin d'éveiller tous les moustiques cachés ;
- Laisser la chambre fermée pendant 10 minutes environ après traitement
- Retirer soigneusement les draps pour recueillir les moustiques tombés (pouvant être l'objet de plusieurs études entomologiques).

### **d. Tri des moustiques capturés**

Les moustiques collectés étaient identifiés à l'œil nu sur critères morphologiques puis, repartis en genres, espèces, en vecteurs et en non vecteurs, et enregistrés sur une fiche de collecte. Le nombre de dormeurs dans la chambre était aussi porté sur la même fiche que les moustiques. Les vecteurs du paludisme étaient séparés en 4 variantes et conservés dans une chambre froide pour le labo: les femelles à jeun venaient de naître ou de pondre, les gravides avaient pris du sang au moins un jour avant, les semi gravides et les gorgés avaient pris du sang la veille de la séance de captures.

## 2.5. Estimation des paramètres de transmission

L'ensemble des adultes collectés sur le terrain constituait directement l'échantillon pour exprimer l'abondance des vecteurs au niveau de la population. Compte tenu des faibles moyens de l'étude, un échantillonnage des captures a été fait pour l'indice sporozoitique des moustiques. L'infectivité des moustiques a été estimée sur la base de détermination de l'antigène sporozoïte par la technique de l'Enzyme Linked ImmunoSorbent-Assay (ELISA).

Toute femelle semi-gravide dont l'état de conservation permettait de faire une bonne préparation chromosomique faisait partie de l'échantillon de moustiques pour l'étude cytogénétique.

Au laboratoire, l'équipe procéda tout d'abord à l'organisation et l'étiquetage des échantillons de moustiques de l'année selon la nature des examens préconisés.

### a. Taux d'infection des moustiques à l'ELISA

A défaut d'un indice entomologique de transmission disponible dans la zone d'étude ou au voisinage, nous avons pris comme base de calcul de la taille d'échantillon à partir de l'indice sporozoitique de l'année 2000 (IS = 0,06%) obtenu à Mantéourou (*seeno*), écologiquement semblable à Dèbo. Mais, il nous fallait plus de moustiques à traiter qu'on ne capturerait. Nous avons raisonnablement constitué un échantillon proportionnel à la taille des moustiques par séance de captures dans les strates de concessions du village. Le nombre à traiter pour estimer l'infectivité des moustiques figure en 2<sup>ème</sup> colonne dans les strates A, B et C (tableau 1).

**Tableau 1.** Echantillon de moustiques capturés à traiter (ELISA)

Dates des captures	States de Capture						Total captures	
	A		B		C			
	Total <i>An. gamb</i>		Total <i>An. gambiae</i>		Total <i>An. gambiae</i>		Total <i>An. gambiae</i>	
16 juillet	257	110	115	80	118	80	490	270
31 juillet	192	100	205	100	114	80	511	280
20 août	169	100	213	100	170	100	552	300
05 septembre	68	68	59	59	13	13	140	140
29 septembre	149	91	197	140	29	29	375	260
20 octobre	30	30	37	37	20	20	87	87
17 novembre	53	53	35	35	7	07	95	95
<b>Total</b>	<b>918(41%)</b>	<b>552</b>	<b>861(38%)</b>	<b>551</b>	<b>471(21%)</b>	<b>329</b>	<b>2250(100%)</b>	<b>1432 (63,64%)</b>

## b. Calcul des paramètres de transmission

- **La densité par case** exprime la densité de présence des vecteurs dans l'habitat humain

- **L'agressivité (m.a).** C'est le nombre de piqûres de moustique qu'une personne peut recevoir par nuit. Les femelles fraîchement gorgées et les semi-gravides (abdomen moitié rouge de sang, moitié blanc d'œufs) ont servi pour calculer l'agressivité qui exprime la fréquence du contact homme-vecteur. L'agressivité a été calculée par séance de captures en utilisant la formule: Nombre de femelles (fraîchement gorgées + semi-gravides)/Nombre total de dormeurs.

- **Le taux d'infection des moustiques :** L'infektivité des moustiques : exprimera la proportion de moustiques infestés dans le temps et dans l'espace. Les néonates ne posent pas de risque, seules les vieilles femelles rencontrées lors des captures seront pris en compte.

- **Le TIE, variable clé de la transmission :** Le taux d'inoculation entomologique est défini comme le nombre de piqûres infectantes qu'une personne peut recevoir par nuit. Elle exprime l'intensité de la transmission dans la population.

### 2-6. Détermination des espèces éco génétiques du complexe *An. gambiae*.

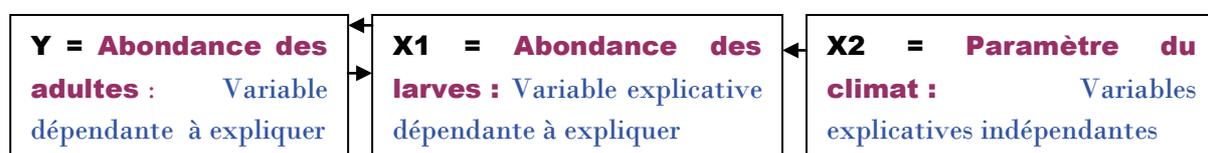
Des préparations chromosomiques étaient faites au laboratoire à partir d'ovaires des femelles semi-gravides d'*An. gambiae s. l* capturés pour examens cytogénétiques. Les membres du complexe *An. gambiae* représentant les vecteurs du paludisme dans le village ont été identifiés à partir de ces résultats.

**Tableau 2.** Examen cytogénétique d'*An. gambiae s.l.* capturés à Dèbo Bambara en saison des pluies 2009

Dates des captures	Strates de captures						Total captures	
	A		B		C		Total <i>An.gambiae</i>	Semi-gravide
	Total <i>An.gambiae</i>	Semi-gravide	Total <i>An.gambiae</i>	Semi-gravide	Total <i>An.gambiae</i>	Semi-gravide		
16 juillet	257	90	115	12	118	49	490	151
31 juillet	192	51	205	2	114	44	511	97
20 août	169	22	213	64	170	59	552	145
05 septembre	68	28	59	14	13	0	140	42
29 septembre	149	11	197	36	29	5	375	52
20 octobre	30	5	37	7	20	10	87	22
17 novembre	53	15	35	19	7	2	95	36
<b>Total</b>	<b>918</b>	<b>222</b>	<b>861</b>	<b>154</b>	<b>471</b>	<b>169</b>	<b>2250</b>	<b>545</b>

## 2-7. Analyse statistique des données

Nous cherchons à expliquer l'abondance des moustiques par 3 variables climatiques (pluviométrie, température et humidité) en considérant que les variables anthropiques comme la distance des gîtes larvaires aux concessions humaines, le nombre de dormeurs par chambre, la densité humaine et celle des animaux par concession, sont des paramètres de distribution des moustiques dans le village. Les variables de l'étude ont été classées en trois groupes d'interdépendance pour la recherche de liens fonctionnels entre les paramètres climatiques, environnementaux et entomologiques selon la fonction de régression  $Y = f(\text{climat, gîtes larvaires, hôte humain})$ .



Y désigne l'abondance des adultes que nous souhaitons expliquer dans l'étude. L'abondance des moustiques adultes dépend naturellement de la quantité d'œufs pondus par les femelles, et la densité de larves qui émergent au niveau des gîtes larvaires. Et l'émergence des adultes dépend directement ou indirectement des paramètres du climat. La corrélation entre le réchauffement de l'air et la température du gîte a été étudiée avec le logiciel SPSS.

Pour déterminer l'influence des paramètres climatiques sur l'abondance des vecteurs du paludisme nous avons utilisé la régression de Poisson Count Outcomes du logiciel Intercooled Stata version 9.1. L'influence du climat a été recherchée sur les différents stades de vie du moustique (larves et adultes), les gravides (exprimant le potentiel de ponte) et l'agressivité des moustiques dans les chambres. A chaque valeur d'une variable indépendante, le nombre de moustiques incidents a pu être compté et cette abondance a été déterminée par l'IRR (incidence rate ratio) et la valeur du petit p correspondant. Si l'IRR est égal à 1 cela signifie qu'il n'y a pas d'effet de la variable explicative sur la variable dépendante. Si  $IRR > 1$ , il y a un effet positif de la variable dépendante c à d une augmentation dans la régression. Si  $IRR < 1$ , l'abondance des larves ou des moustiques diminue. Les analyses de régression de l'abondance des anophèles ont été faites à deux niveaux de variables dépendantes : (i) l'analyse de l'abondance des larves et adultes pour l'effet des paramètres climatiques (température,

humidité, pluviométrie) classés comme variables indépendantes ; (ii) l'analyse de l'abondance des nouvelles entrées de femelles dans les chambres et des gorgés pour l'influence de l'hôte comme variable indépendante.

Nous chercherons à établir dans quelle mesure, les caractéristiques de la population d'hôtes (nombre d'habitants par concession, nombre de dormeurs dans les chambres, nombre et type d'animaux dans la concession) impactent la dynamique des populations de moustique, ainsi que l'incidence du parasite au sein de ces populations, notamment au travers des contacts hommes-moustiques. (Relation entre abondance des larves, proportion des stades gravides et gorgés incidents et disponibilité de l'hôte humain).

### **3. Résultats**

Les enquêtes entomologiques nous donnent l'information sur la variabilité des paramètres de transmission par l'influence du climat. L'enquête entomologique que nous avons réalisée à Debo ; nous a permis de caractériser la dynamique spatio-temporelle des populations de moustiques adultes et de larves. Nous avons relié cette dynamique à la disponibilité et à la productivité des gîtes larvaires, aux facteurs climatiques locaux, et aux caractéristiques des peuplements humains.

#### **3.1. Evolution de la population de moustiques adultes**

Nous avons collecté des moustiques adultes dans 210 habitations du village par la méthode de pulvérisation d'insecticide (Spray-Catch). 41% des moustiques étaient capturés dans les concessions de la strate A, contre 38% dans les concessions B et 21% dans la strate C. Les résultats ont permis de confirmer que l'abondance des adultes gravides est corrélée à l'abondance des larves au niveau des sites de production. Cependant du fait de l'existence d'un habitat dual qui assure une production de larve entretenue en dehors de la saison des pluies, l'abondance des adultes capturés au sein des habitations est assez peu affectée par la production des larves.

#### **3.2. Evolution des paramètres de la transmission du paludisme**

Le micro-climat du village de Debo, est propice à la transmission. Nous avons identifié des moustiques infectés dans les habitations, avant, pendant et après la saison des

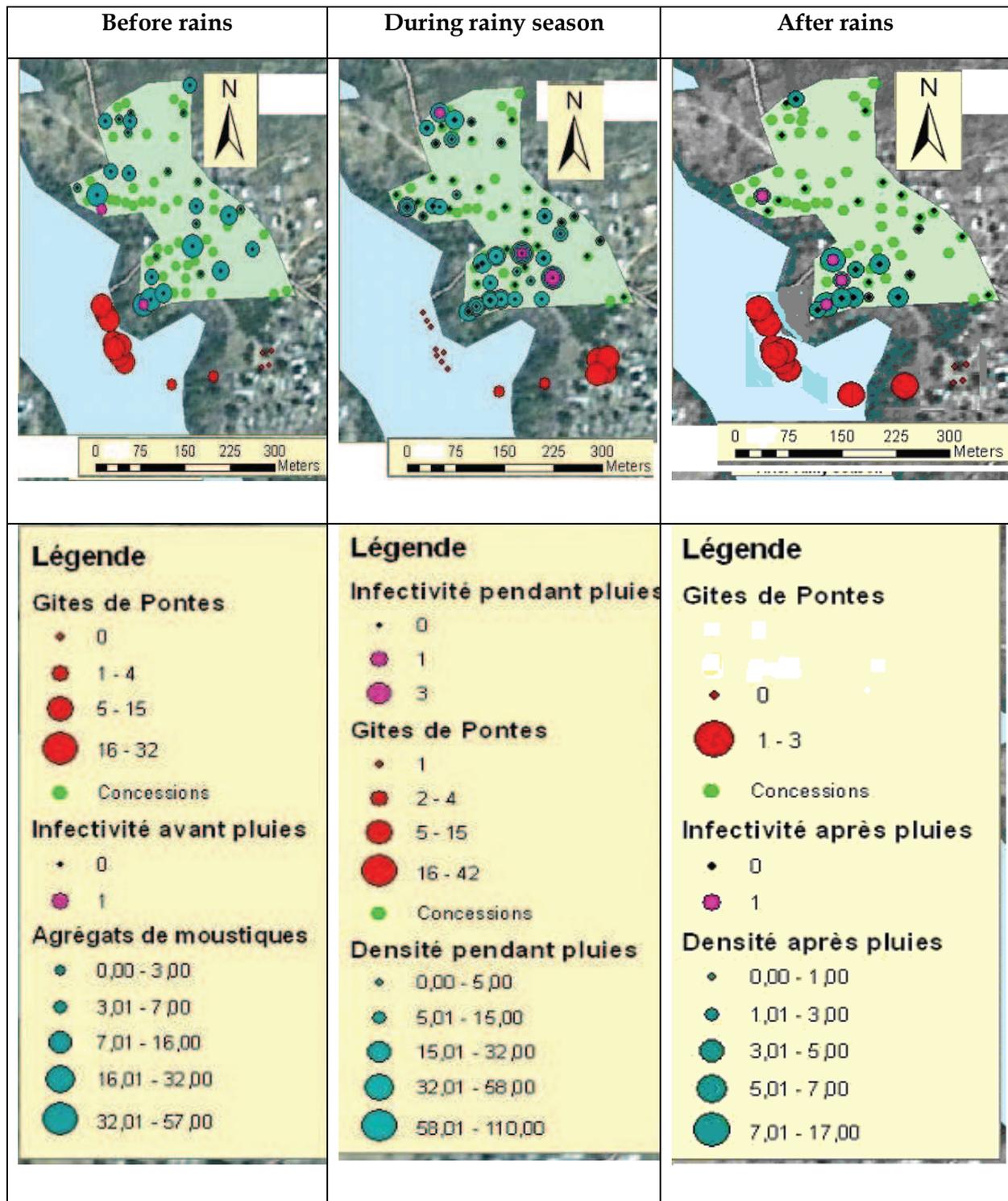
pluies. Cela montre qu'une transmission continue du paludisme est dans les régions sahéliennes du Mali.

Tableau 3. Risque de transmission et formes chromosomiques représentant les vecteurs du paludisme pendant la période d'étude à Dèbo

Périodes	Dormeurs	House entry	Taux de piqûre homme* (m.a)	Infectivité des captures p.cent	Risque quotidien d'inoculation (ma*IS)	<i>Arabiensis</i>	<i>A. gambiae</i> Mopti	<i>A. gambiae</i> Savane
Avant pluies	4	8	2	2/300	0,014	33	18	8
								<i>IS=0,007</i>
Pendant pluies	4	5	1,25	7/1129	0,008	16	9	1
								<i>IS=0,0062</i>
Après pluies	4	1	0,25	4/84	0,012	-	-	-
								<i>IS=0,048</i>
<b>Total/moyenne</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>1,16</b>	<b>13/1513</b>	<b>0,011</b>	<b>49</b>	<b>27</b>	<b>9</b>
								<i>IS=0,009</i>

\* Le taux de piqûre-homme c'est le nombre de vecteurs par humain qui équivaut au nombre quotidien de piqûre-homme. Puis que les moustiques ont été collectés dans les habitations humaines nous nous sommes permis de les considérer comme anthropophile dans le calcul de leur agressivité (m.a). Notre étude a duré 17 semaines soit, 119 jours au total. Chaque membre de l'équipe d'entomologie aurait donc risqué 1,666 piqûre infectante pendant cette période à Dèbo.

Le risque semblait augmenter à la fin des précipitations. De plus, les cartes thématiques montrent que les clusters de moustiques agressifs et infectés sont géographiquement proches des gîtes larvaires productifs localisés avant, pendant et après les pluies. On pouvait observer trois cas de figures du risque palustre dans le village: 1) Des grands agrégats de moustiques sans risque d'infection ; 2) Des petits agrégats de moustiques avec assez de risque ; et 3) Des petits agrégats de moustiques sans risque. Nous n'avons pas pu estimer la durée de vie des moustiques dans la localité à cause des difficultés de travail. Ce qui nous permettrait de fournir des informations complémentaires à ce sujet.



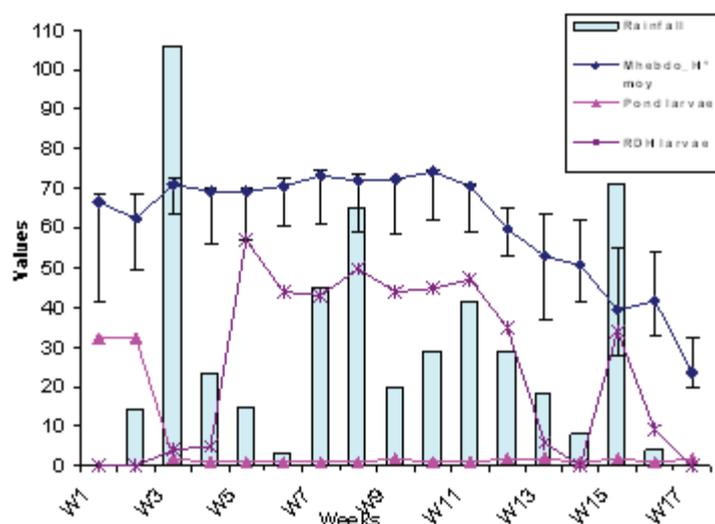
**Figure. 6.** Spatial relations between infectious clusters, larval and human habitats location in Dèbo village.

### 3.3. Evolution de la population de larves

Nous avons réalisé 204 observations d'habitats larvaires en saison sèche, et 190 observations en début de saison des pluies et 1780 dans des habitats tributaires des pluies sur les bords de l'étang, soit au total 2134 observations. Parallèlement, nous

avons enregistré les principaux paramètres météorologiques (pluviométrie, températures et humidité). Les températures furent constamment élevées et subissaient très peu de variations. La moyenne des températures est de 29 °C avec un maximum de 33° C et un minimum de 27 C, toujours au-dessus de l'optimum pour le développement larvaire des anophèles. Par contre, l'humidité de l'air a subit des variations. La moyenne d'humidité est de 61% avec un maximum de 66% et un minimum de 49%. Les minima d'humidité enregistrés entre début juillet (début d'hivernage) et fin septembre sont très marqués. Il a fallu attendre le mois d'octobre pour que les écarts se resserrent (minimums proches des maximums).

La collecte des larves a été réalisée avant, pendant et après la saison des pluies dans deux types d'habitats. L'analyse de la production de larves à l'échelle du village, révèle un comportement très différent des habitats. Les « habitats humides » localisés sur les côtes de la mare sont actifs pendant la saison des pluies, alors que les « habitats secs » localisés dans le lit de l'étang Dèbo sont actifs hors saison des pluies. Les premiers, aussi appelés habitats dépendants des pluies (RDH) ont été peu productifs en larves au début de la saison des pluies, mais leur productivité s'est accrue durant la période de précipitation abondante. A l'inverse, les seconds ont été très productifs durant la saison sèche et très pauvres en saison des pluies.



**Figure 7.** Evolution des populations de vecteurs adultes et de larves par rapport aux facteurs météorologiques.

### 3.4. Evolution locale des variables climatiques

Les températures ont été constamment élevées, subissant très peu de variations. Pendant l'étude la moyenne des températures était de 28,87°C, l'optimum du développement larvaire des anophèles (Fig.8). Le maximum (33,09°C) et le minimum (27,33°C) de températures étaient tous à l'intérieur des seuils limites de développement optimal des larves d'*A. gambiae*. Les mesures que nous avons réalisées montrent que le réchauffement des gîtes est très corrélée au réchauffement de l'air ( $r [0,673 ; 0,673]$  ;  $p = 0,000$ ) modulo un décalage d'une heure, soit le temps nécessaire au réchauffement d'un gîte à partir du réchauffement solaire ((Fig.8).

Par contre, l'humidité de l'air a subi d'importantes variations. La moyenne d'humidité était de 61% avec un maximum de 66% et un minimum de 49%. L'écart entre les moyennes d'humidité et les minima a été important à partir du mois de juillet (début d'hivernage) jusqu'à la fin septembre. Pendant ce temps, les moyennes d'humidité étaient très proches voir souvent confondues aux humidités maximales. C'est à partir du mois d'octobre que les moyennes d'humidités se sont équilibrées entre les maximums et minimums. La température ambiante semble négativement corrélée à l'humidité de l'air ( $r [0,431 ; 0,431]$  ;  $p = 0,001$ ), et les précipitations ne semblent être corrélées ni l'humidité de l'air, ni aux températures ambiante. Toutefois, les rapprochements entre température maximale et humidité minimale semblent associées aux épisodes de pluies intenses. Ces observations justifient, s'il en est besoin, la nécessité d'entreprendre des études approfondies sur les interactions climatiques au Sahara.

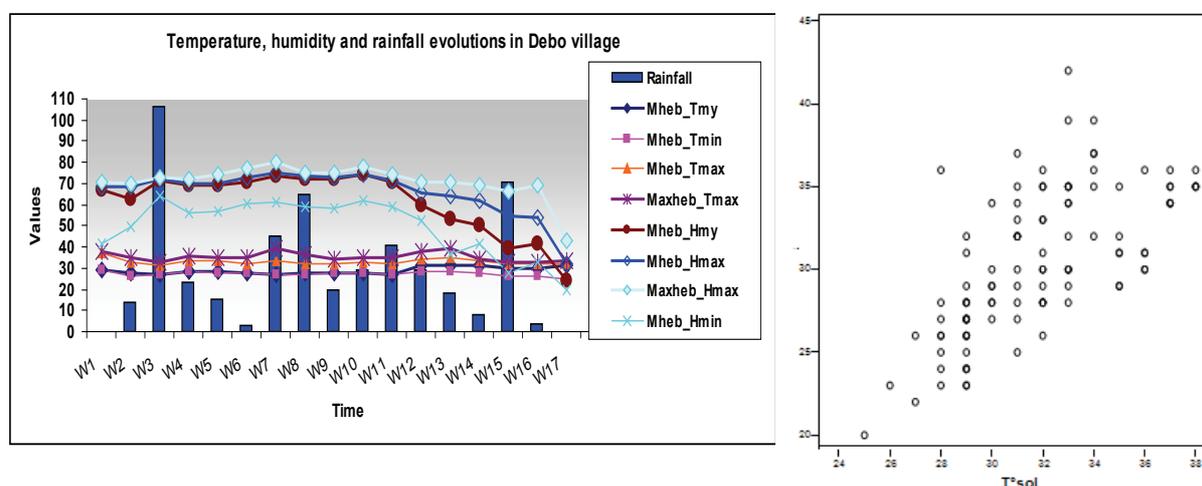


Figure 8. Evolutions des températures, de l'humidité et de la pluviométrie à Dèbo.

### 3.5. Disponibilité et productivité des gîtes larvaires

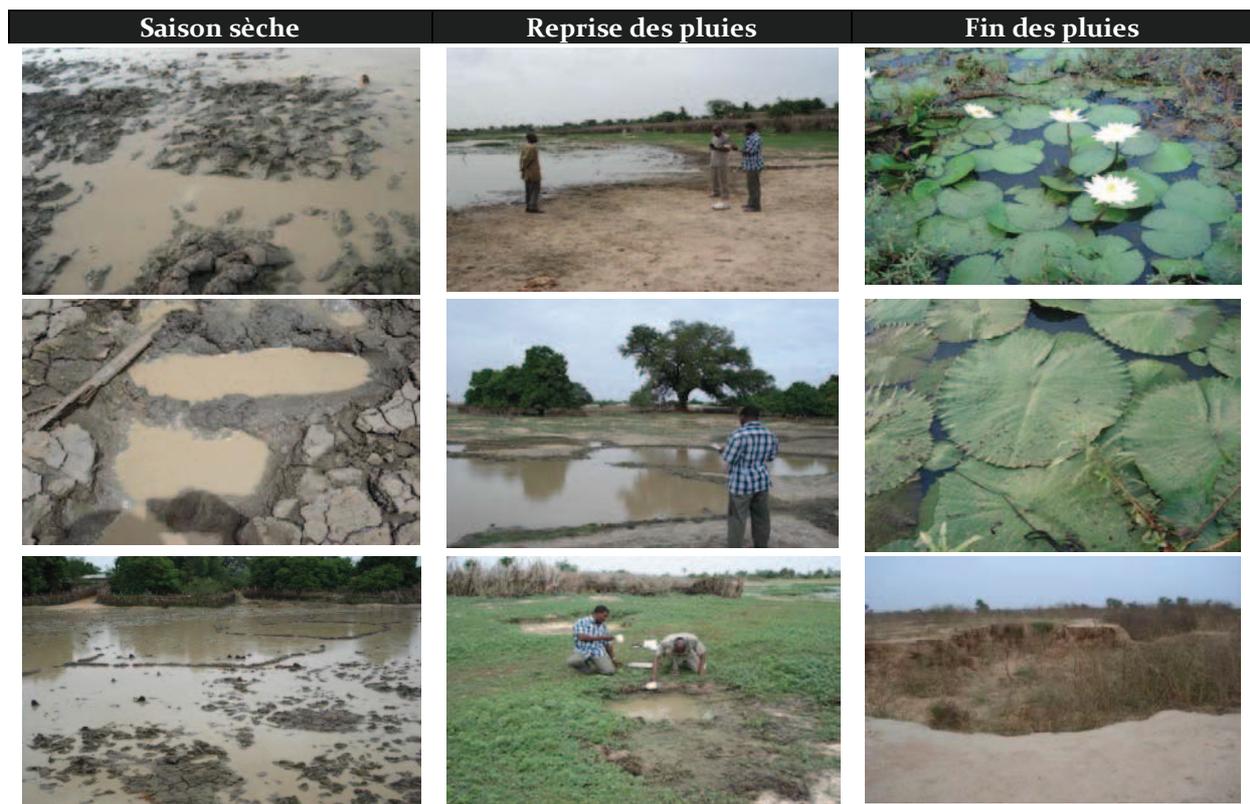
Paradoxalement, le pic de productivité larvaire est observé durant la saison sèche. La production de larves est assurée par de petites collections d'eau qui apparaissent dans le lit ensoleillé de l'étang Dèbo. L'importante pluviométrie (106mm) enregistrée, en début de saison des pluies, durant les semaines 3 et 4, entraîne l'inondation et le lessivage des gîtes larvaires de l'étang, qui étaient auparavant les seuls productifs sur le site du village. La mare devient soudainement improductive et de nouveaux gîtes de saison des pluies prennent le relais de production. Les gîtes larvaires qui étaient inactifs durant la saison sèche, commencent à être productifs en début de saison des pluies, et deviennent très productifs en période de grandes pluies. Le pic de production des larves d'anophèles est contrôlé par le pic des précipitations et par la dynamique de formation (remplissage/vidange) des gîtes larvaires. La faible densité larvaire des semaines 13 et 14 s'explique par une baisse significative de la pluviométrie et la raréfaction des gîtes de saison des pluies sur le site du village. Puis, la chute drastique des densités larvaires en semaine 17 correspond à l'arrêt des précipitations et l'arrêt de la production larvaire dans les gîtes de saison des pluies (Fig.8). Les gîtes de saison des pluies se forment et se tarissent au rythme de la pluviométrie assurant leur production vectorielle en alternance avec la mare, improductive durant la saison des pluies. A la fin des pluies, les femelles d'anophèles se détournent des gîtes de saison des pluies et recolonisent les bordures de l'étang au fur et à mesure que l'eau se retire.

**Tableau 4:** Densités moyennes des larves d'*Anopheles gambiae* sl dans les habitats actifs successifs : à partir de l'étang vers les habitats générés par l'activité humaine.

Months	July	August	to	October	November
Epidemic states	1	2	3	4	5
Habitat type	Small pools in Pond residual bed	Pond primary bed	Pond secondary bed	Pond full water / RDH up	Pond full water
Productivity	32 (100%)	32 (40%)	4 (5%)	2 (2%) / 42 (53%)	3 (37%)
Time	Dry season ending		Rainy season		Onset of dry season

D'une saison sèche à l'autre, nous avons observé 5 dynamiques successives de gîtes larvaires au niveau du village : (1) petites collections d'eau résiduelles de la mare durant la saison sèche; (2) extension des petites collections d'eau initiales avec l'arrivée de la

première pluie ; (3) apparition des nouvelles collections d'eau temporaires sur les bordures de la mare avec l'avancement de la saison des pluies ; (4) lessivage des habitats précédents avec la mise en eau complète de l'étang et apparition de gîtes larvaires anthropiques sur les côtes de la mare; (5) assèchement des gîtes anthropiques et retour à la mare. Ainsi les populations d'*A. gambiae* colonisent chaque année durant la saison sèche, les nombreuses petites collections d'eaux ensoleillées qui apparaissent sur les traces de cru de la mare. A l'arrivée de la saison des pluies, après que la terre se soit imbibée d'eau de pluies, apparaissent sur les bords de l'étang, des gîtes temporaires. Ces nouveaux gîtes prennent le relais de la production larvaires au moment où les gîtes initiaux sont noyés. Ils amplifient les populations d'anophèles au village par leur forte capacité de production mais, tarissent vite dès qu'il cesse de pleuvoir.



**Figure 9.** Structure des gîtes larvaires

### 3.6. Impact local du climat sur l'abondance des vecteurs

A Dèbo, la production abondante des larves d'anophèles est positivement liée à la température maximale au sol (IRR=[1.04], p=0.00) et à l'humidité maximale de l'air (IRR= [1.04], p=0.00). Par ailleurs, une faible liaison positive a été trouvée entre l'abondance des larves et l'abondance des femelles gravides (IRR=[1.005], p=0.02). L'abondance des femelles gravides est également liée à la température maximale au sol (IRR=[1.12], p=0.00) et à l'humidité maximale de l'air (IRR= [1.03], p=0.00). Par contre, l'abondance des autres formes d'adultes qui est aussi liée à la température maximale, (IRR=[1.07], p=0.00) est plus liée à l'humidité moyenne de l'air (IRR=[1.02], p=0.02) qu'à l'humidité maximale. Paradoxalement, ni l'abondance des larves d'anophèle ni d'adultes n'est statistiquement associée à la pluviométrie.

**Tableau 5.** Impact de l'environnement sur l'abondance des populations de vecteurs

Variable	Incidence Rate	Std Err	p-value	Int. Conf	
<b>Larvae abundance</b>					
t°moysol	.8952149	.0217356	0.000	.8536118	.9388457
t°maxsol	1.042169	.0165706	0.009	1.010192	1.075158
h°maxair	1.04292	.0080796	0.000	1.027204	1.058877
<b>Adult abundance</b>					
t°maxsol	1.075739	.0229998	0.001	1.031591	1.121775
h°moyair	1.026262	.0117855	0.024	1.003421	1.049623
<b>Gravid abundance</b>					
t°maxsol	1.117778	.0312481	.000	1.058181	1.180732
h°maxair	1.039008	.013083	0.002	1.01368	1.064969
ab_larve	1.00524	.0023479	0.025	1.000649	1.009853
<b>House-entry</b>					
comp_habit	1.012359	.0036797	0.001	1.005173	1.019597
dormcase	1.054303	.022873	0.015	1.010412	1.1001
animals	1.296392	.117532	0.004	1.085339	1.548485
<b>Blood-fed abundance</b>					
dormcase	1.066111	.0271966	0.012	1.014117	1.12077
animals	1.052419	.0060263	0.000	1.040674	1.064297

### 3.7. Impact anthropique sur l'abondance des vecteurs

La densité moyenne des femelles gravides dans les habitations atteint 61% du total des moustiques capturés durant l'étude. Au niveau des habitations, cette valeur est corrélée à la présence de l'hôte humain (y compris des dormeurs) et animal du parasite. Cela confirme le potentiel de ponte des femelles d'*An. gambiae s. l* qui peuvent produire jusqu'à 150 œufs par ponte. La ponte chez le moustique passe toujours par une ou plusieurs prises de sanguin sur l'hôte vertébré afin de mûrir les

oeufs. L'agressivité sur l'hôte pour satisfaire ce besoin exprime la fréquence des contacts hôte vecteur.

**Tableau 6.** Impacts anthropiques sur l'abondance des populations de vecteurs adultes

Malaria vector collection	Juillet (16-31)		Août (01-31)		Sept (1-30)		Octobre (16-31)		Nov (16-30)		Total
House captures	490	100	1065	100	515	100	87	100	95	100	2252
House-entry	223	45,5	463	43,47	121	23,5	33	38	42	44,2	
Feed	162	0,5	277	26,00	110	21,36	31	0,32	38	0,44	
Gravid*	267	54,5	602	56,53	394	76,50	52	60	53	56	1368
Infectious	2	18,2	3	27,2	1	9,1	1	9,1	4	36,4	

\*Une femelle gravide d'*An. gambiae* libère en moyenne au Mali 150 œufs par ponte.

## 4. Discussion

Notre étude montre que la formation (remplissage/vidange) des gîtes larvaires de pluies contrôle étroitement la production des larves d'anophèles. L'extension des gîtes résiduels localisés au centre du lit de l'étang conduit à une première augmentation de la production de larves. Le pic de production associé à l'extension maximale des gîtes d'hivernage correspond au pic de précipitations. En semaine 3 et 4, les faibles densités d'*A. gambiae* correspondent à une pluviométrie accrue (106mm enregistrés), entraînant l'inondation des gîtes de l'étang de Dèbo qui étaient jusque là les seuls productifs. On assiste, ensuite, à un passage de relais vers des gîtes temporaires de saison des pluies.

La baisse de production des semaines 13 et 14 s'explique par une baisse significative de la pluviométrie et par une raréfaction des gîtes temporaires. Enfin, la chute drastique des densités larvaires en semaine 17 correspond à l'arrêt de la production larvaire dans les gîtes temporaires de saison des pluies associé à l'arrêt des précipitations. Les gîtes temporaires de saison des pluies se forment et se tarissent au rythme des pluies. Les densités larvaires augmenteront, à nouveau, au fur et à mesure que l'eau de la mare se retirera au centre de son lit, laissant sur ses traces des petites collections d'eau que la femelle d'anophèle utilisait pour son oviposition. Durant presque les  $\frac{3}{4}$  de l'année ce sont les habitats larvaires localisés dans le lit de la mare qui assurent la production larvaire, pérennisant la transmission du paludisme dans la localité.

Ainsi en Afrique Sub-saharienne, les gîtes larvaires d'*An. gambiae* sont largement distribués par la formation de nombreuses petites surfaces d'eau durant la saison des pluies. *An. gambiae* préfère, en effet, pondre dans de petites collections d'eau temporaires (Holstein, 1954 ; Gillies and De Meillon 1968 ; Minakawa et al. 1999, 2004 ; Gimnig et al. 2001). Mais, nous n'avons pas encore connaissance que l'espèce, aussi mimétique qu'elle soit, peut se reproduire seulement à partir de la température et l'humidité sans l'eau. Dans ce contexte, la stabilité et la disponibilité des gîtes larvaires d'*A. gambiae* sont bien corrélées à l'activité des gîtes d'anophèles (présence/absence des larves) (Service, 1977, Minakawa et al. 2005). Lorsqu'il tarde à pleuvoir, ces petites collections d'eau peuvent sécher rapidement du fait de l'évaporation sous le soleil accablant. Une masse critique des larves en phase de développement peuvent mourir par dessiccation et il ne reste à la limite que quelques grands gîtes qui assurent la production des vecteurs. Objectivement, la pluviométrie est le paramètre clé de la production d'anophèles mais son impact n'est pas directement visible, car il est médiatisé de façon plus ou moins complexe par le mécanisme de remplissage-vidange des différents types d'habitats aquatiques.

La balance de production larvaire entre la mare pérenne (macro gîte) et les gîtes de pluies ressort *l'idée de Minakawa et al. en 2055, selon laquelle les gîtes pérennes peuvent interagir avec des gîtes temporaires pour donner un système productif de larves*. Avec les pluies la mare de Dèbo n'était pas productive à cause du volume d'eau qui ne convenait plus à *A. gambiae* pour son oviposition. Elle a légué son potentiel de production aux nouveaux gîtes formés en les semant, qui ont même amplifié la productivité larvaire et la densité des adultes d'anophèles dans la localité.

Notre étude donne des résultats similaires à celle de Bancoumana, menée par Sogoba en 2007 quant au mécanisme de relais de production entre gîtes larvaires permanents et gîtes temporaires de saison des pluies. A Bancoumana, en saison sèche, les gîtes temporaires ne produisent aucune larve, et les adultes d'anophèles y sont à peine détectables dans les habitations (0,16/case). En revanche, à 5 km de Bancoumana, il existe un village de pêcheurs installé au bord du fleuve Niger, Bozokin, dans lequel les gîtes restent actifs en toute saison, et l'on peut capturer 8,16 moustiques/case durant la saison sèche. L'étude a démontré, qu'à l'arrivée des

premières pluies, les gîtes positifs de Bozokin ensemençaient les gîtes temporaires négatifs, Human Made Habitats (HMH), de Bancoumana.

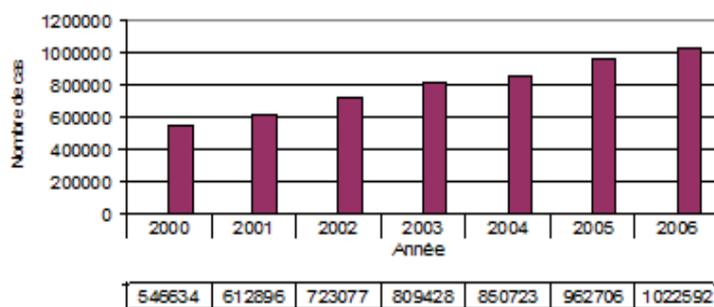
A Dèbo, la mare est le "réservoir de larves" pour ensemençer les nouveaux gîtes larvaires formés en saison des pluies. Bancoumana se trouve dans une zone humide du Mali où le paludisme est stable. Le mécanisme de relais de production entre les gîtes larvaires de saisons sèche et pluvieuse peut porter moins de risque pour la population fortement immunisée. Dans une zone d'instabilité du paludisme comme le sahel désertique au contraire, cette dynamique de production continue d'anophèles suite à une pluviométrie abondante de l'année précédente peut constituer un danger pour la population à risque faiblement immunisée. La mare peut être à l'origine d'épidémies de paludisme dans la localité s'ils se greffaient d'autres facteurs favorisants, invisibles pour le moment.

L'étude de l'impact des paramètres climatiques sur la transmission du paludisme en Afrique nécessite que soient pris en compte non-seulement les effets directs du climat sur le développement du vecteur ou sur le cycle extrinsèque du parasite, mais aussi les effets indirects sur les habitats des vecteurs. Dans le chapitre suivant, nous étudierons dans quelle mesure, les techniques de désagrégation des paramètres climatiques, permettent d'établir des prédictions à long terme des impacts du climat sur le paludisme en partant de scénarios climatiques globaux.

**PARTIE III**

**IMPACT DU CLIMAT SUR LA  
TRANSMISSION DU PALUDISME  
A L'ECHELLE REGIONALE**

D'après le Système Local d'Information Sanitaire (SLIS) du Mali, le paludisme est la première cause de morbidité et de mortalité, (45%), suivi des infections respiratoires aiguës et des diarrhées (27,4% et 8%) (PNLP. 2008; Kleinschmidt I. et al. 2000) (Fig.10). L'efficacité des mesures de contrôle a diminué au cours des dernières décennies, car les moustiques et les parasites sont de plus en plus résistants aux insecticides et des médicaments antipaludiques couramment utilisés (Touré O.A. et al. 2008 ; Tia E. et al. 2006 ; Fane M.D. et al.2011) Par conséquent, le paludisme tue plus de gens aujourd'hui qu'au cours des trois dernières décennies. Pour noircir un peu plus le tableau, la communauté internationale suggère que le paludisme, et plus généralement les maladies transmises par les moustiques, pourraient se propager de façon spectaculaire du fait du réchauffement climatique (CC) (Mouchet J. et al. 1988 ; Capelle A. 2007 ; OMS. 2009).



**Figure 10.** Evolution de l'incidence du paludisme au Mali (2000-2006)

De nombreux auteurs considèrent, en effet, que le CC devrait induire une progression, en altitude et en latitude, des maladies vectorielles (Bouma et al., 1994; McMichael et al., 1996 ; Colwell et Patz, 1998; Martens et al., 1995 ; Epstein et al., 1998). Quelques travaux ont commencé à tenter d'évaluer l'impact du CC sur l'incidence/prévalence de certaines maladies vectorielles en utilisant les sorties de modèles de climat (GCMs) : cas des Arbovirose (Dengue) (Hales et al, 2002) ; cas du Paludisme (Rogers et al., 2000). Les prévisions de différents modèles suggèrent que d'ici la fin du 21ème siècle le réchauffement en cours pourrait élargir la zone de transmission du paludisme, contenant de 45 pour cent de la population mondiale, à une zone contenant environ 60 pour cent (OMS. 2009). Ces premières évaluations ont cependant suscité de vives critiques de certains épidémiologistes (Reiter, 2000) qui considèrent que, si l'influence du climat sur la transmission des maladies vectorielles ne peut être contestée,

l'évaluation du risque associé au CC ne peut ignorer les nombreuses covariables entrant dans la détermination des états de santé.

De toute évidence, il paraît impossible de traiter de l'extension potentielle du paludisme, en ne considérant que le climat, à l'exclusion des autres agents contributeurs qui sont biologiques (environnement), culturelle (habitat), socioéconomiques (inégalités) ou démographiques (mobilité). Pour autant, la question de l'étude de l'impact potentiel du changement climatique sur l'incidence du paludisme ne peut être éludée. Même si le paludisme est une maladie hautement multi-factorielle et complexe, il est aujourd'hui possible d'étudier les impacts du climat sur les fluctuations d'incidence de la maladie, en considérant des covariables environnementales (Abose A.T. et al. 2003) ; Craig M.H. et al. 2004 ; Gemperli A. et al. 2006 ; Wenkosi M. et al. 2007).

## **1. Problématique**

Notre travail s'inscrit dans le cadre du projet « Analyse du Changement Climatique et de ses Impacts sur l'Eau et la Santé » (ACCIES) dont la mission est de : (i) développer une méthodologie intégrée d'études des impacts multi-échelle du changement climatique dans le domaine des ressources en eau et dans celui de la santé publique ; pour (ii) l'étude, à l'échelle régionale, des risques d'émergence et de réémergence des maladies vectorielles (notamment du paludisme) le long d'un gradient méridien Nord-Sud. A l'intérieur du projet ACCIES, l'objectif de notre travail est : (i) de concevoir et de mettre en œuvre, à l'échelle régionale, un recueil d'informations entomologiques et environnementales, relatif (ii) aux covariables du climat régional, qui sont nécessaires à la modélisation des impacts du CC sur l'hydrologie et l'épidémiologie du paludisme.

En introduction de ce chapitre, nous présentons le contexte dans lequel se situe notre travail au sein du consortium « ACCIES » (Bicout et al., 2009). Constatant, que la résolution spatiale et la fréquence temporelle des processus, représentés par les modèles de circulation générale atmosphérique (MCG), ~250 km en moyenne, étaient beaucoup trop grandes pour fournir les informations nécessaires à l'estimation des impacts hydrologiques et épidémiologiques, ~1 km, le consortium ACCIES s'est efforcé de développer des techniques permettant de désagréger les champs climatiques fournis

par des MCG à l'échelle régionale. L'approche retenue a consisté à utiliser les sorties à grande échelle, les plus fiables et à variation relativement lente pour extraire des informations sur les variables de petite échelle, moins fiables, mais requises par les modèles d'impact. Les modèles hydrologiques ou épidémiologiques ont, par exemple, besoin de résolutions très fines à l'échelle des bassins versants et mêmes des mares (Bicout et al., 2002 ; Bicout & Sabatier, 2004 ; Porphyre et al., 2005 ; Ndiaye et al., 2006 ; Lacaux et al., 2007 ; Tourre et al., 2007 ; Vignolles et al., 2007 ; Ndione et al., 2009). De plus, ils nécessitent des entrées qui respectent les cumuls pluviométriques ou la distribution des pluies. En effet, les modèles climatiques peuvent produire des quantités de pluie proches de la réalité mais dont la distribution temporelle est entachée d'erreurs : typiquement, le nombre de jours de fortes pluies est sous évalué (Gallée et al., 2004). C'est souvent le résultat du lissage de la topographie dans le modèle et la difficulté à paramétriser les processus sous mailles comme les nuages par exemple (Mc Guffie et Henderson-Sellers, 2001).

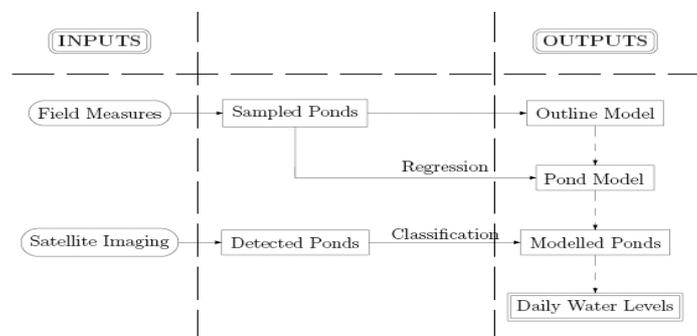
Les projections climatiques, utilisées par le consortium ACCIES, ont été réalisées à partir d'un Modèles de Circulation Générale (MCG) basé sur la version 3 d'ARPEGE-Climat avec une grille linéaire correspondant à une résolution uniforme d'environ 2,8 degrés. Ce modèle atmosphérique est couplé au moyen du coupleur OASIS, développé par le CERFACS, au modèle d'océan OPA version 8.0 réalisée par le LOCEAN (CNRS/IPSL) et interfacé avec un modèle dynamique de banquise (GELATO) et un modèle de routage des fleuves (TRIP). Les simulations obtenues permettent de définir des scénarios de large échelle pour la période 1980-1999 et pour la période 2080-2099, afin de permettre la réalisation des simulations régionales sur ces deux périodes.

Une première désagrégation du climat, à méso-échelle, a été réalisée par un recours au modèle NCAR/Penn State Mesoscale Model (MM5), cinquième génération d'un modèle qui a été développé dans les années 70 (Sijikumar et al., 2008). La simulation portant sur la fin du XXIe siècle indique de grandes différences entre le modèle initial et le modèle désagrégé. Les différences calculées entre la période 1981-1999 et 2081-2099 montrent que, dans le cas d'ARPEGE, les pluies ont tendance à augmenter sur toute l'Afrique de l'Ouest alors que pour MM5, on remarque une augmentation des pluies sur la bande guinéenne et une réduction sur la bande sahélienne. Cette

différence entre les champs de pluie obtenus pour la fin du XXI<sup>e</sup> siècle pose la question des incertitudes liées au changement climatique en Afrique de l'Ouest.

Une seconde désagrégation statistique du climat (surtout de la pluie) a permis de passer de l'échelle synoptique précédente à celle d'un petit bassin versant (~1 km) (Gerbaux et al., 2009). Par ailleurs, les processus de ruissellement ont été simulés avec un modèle conceptuel de type SCS (1956, 1964, 1971, 1985, 1993). L'accroissement de la pluviométrie, que révèlent les sorties d'ARPEGE et de MM5, se traduit par un accroissement du ruissellement, tant en niveau qu'en épisodes. Le niveau de ruissellement augmente de 50% dans l'ensemble du Sahel et l'accroissement le plus important se situe à proximité de la façade atlantique, précisément dans la région où la pluviométrie augmente le plus. Par ailleurs, la relation pluviométrie-ruissellement apparaît fortement non-linéaire: une augmentation de 10% de la pluviométrie moyenne entraîne une augmentation de 50% du niveau ruissellement et du nombre d'épisodes de ruissellement.

Ces données désagrégées permettent de spatialiser les températures et les précipitations ainsi que de simuler les processus de ruissellement avec un modèle conceptuel de type SCS (1956, 1964, 1971, 1985, 1993), mixant des bases de données relatives à la nature (FAO2000), et à l'utilisation des sols (GLC2000). Ce modèle permet de reproduire la variabilité intra et inter annuelle des variables climatiques et du ruissellement. Il permet de simuler le remplissage et la vidange des habitats aquatiques des moustiques vecteurs pour chaque mare, ainsi que la production de vecteurs. La méthode suivie est décrite dans le schéma suivant (Figure 11)



**Figure 11** : Diagramme de la tâche de simulation de la dynamique des mares (Bicout et al., 2009).

La chaîne de calcul permet de simuler les impacts hydrologiques et entomologiques à l'échelle locale, sur un site d'observation couvrant une surface de 1600 km<sup>2</sup>, à

proximité du village sahélien du Barkedji, 15°16'46"N, 14°52'05"W, dans le Ferlo, au Nord du Sénégal. Nous avons pu montrer l'existence d'une relation entre la taille des habitats et différents indices de résistance à la sécheresse (nombre de jours durant lesquels les habitats aquatiques sont remplis ; nombre de fois que le niveau des habitats aquatiques atteint le niveau 0 ; nombre de remplissages consécutifs). Nos résultats montrent que l'impact de la pluviométrie sur la production des moustiques diffère selon les types d'habitats, dont les temps moyens de remplissage peuvent être courts ( $\leq 7$  jours), moyens (= [8,28] jours) ou longs ( $\geq 29$  jours) (Bicout et al. 2009).

## 2. Matériel et méthodes

Au Mali, le site d'observations du projet ACCIES correspond à la région sahélienne. La mise en évidence de la variabilité climatique du paludisme était conduite par une équipe pluridisciplinaire composée d'un géographe, d'un modélisateur, d'hydrologues, d'épidémiologistes et d'entomologistes du MRTC.

L'étude était menée en deux étapes intégrant de façon méthodique les observations environnementales et de terrain (entomologie, gîtes de pontes): 1) Une étude globale à large échelle de l'impact des facteurs climatiques et environnementaux globaux sur la variabilité de la transmission du paludisme le long d'un gradient allant de la zone sub-aride sahélienne (gîtes permanents dans les faciès inondés et gîtes temporaires dans les faciès exondés) à la zone aride saharienne (gîtes épisodiques : petites et grandes mares, pluies sporadiques) ; 2) Une étude pondérale de l'impact locale des facteurs climatiques et environnementaux sur la variabilité de la transmission du paludisme.

La première étape de l'étude présentait à son tour deux volets complémentaires: 1) Une étude de terrain dans des sites retenus et application des protocoles d'échantillonnage des moustiques pour constituer une première base (a) de données entomologiques à partir de laquelle le risque palustre sera quantifié par des analyses statistiques ; 2) Une analyse rétrospective de la variabilité de la transmission à partir d'une base (b) de données entomologiques constituées par les résultats d'études antérieures menées sur la transmission du paludisme au Mali.

Les deux étapes de l'étude doivent aboutir à une estimation des paramètres du modèle de transmission, incluant la dynamique de production d'anophèles. En effets, les intensités du risque palustre quantifiées à partir des bases de données entomologiques (a et b) ont été couvertes par des données d'observation de la terre (Spot Image) et des données climatiques (météorologie), afin de ressortir l'impact des scénarios climatiques sur la dynamique de production d'anophèles par rapport à la transmission.

Nous avons conçu et mis en place des sites d'observations pour un recueil d'informations relatif aux covariables entomologiques et environnementales du climat régional pour nourrir les modèles de prédiction du risque palustre. Entre Janvier et Juillet 2007, des mesures ont été réalisées pour classer et quantifier différents profils des habitats aquatiques des vecteurs (paramètres de contrôle du modèle d'impact de la dynamique vectorielle). Ces résultats ont été confrontés aux résultats de mesures réalisées le long d'un transect bioclimatique. Puis, le recours à l'imagerie satellite a permis de détecter et de caractériser les profils des différents habitats aquatiques à l'échelle locale. Les images satellites utilisées ont été acquises par le Consortium ACCIES dans le cadre de la banque d'image ISIS, financée par le CNES. Elles ont été traitées dans le cadre du consortium ACCIES par le LTHE (Gaudart et al. 2009).

### **2.1.Sites d'étude**

Les sites étaient par définition des points d'observations locales pour abriter les études de terrain. Chaque site est une portion de faciès d'environ 500m de rayon autour d'un village sentinelle, choisi sur la base de sa taille, la motivation de la population à participer aux problèmes de santé, l'accessibilité en toute saison et la représentativité bio géographique du faciès.

Un site d'observation principal appartenant à un faciès a été choisi pour l'étude pondérale. Cependant pour mieux appréhender la variabilité des impacts du climat sur la dynamique vectorielle du paludisme, le protocole d'étude a été étendu à quatre faciès différents le long d'un transect bioclimatique.

**a. Bandiagara : village sahélien exondé de la région de Mopti.**

Le plateau Dogon, sur lequel est situé Bandiagara, est l'un des grands plateaux du relief malien. C'est une grande table de grès inclinée vers l'ouest. La table est une succession de plateaux séparés les uns des autres par des ravins encaissés. Le plateau Dogon est arrosé par le réseau du Yamé, affluent du Niger. Il existe de nombreux petits barrages destinés à la retenue d'eau pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau en saison sèche. La circonscription est traditionnellement habitée par le peuple Dogon resté toujours majoritaire dans la localité. L'activité des populations est essentiellement agropastorale et maraîchère. Ce village sentinelle a été choisi sur la base de sa taille, de sa motivation communautaire à participer à une enquête sanitaire, de son accessibilité en toute saison et de la représentativité bioclimatique de son faciès. Une jeune équipe d'entomologie a été installée dans le village. L'équipe dispose d'un protocole d'étude de la dynamique des populations adultes d'anophèles dans les villages d'étude. Lors de l'installation de l'équipe, le village a été géoréférencé par GPS simple au départ, et une description des caractéristiques environnementales (au sens large) a été faite par observations (avec photos numériques à l'appui).

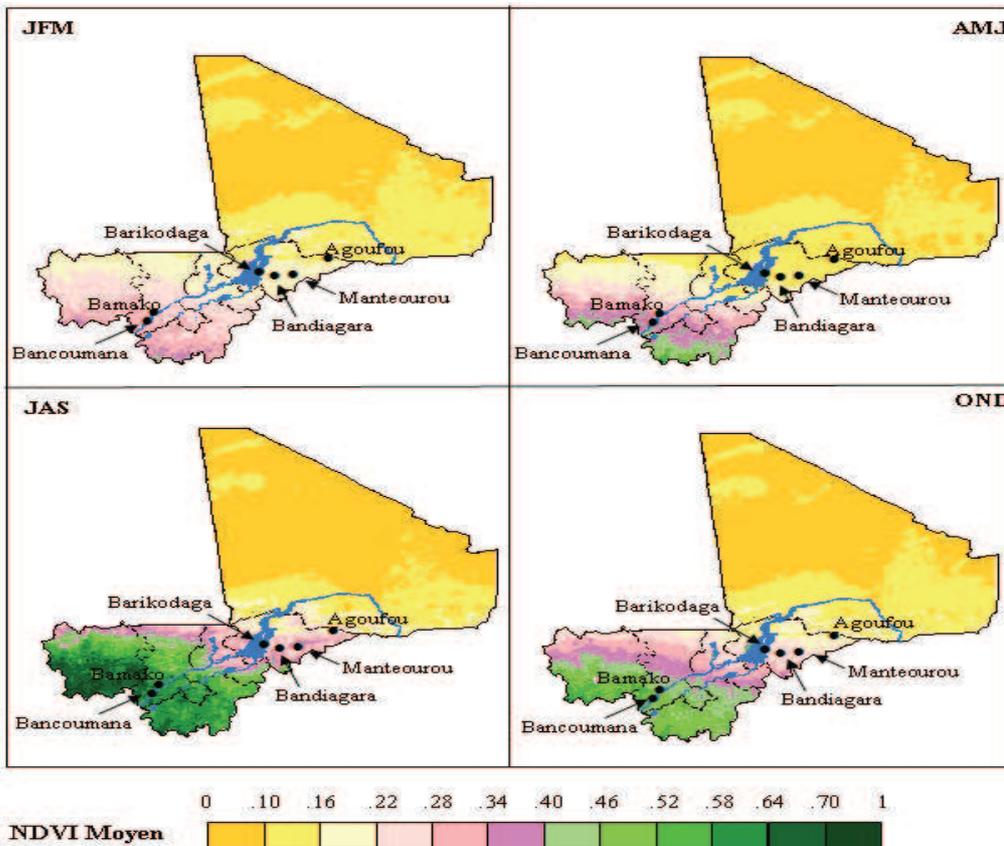
**b. Autres faciès bioclimatiques.**

**Cartographie des différentes strates de végétation (NDVI).** Nous l'avons réalisée à partir d'images NOAA prises à différentes saisons, et réceptionnées fin décembre 2007<sup>3</sup>. L'indice de végétation normalisé (Normalized Difference Vegetation Index), a été calculé à partir des combinaisons des bandes spectrales. La faible résolution spatiale des images NOAA (1 km) est compensée par un large champ d'observation et une haute résolution temporelle (répétitivité journalière). Les données étaient composites avec une résolution temporelle de 15 jours. Elles ont été rééchantillonnées à la résolution spatiale de 8km. Après avoir vérifié la qualité des données nous avons calculés les moyennes intra et inter annuelles. Le NDVI moyen, présenté sur la figure 12, a été calculé sur une période de 26 ans pour les quatre trimestres de l'année. Les NDVI les plus élevées sont observées durant la saison des pluies (Juin Août Septembre - JAS) et les moins élevés

---

<sup>3</sup> - Les capteurs NOAA ne mesurent pas le stade phénologique des végétaux mais donnent une mesure de réflectance. Les données satellitaires utilisées ont été fournies par le groupe Global Inventory Monitoring and Modelling Studies (GIMMS) de la National Aeronautics and Space Administration/Goddard Space Flight Center (NASA/GSFC). Elles ont été obtenues à partir des données LAC (Local Area Coverage) collectées quotidiennement par les capteurs AVHRR des satellites NOAA-7, 9, 11,14, 16 et 17.

durant la saison sèche (Janvier Février Mars - JFM). Nous distinguons au Nord du Mali, la région la plus désertique avec des valeurs de NDVI inférieures à 0.1 tout au long de l'année. Ensuite vient une zone de transition avec des valeurs maximales de NDVI de 0.40. Au Sud les valeurs de NDVI plus élevées correspondent aux régions de savanes arborées et aux mosaïques de forêts claires. Du Nord désertique au Sud humide relativement bien arrosé, on peut noter une augmentation (du jaune au vert) de l'indice de NDVI représentant la végétation. L'indice de NDVI varie de 0 (végétation est faible) à 1 (végétation importante).



**Figure 12** : NDVI moyen calculé pour les 4 trimestres sur une période de 26 ans de 1982-2006. (Gaudart et al., 2009)

**Sites d'études complémentaires.** Deux faciès proches de la Région de Mopti (sahélien inondé et seeno) ; et deux faciès éloignés (aride et guinéen) ont été intégrés au protocole d'étude. Nous avons, dans cadre, réalisé des observations à grande échelle du contexte bioclimatique de production des anophèles au Mali.

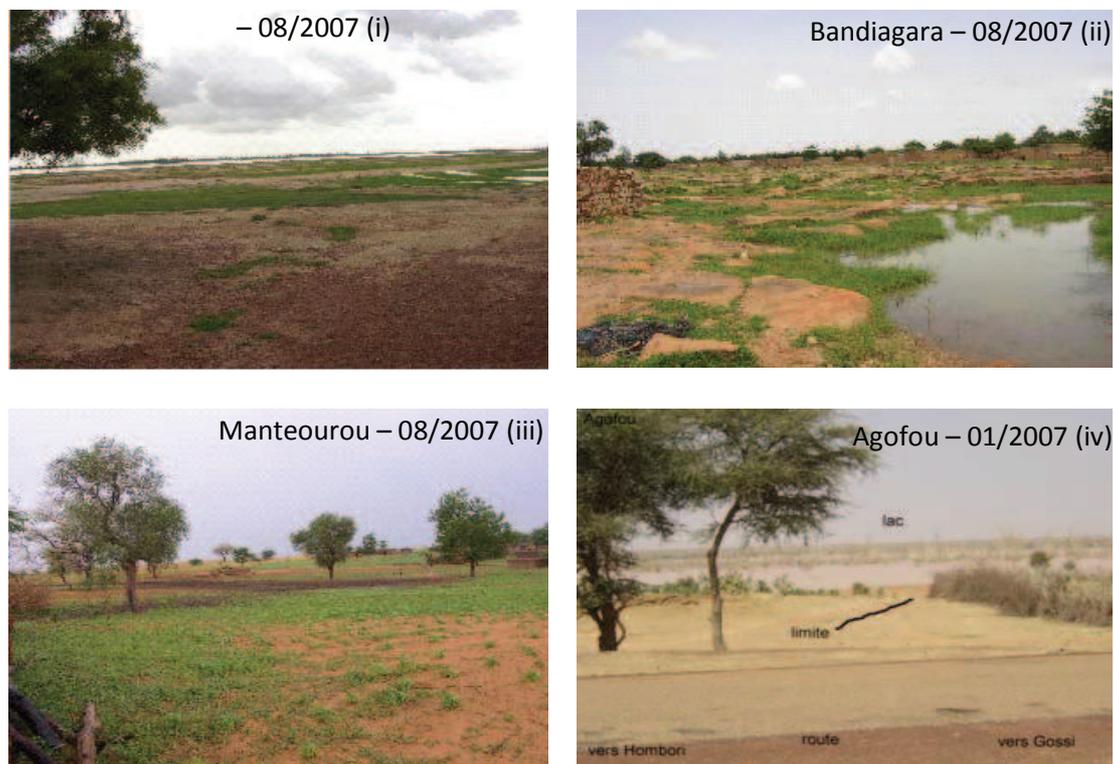
**Tableau 7.** Présentation des cinq sites d'étude

Régions administratives	Villages	Strates observées	Distance Bamako	Position géographique
Mopti	Barikodaga	Faciès inondé Delta Riziculture	665	14°29'00N 4°11'00W
	Bandiagara	Faciès exondé Plateau Dogon (roc)	750	14°20'40N 3°36'19W
	Mantéourou	Faciès seeno Terre sablonneuse	900	14°26'05N 3°02'00W
Tombouctou	Agofou	Faciès aride (sable) Présence d'un mini lac	875	18°54'00N 3°31'50W
Koulikoro	Bankoumana	Faciès guinéen Humide	60	12°20'N 8°20'W

**Barikodaga : faciès sahélien inondé du Delta (Mopti).** Inondée une partie de l'année, le delta intérieur du fleuve Niger (DIN) a été classé comme "Zone Humide d'importance Internationale". Il serait la plus grande zone humide de l'Afrique de l'ouest, une oasis dans le sahel. En période de crue, le delta du Niger apparaît comme une véritable mer interne. A la décrue, il s'agit plutôt d'un ensemble de plaines et de cuvettes. Le Delta porte des pâturages appelés *burgu* en peul, terme par lequel l'ensemble de cette zone géographique est aussi désigné. L'hivernage dure 4 à 6 mois. Les activités économiques sont dominées par la riziculture, l'élevage, la pêche et le petit commerce. Pendant la période de décrue, la population pratique la pêche et l'élevage. La spécificité locale réside dans le fait que l'eau souterraine est très profonde.

**Mantéourou : faciès sahélien sableux (Seenno Mopti).** Le *Seenno* (sable = étendu sablonneuse = dune) est une plaine de terres sablonneuses d'où il tire son nom en peulh. Il couvre les cercles de Douentza, Koro, Bankass et une partie du cercle de Bandiagara. La plaine du *Seenno* est surplombée à l'Ouest par la falaise de Bandiagara, à l'est par le massif de Hombori, au nord par le massif de Gandiama (tous à environ 1000m d'altitude) et dans sa partie nord par quelques escarpements rocheux comme à Boni. L'assèchement des eaux de surface est rapide dans la plaine du *Seenno* : dès décembre, elles sont presque toutes asséchées. La zone est subdivisée en langue peulh en *Seenno* et *Hayre*. Pour que le nom *Seenno* devienne un toponyme, il faut qu'un déterminant lui soit joint comme dans *Seenno mango*, qui désigne une vaste étendue sablonneuse (*mango* = grand). La culture du petit mil prédomine sur le *Seenno* et sur les poches arables de *hayre*.

**Agofou : faciès sahélien du Nord (Hombori-Gourma).** Plus on avance du sud vers les régions Nord, plus les pluies sont rares. La période de crue est décalée au nord par rapport à celle des régions sud du Mali et en avance sur celle du Niger. En dehors des précipitations, la crue s'observe à partir de septembre et en octobre novembre et décembre, les eaux montent jusqu'aux abords des villages riverains et entraînent la multiplication des gîtes larvaires de moustiques. Le village d'Agofou (Gourma malien) est situé à environ 30 km de Hombori en bordure d'un grand lac permanent. L'environnement est similaire à celui de Mantéourou, quoique plus sec. Trois peuples sont présents, les Sonrhaïs, sédentaires, les Peuls et les Tamasheks, nomades. Agofou est habité en permanence par environ 6 familles Sonrhaïs. Les concessions des familles sédentaires et les points caractéristiques du village ont été repérés par GPS.



**Figure 13:** Sites d'observations retenus en début de saison des pluies: (i) Strate inondée (Mopti-Barikodaga) ; (ii) Strate exondée (Mopti-Bandiagara) ; (iii) Strate seeno (Mopti-Mantéourou); (iv) Strate aride (Tombouctou - Agofou) (où la saison des pluies a été retardée en 2007).

**Bancoumana : faciès guinéen humide du Sud (Bamako).** Situé à 60 km au Sud de Bamako, Bancoumana relève de la région de Koulikoro, en zone de savane soudanienne. La végétation y est plus abondante que dans les autres strates étudiées.

La plupart des concessions et les points caractéristiques du village ont été repérés par GPS, et ainsi que le contour des macro-gîtes.

## **2.2. La collecte des données historiques d'études de la transmission du paludisme au Mali**

Parallèlement aux données d'observations environnementales à large échelle (cf. faciès de transmission), des données historiques du Mali sont utilisées pour faire ressortir l'impact global des paramètres climatiques et environnementaux sur la distribution, l'abondance et la compétence des vecteurs du paludisme au Mali. Ces données ont été collectées à partir d'articles scientifiques, de mémoires de thèses, de rapports et de mémoires de fin d'étude réalisées au Mali. Nous avons retenu quatre variables entomologiques clés à savoir : (i) la composition vectorielle ; (ii) l'agressivité par rapport à l'homme ; (iii) l'infectivité des moustiques et (iv) le taux d'inoculation entomologique, principale variable de la transmission (cf. pages 130).

Au total 152 classes de données entomologiques ont été retenus pour constituer la base des données historiques. Ces études réalisées de 1988 à 2007 couvrent presque tous les faciès éco géographiques du Mali, 38 localités étaient représentées dans la base de données. Les données recueillies ont été compilées grâce à la statistique selon leur appartenance aux trois saisons climatiques du Mali : 1) la saison chaude de mars à mai ; 2) la saison froide de novembre à février ; et 3) la saison pluvieuse de mai à octobre, puis, selon les faciès (inondé ou exondé).

## **2.3. Enquêtes entomologiques (5 sites d'étude)**

Sur l'ensemble des cinq sites d'études, les variables paludométriques comme la fréquence/agressivité des vecteurs, le taux d'infection au *Plasmodium* (TI) et le taux d'inoculation entomologique (TIE) ont été évaluées en différentes périodes de l'année, en même temps que l'observation des gîtes larvaires de d'anophèles. Pour mieux appréhender la dynamique de la transmission par rapport aux variations environnementales le même protocole était appliqué parallèlement dans les strates en multipliant la mesure des variables de la transmission.

**a. Matériel d'étude.** *Anophèles gambiae sensu lato* et *Anophèles funestus* sont les principaux vecteurs rencontrés au Mali. La pluviométrie est globalement faible au Mali (200 à 1300mm) avec des périodes de sécheresse très variées. Les activités agricoles s'étendent sur cinq mois dans le sud, sur trois mois dans le nord et sur deux mois dans le Sahara. Du point de vue variations saisonnières des membres du complexe *An. gambiae*, *An. arabiansis* et la forme Mopti prédominent avant et après la saison des pluies tandis que les formes Bamako et Savane dominent pendant la saison des pluies.

**b. Méthode de collecte des moustiques : landing catch.** Deux méthodes classiques de captures des moustiques sont usuelles au Mali pour l'échantillonnage des vecteurs selon les objectifs du projet: les captures sur sujets humains volontaires et la méthode de collecte au repos dans les habitations humaines. La première méthode de captures, le *landing catch* permet de mesurer le contact homme-vecteur (rythme d'agression) et la seconde, le *spray catch* permet de déterminer les comportements de repos des vecteurs et leurs préférences trophiques. Nous avons choisi le *landing catch* du fait qu'il répondait mieux à notre objectif de diffusion des moustiques.

**c. Mode opératoire.** Le matériel de captures est constitué de : torches, caisses de captures, gobelets en carton, coton, coupons de tulle moustiquaire, bracelets élastiques, serpillières, aspirateur à bouche, montres. Le captureur est assis sur une chaise, munie d'une torche électrique et d'un aspirateur à bouche. Il retrousse ses pantalons jusqu'aux genoux et libère les jambes nues. A la lumière de la torche, il prend tout moustique en quête de repas sanguin venant se poser sur ses jambes. Les captures seront effectuées de la tombée du soleil à 18H du soir à 06H du lendemain matin. Les superviseurs rassembleront à minuit, les moustiques capturés de 18H à 00H,



**Figure 14.** Méthode de collecte des moustiques : matériel, mode opératoire et tri des captures

puis à 06H, les captures de 00H à 06H, et les conditionneront dans des caisses de capture étiquetées. Pour plus d'efficacité, l'équipe de captures installée à 18 heures sera remplacée à minuit par une seconde équipe. Le matin, tous les moustiques sont collectés, identifiés et répartis en espèces d'abord, puis en vecteurs et en non vecteurs avant de conserver les vecteurs du paludisme dans le "fixateur de Carnoy"(mélange d'une partie d'acide acétique glaciale pour trois parties d'alcool éthylique ou méthanol) pour les examens de laboratoire. On a l'information strate de captures, date de captures, période de captures, poste de captures, colonne de capture, tranches horaires, village.

**d. Examens du laboratoire.** On procède ensuite à un tri des vecteurs du paludisme et calcul des paramètres de transmission. *An. gambiae s. l* et *An. funestus* sont séparés à l'œil nu sur le terrain pour l'étiquetage et la conservation. Puis au laboratoire, *An. gambiae s.s* et *An. arabiensis* sont séparés par la méthode de biologie moléculaire. Un inventaire des trois espèces était fait par strate et dans la durée d'étude. On a l'information présence/absence, abondance/faible présence des espèces capturées par période, saison, strate etc... La détermination du taux d'infection des moustiques capturés a été faite par ELISA. Cette méthode immuno enzymatique explore des antigènes solubles présents dans le thorax du moustique. L'Indice d'antigène Sporozoïtique indique le pourcentage d'anophèles femelles ayant révélé des antigènes du circum sporozoïte sur l'ensemble testé avec un anticorps monoclonal dirigé contre le *Plasmodium*.

#### 2.4. Monitoring environnemental et climatique (3 sites d'études)

La variabilité de l'effet climatique sur la production d'anophèles a été étudiée sur trois sites d'études de la Région de Mopti appartenant au faciès sahélien. Chaque site sentinelle est défini par le couvert végétal, la nature du sol, l'occupation en eau, l'habitat humain. Les éléments suivants font l'objet de suivi à l'occasion des passages des équipes d'entomologistes.

**a. Stratification topographique du village.** Dans chaque village sentinelle, l'équipe procédait à une division topographique du territoire en secteurs d'étude pour une représentativité géographique des sites de collecte des moustiques. L'aire des secteurs

était comparable dans le village et entre les villages sentinelles. Proportionnellement à la taille du village, quatre points de captures ont été choisis à Mantéourou, 5 à Bandiagara et 3 à Baricodaga. Chaque site de captures portait un numéro d'identification et pouvait être répertorié par le nom du chef de famille. Les enquêtes entomologiques étaient ainsi menées dans les localités du village au niveau des points ciblés et géo référencés par GPS simple. On pouvait ressortir une variabilité spatiale des densités de vecteurs au niveau du village grâce à cette stratification.

**b. Localisation des éléments de l'environnement.** Deux types de GPS (Global Positioning System) ont été utilisés dans notre étude: le GPS simple et le GPS différentielle. Une visite préalable de terrain a été organisée en janvier 2007 pour observer toutes les localités et confins des sites sentinelles. Les limites périphériques des villages sentinelles et les concessions humaines ont été géoréférencées par GPS simple. Les points sensibles comme les routes, les écoles, les dispensaires, les cours d'eau, les points d'eau durables, les poches de terrain susceptibles d'être des gîtes de ponte des moustiques et les grands arbres ont été localisés par GPS. Une prise de photos numériques était souvent faite pour appuyer certaines observations. Les endroits nus où aucune végétation ne pousse ont été répertoriés par GPS simple avec le plus souvent des photos à l'appui pour caller les images satellitaires par village d'étude. Le deuxième passage au début de la saison pluvieuse nous a permis d'identifier les premiers gîtes formés, de les localiser par GPS simple et par GPS différentiel et de les classer. Ces gîtes sont de nature les plus durables parce que les derniers à tarir. Nous avons procédé au positionnement géographique, par le GPS différentiel, des concessions du village, à la localisation de la mosquée, l'école, l'église et les puits. Les sites de capture des moustiques ont été localisés par GPS simple et par GPS différentiel. L'ensemble des informations collectées ont été placées dans un système d'information géographique (SIG) de haute définition pour la cartographie des sites d'étude, afin de visualiser les réalités topographiques observées.

**c. Etude des gîtes larvaires d'anophèles** La productivité individuelle des gîtes larvaires et la dynamique vectorielle des anophèles sont observées respectivement au niveau des sites et dans les villages sentinelles. Le protocole d'étude des gîtes larvaires a été appliqué en deux phases :

**La phase-1** comprend l'identification et l'inventaire des structures de gîtes formés au niveau du site sentinelle. L'objectif de cette partie d'étude est de faire le lien entre la structure des gîtes larvaires et l'abondance des adultes d'anophèles par rapport aux paramètres climatiques. Cette phase comprends : (i) *Recherche et identification des larves d'anophèles dans les collections d'eaux de surface* ; (ii) *Observations mini-hydrologiques directes des gîtes larvaires d'anophèle* ; (iii) *Identification des larves d'anophèles à l'œil nu sur critères morphologiques*. L'équipe procédait à des promenades scientifiques pour rechercher les gîtes d'Anophèles sur le site sentinelle (500m autour du village sentinelle), et pour identifier les collections d'eau appropriées et les poches de terrain susceptibles d'être des sites de ponte d'*A. gambiae*. Les structures de gîtes identifiées dans les strates distinctes reliées aux densités des adultes capturés par strate nous ont permis de conclure que la production abondante des anophèles n'est pas la seule faite de la pluviométrie même si l'eau est la seule source de production (Fane M. et al. 2007)<sup>4</sup>. D'où la nécessité d'approfondir l'étude, afin de découvrir des paramètres additionnels environnementaux pouvant expliquer les situations d'abondance. Ce qui fut l'objet de la seconde phase d'étude des gîtes larvaires, menée dans les mêmes strates.

**La phase-2** vise à relier la productivité individuelle aux caractéristiques environnementales des structures de gîte. Des variables environnementales comme la végétation (abondance ou absence), la turbidité (claire, trouble), la biomasse (abondance ou absence) devront ressortir sur les fiches de caractérisation en relation avec la surface de ponte du gîte (petite collection d'eau, flaque d'eau, mare, champs de riz, trou de rocher...), la profondeur et l'ensoleillement du gîte, la présence/absence et densité des larves d'anophèles dans le gîte. La distance des gîtes positifs par rapport aux dernières concessions du village, leurs coordonnées géographiques et leurs positions cardinales par rapport au village seraient notées. Les gîtes positifs seront caractérisés en comparaison aux gîtes négatifs pour ressortir les propriétés communes et les différences. A chaque gîte seront affiliés les caractéristiques bioécologiques qui lui sont propres quelque soit son statut (positif ou négatif).

---

<sup>4</sup> Présentation, Journées EPSP

**d. Mesures météorologiques.** Une fiche quotidienne de relevés météorologiques à été établit pour chaque site d'étude. Un opérateur chargé des relevés est installé dans chaque site en vue d'une prise quotidienne des données. A chaque heure, l'agent devra prendre les températures ambiantes externes au niveau de trois stations météo que l'équipe devra installer sur place. Ces renseignements portaient sur les paramètres météorologiques comme la date des dernières précipitations, la température extérieure et l'humidité dans l'air. Ces données étaient toujours notifiées sur les fiches de captures avant la collecte.

**e. Données complémentaires.** A chaque passage l'équipe a refait le contour de chaque village sentinelle pour **réévaluer** au moyen d'un GPS **l'étendu des villages**, et par déduction le niveau d'extension par les nouvelles constructions. Un inventaire des **types d'habitation** permet d'évaluer les proportions spécifiques par village. La détermination des densités de vecteurs par style d'habitat permettait de savoir s'il s'agit d'une prédisposition de type d'habitat à la circulation du vecteur ou une préférence quelconque du style de construction, ou encore une préférence trophique. **Les mouvements de populations sont appréciés par la réalisation d'un budget "espace-temps"**. Le mode opératoire suivant a été utilisé : Prendre le village, déterminer le nombre d'immigrants qui arrivent dans l'année, ou le moi, ou la semaine, connaître l'activité qui occupe chaque migrant quand ils arrivent dans le village, connaître la provenance de chaque migrant, les dates d'arriver et de son départ du village. Une brève description du **couvert végétal** est réalisée à chaque passage de l'équipe d'entomologistes. L'étude des relations entre la dynamique vectorielle et l'état de la végétation (indices de végétations) est déterminante, car les stades de développement du couvert végétal induisent des niveaux de transmission donnés.

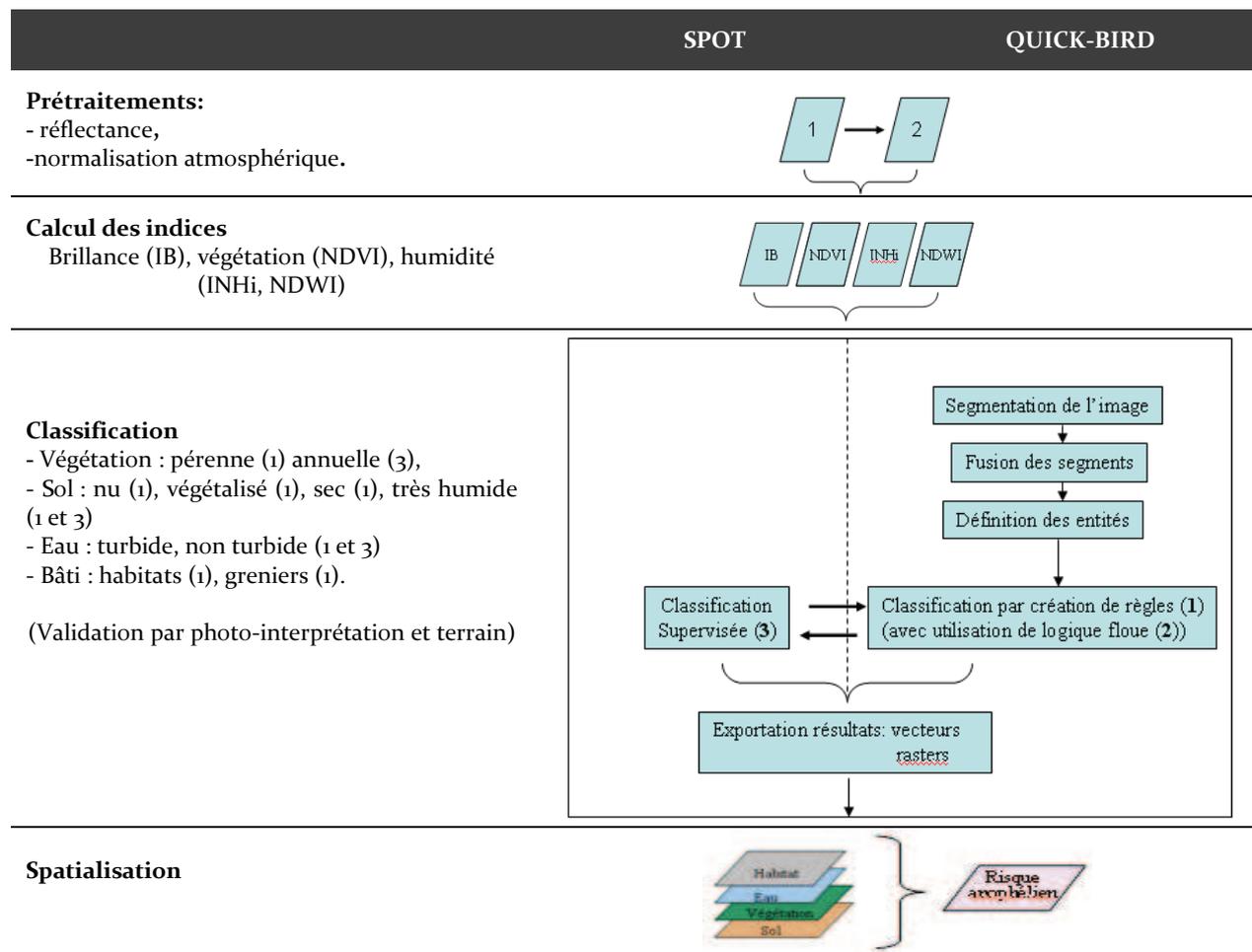
## 2.5. Analyse spatiale du site principal d'étude (Bandiagara)

A l'échelle locale, la haute résolution (SPOT5 et Quick-Bird) permet une classification fine de la végétation, du sol et du bâti. Le résultat est ensuite utilisé pour cartographier le risque anophélien dans un environnement donné. L'analyse de l'impact des gîtes larvaires sur le paludisme dans les populations a nécessité une cartographie de l'habitat humain et des zones permanentes ou temporaires propices à la prolifération vectorielle. Plusieurs images satellites de types SPOT (4 et 5) et QUICK BIRD ont été acquises entre 2006 et 2008 (Tableau. 7).

**Tableau 8:** Images spatiales acquises par le consortium ACCIES

Villages	Strates observées	Produit Spatial	Résolutions	Nombre de canaux	Dates
<b>Barikodaga</b>	<b>Faciès inondé</b> Delta Riziculture				
<b>Bandiagara</b>	<b>Faciès exondé</b> Plateau Dogon (roc)	SPOT5	2,5m	4	20/10/2006 ; 25/10/2007
		QUICKBIRD	60cm	1	21/10/2004
<b>Mantéourou</b>	<b>Faciès seeno</b> Terre sablonneuse	SPOT5	2,5m	4	25/10/2007
		QUICKBIRD	60cm	1	05/01/2008
<b>Agofou</b>	<b>Faciès aride (sable)</b> Présence d'un mini lac				
<b>Bankoumana</b>	<b>Faciès soudanien</b> Humide	SPOT3	20m		08/04/1996 ;
		SPOT4	20m		08/04/1996 06/12/1998 ; 26/11/1999

Deux prétraitements sont effectués : (1) la calibration radiométrique en radiance, et (2) ensuite en réflectance au sommet de l'atmosphère (FIG. 15). Cette première étape est très importante car elle va permettre par la suite de comparer les images à différentes dates et de différentes localisations. Une bibliographie a été établie sur les différents indices portant sur la brillance des sols, la végétation et l'humidité des sols. Nous en avons retenus 4. En ce qui concerne l'indice d'humidité des sols, lorsque nous disposons du canal MIR nous adaptons l'indice d'humidité normalisé développé par Clandillon *et al* en 1995, sinon nous travaillons avec l'indice de McFetters (1996). Deux types de classification ont été appliqués suivant les thèmes recherchés et les données satellitaires utilisées : la classification supervisée classique et une classification par segmentation d'images et définition de règles. Le risque de transmission a été calculé en prenant en compte le parcours théorique de l'anophèle et la distance des gîtes par rapport aux habitats humains.



**Figure. 15.** Procédure utilisée pour le traitement des données SPOT et QUICKBIRD (Gaudart et al., 2009)

### 3. Résultats.

Le traitement des images spatiales, nous a permis de classier : (i) les habitats aquatiques ; (ii) le bâti et la végétation du village de Bandiagara. Les résultats de ces traitements, ont été utilisés avec les résultats de notre enquête entomologique pour établir une carte du risque palustre sur le site de Biandiagara. Les résultats de l'enquête entomologique réalisée au sein des deux autres faciès de la strate de Mopti, nous ont permis d'analyser la variabilité de ce risque à l'échelle régionale.

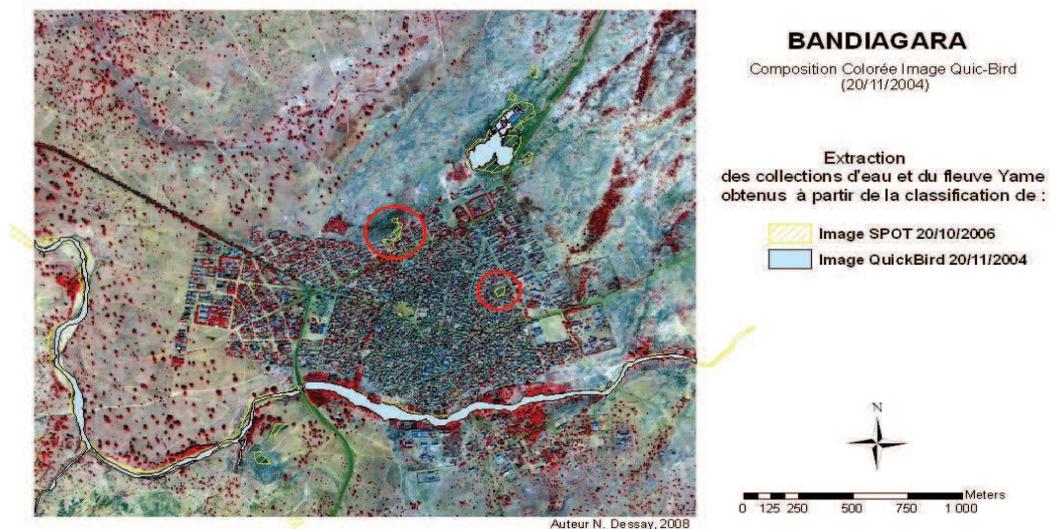
#### 3.1. Analyse du risque palustre à Bandiagara (faciès sahélien, Mopti)

Nous avons réalisé une cartographie du village d'étude à partir d'une classification des images spatiales prises en début de saison des pluies. Nous avons établis successivement : (i) une première carte en extrayant les contours des habitats aquatiques ; (ii) puis une seconde identifiant les habitations et le couvert végétal ; et (iii) une troisième relative au risque palustre à partir des deux précédentes. Le risque

palustre peut être défini à partir de plusieurs types de dangers : soit une transmission vectorielle; soit un épisode clinique de paludisme ou des cas de parasitémie. C'est le premier danger que nous avons retenu dans notre étude. Le risque a été évalué à partir des résultats d'une étude entomologique, couplant captures de moustiques et observations de gîtes dans chaque faciès d'étude. Nous avons observé simultanément sur les différents faciès : la dynamique des vecteurs du paludisme ; et le potentiel de productivité des gîtes larvaires lui-même contrôlé par des variables environnementales.

**a. Classification des habitats aquatiques.** Une première classification des images spatiales, nous permet d'identifier les contours des différents gîtes larvaires potentiels et du Yamé (FIG. 16). La présence au Nord Nord-Est (NNE) d'une grande briqueterie constitue une première zone d'habitats aquatiques comprenant plusieurs types de gîtes larvaires. Un premier type de gîtes larvaires est constitué, en saison sèche, par une grande mare très réticulée associée à 2 mares plus petites. Cet ensemble se remplit au cours de la saison des pluies pour ne former qu'un seul système. En plus de cette grande briqueterie, nous pouvons identifier deux importantes collections d'eau, localisées au nord et à l'est de la ville. En saison sèche, ces zones d'habitats larvaires disparaissent totalement, pour réapparaître en début de saison des pluies.

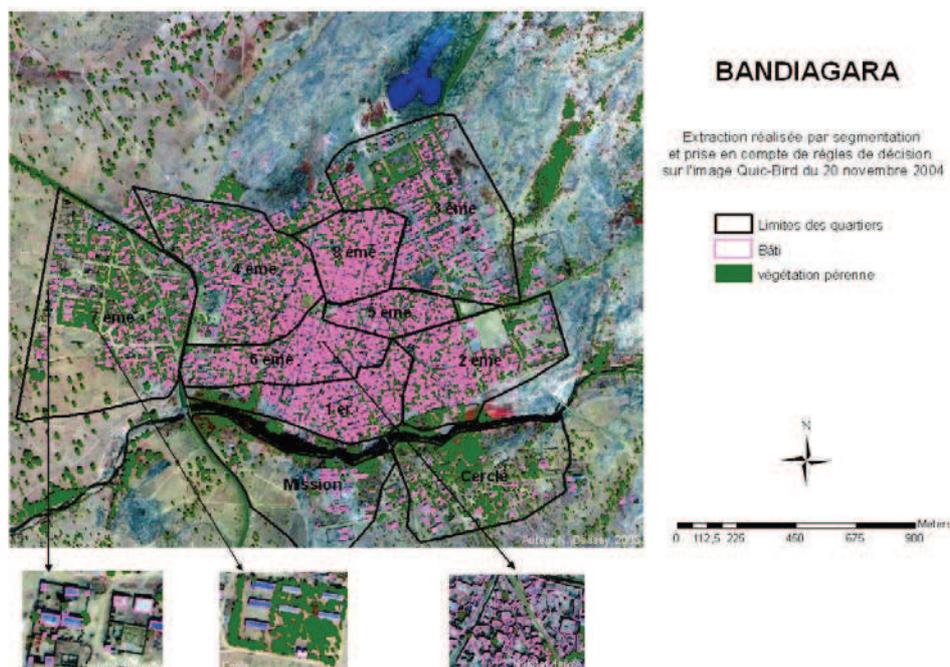
Autour de ces grandes mares, on peut observer, en saison sèche, un second type de gîtes larvaires constitués de trous asséchés de différentes tailles. Creusés naturellement dans la roche, ces trous se remplissent au début de la saison des pluies, et constituent petites collections qui se réchauffent rapidement. Ces gîtes, localisés dans un terrain rocheux sont d'excellents gîtes d'*An. gambiae*. Nous retrouvons également ce type de gîtes dans la zone ouest du village



**Figure 16.** Cartographie des collections d'eau à partir d'images SPOT du 20/10/2006 et QUICKBIRD du 20/11/2004. (Gaudart et al., 2009)

Les rives de la rivière Yamé constituent également une zone de gîtes potentiels de petites tailles abondants. En saison sèche, le Yamé se retire et forme 2 grosses mares accolées avec des trous à secs autours. En début de saison des pluies, les trous sont régulièrement mis en eau, par les pluies et les crues de la rivière, puis ils ne forment qu'un seul système. La nature du sol et l'élévation du plateau font que les gîtes larvaires se constituent difficilement. Le courant d'eau entraîne régulièrement la disparition des œufs et des larves. C'est en fin de saison des pluies que ces gîtes seront particulièrement actifs.

**b. Classification du bâti et de la végétation.** Après l'extraction des gîtes de production, nous avons ensuite classifié la végétation et l'habitat humain. L'espèce vectorielle principalement étudiée, *A. gambiae* est anthropophile et endophile. On peut voir (Fig. 17) que la végétation est assez rare en dehors de la bordure du Yamé et quasi absente dans les quartiers les plus peuplés (1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup>, 5<sup>ème</sup>, 6<sup>ème</sup> et 8<sup>ème</sup>). La végétation influe sur le vecteur en tant que sites potentiels de repos, elle conditionne ses déplacements. L'habitat implique la présence d'homme et d'animaux.



**Figure. 17.** Cartographie du bâti, et de la végétation, à partir de l'image QUICKBIRD prise le 21/11/2004. (Gaudart et al., 2009)

**c. Cartographie du risque palustre.** Sur 938 moustiques capturés en Août 2007 dans le village de Bandiagara, nous avons identifié : 61 (6,5 %) *An. gambiae* ; 859 (91,6 %) *Culex* et 18 (1,9 %) *Aedes*. Parmi les 61 *An. gambiae*, 39 (64 %) viennent du point de capture « Route de Mopti », 9 (14,7%) du point de capture « Mosqué Yamé», 6 (9,8 %) des points de capture « Briqueterie » et « CS Réf », et 1 (1,6 %) du point de capture « Central ». Les densités de larves des gîtes associés à ces points de capture (Nombre de larves d'anophèle par loucher de 120 ml) diminuaient parallèlement de la périphérie

vers le centre ville. Ces éléments nous permettent de calculer un risque de transmission palustre spatialisé. L'analyse géographique des résultats, révèle que les quartiers à risques sont majoritairement situés en bordure du Yamé (1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup>, 6<sup>ème</sup>, le quartier de la mission catholique et le cercle). Les quartiers de la partie Nord de la ville sont relativement les moins exposés (3<sup>ème</sup> quartier et SE du 7<sup>ème</sup> quartier) [Fig. 18]. Au total, le risque de transmission palustre était plus important à proximité des principaux gîtes de reproduction.

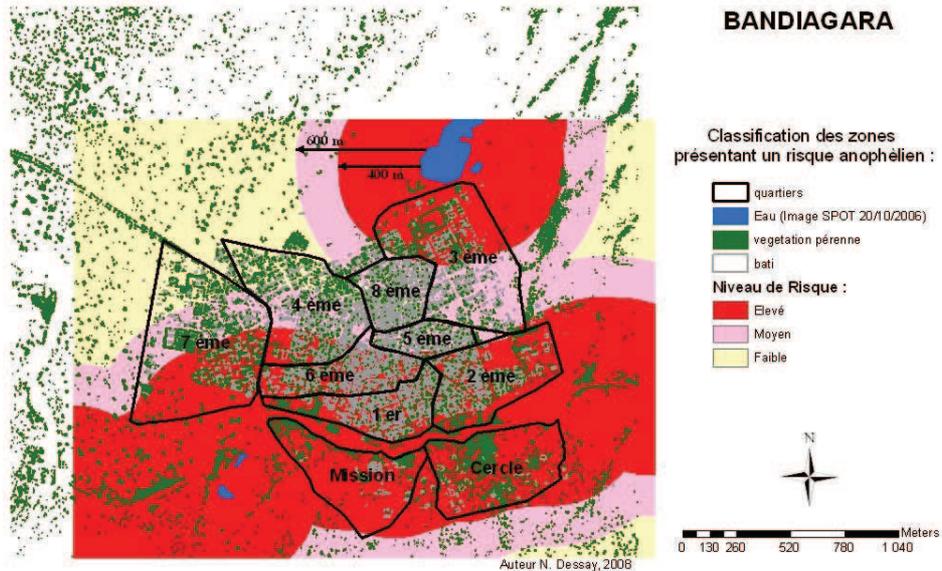


Figure. 18. Risque palustre calculé à partir de la distance aux gîtes larvaires. Deux limites ont été retenues, 400 et 600 mètres à partir de chaque zone, (Gaudart et al., 2009).

### 3.2. Variabilité du risque de transmission : transect sahélien de Mopti

Au total 1813 moustiques ont été collectés lors des captures réalisées au mois d’Août 2007 dans les 3 faciès dans la région de Mopti. La distribution des différentes espèces est la suivante : 35,2% d’*A. gambiae s. l* ; 4% d’*A. funestus* ; 57,1 % de *Culex* ; 3,7% d’*Aedes*.

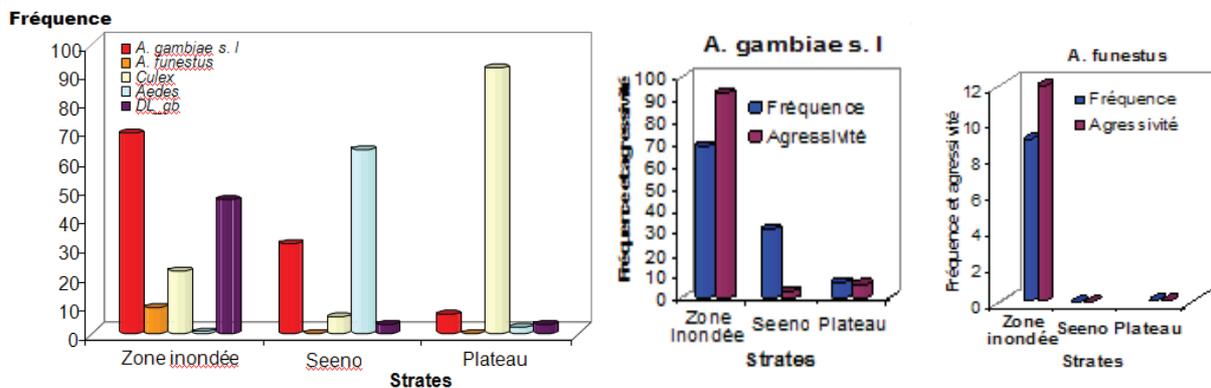


Figure 19. Fréquence et agressivité des vecteurs du paludisme par faciès (transect de Mopti).

Cette distribution varie beaucoup en fonction des strates : 6,5 % d'*A. gambiae s. l* dans la zone rocheuse du Plateau Dogon ; 31,0 % dans la zone sablonneuse du Seeno ; 69,0 % dans la zone inondée du delta avec apparition d'*A. funestus* à 9%, soit, 78,0 % (Figure 18). La distribution des agressivités d'anophèles selon les strates est encore plus marquée : 6% d'*A. gambiae s. l* dans la zone rocheuse du Plateau Dogon ; 3% d'*A. gambiae s. l* dans la zone sablonneuse du Seeno ; 93% d'*A. gambiae s. l*, soit 105 PHN (en incluant les 12% d'*A. funestus*) dans la zone inondée du delta.

L'abondance des anophèles adultes est liée en grande partie à la densité de présence, mais, surtout à la structure des gîtes larvaires, voir l'étendue des surfaces de ponte et donc aux faciès considérés. La densité larvaire des gîtes fonctionnels de la zone inondée du delta (46 larves par dipping) est 5 fois supérieure à celle des gîtes de la zone sablonneuse du Seeno (9 larves par dipping)<sup>5</sup> et 15 fois supérieure à celle des gîtes du plateau Dogon (3 larves par dipping).

**Tableau 9.** Dynamique de la productivité larvaire d'anophèles dans les strates prospectées.

Strates	Delta inondée	Plateau Dogon	Seeno sablonneux	Savane guinéenne	Désert saharien
Densité moyenne de larves par dipping*	46	3	9	8	0
%	89,7	4,5	13,6	12,1	0

\* Nombre de larves d'anophèles par loucher de 120 ml

### 3.3. Caractéristiques écologiques de la productivité individuelle des sites de ponte d'anophèles

Notre enquête nous a permis de faire des liens entre la structure des gîtes larvaires d'anophèles et la productivité des adultes (Tableau 9). Les gîtes d'anophèle reflètent fidèlement le relief, la nature du sol et les modes d'activités humaines en cours dans le milieu. Différents types de gîtes ont été identifiées dans les strates observées : les grandes mares pérennes naturelles et de briqueteries, petites mares temporaires, mares de rétraction d'eau du fleuve, les petites collections d'eau ensoleillées, les trous de rocher et d'extraction de banco, les mares de bas-fonds inter dunaires, les flaques résiduelles sur les traces d'écoulement d'eau de pluies, les champs de riz et les canaux d'irrigation.

<sup>5</sup> Elle est 6 fois supérieure à la densité larvaire des gîtes en savane guinéenne (8 larves par dipping).

Ces gîtes peuvent être classés en sept structures micro hydrologiques distinctes selon leur: (i) origine (source); (ii) stabilité (durée en eau); (iii) leur strate de rattachement; (iv) et la nature de leur sol (Tableau 9). Ainsi, les poches d'extraction ont toutes une origine humaine, mais des stabilités différentes, ce qui justifie une classification en 3 types de structure différentes: *grandes mares* pérennes de briqueteries; *petites mares* temporaires; et *trous* d'extraction de banco). Par ailleurs, la formation des gîtes larvaires d'anophèle est, en grande partie, liée à la nature des sols. Ainsi, les briqueteries peuvent être, selon la nature des sols, des habitats aquatiques pérennes (sol rocheux du Plateau Dogon) ou temporaires (sol argileux du Seeno).

**Tableau 10.** Structure et productivité des gîtes d'anophèles au début de la saison des pluies.

Structures	Origine des gîtes	Stabilité	Strate	Sol	Productivité*
Mares pérennes	Relief	Pérennes	Sahara	Sableux	0
Mare de bas-fond dunaire	Relief	Temporaire	Seeno	Sableux	3
Petites col. d'eau ensoleillées	Cour d'eau	Temporaire	Plateau	Rocheux	2
Trous de rocher	Cour d'eau	Temporaire	Plateau	Rocheux	1
Flaques résiduelles de pluies	Pluies	Temporaire	Plateau	Rocheux	3
Briqueterie	Humain	Pérenne Temporaire	Plateau Seeno	Rocheux Argilo sableux	6 15
Puits de briqueterie	Humaine	Pérenne	S. guinéen	Argileux	8
Champs de riz	Humain, agriculture	Pérennes	Inondé	Argileux	67
Canaux d'irrigation	Humain	Pérennes	Inondé	Argileux	25

\* = Nombre de larves d'anophèles par loucher de 120ml

Globalement, ces **structures mico-hydrologiques** peuvent avoir des comportements très différents selon les states auxquelles elles sont rattachées (Tableau 9). A Bandiaraga, le sol rocailleux du plateau Dogon, permet difficilement l'écoulement des eaux de pluie, qui stagnent dans les grandes dépressions qui entourent la ville et aux abords de la rivière du Yamé. A Barikodaga, en zone inondée du delta, ou à Bancoumana, en zone guinéenne, au contraire les eaux stagnent à la surface du sol en toute saison et le paludisme est transmis de façon continue. A l'inverse, à Mantéourou, dans le Seeno, ou à Agofou, dans le Sahara, les sols sablonneux permettent une infiltration importante des eaux de pluie, ce qui conduit à un tarissement très rapide des gîtes, notamment des mares stagnantes des bas-fonds inter dunaires. A l'intérieur d'une strate donnée, chaque site d'étude correspond à une unité écologique (biotope) définie par un index de végétation, un sol, une population et son habitat, la

pluviométrie, la température, l'humidité et l'occupation du sol et le profil. Chaque unité écologique représentait un faciès de transmission (figure 20). L'étude à large échelle devra nous permettre de relier de façon globale la transmission aux autres paramètres de définition des faciès, afin de ressortir le risque des facteurs climatiques et environnementaux globaux.

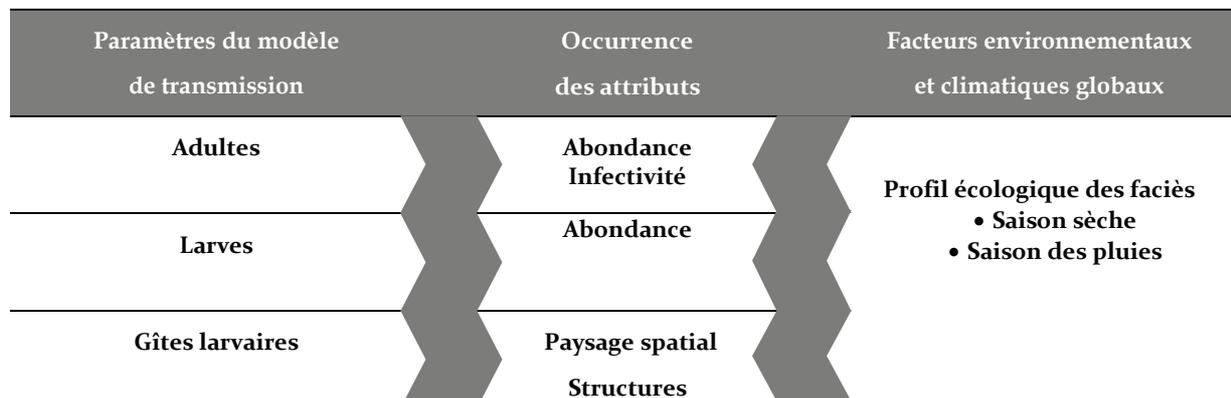


Figure 20. Légende.

Au premier passage de l'équipe en janvier 2007 l'index des pluies était nul (=0) dans les faciès visités c'est-à-dire qu'il ne pleuvait nulle part.

Tableau 11. Structure des gîtes larvaires d'anophèles en saison sèche

Profil écologique des strates	Gîtes de saison sèche
<b>Bandiagara</b> - Zone exondée du Plateau Dogon (Mopti)	
Aucune piqûre de moustique pendant la nuit. De même que les adultes, les larves d'anophèles étaient pratiquement indétectables. A part une larve prise au bord du Yamé, aucune autre forme immature d'anophèle n'a été observée dans ces eaux.	

La végétation était globalement dégradée sauf aux abords des cours d'eau exploités par les femmes pour la culture d'oignon. Les quelques arbustes étaient en voie de perdre leurs feuilles. L'eau s'était complètement retirée dans ses cours laissant un sol. La température et l'humidité étaient pratiquement modérées jusqu'à la deuxième moitié de la nuit où le froid se faisait sentir.

Sur le plateau, les trous de dimensions multiples formés

dans l'affleurement massif de rocheux étaient des sites susceptibles d'être des gîtes de ponte d'anophèles au lit de la rivière du Yamé. Les mares pérennes qui peuvent servir de lieu de ponte se résument à deux grandes briqueteries au Nord et à l'entrée de la ville de Bandiagara. Les autres grandes mares d'extraction du banco étaient polluées par les immondices du village, et colonisées par le genre culex.

---

**Mantéourou** - Zone sablonneuse du Seeno (Mopti)

---

Plus de moustiques et des points de gîtes qui sont pratiquement en poussière. Cependant, quelques larves d'*Aedes* sont visibles dans les eaux conservées des canaris et des abreuvoirs d'animaux fixées aux abords des grands puits du village.



Les épineux gardaient leurs feuilles qui résistent mieux à la dessiccation. La température et l'humidité ne différaient pas pratiquement.<sup>6</sup>

---

**Barikodaga** - Zone inondée du Delta (Mopti)

---

Notre enquête au près de la population révèle que les moustiques pullulent dans le village à tout moment, même si on observe une petite diminution de densité en saison sèche. Les larves d'anophèles sont visibles dans des petites canalisations et les eaux accumulées dans les vieux cassiers rizicoles. On peut même prendre parfois 5 larves par dipping dans une collection d'eau. Lorsque l'étendu d'eaux est vaste, les larves d'*An. funestus* pouvaient cohabiter avec celles d'*An. gambiae* dans le casier.



Plaine rizicole après la moisson du riz (saison sèche). Véritables mares intarissables dans la plaine servant de gîtes larvaires d'anophèles. Le paysage est dominé par les herbacées qui couvre totalement le sol. Les arbres sont en général plantés au bord des digues et des routes.

Les flaques d'eaux traînantes forment d'importantes surfaces de ponte appropriées pour les anophèles. Les larves d'*A. funestus* se collaient rapidement aux racines pourrissantes des vieilles tiges de riz.

---

Au second passage de l'équipe en juillet août 2007, début de saison pluvieuse dans la région, les situations avaient visiblement changé alors que l'hivernage tardait à s'installer. La végétation avait commencé à renaître surtout sur le sol rocailleux de Bandiagara et Matéourou, et même à Baricodaga où la nouvelle verdure réapparaissait. Nous avons commencé l'application de notre protocole des gîtes et procédé à des captures de moustiques dans les villages sentinelles des faciès.

---

<sup>6</sup> Les larves d'*Aedes* pondaient surtout dans les eaux conservées des canaris et des abreuvoirs d'animaux aux abords des grands puits.

**Tableau 12. Paysage écologique, structure et productivité individuelle des gîtes larvaires et abondance des adultes d'anophèles en Août 2007 (début de saison des pluies)**

**Profil écologique des faciès** **Captures & Gîtes de saison des pluies**

**Bandiagara - Zone exondée du Plateau Dogon (Mopti)**



Genres	Captures		Gîtes larvaires	
	N0	p.cent	Structures	Productivité*
<i>A. gambiae s. l</i>	61	6,50	Petites collections. d'eau	2
<i>A. funestus</i>	0	0	Trous de rocher	1
<i>Culex</i>	859	91,60	Flaques d'eau de pluies	3
<i>Aedes</i>	18	1,90	Briqueterie	6
<i>Total des espèces</i>	938	100	Moyenne	3 laves/dip

Les trois genres de moustiques ont été rencontrés à Bandiagara mais, avec une forte prédominance du genre *Culex*. La population vectorielle faiblement représentée par *A. gambiae s. l* était à son tour plus forte que le genre *Aedes*. Les larves d'anophèles sont observées dès le début de la saison des pluies sur les rives du Yamé et dans certaines briqueteries. Des femelles pouvaient aussi pondre dans les flaques d'eau traînantes dans certaines rues de la ville. Il ne pleuvait pas pratiquement dans la région pendant notre passage mai, une fois que les premières pluies de la saison tombent, les eaux stagnent dans les entrailles des rochers sans infiltration. Les trous de rocher se remplissent d'eau dès l'arrivée des pluies et constituent des gîtes potentiels d'anophèles. **Une particularité importante de ce site rocheux de Bandiagara est que l'on ne trouvait jamais de fortes densités de larves d'anophèles dans les gîtes.**

**Mantéourou - Zone sablonneuse du Seenou (Mopti)**



Genres	Captures		Gîtes larvaires	
	N0	p.cent	Structures	Productivité*
<i>A. gambiae s. l</i>	22	31	Mare au bas-fond inter dunaire	3
<i>A. funestus</i>	0		Briqueterie	15
<i>Culex</i>	4	6		
<i>Aedes</i>	45	63		
<i>Total des espèces</i>	71	100	Moyenne	9 laves/dip

Les trois genres de moustiques ont été aussi rencontrés à Mantéourou mais, cette fois-ci avec une nette prédominance du genre *Aedes*. La population vectorielle représentée par *A. gambiae s. l* était relativement plus forte qu'à Bandiagara mais l'effectif était très faible dans l'ensemble. Les densités de larves étaient très élevées dans les petites mares d'extraction de banco dans un champ de mil. Des collections d'eau très trouble ; forte densité de larves au stade 3-4 de Christophers. Terres de labours assurant le remblayage progressif du gîte en période pluvieuse. Densités larvaires assez faibles dans les mares inter dunaires qui s'asséchaient vite. Il ne pleuvait pas aussi à Mantéourou comme à Bandiagara. **La particularité qu'on pouvait retenir de ce site sablonneux est que les gîtes d'anophèles se faisaient de plus en plus rares par l'infiltration rapide des eaux de surface dans le sol.**

**Baricodaga - Zone inondée du Delta (Mopti)**



Captures			Gîtes larvaires	
Genres	No	p.cent	Structures	Productivité*
<i>A. gambiae s. l</i>	555	69	Champs de riz	67
<i>A. funestus</i>	72	9	Canaux d'irrigation	25
<i>Culex</i>	173	21,50	Moyenne	46 laves/dip
<i>Aedes</i>	4	1,50		
<b>Total des espèces</b>	<b>804</b>	<b>100</b>		

Plan de labour dans la plaine de riziculture au début de la saison des pluies. A Baricodaga, la population d'anophèles était plus abondante qu'à Bandiagara et Mantéourou. *A. funestus* a été particulièrement rencontré dans ce site et en nombre plus élevé que *A. gambiae s. l.* à Mantéourou et Bandiagara. De même, les densités de larves d'anophèles étaient plus élevées qu'à Mantéourou et à Bandiagara. Sur l'étendue de la plaine de Baricodaga, on observait des fortes densités de larves dans les flaques d'eaux traînantes, les canaux d'irrigation et les cassiers rizicoles. Il n'y avait pas de pluies pendant notre passage. **La particularité du site de Baricodaga était la disponibilité des gîtes appropriés de ponte d'anophèles en toute saison.**

\* *Densité de larves par louchet de 120ml* ; N0 = nombre de moustiques ; % = pourcentage du genre

### 3.4. Données historiques de la transmission du paludisme au Mali

Ces d'études réalisées pour la plupart par le MRTC montrent globalement une nette prédominance d'*A. gambiae s. l* (94,79%) sur *A. funestus* (5,96%) en toute saison, sans distinction de zone (zone inondée, zone exondée) (tableau 12). Le nombre de piqûres que la seule espèce *gambiae s. l* inflige à la population malienne est en moyenne 1495 piqûres par personne et par mois ; avec un taux d'infection global de 3,52%. Le risque de transmission liée à cette forte pression de piqûres est dans l'ordre de 5,58 piqûres infectantes par personne et par mois.

**Tableau 13** : Variables entomologiques de la transmission en zones inondée et exondée selon les trois saisons climatiques de l'année au Mali (*A. gambiae*).

Variables	Densité/habitat (MPC)	Fréquence agressive (PHM)	Infectivité (%)	Risque d'infection (PIHM)
<b>Zone exondée</b>				
S. chaude	6,65	52	1,20	0,5
S. froide	2	108	4,44	7,81
S. pluies	14	731	5,91	8,33
<b>Moyenne</b>	<b>7,55</b>	<b>297</b>	<b>3,85</b>	<b>5,55</b>
<b>Zone inondée</b>				
S. chaude	96	5789	0,09	1,45
S. froide	6	174	2,91	2,42
S. pluies	147	8309	0,28	2,32
<b>Moyenne</b>	<b>83</b>	<b>4757,34</b>	<b>1,10</b>	<b>2,07</b>
<b>Régions Nord</b>				
S. pluies	33	-	0	0

En comparant les données collectées à différentes saisons, au sein des faciès inondés et exondés, on constate une nouvelle variabilité géographique des paramètres de transmission du paludisme. La densité moyenne de vecteurs par habitation humaine était 10 (83/7,55) fois plus élevée en zone inondée qu'en zone exondée. De même, le nombre de piqûres que *A. gambiae* infligeait à la population de la zone inondée était 16 (4757,34/297) fois plus qu'en zone exondée. Par contre, le taux d'infection de *gambiae* était 3,5 (3,85/1,10) fois plus élevé en zone exondée qu'en zone inondée de même que le risque de transmission 2,68 (5,55/2,07) fois plus élevé en zone exondée qu'en zone inondée. Dans la zone exondée, la densité anophelienne, l'infectivité et le risque de transmissions sont plus élevés en saison pluvieuse qu'en saisons froide et chaudes. Dans la zone inondée au contraire, les moustiques sont moins infectivités et portent moins de risque en saison pluvieuse qu'en saison froide.

L'analyse des données historiques valide les résultats de nos observations environnementales à large échelle de la transmission du paludisme dans les faciès. Il ressort essentiellement deux choses dans cette partie de l'étude:

- 1) Une abondance des anophèles liée à l'abondance de l'eau, notamment à la pluviométrie (zones exondée) et routage des eaux de pluies (zones inondées).
- 2) Une distorsion du niveau d'infectivité des moustiques et du niveau de transmission par rapport à l'abondance des moustiques dans les zones inondées.

Dans les zones exondées, l'abondance particulière d'*A. gambiae* en période pluvieuse s'explique par la multiplication gîtes larvaires à la surface de la terre par les eaux de pluies. Dans les zones inondées, les contraintes topographiques forcent l'accumulation des eaux de pluies créant un environnement (géo faciès) particulièrement favorable à la prolifération des moustiques grâce à la disponibilité des gîtes larvaires qu'il y aie pluies ou pas.

## 4. Discussion

### *Méthode.*

Avec la méthodologie d'étude développée dans le cadre du programme ACCIES, nous pensons que la relation entre le climat et la transmission du paludisme est visible quand les données sont visualisées ensemble. Le cadre conceptuel, qui a été développé dans le programme ACCIES, permet l'évaluation des impacts des changements environnementaux sur des populations anophéliennes par : (i) la classification des habitats (aquatiques et bati) à partir d'images spatiales; et (ii) l'évaluation de la productivité des habitats et des contacts hôtes-vecteurs, à partir d'enquêtes entomologiques. Ces travaux nous permettent de discuter et d'étendre la méthodologie des calculs d'impact climatiques sur l'eau et la santé, à des zones dans lesquelles le système hydrologique n'est pas endoréique. Le calcul de risque de transmission palustre a été testé à l'échelle locale dans une zone centrée sur le village de Dèbo (14°34"N ; 9°21"W), localisée à 340 km de Bamako (Mali). Les situations d'abondance et d'infectivité des moustiques étaient observées avant, pendant et après la saison des pluies par rapport à la dynamique de fonctionnalité des gîtes de mare et de pluies. Puis, nous avons étudié la variabilité de ce risque à l'échelle régionale en réalisant un transect de la strate sahéenne de Mopti.

### *Stratification.*

La stratification du terrain a permis d'observer plus en détails la variation des paramètres entomologiques sous le même climat. On n'aurait pas pu détecter certaines informations cachées par une simple analyse globale des données régionales.

La variabilité de la production anophélienne a été étudiée sur trois sites d'études de la Région de Mopti: Bandiagara (zone rocheuse du Plateau Dogon) ; Mantéourou (zone sablonneuse du Seenou) ; (Barikodaga (zone inondée du delta). Les trois faciès étudiés reçoivent les mêmes hauteurs de pluies au sol. Paradoxalement, la productivité des vecteurs du paludisme dans le Delta (88,3%) est 10 fois supérieure qu'à Bandiagara (8,3%) et 28 fois supérieure qu'à Mantéourou (3,1%). A Mantéourou, la population d'Aedes était plus élevée par rapport aux anophèles tandis qu'à Bandiagara les culex dominaient. Quant à Baricodaga, le genre Anopheles dominait les autres genres de

*culicidae* et *A. funestus* était présent en nombre élevé que *gambiae* dans les deux autres localités. Ce constat ne peut s'expliquer que par d'autres facteurs que la pluviométrie. En effet, l'environnement de ces trois faciès ne diffère que par la nature des sols et le relief du milieu.

La ville de Bandiagara est située sur le plateau Dogon. En saison sèche, le Yamé se retire et forme 2 grosses mares accolées avec des trous à secs autour. Ces mares se remplissent au cours de la saison des pluies pour former un seul système. Le sol rocaillieux et l'élévation du plateau font que les gîtes larvaires se constituent difficilement. Le courant d'eau entraîne régulièrement la disparition des œufs et des larves.

Le village de Mantéourou est plus élevé dans sa partie Nord et plus étiré d'Ouest en Est. Le terrain sablonneux est entrecoupé de dunes. En saison des pluies, les eaux de ruissellement s'écoulent vers le Sud et stagnent entre le village et le centre de santé. Mais, le sol sablonneux laisse passer rapidement les eaux en profondeur de sorte qu'il y a très peu de gîtes larvaires d'anophèles disponible à Mantéourou. Au delà de l'élévation Nord se trouve deux zones d'accumulation des eaux de pluies, correspondent à des briqueteries vers le village peul au Sud. Ces gîtes produisent les anophèles au rythme des pluies.

Le relief de Baricodaga dans le delta est dominé par une grande plaine inondable aménagée pour la riziculture. Ce périmètre est une véritable usine de production d'anophèles tout au long de l'année. En période post culturale *A. gambiae* pond dans les petites poches d'eau pouvant s'échauffer rapidement. Dans les surfaces continues d'eau, on peut facilement observer les larves d'*A. funestus* sous les vieilles tiges de riz. Dès la tombée des pluies, la production d'anophèles s'observe sur toute l'étendue de la vaste plaine d'irrigation.

Les deux principaux facteurs climatiques, la température et la pluviométrie, sont des paramètres clés déterminant la production et la distribution des vecteurs du paludisme. La pluviométrie contrôle le risque de transmission à travers le routage et la mise en eau des surfaces continentales. La topographie du milieu, la nature des sols et les modifications environnementales (ouvrages agricoles, constructions traditionnelles à l'aide du banco et plein d'autres actions humaines) forcent le devenir des eaux de

surface. Lorsque les eaux stagnent de façon durable dans un milieu (mares pérennes, marigots, bras de fleuves, zones d'irrigation de barrages...) les moustiques peuvent persister longtemps. Dans ce cas, la structure du gîte bien que peut néanmoins changer selon les saisons (gîtes de saison sèche et gîtes de saison pluvieuse). Lorsque le gîte est temporaire, il peut se tarir et redevenir fonctionnel au rythme de la pluviométrie.

Il arrive qu'à l'intérieur d'une même strate géo-climatique des modifications environnementales créent des aires particulières de transmission par le développement massif des populations de vecteurs. Les aménagements hydro agricoles comme la zone d'Office du Niger à Niono, les zones de barrage de Sélingué et Manantali, le delta central du fleuve Niger à Mopti, en sont des cas. Le paludisme est transmis de façon continue, toute l'année dans ces zones. Ces zones spécifiques de conservation des moustiques deviennent ainsi des "géo réservoirs de parasites" qui assurent la pérennité de l'espèce. Les modifications environnementales induites par l'homme se traduisent, entre autres, par la création des conditions nouvelles favorables ou défavorables à l'épidémiologie du paludisme (Kleinschmidt I. et al. 2000 ; Gimnig J. E. et al. 2001 ; Yaro A.S. et al. 2006 ; Bogh C. et al. 2007 ; Zhou G. et al. 2007 ; Stoops G.A. et al. 2007 ; PNLP, 2007; Himeidan Y. E., et al. 2009). *An. gambiae s. l.*, principal vecteur rencontré au Mali manifeste une instabilité numérique marquée selon qu'il existe ou non de gîtes larvaires favorables. Il peut ainsi se produire des variations spectaculaires de l'indice sporozoïtique en des laps de temps très courts.

En permettant la localisation des zones à risques de paludisme, nos travaux s'inscrivent dans le cadre des recommandations de l'OMS (WHO 1984, Breman 2004). L'identification de clusters -ou agrégats- permet de quantifier la variabilité dans le temps et dans l'espace du risque palustre. L'utilisation d'un SIG permet l'analyse précise de ces variations à différentes échelles. On peut, ainsi, identifier des zones à risque élevé d'infection, malgré par exemple une tendance décroissante globale. De même, indépendamment de l'évolution globale saisonnière de l'infection, on peut retrouver des clusters de cas en saison sèche. Ces clusters rendent compte du risque d'infection à *P. falciparum* de façon beaucoup plus précise. L'évolution spatio-

temporelle des clusters est liée à l'évolution spatio-temporelle des facteurs locaux, en particulier des micros gîtes temporaires (Figure 6).

Le NDVI est clairement associé à l'épidémiologie du paludisme (Yé 2007, Rogers 2002, Eisele 2003, Patz 1998, Roberts 1996). C'est un indicateur relativement accessible reflétant un ensemble de caractéristiques de terrain. Il s'agit donc d'un outil pratique. Cependant, pour améliorer la modélisation il est nécessaire d'ajouter à nos modèles des informations plus précises en terme d'environnement et de climat. Les modèles utilisés ne tiennent pas compte de l'hydrologie et de la forme de terrain. Pour améliorer les modèles, il faut ajouter aux fluctuations pluviométriques spatiales (distribution spatiale et intensité de l'averse, ie modélisation des champs de pluie), les effets du ruissellement et la réponse hydrologique du terrain (à partir d'un modèle numérique de terrain).

Les études entomologiques permettent de mieux prendre en compte un comportement précis du vecteur dans la chaîne de transmission du paludisme en fonction du milieu. Associé à la gestion de l'environnement, les mesures de contrôle de la maladie doivent cibler les différents niveaux de la chaîne de transmission.

La capacité vectorielle (CV) ou indice de propagation du paludisme exprime le degré de compatibilité hôte-vecteur et le système de la transmission dans un environnement donné. Ce paramètre peut être défini comme "le taux quotidien d'inoculations futures à partir de chaque cas infecté non immun".

D'après Macdonald la CV est directement déterminée par: 1) le nombre de piqûres par personne par jour (ou taux de piqûre-homme); 2) la préférence trophique (anthropophilie versus zoophilie) et 3) la longévité du moustique.

Sa formule mathématique est :

$$C = \frac{m a^2 P^n}{-\log_e P}$$

Les paramètres qui contribuent au calcul de la CV sont largement dépendants des conditions environnementales: pluviométrie (création de gîtes, saisonnalité de la transmission), température (cycle d'incubation extrinsèque), humidité (taux de survie du vecteur), vent (dispersion du vecteur). Ils varient avec le temps, l'espèce de moustique mais également l'espèce de *Plasmodium*.

**m** = densité relative des vecteurs ou le nombre de vecteurs par humain.

**a** = fréquence de piqûre humaine ou le nombre de repas sanguins par vecteur par jour. Les préférences trophiques des vecteurs expriment la gamme d'hôtes sur laquelle un vecteur donné se gorge et rend compte de la disponibilité et de l'accessibilité d'hôtes alternatifs. Il permet ainsi de mesurer le degré de déviation trophique sur animal et permet d'expliquer les différences de capacités vectorielles entre espèces dans un même environnement.

**m.a** = le nombre de piqûres par personne par jour est exprimée par le produit de la fréquence des repas sur homme « a » et de la densité du vecteur par rapport à l'homme « m ». La fréquence et l'intensité de **m.a** expriment le degré d'efficacité vectorielle. Ce paramètre ne pouvant pas être estimé directement, nous avons utilisé indirectement le nombre de piqûres reçu par capteur pour estimer le taux d'agressivité.

**n** = la durée du cycle d'incubation extrinsèque est le nombre de jours entre le repas infectant le moustique et l'apparition des sporozoïtes dans les glandes salivaires. Cette durée est dépendante de la température. Pour *Plasmodium falciparum*, elle peut être estimée à partir de la formule de Moshkovsky :  $n = 111/T - 16$  avec T représentant la température moyenne en °C. La compétence vectorielle exprime l'aptitude de l'anophèle à conduire la réalisation du cycle de développement extrinsèque du *Plasmodium* jusqu'au stade infectant. Elle dépend ainsi exclusivement de facteurs intrinsèques propres aux vecteurs.

**p** = le taux quotidien de survie et exprime l'espérance de vie de la femelle d'anophèle.

La CV doit être évaluée pour chaque espèce anophélienne impliquée dans la transmission dans les localités données. Le taux de reproduction de base du *Plasmodium* ( $R_0$ ) ou taux de propagation de base indique le nombre potentiel total d'infections secondaires prenant leur origine d'un cas primaire impaludé infectant dans une population humaine non immune de N individus.

$$R_0 = \frac{m a^2 b P^n}{-r \log_e P}$$

**P** = probabilité quotidienne de survie des (**ma**) moustiques

$1/-\log_e P$  = espérance de vie du moustique

**Pn** /  $-\log_e P$  = espérance de vie infectante

**b** indique l'infectivité du moustique pour l'Homme. C'est la proportion de piqûres de moustiques infectés, réellement infectantes pour l'Homme.

$1/r$  indique l'infectivité de l'Homme pour le moustique. On estime que 1 cas primaire de sujet infecté non immun est infectant pour l'anophèle pendant  $1/r$  jours.

**r** exprime le taux journalier de guérison déterminé par observation longitudinale des cas locaux de paludisme en l'absence de transmission. C'est le nombre de jours d'infectivité pour l'anophèle par individu infecté

Le taux de propagation de base se produit durant l'espérance de vie infectante (après survie de  $n$  jours) d'une densité agressive ( $ma$ ) d'anophèles. On s'accorde à dire aujourd'hui que l'on arrive pas à vaincre le paludisme parce que le  $R_o$  est suffisamment grand ( $R_o > 1$ ) et qu'il faut protéger près de 100% (au moins 80%) de la population  $N$  par les moustiquaires imprégnées d'insecticide (à défaut du vaccin) pour obtenir un  $R_o$  suffisamment faible ( $R_o < 1$ ) pour qu'il n'y ait pas de transmission.

$R_o$  correspond à la capacité vectorielle cumulée sur une période donnée. Mais la capacité vectorielle ne tient pas compte de l'infectivité du vecteur pour l'Homme. En raison de la difficulté de mesurer la capacité vectorielle avec précision, le risque de transmission dans notre étude a été basé sur le taux d'inoculation entomologique (EIR) qui représente le taux de transmission. Sa formule,  $h = ma * s$ . ( $s$ ) étant le taux d'infection des vecteurs à la microscopie ou à l'ELISA.

Comme les autres facteurs impliqués dans l'évaluation de la capacité vectorielle, le taux d'inoculation entomologique est sujet également à des variations liées aux facteurs environnementaux. En intégrant les modifications climatiques, la modélisation de la transmission palustre apportera une évaluation *in silico* des mesures de contrôle intégrées. Ce SIG doit être associé à la surveillance sanitaire, dans un objectif de santé publique.

La télédétection est associée aux observations entomologiques. Elle permet d'évaluer l'occupation des sols (cartographie des villages), de surveiller les gîtes larvaires potentiels et in-fine de relier la variabilité spatio-temporelle des indices de télédétection (NDVI, humidité) aux risques palustres causés. L'ensemble de ces informations sont indispensable à la modélisation. Pour le site de Bancoumana, pour lequel une étude spatio-temporelle du paludisme avait été effectuée pour les années 1996-2001 (Gaudart 2006), nous avons acheté 4 images SPOT situées dans le même intervalle de temps.

# **Partie IV**

# **DISCUSSION**

Cette étude de l'impact du climat sur la transmission du paludisme au Sahel, nous a permis de mettre en évidence le rôle clé de la pluviométrie, qui contrôle le risque palustre à travers la distribution de l'eau sur les surfaces continentales. Les résultats que nous avons acquis nous permettent de proposer des recommandations pratiques relatives à la surveillance environnementale du paludisme dans les régions à haut risque de transmission aux populations humaines, particulièrement dans le contexte du changement climatique.

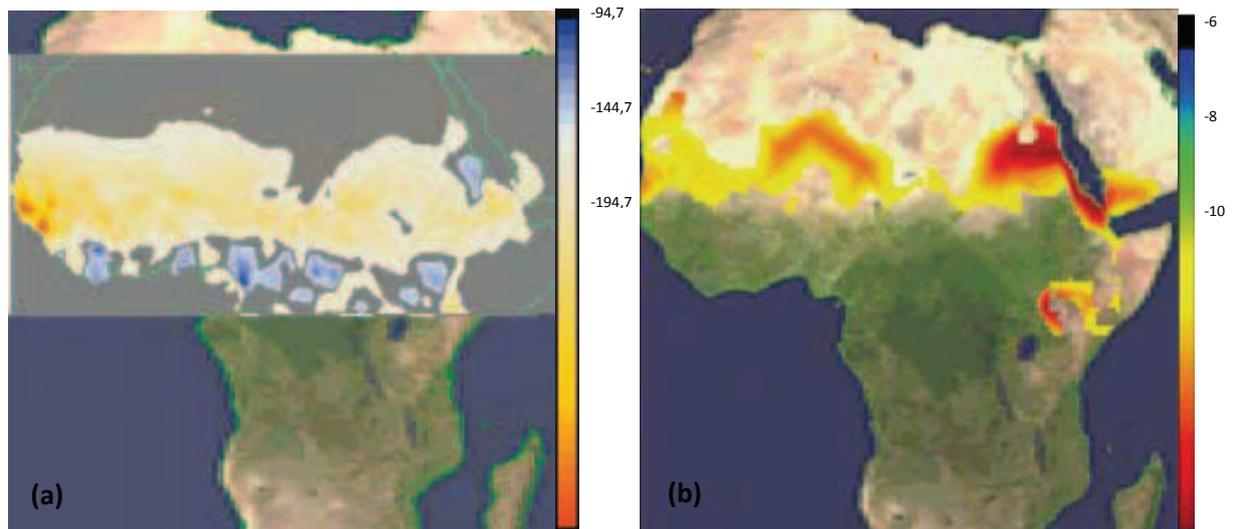
## **1. Apports des scénarios climatiques au Sahel**

Peu de régions dans le monde sont confrontées à une aussi grande variabilité du climat que le Sahel (12 ° N - 20 ° N), région semi-aride située à la marge du désert du Sahara. Des années 1970 aux années 1990, le Sahel a connu un nombre sans précédent de sécheresses sévères et de longues durées, avec une récupération partielle en 2003 qui n'a pas permis de rattraper le déficit pluviométrique accumulé (Nicholson et al, 2000; Biasutti et Giannini, 2006; Dai et al ., 2004). L'incapacité des modèles à saisir les bases de cette variabilité du climat d'Afrique de l'Ouest est à l'origine d'une absence de consensus des projections climatiques CMIP3 produites pour le quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, IPCC-AR4 (GIEC, 2007). Cette incertitude relative au climat futur de l'Afrique occidentale, ainsi que les risques associés à la disponibilité des ressources en eau, suscitent une inquiétude croissante des populations de la région dont le sort dépend en grande partie de l'agriculture (GIEC, 2007).

### **1.1. Pluviométrie et sécheresse au Sahel**

Le Sahel représente une zone de transition entre le désert du Sahara et le climat humide de l'Afrique tropicale. La caractéristique dominante du climat de cette région est le système de la Mousson Ouest Africaine (MOA), qui se développe d'Avril à Octobre, à l'occasion de la remontée de la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT), dont la localisation septentrionale en août est associée à des maximas de précipitations dans toute la région. L'analyse des données quotidiennes de pluviométrie effectuée par le Sultan et Janicot (2000) et Le Barbé et al. (2000) révèle que la migration intra-saisonnière des précipitations est un processus discontinu marqué par trois phases principales: (i) le préonset, ou arrivée du front intertropical

(FIT) à 15 ° N en Mai, qui apporte suffisamment d'humidité pour qu'un système convectif isolé se développe sur le Sahel, (ii) l'onset, qui survient à la fin Juin et correspond à une transition latitudinal abrupte de la ZCIT partant d'un emplacement quasi-stationnaire à 5 N ° en Mai-Juin, pour arriver à un autre emplacement quasi-stationnaire à 10 ° N en Juillet-Août, et (iii) le retrait de la ZCIT vers le Golfe de Guinée, qui se produit en Septembre-Octobre.



**Figure 21.** Cartes climatologiques d'anomalies de précipitations basées sur les observations du CRU. (Mitchell et Jones, 2005).

(a) Anomalie des précipitations moyennes du mois d'août [mm/mois] dans la période 1975 – 1990 par rapport à la moyenne du XXe siècle.

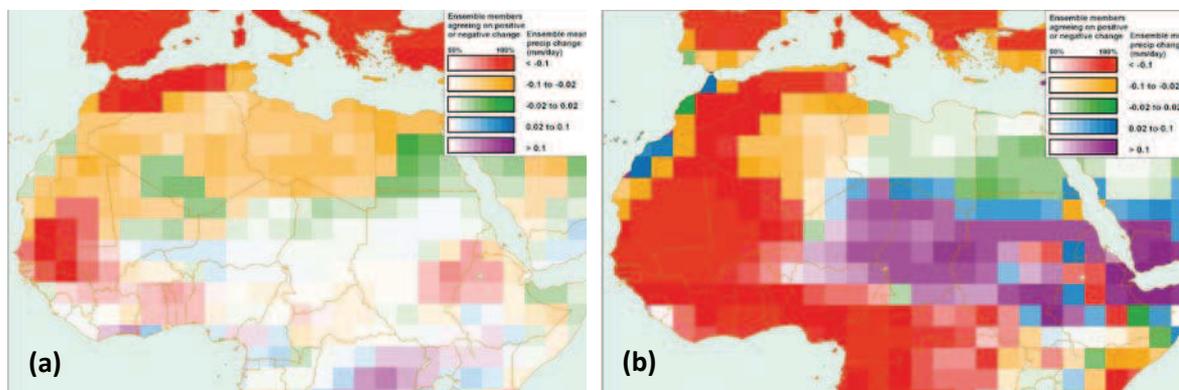
(b) Nombre de jours de pluie en août pendant les 10 principales sécheresses du XXe siècle, exprimé sous forme de fraction de la valeur climatologique au cours du XXe siècle. La carte ne relève que les zones ayant enregistré au moins 77 mm de pluie par mois.

La figure 21 met en regard les précipitations moyennes du mois d'août durant la période de sécheresse (les 15 années comprises entre 1975 et 1990) et la période 1901 – 2000 avec les valeurs correspondantes. Il en ressort une réduction générale des précipitations au Sahel et une légère hausse le long du littoral guinéen (Fig. 21 a). Une telle structure duale confirme qu'il existe un lien entre les pluies sahéniennes et la position géographique du front de la mousson ou ZCIT. La figure 21 b représente le nombre de jours de pluie en août pendant les 10 principales sécheresses du XXe siècle, exprimé sous forme de fraction de la valeur climatologique au cours du XXe siècle. On relève trois « hot spots » (zones particulièrement sensibles au changement climatique) : le premier se situe le long de la côte ouest (Sénégal & Mauritanie), le second entre le

Mali et le Niger; et le troisième rassemble la zone Soudan/Érythrée et Éthiopie orientale.

### 1.2. Projection globale du climat futur (grande échelle)

Selon l'AR4 du GIEC, le Met Office Hadley Centre, dont les projections de précipitations estivales sont présentées à la Figure 22 (a et b), les pays côtiers de l'ouest du Sahel verront probablement leurs précipitations diminuer tandis que les hauts plateaux éthiopiens devraient recevoir davantage de pluie (en DJF et MAM) (Christensen et al., 2007). Les projections du Met Office Hadley Centre (Figure 22a) envisagent, par ailleurs, une forte augmentation des précipitations, y compris durant l'été, au centre et l'est du Sahel. Pour l'extrême ouest du Sahel, on s'attend à une diminution des précipitations durant l'été : environ  $-0.1$  mm/jour, ce qui représente quelques points de pourcentage de la précipitation annuelle. Cette évolution apparaît clairement tant dans l'ensemble de modèles de l'AR4 que dans l'ensemble plus réduit de paramètres du Met Office Hadley Centre. Elle est moins évidente pour le centre du Sahel : les projections des modèles le concernant sont moins robustes et diffèrent dans les deux ensembles analysés.



**Figure 22.** Différence (mm/jour) des précipitations estivales (JJA) entre 2020 – 2049 et 1960 – 1990. (Christensen et al., 2007).

- (a) Simulations de l'AR4. La couleur indique la force du signal, alors que l'intensité de couleur indique la cohérence entre tous les modèles. L'extrême-ouest du Sahel est la zone où l'on constate le signal le plus fort et le plus fiable.  
 (b) Traitements du Met Office Hardley Center. Signal similaire à l'Ouest, mais d'importantes différences à l'Ouest.

Bien qu'il ne ressorte pas de signe cohérent concernant les précipitations estivales dans le Sahel oriental (à l'est du méridien  $20^{\circ}\text{E}$ ), la plupart des modèles détectent une augmentation des précipitations annuelles. Les projections pour la température a tendance à être plus uniforme parmi les modèles climatiques et suggèrent que

l'augmentation, en particulier pour l'été, est susceptible de dépasser largement l'augmentation moyenne mondiale.

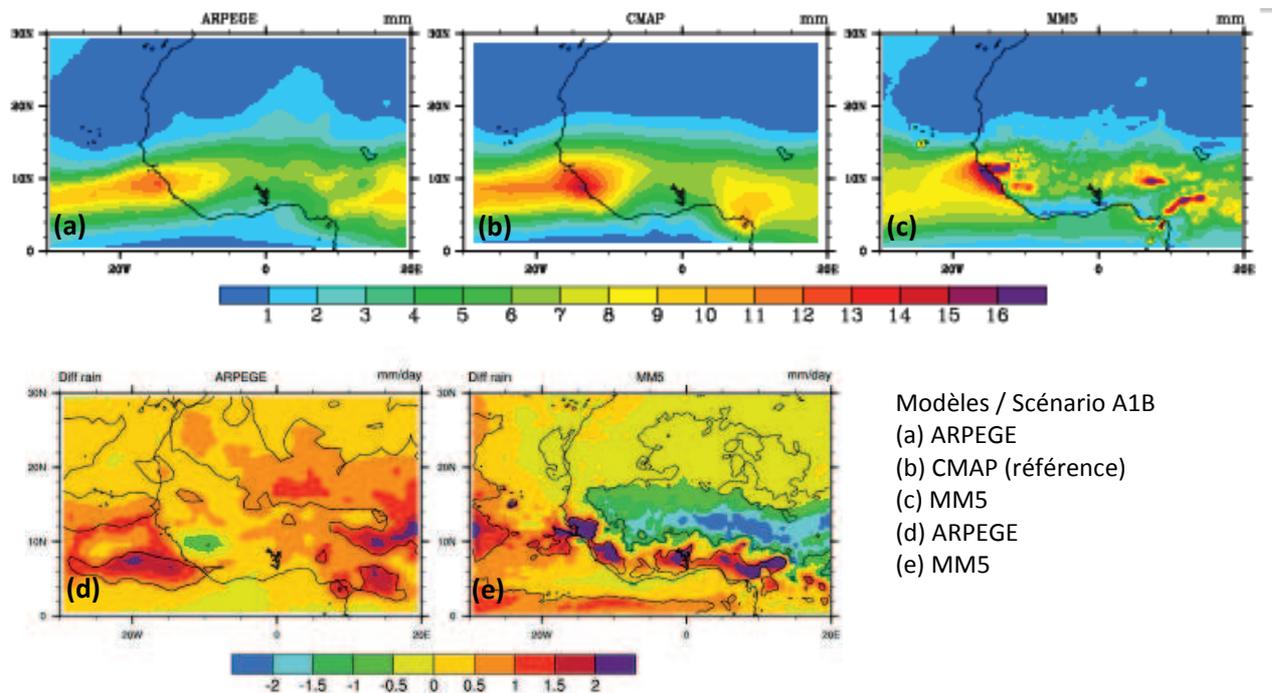
### **1.3. Projection régionale du climat futur (petite échelle)**

Dans le cadre d'ACCIES, une translation des scénarios climatiques des échelles larges vers des échelles fines, a été réalisée en reliant les variables climatiques locales ou micro-régionales aux forçages atmosphériques de plus large échelle (Bicout et al., 2009). L'approche numérique retenue a privilégié l'utilisation d'un modèle régional méso-échelle MM5. La résolution de MM5 à 45 km permet de mieux détailler les effets du relief (ici Fouta Djallon, Adamaoua, Ahaggar), et de mieux représenter physiquement les processus d'interactions surface-atmosphère ou nuages-radiations (Giorgi et al., 2001; Han et Roads, 2004). Ce type de modèle présente l'avantage d'une résolution spatiale plus fine, d'une meilleure prise en compte des MM5 validé sur la période contemporaine pour le domaine ouest-africain dans le cadre d'AMMA (Sijikumar et al., 2006).

Les champs de pluie simulés par le modèle MM5, ont été comparés aux pluies d'ARPEGE et à celles du produit CMAP issu de l'observation pour la moyenne des mois de Juillet à Septembre (JAS) (Sijikumar et al, 2008). Bien qu'alimenté par les conditions aux limites d'ARPEGE, la pluie générée par MM5 s'étend moins au nord, ce qui est plus conforme à l'observation et en relation avec une zone de convergence des alizés mieux positionnée (figure 23). Ceci s'explique par une convergence des alizés trop septentrionale. La circulation régionale est mieux représentée dans les basses couches où l'extension du flux de mousson devient plus proche des produits de référence comme les réanalyses. La circulation de la moyenne troposphère est, elle aussi, plus réaliste, comme le montre la circulation du Jet d'Est Africain dont la position et la vitesse sont mieux représentées que dans ARPEGE.

La simulation portant sur la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, indique de grandes différences entre les deux modèles. Les différences calculées entre la période 2081-2099 et 1981-1999 montrent que, les pluies ont tendance à augmenter sur toute l'Afrique de l'Ouest pour ARPEGE, alors que la situation est plus contrastée pour MM5 (figure 24). En effet, on remarque une augmentation des pluies sur la bande guinéenne et une réduction sur la

bande sahélienne. Même si MM5 offre plus de réalisme durant la période contemporaine, on ne peut être sûr du scénario produit pour la fin de siècle.



**Figure 23** : Haut : Champs de pluie moyen de Juillet à Septembre (JAS). Bas : Différences 2081-2099 et 1981-1999 en JAS En mm/jour (Bicout et al., 2009).

## 2. Evaluation des impacts des scénarios climatiques sur le paludisme

Si les températures de surface de la mer dans le golfe de Guinée, en Méditerranée ou dans l'océan Pacifique sont des facteurs majeurs qui conditionnent les cycles climatiques de la mousson en Afrique de l'Ouest (Janicot et al. 1998), il est également reconnu que la variabilité interannuelle et la variabilité spatiale de la mousson sont affectées par des paramètres locaux, caractéristiques des surfaces continentales, comme le relief ou la végétation (Zheng and Eltahir 1998). Les transferts d'eau et d'énergie qui déterminent le climat sahélien sont à la fois en entrées et en sorties des processus locaux (hydrologiques, biologiques et atmosphériques) qui produisent à la fois le climat et ses impacts sur l'épidémiologie du paludisme. Les travaux conduits dans le cadre du consortium Analyse et Modélisation de la Mousson Africaine (AMMA), ont permis de mettre en évidence le rôle prépondérant de la végétation dans la zone sahélienne. L'évapotranspiration est le terme prépondérant du bilan d'eau avec en première estimation plus de 60% des précipitations qui retournent à l'atmosphère via ce processus. Toutefois, la complexité de la géologie (socle fracturé), l'hétérogénéité

des épaisseurs de sol, du couvert végétal et des caractéristiques hydriques induites par les différents réservoirs hydrologiques, rendent très difficile la généralisation des processus observés localement et l'agrégation des paramètres hydrologiques à grande échelle. Afin de répondre à ces problématiques, un travail de modélisation est nécessaire.

La grande variabilité et la grande incertitude qui caractérisent l'estimation de ces échanges fondent l'affirmation selon laquelle « à chaque localité correspond une situation palustre spécifique ». Les travaux de modélisation spatiale, entrepris par l'équipe EPSP/TIMC-IMAG dans le cadre du programme ACCIES, permettent : d'une part de valider certaines paramétrisations des modèles de transmission du paludisme, et de proposer des représentations simplifiées pour la modélisation des faciès épidémiologiques où des unités hydrologiques à plusieurs échelles temporelles et spatiales (exemple de Mopti).

### **2.1. Impacts directs de l'humidité et de la température sur la transmission**

La pluviométrie et l'hydrologie sont des acteurs principaux de distribution géographique du paludisme par l'anophèle. Mais la pluviométrie ne saurait être dissociée de la température. La température est, en effet, un facteur contrôlant le développement des moustiques aussi bien dans l'eau que sur terre. L'étude menée par M.H.Craig, R.W Snow et D. le Sueur à travers l'Afrique ont montré l'influence de la température sur la durée de la sporogonie, la longévité du moustique et la durée de développement larvaire. L'étude de Afolabi en 2008 au Nigeria donne des résultats comparables à nos observations (Afolabi B.M. et al. 2008).

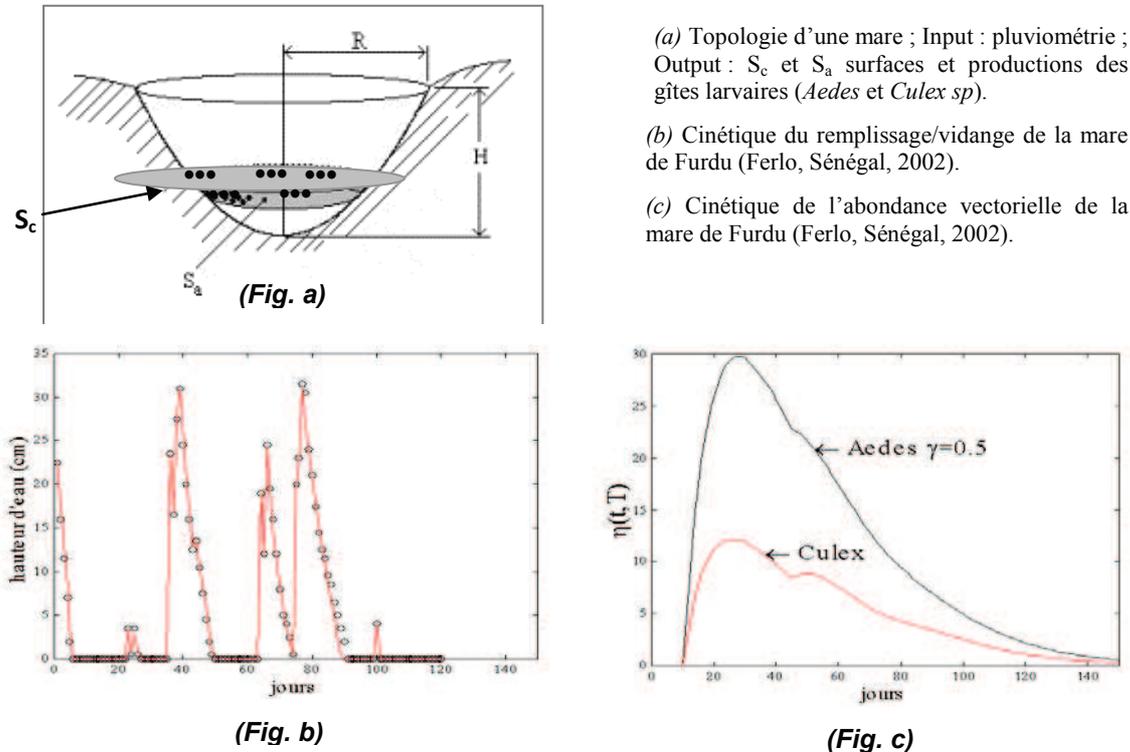
L'influence de la température sur le développement larvaire des anophèles est mise en avant pour expliquer des contrastes liés à la distribution du paludisme ; par exemple dans les zones en altitude et de bas-fond. Les conditions climatiques sont directement associées à l'élévation des terres (Lindblade K.A. et al. 2000). Plus on monte en élévation plus la température baisse et par conséquent, l'abondance et la composition des espèces vectorielles peuvent changer avec l'élévation. Dans les zones de montagnes en Afrique de l'est notamment au Kenya, la faible température sur les plateaux ( $\geq 1500$  m d'altitude) expliquerait la faible productivité des vecteurs du paludisme et leur faible

longévité par rapport aux basses régions de 1200m d'altitudes au dessus de la mer. Ils se produiraient plus d'anophèles dans les superficies cultivées que non cultivées du fait que les premières reçoivent plus d'ensoleillement que les secondes. En effet l'agriculture peut induire une élévation de température locale dans les régions d'altitude (1500 to 2400m en Ouganda) par le remplacement de la flore locale naturelle par des plantes cultivées. Toute augmentation du seuil limite inférieur de température de survie du moustique affecterait le temps de développement du *Plasmodium* et de son vecteur en le raccourcissant. Des zones de stabilité, instabilité et d'épidémies de paludisme ont été définies selon le profil écologique généré par la température et la pluviométrie. La température n'est pas un facteur limitant l'abondance des vecteurs du paludisme au Sahara car son influence écologique ne peut expliquer la distribution du paludisme dans cette région d'Afrique comme nous avons vu à Dèbo.

## **2.2. Impacts indirects de la pluviométrie sur les habitats et la transmission vectorielle**

Dans le système vectoriel le plus simple, la transmission d'une maladie (par exemple le paludisme), est assurée localement par des insectes ou des acariens hématophages. L'influence climatique porte, non seulement sur la biologie et la pathologie des vecteurs (survie, compétence, etc.), mais aussi sur l'environnement physique local (pluviométrie, température, surfaces en eau, végétation, etc.) dont dépendent les vecteurs (Mellor et Leake, 2000). Trois processus clés interviennent dans la dynamique des habitats aquatiques qui constitue un élément-clé de l'environnement des vecteurs (larves et nymphes): (i) les entrées d'eau associées aux événements pluvieux et au ruissellement; (ii) les infiltrations d'eau dans le sol ; et (iii) l'évaporation dans l'atmosphère. Les entrées d'eau sont contrôlées par le climat et le système hydrologique local ; l'évaporation dépend des conditions atmosphériques et les infiltrations dépendent de la structure des sols, et du colmatage dû à l'accumulation de limon argileux du fait de l'érosion par la pluie, le ruissellement et le vent (Martin-Rosales and Leduc, 2003). Dans la partie colmatée, située au fond des mares, l'infiltration de l'eau est lente et quasiment constante, alors que dans la partie non colmatée, située en haut des mares, elle est rapide et dépend de la charge en eau (Desconnets et al., 1997). L'équipe EPSP TIMC-IMAG a étudié expérimentalement et

modélisé **les interactions entre pluviométrie, dynamique des mares et abondance vectorielle** (Bicout et al. 2003, Ndione et al., 2003, Bicout et Sabatier, 2004, Porphyre et al., 2005, Ndiaye et al., 2006).



**Figure 24.** Modèle couplé hydrologie et abondance vectorielle (Porphyre et al., 2005).

Un couplage entre un modèle de dynamique des mares (remplissage/vidange) et un modèle de dynamique des populations de moustiques vecteurs (ici *Culex* et *Aedes*) a été réalisé (Fig. 24). Dans cette approche, les relations entre le vecteur et son environnement sont décrites par le potentiel  $\sigma(t, T)$  et la susceptibilité  $\chi(t, T)$  de production vectorielle de l'habitat. Ces fonctions sont calculées à partir des paramètres expérimentaux de vidange des mares et ensuite utilisées dans l'estimation, au niveau local, de l'abondance vectorielle. L'estimation des paramètres d'entrée de validation du modèle sont issues de campagnes de mesures réalisées sur plusieurs mares du Ferlo (Sénégal) entre 2000 et 2003. La chaîne de calcul, mise en place, nous a permis de simuler les impacts hydrologiques et entomologiques à l'échelle locale, sur un site d'observation couvrant une surface de 1600 km<sup>2</sup>, à proximité du village de Barkedji (15°16'46"N, 14°52'05"W), dans le Ferlo, au Nord du Sénégal (Bicout et al., 2009). Les images satellites utilisées ont été acquises par le Consortium ACCIES dans le cadre de la banque d'image ISIS, financée par le CNES. Elles ont été traitées par Medias-France

qui en a extrait une cartographie des habitats aquatiques. Nous avons développé un programme permettant d'extraire, pour chacune des mares : sa forme pixélisée ; sa surface et son périmètre. La cartographie présentée ci-dessous a été réalisée à partir de l'image prise le 26 Août 2003 à la suite d'une période de pluies intenses, ce qui nous permet d'identifier l'ensemble des mares remplies (Fig. 25)

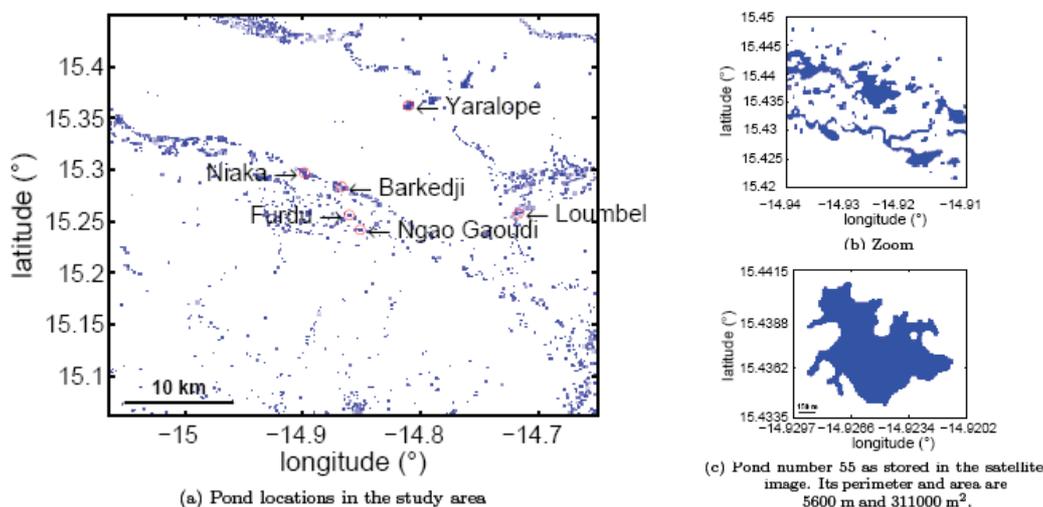


Figure 25: Données obtenues à partir d'images satellites (Bicout et al., 2009).

La Figure 26 montre des résultats obtenus pour trois types différents d'habitats aquatiques (trois des cinq mares canoniques). Ces résultats portent sur le calcul de l'évolution des surfaces en eau durant une année (à droite). La situation des trois mares à trois dates différentes est présentée (à gauche).

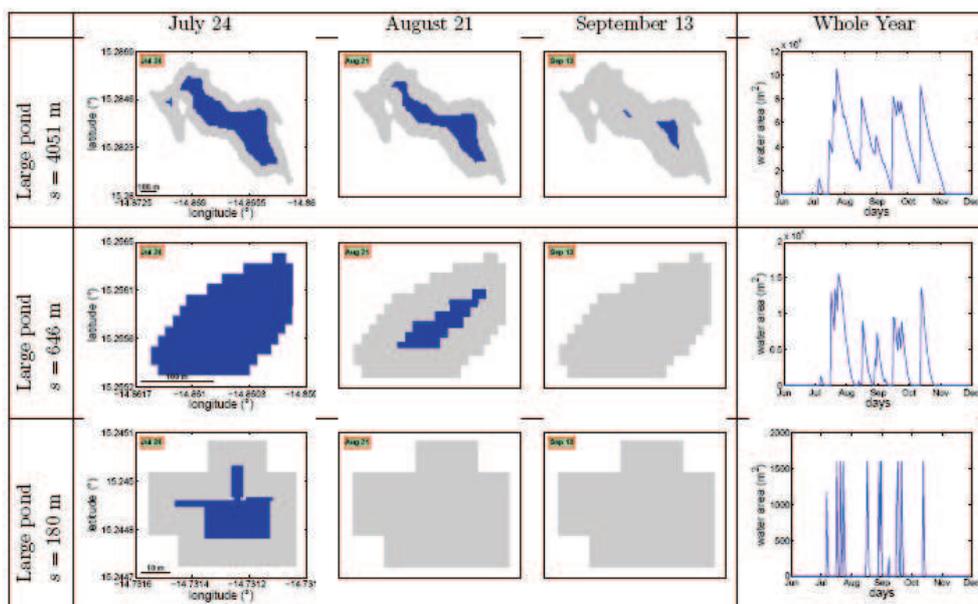
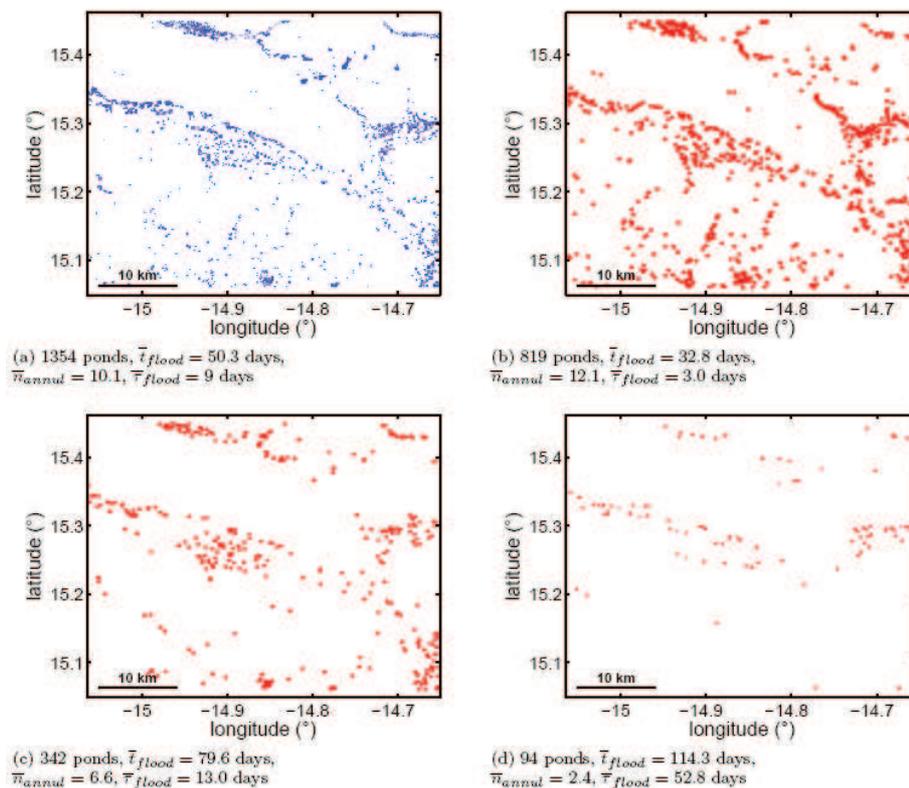


Figure 26 : Impact d'une séquence de pluie désagrégée sur trois mares de la région de Barkédji. (Bicout et al., 2009)

La variabilité du niveau des habitats aquatiques, et la fréquence des assèchements modifiant la production de vecteurs, Bicout et al. ont défini une Zone de Comportement Identique (IBA : Identical Behaviour Area) qui permet d'identifier un habitat dont la production est corrélée à la pluviométrie. Pour estimer la variation de la production de vecteurs, quelques indices ont été mesurés :  $t_{\text{flood}}$  : le nombre de jours durant lesquels les habitats aquatiques sont remplis ;  $\eta_{\text{annul}}$  : le nombre de fois que le niveau des habitats aquatiques atteint le niveau 0 ;  $\tau_{\text{flood}} = t_{\text{flood}} / \eta_{\text{annul}}$  : le nombre de remplissages consécutifs.  $\tau_{\text{flood}}$  peut être vu comme le temps de survie du remplissage d'un habitat aquatique. La Figure 27 montre une cartographie des clusters d'habitats aquatiques ayant des dynamiques similaires. Les mares ont été classées selon  $\tau_{\text{flood}}$ , leur temps moyen de remplissage qui peut être court ( $\tau_{\text{flood}} \leq 7$  jours), moyen ( $\tau_{\text{flood}} = [8,28]$  jours) ou long ( $\tau_{\text{flood}} \geq 29$  jours).



**Figure 27** : Impact d'une séquence de pluie désagrégée sur trois index de résistance à la sécheresse [Haut-Gauche] : localisation des mares en eau. [Haut-Droite] : clusters de mares ayant une courte durée de survie ( $\tau_{\text{flood}} \leq 7$  jours). [Bas-Gauche] : clusters de mares ayant une moyenne durée de survie ( $\tau_{\text{flood}} = [8,28]$  jours). [Bas-Droite] : clusters de mares ayant une longue durée

### **2.3. Impacts anthropiques sur la transmission : agriculture et urbanisation**

Comme nous l'avons observé à Baricodaga, les densités d'anophèles sont toujours élevées dans les zones de riziculture par rapports aux zones exondées dans la même strate. La production d'adultes est fondamentalement liée au temps de développement des larves dans l'eau en cas de disponibilité de l'hôte. Les populations Bozos sont reconnues au Mali pour leurs activités de pêche, et Baricodaga est installé entre le fleuve Niger et la plaine rizicole. Ces zones de modification environnementale par les aménagements hydro agricoles et les cours d'eau permanentes son des foyers particuliers de développement massif des populations de vecteurs. Le paludisme y est transmis de façon continue, toute l'année.

Les études de Dolo et Sogoba ont déjà montré que la nuisance des moustiques pouvait atteindre parfois 296,7 piquères par dormeur dans les zones de riziculture irriguée dans le Sahel malien (Dolo G. et al. 2004 ; Sogaba N. et al. 2007 ; Ijumba J.N. et al. 2002). Mais curieusement, le niveau de transmission n'est pas le reflet de la densité dans ces zones de production intense d'anophèles au Sahel. Weidong Gu et als. (2006) ont trouvé une corrélation positive entre le cycle gonotrophique du moustique, c'est à dire le temps qui sépare deux pontes successives, la densité anophelienne et la transmission du paludisme. Ils ont prouvé que plus, le nombre de gîtes d'anophèles est grand dans un milieu, plus la densité des anophèles était assez élevée dans ce milieu du fait que le cycle gonotrophique du moustique se raccourcissait. Et moins, les gîtes de ponte sont disponibles, moins la densité anophelienne était élevée car le cycle gonotrophique se prolongeait. En jouant sur ce facteur, ces chercheurs sont parvenus à réduire la densité anophelienne et la transmission du paludisme par la réduction du nombre de gîtes de pontes.

Lorsque le nombre de gîtes disponibles est élevé la femelle perd moins de temps pour chercher où pondre. Par contre, lorsqu'il y a moins de gîtes disponibles les moustiques ont plus de déplacement à faire pour pondre et le cycle gonotrophique se prolonge. De plus la longévité des femelles peut diminuer par l'éloignement des gîtes car beaucoup d'entre elles peuvent trouver la mort en cour de chemin entre l'hôte et les points d'eau (Gu W. et Novak R.J. 2005 ; Gu W. et al. 2006). Le nombre de gîtes se traduit en substance par la surface de ponte. Du fait de sa préférence pour les petites collections

d'eau, *An. gambiae* augmente rapidement ses effectif dans un laps de temps parce qu'il arrive à coloniser rapidement un nombre suffisant de gîtes. Chaque petit gîte étant une unité de surface de ponte, plus le nombre de gîte est grand, plus la surface de ponte est grande. Les plaines de riziculture irriguées sont des grandes surfaces mises en eau aux faims d'agriculture que les moustiques peuvent semer d'œuf autant qu'ils peuvent. Ce qui peut expliquer la grande potentialité de production larvaire dans les zones d'aménagement pour la riziculture où les densités de moustiques sont très élevées.

La stabilité du gîte larvaire, définie comme étant sa durée en eau est très critique pour le développement larvaire du moustique. Des études d'impact de la disponibilité et la stabilité des gîtes larvaires d'*An. gambiae* sur la présence/absence des larves d'anophèles ont montré que ces deux paramètres sont bien corrélés à la positivité des gîtes en larves (GU W. et al. 2006; Himeidan Y.E. et al. 2009). *An. gambiae s. l* est principalement liée à la pluviométrie car il préfère pondre dans des petites collections d'eau ensoleillées. Lorsqu'il tarde à pleuvoir, beaucoup de ces micro gîtes tarissent rapidement sous le soleil accablant et d'innombrables larves meurent par dessiccation au Sahel (Minakawa et als., 2001). Or, dans les vastes plaines d'irrigation ce problème de dessiccation ne se pose pas et la très forte abondance des larves semées dans les macro gîtes fait qu'elles résistent aux prédatations. Pendant une année complète, Minakawa et als., ont étudié la relation entre la taille du gîte, sa stabilité et la densité des stades immatures d'anophèles dans les conditions naturelles au Kenya (Minakawa et al. 2005). Ils ont révélée que la stabilité du gîte larvaire était significativement associée à sa taille en eau et fortement associées à sa position géographique. Par le principe de la transitivité mathématique les densités de nymphe étaient à la fois significativement associées à la taille du gîte et à sa position géographique. La même étude avait trouvé une association positive entre le nombre de gîtes disponibles et la densité de la faune résiduelle d'anophèles au niveau de l'habitat humain.

#### **2.4. Impacts anthropiques sur la transmission : Risques d'expositions.**

Le risque du paludisme dans notre étude c'est la piqûre infestante de l'anophèle en dehors d'une transmission transfusionnelle. Si les contraintes climatiques sont primordiales sur l'écologie du vecteur, les contraintes humaines sont un maillon important dans le transfert de l'agent infectieux entre l'homme et le moustique, et

dans l'évolution du plasmodium chez le sujet infecté. La transmission du paludisme dépend de deux facteurs : l'âge du moustique et le rythme de contact homme-vecteur pour les repas sanguins. La préférence d'hôte pour le repas est le plus grand facteur de distribution des espèces d'anophèles voulant atteindre chaque type d'hôte dans son milieu. De ce fait, le degré de préférence trophique de chaque espèce de moustique pour chaque type d'hôte est important à connaître au niveau des sites d'étude. La durée d'exposition au risque d'inoculation correspond à la durée de la saison de transmission pour la population autochtone et au nombre de jours dans une zone à risque pour le voyageur. Dans plusieurs faciès épidémiologiques en Afrique, les habitants sont soumis chaque année, plusieurs fois par année et toute leur vie aux infections plasmodiales. Chez les personnes stables dans les zones à transmission continue comme les secteurs d'irrigation, Douna au bord du Bani, Doneguebougou etc l'exposition au risque est *chronique* c'est à dire dure plusieurs années. Chez les personnes stables dans les zones à transmission saisonnières, la chronicité de l'exposition est moindre qu'en zone de transmission continue. Chez les personnes vivants dans les zones à transmission sporadique comme le Nord du Mali, l'exposition est *sub-chronique*, voire *intermittente*. Chez le voyageur, la durée de l'exposition équivaut à la durée du séjour c'est à dire le nombre de jours qu'il passera dans la zone à risque d'infection. Son exposition est *aigüe* (si le voyage dure quelques heures à quelques jours) ou *sub-chronique* (quelques semaines à quelques mois)

### **3. Contribution à un contrôle environnemental du paludisme**

Au début des années 90, on était peu conscient des risques pour la santé que représentaient les changements climatiques pour la santé, et notamment pour le paludisme. Ce manque de prise de conscience traduisait le manque général de connaissances concernant les effets néfastes probables de la perturbation des systèmes biophysiques et écologiques sur le bien-être et la santé des populations. Les difficultés que posent l'identification, la quantification et la prédiction des effets du changement climatique sur la santé ont trait aux caractéristiques de « l'exposition » et à l'élaboration de relations de causalité souvent complexes et indirectes intervenant à différentes d'échelles spatio-temporelles. Plusieurs types de préconisations sont proposés (Who, 2003).

### ***3.1. Définir une stratégie de recherche***

Les épidémiologistes étudient d'ordinaire des problèmes circonscrits géographiquement, dont l'apparition est relativement rapide et qui ont un effet direct sur la santé de groupes d'individus. Dans le cas des effets du Changement Climatique (CC) : (i) la vaste dimension géographique du problème et les périodes particulièrement longues sur lesquelles il faut se pencher sont des éléments peu familiers pour les chercheurs. (ii) les variables «expositions» (climat, variabilité et tendances) affectent l'ensemble de la population. Il n'y a pas de groupe « non exposé » pour servir de point de comparaison. Il convient dans ces conditions de comparer des communautés ou des populations entières et, ce faisant, de tenir compte des différences intercommunautaires de vulnérabilité. (iii) certains effets sur la santé se produisent par des voies indirectes et complexes. Des changements complexes de la composition et du fonctionnement des écosystèmes influent sur la propagation des maladies infectieuses à transmission vectorielle et sur la productivité agricole. (iv) une grande partie des risques prévus se manifesteront dans un certain nombre d'années, voire des décennies.

Il est possible, au moyen de recherches en santé publique, de mesurer les changements d'un impact précis sur la santé et d'attribuer cette tendance à des changements dans un facteur de risque à action directe. Selon l'OMS, les cinq tâches principales des chercheurs sont les suivantes (WHO, 2003):

1. Etablir des relations de base entre les conditions météorologiques et la santé

De nombreuses questions concernant la sensibilité de certains effets sur la santé aux conditions climatiques, à la variabilité du climat et aux changements environnementaux dus au climat n'ont pas encore trouvé de réponse.

2. Trouver des preuves des effets antérieurs du changement climatique

Nous disposons de nombreuses observations concordantes sur les changements physiques et écologiques imputables au réchauffement récent de la planète mais, jusqu'à présent, de peu d'indications sur ses effets sur la santé humaine..

3. Etablir des modèles de scénarios prévisionnels

En reliant les scénarios climatiques aux modèles d'effets sur la santé, on peut estimer les conséquences probables pour la santé de ces changements. Certains effets

sont facilement quantifiables (décès causés par des inondations ou des tempêtes, par exemple), d'autres pas (conséquences de l'insécurité alimentaire, par exemple).

4. Evaluer les possibilités d'adaptation

S'adapter signifie prendre des mesures pour réduire les effets potentiellement néfastes du changement environnemental (Voir le chapitre 11).

5. Estimer les bénéfices et les coûts de l'atténuation et de l'adaptation

**3.2. Développer et normaliser les réseaux de mesure**

Les données nécessaires au suivi des effets du climat sur la santé comprennent : (i) les variables climatiques ; (ii) les marqueurs de la santé des populations ; (iii) d'autres facteurs explicatifs non climatiques : Effets principaux (Populations de vecteurs ; notifications des maladies; distribution temporelle et géographique) ; Populations/lieux à suivre (Marges de distribution géographique (p.ex. latitude, altitude) et temporalité dans les zones d'endémie) ; Sources et méthodes d'acquisition des données sanitaires (Enquêtes locales ; données courantes de surveillance) ; Données météorologiques (Températures hebdomadaires/journalières, hygrométrie et précipitations) ; Autres variables (Utilisation des sols ; configuration en surface de l'eau douce). Les principales catégories de facteurs de confusion ou de modification comprennent :

- la structure par âge de la population
- les taux sous-jacents de morbidité
- le niveau de développement socioéconomique
- les conditions environnementales, à savoir utilisation des terres, qualité de l'air, habitat
- la qualité des soins de santé
- les mesures de lutte telles que les programmes de lutte anti-vectorielle.

Les modifications des états de santé des populations observées sur de longues séries chronologiques sont particulièrement informatives lorsque la relation climat-maladie est très marquée (grande sensibilité de la maladie au climat). Quelles que soient les formes du suivi, l'interprétation des faits observés est renforcée par des mesures de normalisation, de formation et d'assurance/contrôle de la qualité. Les mesures de suivi gagnent en efficacité moyennant une collaboration internationale et leur intégration dans les réseaux de surveillance en place.

L'utilisation de Systèmes d'Information géographiques prenant en compte l'influence des paramètres climatiques sur la transmission du paludisme a été initiée à la fin des années 90. (Caractérisation écologique des gîtes larvaires de production). En 1998, S. W. Lindsay et als. ont définie les zones de préférence écologiques de ses sous espèces *An. gambiae sensu stricto* et *An. arabiensis* et ont cartographié leur distribution relative sur le continent Africain. Ils ont utilisés un Système d'Information Géographique intégrant des données climatiques comme : la pluviométrie annuelle, la température annuelle et la température en saison sèche. Ces chercheurs ont spatialisé l'abondance relative de *gambiae s.s* par rapport à *arabiensis* à l'échelle du continent en considérant des sites d'études entomologiques localisés à travers l'Afrique.

Kleinschmidt et als, (2000) ont utilisé la statistique spatiale pour mapper l'image prédictive de la diversité du risque de paludisme dans les localités du Mali. Les variables climatiques comme la moyenne de NDVI en saison sèche, l'abondance des pluies (nombre de mois de pluviométrie > 60mm), ou la moyenne de températures maximales, la population à risque et les variables topographiques (distance des gîtes larvaires) ont été utilisé pour nourrir les modèles de prédiction de la relation entre la prévalence du paludisme et les déterminants écologiques de la transmission.

Les facteurs climatiques, comme la température et la pluviométrie, sont les paramètres clés déterminant la transmission du paludisme. La production des anophèles est liée à la pluviométrie mais, le risque de transmission vectorielle suit le devenir et/ou à la gestion des eaux de surface. Le routage des eaux de surface est forcée par les contraintes topographiques du milieu et à la nature des sols. La topographie du milieu, la nature des sols et les modifications environnementales (ouvrages agricoles, constructions traditionnelles à l'aide du banco et plein d'autres actions humaines) forcent le devenir des eaux de surface.

### **3.3. Tester des adaptations destinées à atténuer les effets négatifs du CC**

Le GIEC a défini comme suit les adaptations nécessaires : Réaction des systèmes naturels ou humains aux stimuli climatiques réels ou prévus ou à leurs effets, de façon à atténuer leurs inconvénients ou à tirer parti de leurs avantages. La mesure dans laquelle la santé humaine est affectée dépend de : (i) l'exposition des populations au changement climatique et à ses conséquences environnementales ; (ii) la sensibilité de

la population à l'exposition ; (iii) la capacité des systèmes et populations touchés à s'adapter. Il nous faut donc identifier et tester les décisions concernant les adaptations au CC, et notamment le rôle des particuliers, des communautés, des nations, des institutions et du secteur privé.

De nombreuses mesures d'adaptation ont des avantages autres que ceux associés au changement climatique. La remise en état et le maintien de l'infrastructure de santé publique est souvent considérée comme la stratégie d'adaptation la plus importante, la plus rentable et la plus immédiatement nécessaire (WHO, 2003). Cette stratégie doit, bien entendu, inclure la formation en santé publique, une surveillance et des systèmes d'intervention plus efficaces en cas de situations d'urgence, ainsi que des programmes viables de prévention et de lutte.

Les événements climatiques extrêmes auront des effets différents selon les capacités d'adaptation des populations touchées. Par exemple, des cyclones en 1970 et en 1991 ont fait au Bangladesh 300 000 et 139 000 morts respectivement. En revanche, l'ouragan Andrew qui a frappé les Etats-Unis en 1992 a fait 55 victimes (tout en causant également près de \$30 milliards de dégâts) (WHO, 2003). Il faut donc étudier les stratégies d'adaptation au climat en tenant compte d'éléments plus généraux comme la croissance démographique, la pauvreté, l'assainissement, les soins de santé, la nutrition et la dégradation de l'environnement qui influent sur la vulnérabilité d'une population et sa capacité à s'adapter.

Les mesures qui renforcent la capacité des populations à s'adapter peuvent la protéger contre la variabilité du climat actuelle ainsi que contre les changements climatiques futurs. La capacité d'adaptation englobe à la fois la capacité actuelle d'adaptation et les stratégies visant à augmenter les capacités futures. Par exemple, l'accès à l'eau non contaminée fait partie de la capacité d'adaptation actuelle des pays développés, mais représente une capacité d'adaptation potentielle dans grand nombre de pays moins développés. Les systèmes hautement aménagés, comme l'agriculture et les ressources en eau des pays développés, sont plus adaptables que les écosystèmes moins aménagés ou naturels.

Malheureusement, certaines composantes des systèmes de santé publique tendent à se relâcher quand un danger particulier perd de son acuité. Par exemple, le spectre des maladies infectieuses a semblé s'éloigner il y a 30 ans grâce au développement des

antibiotiques, des vaccins et des pesticides. Face à une recrudescence des maladies infectieuses et il est nécessaire de redynamiser les mesures de santé publique nécessaires. Bien que d'énormes progrès aient été accomplis en santé publique, il n'en reste pas moins que 170 millions d'enfants dans les pays pauvres présentant une insuffisance pondérale et que parmi ceux-ci plus de trois millions meurent tous les ans. Grand nombre de pays portent le double fardeau de maladies non transmissibles qui vont en augmentant et de la prévalence continue des maladies infectieuses (WHO, 2003).

Des stratégies visant à protéger la santé publique seront nécessaires, que l'on prenne ou non des mesures pour atténuer les effets du changement climatique. La création de moyens est une étape préparatoire essentielle. Les ressources financières, la technologie et l'infrastructure de santé publique ne suffiront pas par elles-mêmes. Il faudra y ajouter l'éducation, la sensibilisation et la création de cadres juridiques, d'institutions et de contextes permettant aux populations de prendre des décisions pour l'avenir en toute connaissance de cause.

#### **4. Mes recommandations de santé publique**

Tout le risque du paludisme c'est d'être piqué par un moustique infestant. Les voyageurs du nord au sud (businessmans, militaires, touristes, commerçants..) font que tout le monde est concerné par ce fléau. Les changements de système de la transmission sont le fait des changements d'impact environnemental sur le vecteur. Les modifications environnementales induites par le climat et l'homme se traduisent, entre autres, par la création des conditions nouvelles favorables ou défavorables à l'épidémiologie du paludisme. On connaît maintenant que la disponibilité des gîtes larvaires dans une localité favorise l'intensification de la production du vecteur par le raccourcissement du cycle gonotrophique de la femelle du moustique du fait qu'elle perdre moins de temps pour chercher à pondre ses œufs (Gu. W. et al. 2006). Toute augmentation de la fréquence du cycle biologique des anophèles peut se traduire par une élévation du niveau de transmission entraînant une recrudescence des cas de paludisme dans les faciès exondés.

Un contrôle proactif des foyers d'estivation peut régresser l'activité vectorielle du paludisme en retardant la fréquence du cycle biologique et les pics de transmission qui constituent le danger.

Le changement climatique c'est l'urgence d'agir. Il est attendu que les pays en développement et particulièrement la zone sahélienne seront plus victime du changement climatique par la désertification et les inondations. Les grandes mares du Sahara peuvent représenter au Nord (Sahara) ceux que sont les zones de barrage au Sud et constituer un danger permanent de la transmission du paludisme. D'où une possibilité de résurgence d'épidémies de paludisme sur ces nouveaux territoires colonisés par les moustiques.

Pour réussir à basculer les tendances actuelles du paludisme, la santé publique doit sortir de sa logique actuelle de voir la lutte antipaludique sous le seul angle de l'homme et du moustique. Elle doit se faire des nouveaux outils de prédictions du risque. Ces outils devront en intégrer l'environnement et les moustiques, appuyés par la prise en charge précoce et correcte des cas de paludisme dans les services de santé.

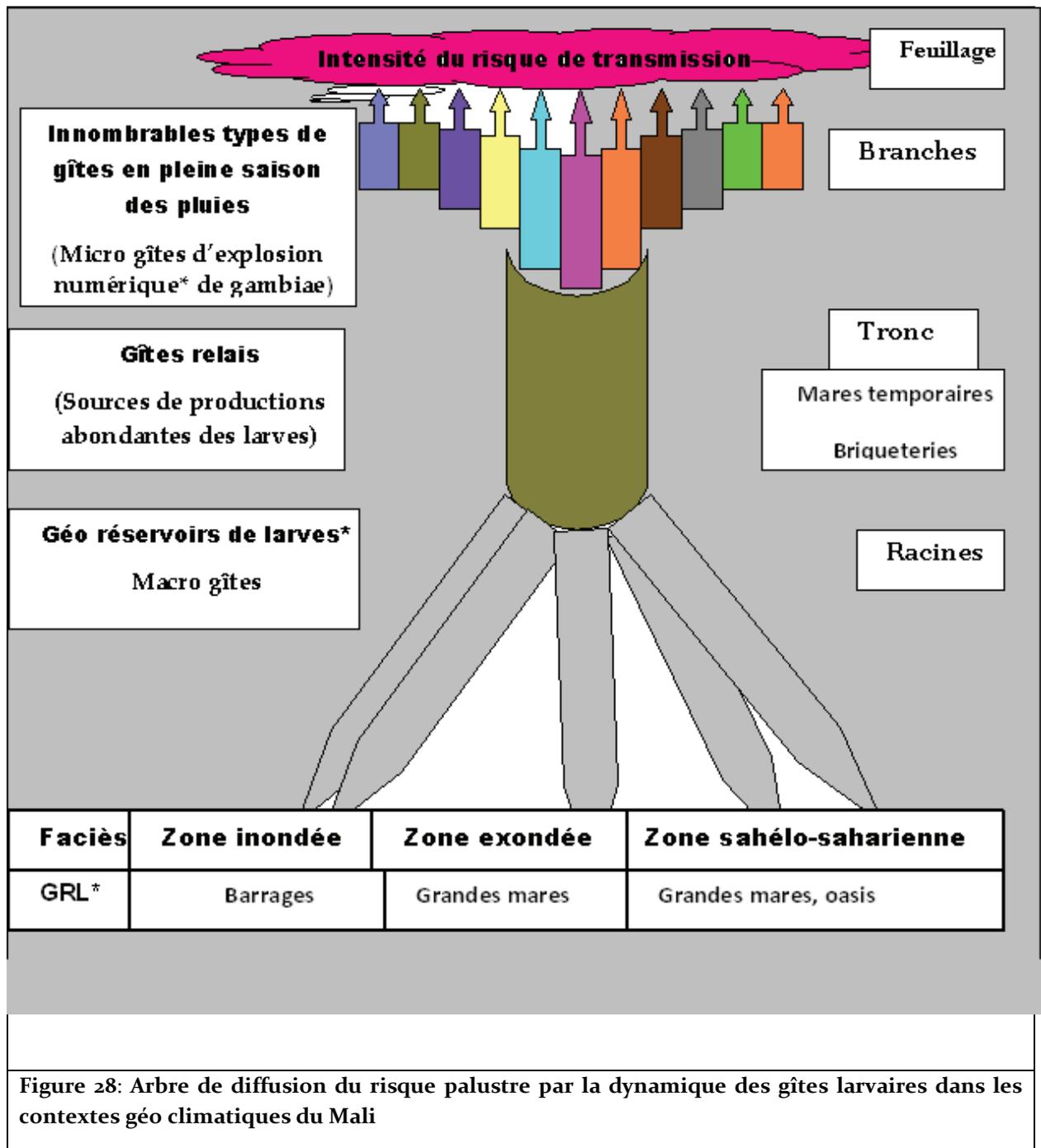
Les ministères de santé publique des pays sahéliens devront adopter **"la stratégie d'interventions selon la source de production des anophèles"**.

La création d'ouvrages pouvant retenir l'eau à la surface de la terre (ponds, barrages, aménagements de périmètres irriguées et entre autres) devra être toujours accompagnée d'une taxe "ECOLO" selon les apports économiques de l'ouvrage. Ces taxes devront être utilisés pour mener des interventions ciblées en vue de protéger les populations à risque des effets sanitaires de l'ouvrage.

Les programmes nationaux de lutte antipaludique doivent aussi changer de stratégies de combat. Chaque année, des milliards de nos francs y sont utilisés de la même façon, depuis la longue histoire mondiale d'éradication jusqu'à nos jours mais, le fardeau du paludisme ne s'affaibli pas. Les programmes d'action devront s'appuyer sur des populations qui connaissent bien leurs terrains et non des curatifs qui, au-delà de leurs soins de routine n'ont aucune autre action verticale sur le paludisme. Chaque localité devra avoir sa carte de lutte et devra participer à la lutte. Une autre source de gain, pour des jeunes démunis au niveau local, et qui ne rêvent que d'aller à l'aventure. La

charge du travail des curatifs sera diminuée par la réduction des multiples séminaires sur le paludisme qui leurs occupent. Ils passeront librement aux traitements de routine, pour mieux satisfaire les besoins d'offre de soins curatifs à la population.

Aux acteurs de la recherche en santé publique. La plupart des temps les espèces n'évoluent pas seules en biologie. Elles évoluent dans un système d'interdépendance les une les autres. L'écosystème détermine les conditions dans lesquelles les populations vivent dans les zones sahélo-sahariennes. La transmission du paludisme doit être étudiée dans le cadre des éco systèmes. Les enquêtes épidémiologiques ont moins de sens si elles sont menées sur l'homme et le moustique de façon isolée. Il ne devra plus avoir d'enquêtes isolées sur les moustiques, ni d'enquêtes isolées sur le plasmodium pour comprendre les situations du paludisme mais, des enquêtes intégrant le moustique, le plasmodium et leur environnement. On en fera autant, tant que la racine du mal n'est pas atteinte.



**Branches** : Flaques d'eau, traces de charrue, traces de dabs, traces de pneus, empreinte de sabots, empreinte de pieds, trous de rocher, trous d'arbre, poches d'extraction de banco...

# **CONCLUSION GENERALE**

En vertu de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (1992), il appartient aux gouvernements nationaux d'effectuer une évaluation formelle des risques pour la santé de leurs populations que pose le changement climatique global. Dans les pays en développement, les évaluations ont été menées uniquement dans le cadre d'initiatives de renforcement des capacités financées par des bailleurs de fonds. Le niveau d'incertitude attaché à ces bilans est rarement décrit. Les maladies à transmission vectorielle, et notamment le paludisme, ont été amplement traitées, mais ce n'est pas le cas d'autres effets, potentiellement plus grands, comme les catastrophes climatiques. Presque tous les bilans réalisés à ce jour ont recensé des lacunes en matière de recherche et énoncent souvent avec précision des questions auxquelles la recherche se doit de répondre.

## **Climat et paludisme**

*Selon le dernier rapport du Giec: «Il est avéré que beaucoup de maladies contagieuses à transmission vectorielle ou d'origine alimentaire ou hydrique sont sensibles aux changements climatiques. D'après les conclusions de la plupart des études fondées sur des modèles de prévision, il ressort avec un degré de confiance moyen à élevé que, selon les scénarios du changement climatique, il y aurait un accroissement net de l'aire géographique de transmission potentielle du paludisme et de la dengue, qui sont deux maladies à transmission vectorielle auxquelles sont actuellement exposés 40 à 50% de la population mondiale. Dans les limites de leurs aires d'extension actuelles, ces deux maladies et nombre d'autres maladies infectieuses présentent apparemment une fréquence et un caractère saisonnier plus marqués – en dépit du recul de certaines maladies infectieuses dans quelques régions. Dans tous les cas, la fréquence effective des maladies est cependant fortement influencée par les conditions environnementales locales, la situation socio-économique et l'infrastructure de santé publique.»*

Le paludisme touche des centaines de millions de personnes à des degrés divers. Il tue environ deux millions de personnes chaque année, dont environ un million

d'enfants de moins de cinq ans, à près de 90% en Afrique. En zone sahélienne, le paludisme représente toujours la première cause mortalité des enfants de moins de cinq ans. Les zones où le moustique vecteur et le parasite peuvent se développer abritent près de 2 milliards d'êtres humains. Les premiers articles publiés sur les impacts du CC sur le paludisme, il y a vingt ans, mettaient l'accent sur le risque accru posé par l'extension des zones favorables à l'insecte - les moustiques anophèles - vecteur du parasite (*Plasmodium falciparum*) pourraient recoloniser de nouveaux territoires et réintroduire le paludisme et ses épidémies. Dans un second temps, d'autres travaux sont venus tempérer cette inquiétude en montrant qu'elle reposait sur une vision trop simpliste basée uniquement sur l'écologie de ces moustiques sans prendre en compte l'homme et ses capacités d'organisation pour l'action. Puis récemment, des approches historiques - valables dès l'antiquité avec l'exemple de Rome - ont montré que, au moins dans les zones méditerranéennes, le contrôle du vecteur permettait de limiter la maladie (Capelle Angélique, 2007).

Avec les diversités écologiques africaines les paramètres pertinents sont difficiles à trouver. Les caractéristiques écologiques du même gîte changent d'un moment à l'autre. L'index de végétation peut être un bon indicateur écologique de saisons du paludisme mais, ne peut pas être utilisé pour cibler les principaux gîtes d'anophèles pour des interventions efficaces. La pluie est le facteur primordial de limitation écologique des aires de paludisme. C'est à elle que dépendent la végétation, la température et l'humidité. Dans le sahel, la pluviométrie est responsable du raccourcissement de la saison de transmission (2 mois de moins qu'en savane humide) et des fortes variations annuelles de l'intensité de transmission avec notamment intervention irrégulière d'*An funestus*. Mais, la pluie seule ne suffit pas pour expliquer les variations locales du paludisme car, les variations locales de la densité d'*An gambiae* seraient liées au nombre et à l'étendue des gîtes larvaires. Les types de gîtes changent d'un milieu à l'autre selon les contraintes topographiques du milieu. Ce travail nous permet de suggérer qu'en milieu sahélien, la topographie locale du milieu doit être un paramètre additionnel au climat pour mieux expliquer l'impact du devenir des eaux de pluies sur la variabilité climatique du paludisme. La température ne fait pas défaut au Sahara. Elle n'est donc pas un paramètre influent de modèle de prédiction dans cette

région si son influence écologique ne peut pas expliquer la distribution du paludisme comme nous l'avons vu à Dèbo.

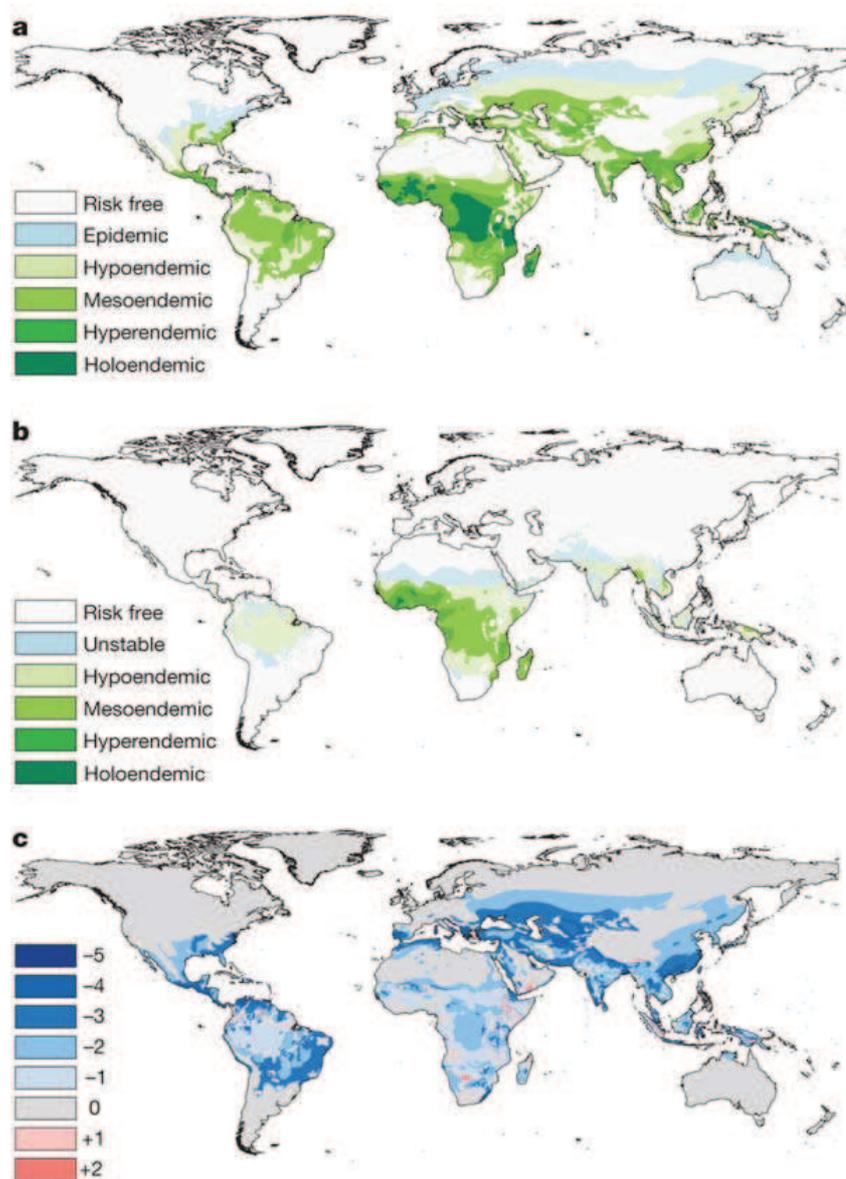
## **Climat et santé publique**

Dans un article paru le 20 mai dernier dans *Nature*, Gething et al. (2011) se réalisent un bilan des relations entre le paludisme, le changement climatique et les politiques de santé publique mises en oeuvre. Les auteurs ont compilé des données du programme MAP (Malaria Atlas Project) qui permettent de faire les cartes de la transmission du paludisme par *Plasmodium falciparum* en 1900 et en 2007 (Figure 28) (Hay et al. 2006).

Ces cartes montrent une régression nette des zones concernées, même si cette régression ne se traduit pas en baisse de l'incidence globale du fait de l'explosion démographique dans les pays endémiques. La corrélation entre paludisme et climat peut ainsi être brisée grâce à l'efficacité des politiques de lutttes contre la maladie et ses vecteurs. Des exemples très positifs de lutte anti-moustique, par exemple en Asie du Sud-Est (moustiquaire à insecticides fabriquées localement) sont présentés en appui de cette observation globale. Par conséquent, malgré l'extension des zones géographiques favorables au vecteur, due au changement climatique, les contre-mesures de santé publique peuvent avoir un effet bien supérieur sur l'extension effective de la maladie.

Si les politiques de santé publique et de lutte anti-vectorielle peuvent contrecarrer la progression et permettent d'envisager l'éradication de cette maladie, il ne faut toutefois pas ignorer que : (i) l'apparition de résistances du parasite aux molécules pharmaceutiques complique le tableau et met en échec les monothérapies ; et que (ii) l'usage régulier des moustiquaires se heurte à des problèmes pratiques et culturels. Ces facteurs biologiques fragilisent de plus en plus la capacité humaine sur l'évolution normale du paludisme en Afrique (FANE et al. 2011).

En outre, certaines pratiques culturelles donnent l'avantage au paludisme sur le terrain. Les nombreuses poches d'extractions de banco pour la construction de l'habitat traditionnel sont des énormes sources de production supplémentaire d'anophèles en appui aux gîtes naturels (cf. page 127).



**Figure 29.** Changement de l'endémicité du paludisme mondial depuis 1900.

(a) première évaluation de l'endémicité (environ 1900). (b) endémicité contemporaine (2007) compilée à partir Malaria Atlas Project visant à limiter l'extension et l'intensité de la transmission courante du *P. falciparum*. (c) changement de classe d'endémicité entre 1900 et 2007. Les valeurs négatives dénotent une réduction de l'endémicité, et les valeurs positives une augmentation (Gething et al., 2011).

Les conclusions de nombreux travaux récents sont néanmoins claires : le développement économique, une politique de santé publique forte, la recherche vaccinale et une lutte spécifique contre les moustiques vecteurs peuvent mettre fin à ce fléau millénaire. Pour être proactif et protéger les populations contre le risque palustre, la santé publique doit se doter de nouvelles méthodes et de nouveaux outils d'intégration des paramètres climatiques et environnementaux dans les modèles de prédiction.

Au cours de notre étude, nous avons analysé la variabilité climatique et son impact sur la variation des densités anophéliennes et du risque de transmission du *Plasmodium* dans plusieurs contextes écoclimatiques du sahel malien.

Nos résultats ont confirmé l'existence d'une variabilité du risque de transmission vectorielle du paludisme liée aux variations écologiques générées par la pluviométrie, le relief et la nature des sols.

L'intérêt de ces résultats nous a amené à conclure que le changement climatique peut radicalement changer l'épidémiologie du paludisme au Sahara par un changement écologique que l'Afrique doit prévoir ou du moins, apprendre à prévoir.

# REFERENCES

- Abeku TA, Gerrit JO, Borsboom G, Sake JV, Habbema JDF. Spatial and temporal variations of malaria epidemic risk in Ethiopia : factors involved and implications. *Acta Tropica* 2003; 87:331-340
- Afolabi BM, Amajoh CN, Adewole TA, Salako LA. Seasonal and temporal variations in the population and biting habit of mosquitoes on the Atlantic Coast of Lagos, Nigeria. *Med Princ Pract* 2006;15:200-2008
- Banque mondiale (BM). Développement et changement climatique. **Rapport sur le développement dans le monde. Abrégé – version préliminaire.** 2010.
- Baudon D. Les faciès épidémiologiques. I.M.T.S.S.A. Marseille, France 2000; BP 46.
- Baudon D. Les faciès épidémiologiques des paludismes en Afrique sub-saharienne conséquences pour la lutte antipaludique. *Sci. Med. Afr.* 2010;2(1):141-145
- Bayoh MN, Lindsay SW. Effect of temperature on the development of the aquatic stages of *Anopheles gambiae sensu stricto* (Diptera: Culicidae). *Bulletin of Entomological Research* 2003;93:375-381
- Boyd MF. Editor, *Malariaology*, Saunders, Philadelphia (1949).
- Bayoh MN, Lindsay SW. Effect of temperature on the development of the aquatic stages of *Anopheles gambiae sensu stricto* (Diptera: Culicidae). *Bull. Entomol. Res.* 2003;93:375-381.
- Bayoh MN, Lindsay SW. Temperature-related duration of aquatic stages of the Afrotropical malaria vector mosquito *Anopheles gambiae* in the laboratory. *Med. Vet. Entomol.* 2004;18:174-179.
- Bouma MJ, Sondorp HE, Van der Kaay HJ. "Health and climate change." *The Lancet* 1994;343: 302.
- Bicout D, Fontaine B, Sabatier P. Analyse du Changement Climatique et de ses Impacts sur l'Eau et la Santé. Rapport final ACCIES. Appel à Proposition de Recherche Gestion et Impact du Chagement Climatique (Gicc 2, 2005). Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Developpement Durable et de la Mer. Direction des Etudes Economiques et de L'Evaluation Environnementale. 1 Septembre 2009.
- Bicout,DJ, Chalvet-Monfray K, Sabatier P. "Infection Persistence Time of Aedes Breeding Habitats." *Physica A* 2002;305:597-603.
- Bicout DJ, Sabatier P. "Mapping Rift Valley Fever vectors and prevalence pattern using rainfall variations." *Vector Borne Zoonotic Diseases* 2004;4(1): 33-42.
- Bogh CI, Lindsay SW, Clarke S, Dean A, Jawara M, Pinder M, Thomas CJ. High spatial resolution mapping of malaria transmission risk in the Gambia, west Africa, using Landsat TM satellite imagery. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 2007;76(5):875-881
- Capelle A. Paludisme et réchauffement climatique. Certificat international d'Ecologie Humaine. Option Ecologie Humaine et Santé. Mémoire de 2è année 2007.
- Campbell-Lendrum DH, Corvalán CF, Prüss-Ustün A. How much disease could climate change cause? <http://www.who.int/globalchange/publications/climatechangechap7.pdf>
- Carnevale P, Vincent R, Molez JF, Baudon D. Faciès épidémiologique des paludismes en Afrique sub-saharienne. *Etudes médicales* 1984;3:123-133.
- Christophers, Sinton JA, Covell G. **How to do a malaria survey** 3rd ed. revised, by J.A. Sinton. By S.R. Published in Delhi 1936.
- Christensen JH, Hewitson B, Busuioc A, Chen A, Gao X, Held I et al. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Regional climate projections. *Climate Change* 2007.

Centre International de Recherche-Développement sur l'Élevage en zones Sub-humides (CIRDES). Évolutions démographiques et changements climatiques: Impacts sur les maladies à transmission vectorielle en Afrique de l'ouest. Conférence internationale à Ouidah (Bénin) novembre 2008.

Cissé A. Cours d'écologie végétale. Ecole Normale Supérieure (ENSUP) de Bamako. Option biologie 2<sup>ème</sup> année maîtrise 1986.

Craig MH, Snow RW, le Sueur DA. Climate-based distribution model of malaria transmission in Sub-Saharan Africa. *Reviews Parasitology Today* 1999;vol. 15:no. 3.

Craig MH, Kleinschmidt I, Nawn JB, Le Sueur D, Sharp BL. Exploring 30 years of malaria case data in KwaZulu-Natal, South Africa: Part I. The impact of climatic factors. *Tropical Medicine and International Health* 2004;Vol 9 No12:1247-1257.

Colwell RR, Patz JA. *Climate Infectious Disease and Health*. Washington, American Academy of Microbiology. Committee on Climate, Ecosystems, Infectious Diseases, and Human Health, Board on Atmospheric Sciences and Climate (2001). *Under the Weather: Climate, Ecosystems, and Infectious Disease*, National Research Council 1998.

Dai A, Lamb PJ, Trenberth KE, Hulme M, Jones PD, Xie P. The recent Sahel drought is real. *Int. J. Climatol* 2004;24:1323-1331.

Diuk-Wasser MA, Touré MB, Dolo G, Bagayoko M, Sogoba N, Traoré S. F. et al. **Vector abundance and malaria transmission in rice-growing villages in Mali.** *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 2005;72(6):725-731.

DOLO G, Briët OJT, DAO A, Traoré SF, Bouaré M, Sogoba N. et al. Malaria transmission in relation to rice cultivation in the irrigated Sahel of Mali. *Acta Tropica* 2004;89:147-159.

Delmont J. Paludisme et variations climatiques saisonnières en savane soudanienne d'Afrique de l'Ouest. In: *Cahiers d'études africaines*. 1982;Vol. 22 N°85-86:117-133.  
[http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/cea\\_0008-0055\\_1982\\_num\\_22\\_85\\_2276](http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/cea_0008-0055_1982_num_22_85_2276)

Ecole Nationale de Médecine et de Pharmacie du Mali (ENMP). Etat de santé des populations riveraines avant la mise en eau du barrage de Sélingué. Programme des Nations Unies pour le Développement-Projet MLI 77/006-Autorité pour l'Aménagement du Barrage de Sélingué, 1980;1:1-237.

Ecole Nationale de Médecine et de Pharmacie du Mali (ENMP). Etat de santé des populations riveraines avant la mise en eau du barrage de Sélingué. Programme des Nations Unies pour le Développement-Projet MLI 77/006-Autorité pour l'Aménagement du Barrage de Sélingué, 1980;2:237-400.

Epstein PR, Diaz HF, Elias SA, Grabherr G, Graham NE, Martens WJM. et al. "Biological and physical signs of climate change focus on mosquitoes-borne diseases." *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1998;78:409-417.

Fane MD, Cissé O, Traoré SF, Sabatier P. **Anopheles Gambiae Resistance to Pyrethroid-treated Nets in Cotton versus Rice Areas in Mali.** *Acta Tropica*, 2011 (in press)

FANE M, Nadine D, Gaudart J, Sabatier P. Impact de la structure des gîtes larvaires sur l'abondance des vecteurs du paludisme: Comparaison dans trois strates éco-géographiques au Mali. Université Joseph Fourier de Grenoble I. Communication, Journées EPSP avril 2008.

Fillinger UB, Knols G, Becker N. Efficacy and efficiency of new *Bacillus thuringiensis* var *israelensis* and *Bacillus sphaericus* formulations against Afrotropical anophelines in western Kenya. *Trop. Med. Int. Health* 2003;8: 37-47.

Mutuku FM, Bayoh MN, Gimnig JE, Vulule JM, Kamau L, Walker ED. et al. Pupal habitat productivity of *Anopheles gambiae* complex mosquitoes in a rural village in western Kenya. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 2006;74(1):54-61

Gaudart J, Dessay N, Touré O, Fané M, Sabatier P, Doumbo O. ACCIES : Analyse du Changement Climatique et de ses Impacts sur l'eau et la Santé. Rapport du groupe de travail« Développement d'une

méthodologie appliquée à l'évaluation du risque palustre, au Mali ». [www.cybertim.timone.univ-mrs.fr/...mali.../download](http://www.cybertim.timone.univ-mrs.fr/...mali.../download)

Gerbaux M, Hall, N, Dessay N, Zin I. The sensitivity of Sahelian runoff to climate change. *Hydrological Sciences Journal*, 2009;54(1).

Gemperli A, Sogoba N, Fondjo E, Mabaso M, Bagayoko M, Briet OJT. et al. Mapping malaria transmission in West and Central Africa. *Tropical Medicine and International Health* 2006;volume 11 no 7:1032–1046.

Gillies MT, De Meillon B. *The Anophelinae of Africa south of the Sahara*. The South African Institute for Medical Research, Johannesburg 1968.

Gimnig JE, Ombok M, Kamau L, Hawley WA. Characteristics of larval anopheline (Diptera: Culicidae) habitats in Western Kenya. *J. Med. Entomol.* 2001;38:282-288.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. The Physical Science Basis. Cambridge University Press: Cambridge. 2007.

Gimnig JE, Ombok M, Kamau L, Hawley WA. Characteristics of larval Anopheline (Diptera: Culicidae) Habitats in Western Kenya. *J. Med. Entomol.* 2001;38(2):282-288.

Gu W, Novak RJ, Habitat-based modeling of impacts of mosquito larval interventions on entomological inoculation rates, incidence and prevalence of malaria. *Am J Trop Med Hyg* 2005;73:546–552.

Gu W, Regens JL, Beier JC, Novak RJ. Source reduction of mosquito larval habitats has unexpected consequences on malaria. *PNAS*. 2006;vol. 103, no 46:17560–17563.

Hales S and al. "El Nino and the dynamics of vector-borne disease transmission." *Environmental Health Perspectives* 1999;107.

Holstein MH. *Biology of Anopheles gambiae*. WHO, Geneva, Switzerland 1954.

Hoshen MB, Morse AP. A weather-driven model of malaria transmission. *Malaria Journal* 2004;3:32

Himeidan YE, Zhou G, Laith Y, Afrane Y, Munga S, Atieli H. et al. Habitat stability and occurrences of malaria vector larvae in western Kenya highlands. *BioMed Central Ltd. Malaria journal* 2009;8:234

Huffaker BC. The temperature relations of the immature stages of the **malarial** mosquito, *Anopheles quadrimaculatus* Say, with a comparison of the developmental powers of constant and variable temperature in insect metabolism. *Ann. Ent. Soc. Am.* 1944;37:1-27.

Ijumba JN, MOSHA FW, Lindsay SW. Malaria transmission risk variations derived from different agricultural practices in an irrigated area of northern Tanzania. *Medical and Veterinary Entomology* 2002;16:28-38

Jacob BG, Muturi E, Halbig P, Mwangangi J, Wanjogu RK, Mpanga E. et al. Environmental abundance of *Anopheles* (Diptera:culicidae) larval habitats on land cover change sites in Karima village, Mwea rice scheme, Kenya. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 2007;76(1):73-80

Janicot S, Harzallah A, Fontaine B, Moron V. West-African Monsoon dynamics and eastern equatorial Atlantic and Pacific SST anomalies (1970– 1988), *J. Clim.* 1998;11:1874–1882.

Jeune Afrique-Air Afrique. *L'Atlas du continent africain*. Le groupe Jeune Afrique et les éditions du Jaguar 57 bis rue D'Auteuil 75016 PARIS. ISBN 1993;2-86950-247-8.

Desconnets JC, Taupin JD, Lebel T, Leduc C. Hydrology of the Hapex–Sahel central super-site: surface water drainage and aquifer recharge through the pool systems, *J. Hydrol.* 1997;188–189 (1–4)155–178.

Killeen GF, Seyoum A, Knols BGJ. Rationalizing historical successes of malaria control in Africa in terms of mosquito resource availability management. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 2004;71:87-93.

Killeen GF, Fillinger U, Knols BG. Advantages of larval control for African malaria vectors: low mobility and behavioural responsiveness of immature mosquito stages allow high effective coverage. *Malar. J.* 2002;1:8.

Kitron U, Spielman A. Suppression of transmission of malaria through source reduction: anti-anopheline measures applied in Israel, the United States, and Italy. *Rev. Infect. Dis.* 1989;11: 391-406.

Kleinschmidt I, Bagayoko M, Clarke GPY, Craig M, le Sueur D. A spatial statistical approach to malaria mapping. *International Journal of Epidemiology* 2000;29:355-361

Lacaux JP, Tourre YM, Vignolles C, Ndione JA, Lafaye M. Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, 2007;106(1):66-74.

Le Barbé L, Lebel T, Tapsoba D. Rainfall variability in West Africa during the years 1950-90, *J. Climate.* 2000;15:187-202.

Le Menach A, McKenzie FE, Flahault AL, Smith D. The unexpected importance of mosquito oviposition behaviour for malaria: non-productive larval habitats can be sources for malaria transmission. *Malaria Journal* 2005;4:23.

Lindblade KA, Walker ED, Onapa AW, Katungu J, Wilson mL. Land use change alters malaria transmission parameters by modifying temperature in a highland area of Uganda. *Tropical medicine & International Health.* 2000;5:263

Lindsay SW, Parson L, Thomas CJ. Mapping the ranges and relative abundance of the two principal African malaria vectors, *Anopheles gambiae sensu stricto* and *A. arabiensis*, using climate data. *Proc. R. Soc. Lond. B* 1998;265:847-854

Levine RS, Peterson AT, Benedict MQ. Geographic and ecologic distributions of the *Anopheles gambiae* complex predicted using a genetic algorithm. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 2004;70(2):105-109

Longstreth JD, Wiseman J. The potential impact of climate change on patterns of infectious disease in the United States. In *The potential effects of global climate change on the United States: Appendix G Health*, ed. J. B. Smith and D. A. Tirpak for the Office of Policy, Planning, and Evaluation, U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency. 1989.

**Macdonald G.** The epidemiology and control of malaria. Oxford University Press, London, United Kingdom. 1957.

Martens WJM, Jetten TH, Rotmans J. Climate change and vector-borne diseases. A global modelling perspective. *Global Environmental Change* 1995;5: 195-209.

Metselaar D, van Thiel PH. Classification of malaria. *Trop. And Geographical Medicine* 1959;11:157

McMichael AJ, Haines A, Sloff R. Climate Change and Human Health. World Health Organization, World Meteorological Organization, United Nations Environmental Program, Geneva, Suisse. 1996.

Minakawa N, Sonye G, Yan G. Relationships Between Occurrence of *Anopheles gambiae* s.l. (Diptera: Culicidae) and Size and Stability of Larval Habitats. *J. Med. Entomol.* 2005;42(3):295-300.

Minakawa N, Githure JI, Beier JC, Yan G. Anopheline mosquito survival strategies during the dry period in western Kenya. *J. Med. Entomol. BioOne, PubMed, CSA.* 2001;38:388-392.

Minakawa N, Mutero CM, Githure JI, Beier JC, Yan G. Spatial distribution and habitat characterization of anopheline mosquito larvae in Western Kenya. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 1999;61:1010-1016.

Minakawa N, Sonye G, Mogi M, Yan G. Habitat characteristics of *Anopheles gambiae* s.s. larvae in a Kenyan highland. *Med. Vet. Entomol.* 2004;18:301-305.

Minakawa N, Sonye G, Mogi M, Githeko A, Yan G. The effects of climatic factors on the distribution and abundance of malaria vectors in Kenya. *J. Med. Entomol.* 2002;39 (6):833-841.

Minakawa N, Omukunda E, Zou G, Githeko A, Yan G. Malaria vector productivity in relation to the highland environment in Kenya. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 2006;75(3):448-453

**Ministère de la santé (MS). Renforcement des capacités de surveillance épidémiologique du paludisme dans les régions nord du Mali.** PNLN, Bamako-Mali. Septembre 2003.

Ministère de la Santé : Lutte contre le paludisme au Mali. *Regard sur la santé 2000*;n°003:3-29

Mouchet J, Carnevale P. **Le paludisme composante de l'environnement africain.**

ORSTOM-Actualités N° 20 Janvier-Février 1988.

Mouchet J, Carnevale P, Coosmans M, Fontenille D, Ravaonjanahary C, Richard A. et al. **Typologie du paludisme en Afrique.** Cahiers Santé 1993;3:220-38.

Mouchet J, Manguin S, Sircoulon J, Laventure S, Faye O, Onapa A. et al. Evolution of malaria in Africa for the past 40 years : Impact of climate and human factors. *Journal of the American Mosquito Control Association*, 1998;14(2):121-130.

Mouchet J, Carnevale P. **Impact des transformations de l'environnement sur les maladies à transmission vectorielle.** Cahiers Santé 1997;7:263-9.

MELLOR PS, LEAKE CJ. Climatic and geographic influences on arboviral infections and vectors. *Rev. Sci. Tech. Off. Int. Epiz.* 2000;19:41-54.

NEVILL H, NEVILL EM. A survey of the *Culicoides* (Diptera: *Ceratopogonidae*) 1995.

Ndiaye PI, Bicout DJ, Mondet B, Sabatier P. "Rainfall Triggered Dynamics of *Aedes* mosquito Aggressiveness." *Journal of Theoretical Biology* 2006;243: 222-229.

Ndione JA, Lacaux JP, Tourre Y, Vignolles C, Fontanaz D, Lafaye M. Water ponds and sanitary risk in the Ferlo area: Contribution of remote sensing in studying Rift Valley Fever between August 2003 and January 2004. *Science et changements planétaires / Sécheresse.* 2009;20:1, 153-60.

Nicholson SE, Yin X, Ba MB. On the feasibility of using a lake water balance model to infer rainfall: an example from Lake Victoria *Hydrol. Sci. J.* 2000;45:75-95.

Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S). **Dix principaux points sur le paludisme.** Informations Essentielles sur l'OMS. Mars 2009.

**Organisation Mondiale de la Santé.** WHO Media centre. **Changement climatique et santé.** Aide-mémoire N°266 Janvier 2010

WHO. Climate change and human health - risks and responses. Summary. 2003;37:ISBN 92 4 159081 5.

Peng BI, Tong S, Donald K, Parton KA, Jinfa NI. Climatic variables and transmission of malaria: A 12-year data analysis in Shuchen country, China. *Public Health Reports/ January-February 2003*;118:

Porphyre T, Bicout DJ, Sabatier P. Modelling the abundance of mosquito vectors versus flooding dynamics. *Ecological Modelling*, 2005;183(2-3):173-181.

Ministère de la santé (MS). Plan de Suivi/Evaluation 2007-2011 du Programme Nationale de Lutte contre le Paludisme (PNLP) du Mali. Juin 2008.

Ministère de L'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche. **Étude du bilan environnemental du barrage de Sélingué.** Projet d'Aménagement du Périmètre Irrigué de Maninkoura (PAPIM)/ Office de Développement rural de Sélingué/ SNC-LAVALIN International. Octobre 2003.

Rogers DJ, Randolph SE. The Global Spread of Malaria in a Future, Warmer World. *Science* 2000;289:1763-1765.

Reiter P. "Climate change and mosquitoes-borne diseases." *Environ. Health Perspect.* 2000;109:141-161.

Simon IH, Carlos AG, Andrew JT, Abdisalan MN, Robert WS. The global distribution and population at risk of malaria: past, present, and future. *Reviews. Lancet Infect Dis* 2004;4:327-36

Small J, Goetz SJ, Hay IS. Climatic suitability for malaria transmission in Africa, 1911-1995. *The National Academy of Sciences of the USA PNAS.* 2003;100:no.26, 15341-15345

Sainz-Elipse S, Latorre JM, Escosa R, Masià M, Fuentes MV, Mas-Coma S et al. Malaria resurgence risk in southern Europe: climate assessment in an historically endemic area of rice fields at the Mediterranean shore of Spain. *Malaria Journal* 2010;9:221  
<http://www.malariajournal.com/content/9/1/221>

Saugeon C, Baldet T, Akogbeto M. Le climat et la démographie peuvent-ils avoir un impact important sur le paludisme en Afrique subsaharienne dans les 20 prochaines années? *Médecine tropicale A.* 2009;69:n° 2, 203-207

Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB. et al. Cambridge University Press, Cambridge, 847-940.

Sultan B, Janicot S. The West African monsoon dynamics. Part II: The "preonset" and "onset" of the summer monsoon. *J. Climate* 2003;16:3407 - 3427.

Sunahara T, Ishizaka K, Mogi M. Habitat size: a factor determining the opportunity for encounters between mosquito larvae and aquatic predators. *J. Vector. Ecol.* 2002;27:8-20.

Sogoba N, Doumbia S, Vounatsou P, Baber I, Keita M, Maiga M. et al. Monitoring of Larval Habitats and Mosquito Densities in the Sudan Savanna of Mali: Implications for Malaria Vector Control. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 2007;77(1):82-88.

Wenkosi M, Mabaso LH, Craig M, Ross A, Smith T. Environmental predictors of the seasonality of malaria transmission in Africa: The challenge. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 2007;76(1):33-38

Service MW. Mortalities of the immature stages of species B of the *Anopheles gambiae* complex in Kenya: comparison between rice fields and temporary pools, identification of predators, and effects of insecticidal spraying. *J. Med. Entomol.* 1977;13:535-545.

Sijikumar S, Roucou P, Fontaine B. , 2006, Monsoon onset over Sudan-Sahel: Simulation by the regional scale model MM5. *Geophys. REs. Letters*, 33, L03814, doi:10.1029/2005GL024819.

Sogoba N, Doumbia S, Vounatsou P, Bagayoko MM, Dolo G, Traoré SF. et al. **Malaria transmission dynamics in Niono, Mali: the effect of the irrigation systems.** *Acta Tropica* 2007;101:232 - 240

Stoops CA, Gionar YR, Shinta, Sismadi P, Elyazar IRF, Bangs MJ, Supratman SJ. *Med. Entomol.* 2007;44 (4):543-553.

Trape JF, Pison G, Spiegel A, Enel C, Rogler C. Combating malaria in Africa. *Trends Parasitol.* 2002;18: 224-330.

TOURE OA, KONE PL, Ronan J, Tanoh DK, Sarr D, BEUGRE GE. Et al. Sensibilité in vitro de *P. falciparum* à la quinine, l'artésunate et la chloroquine à Abidjan (Côte d'Ivoire) = In vitro susceptibility of *P. falciparum* isolates from Abidjan to quinine, artesunate and chloroquine. *INIST-CNRS*. 2008;18:n°1,43-47

Tourre YM, Lacaux J. Monitoring the Environment using High-Spatial Resolution Remote Sensing: Contribution to Health Information Systems, *Eos Trans. AGU*, 2007;88(52):Fall Meet.

**Tia E, Akogbeto M, Koffi A, Toure M, Adja AM, Kone M. et al.** Situation de la résistance d'*Anopheles gambiae* s.s. (*Diptera : Culicidae*) aux pyréthrinoides et au DDT dans cinq écosystèmes agricoles de Côte-d'Ivoire. Manuscrit n° 2877. "Entomologie médicale". 2006.

Vignolles C, Lacaux JP, Tourre YM, Bigeard G, Ndione JA, Lafaye M. Rift Valley fever in a zone potentially occupied by *Aedes vexans* in Senegal: dynamics and risk mapping. *Geospat Health*. 2009;3(2):211-20.

World Health Organisation. Mapping the disease information across sectors. Geographic information systems. (NLM classification: WB700) ISBN97892 4 1563376. 2007.

Washburn JO. Regulatory factors affecting larval mosquito populations in container and pool habitats: implications for biological control. *J. Am. Mosq. Control Assoc.* 1995;11:279-283.

Wenceslas MR, Leduc C. Dynamiques de vidange d'une mare temporaire au Sahel : l'exemple de Banizoumbou (Sud-Ouest du Niger). Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. C. R. Geoscience 2003; 335:461-468

Yaro AS, Dao A, Adamou A, Crawford JE, Ribeiro JMC, Gwadz R et al. The distribution of the hatching time in *Anopheles gambiae*. *BioMed Central Ltd. Malaria journal* march 2006;5:19

Touré YT, Petrarca V, Traoré SF, Coulibaly A, Maïga HM, Sankaré O. Ecological genetic studies in the chromosomal form Mopti of *Anopheles gambiae* s.str. in Mali, West Africa. *BIOMEDICAL AND LIFE SCIENCES*. Volume 94, Numbers 2-3, 213-223, DOI: 10.1007/BF01443435

Zheng X, Eltahir EAB. The Role of Vegetation in the Dynamics of West African Monsoons, *Journal of Climate*, 1998;11(8):2078-2096.

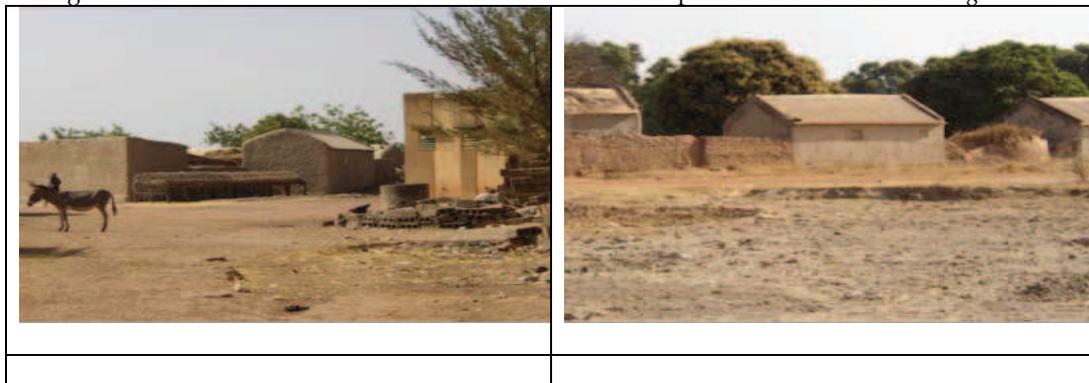
Zhou G, Munga S, Minakawa N, Githeko AK, Yan G. Spatial relationship between adult malaria vector abundance and environmental factors in western Kenya highlands. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 2007;77(1):29-35

Types de gâtes d'*A. gambiae* créés par l'extraction du banco pour la construction de l'habitat traditionnel dans les faciès étudiés



Petite briqueterie à l'extrême Sud-Ouest du village de Bancoumana

Grande briqueterie à sec mais avec un puits au centre qui contenait des larves de *A. gambiae*.





Puis de briqueterie.



Briqueterie localisée au Nord du village de Barikodaga

Grande briqueterie au sud



Autre briqueterie au Sud-Ouest du village Barikodaga

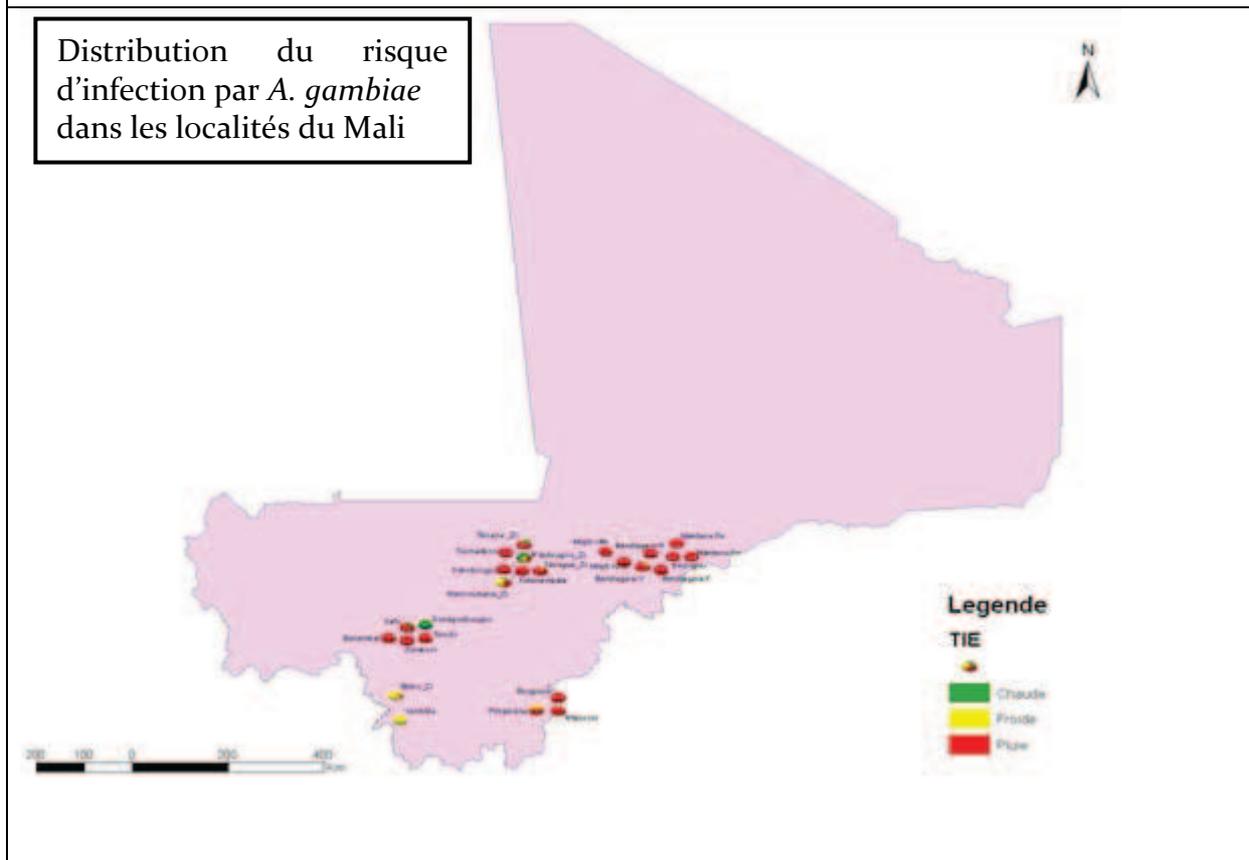
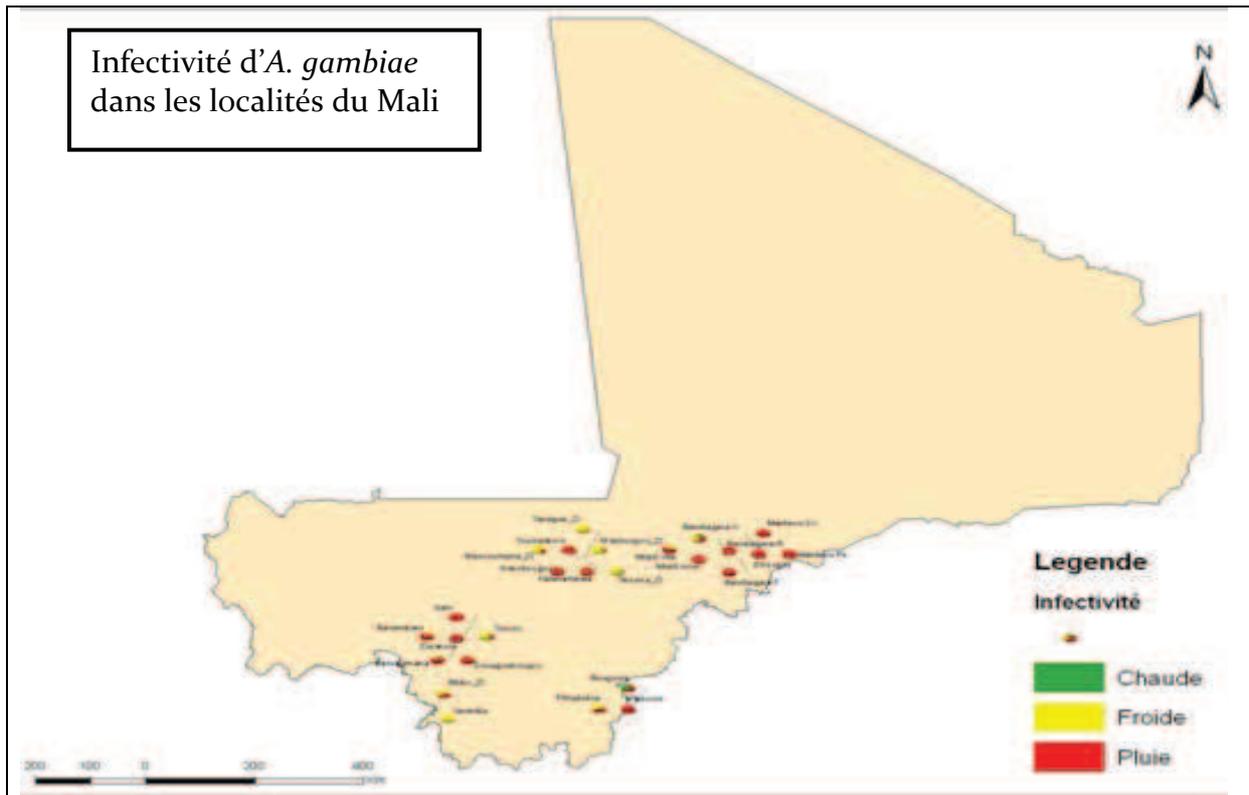


Briqueterie dans un champ à Matéourou



Briqueterie abandonnée à côté du champ



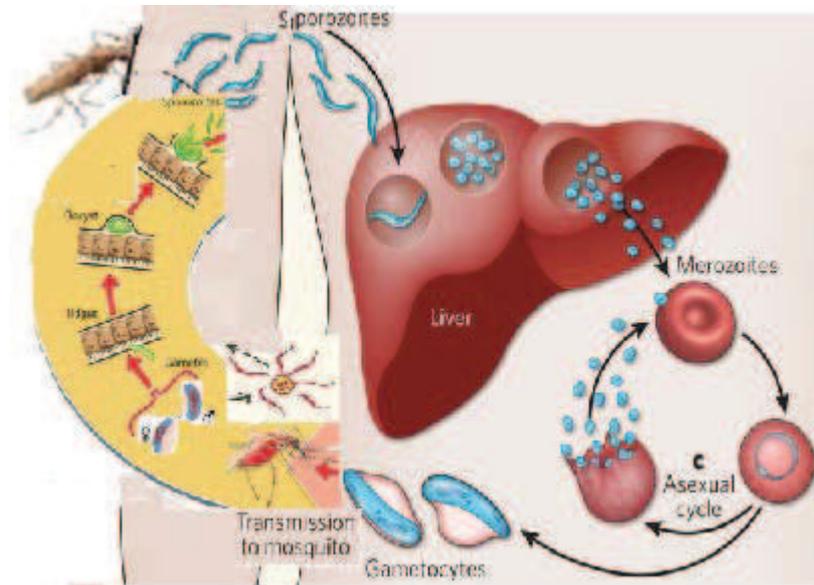


## **Annexes**

**Annexes-1.**

**Le cycle biologique du Plasmodium chez l'Homme et le moustique.**

Le *Plasmodium* affecte le moustique pour sa reproduction et l'homme pour sa multiplication.

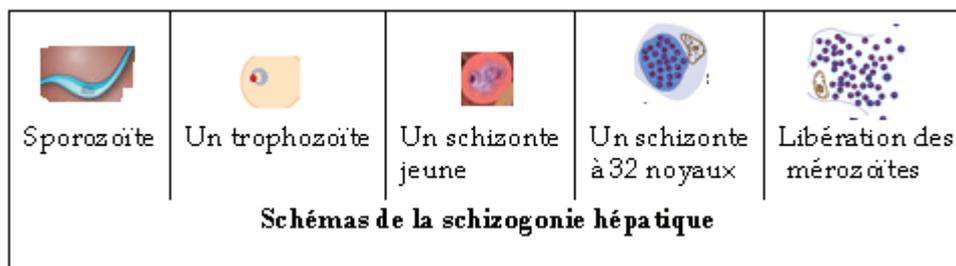


**Evolution du plasmodium dans l'organisme humain : la schizogonie**

Une fois inoculé dans l'organisme humain, le *Plasmodium* infectieux ou sporozoïte migre vers une cellule hépatique, sa niche écologique.

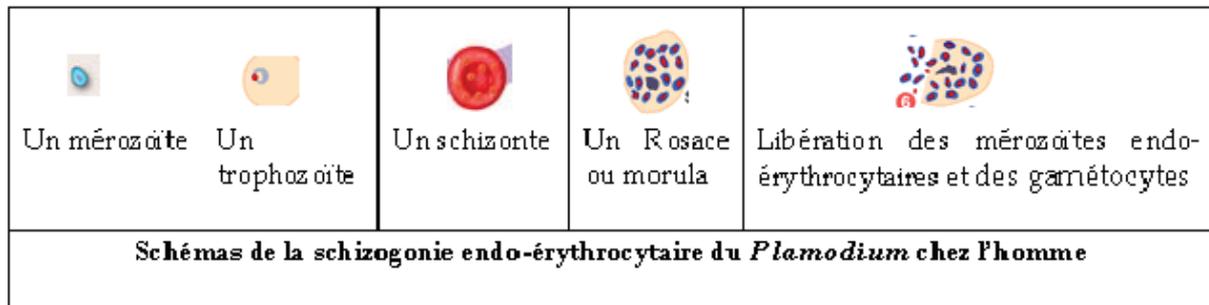
**Au niveau du foie :** Une minute après son inoculation chez l'homme par le moustique, le sporozoïte gagne le foie. Pendant 10 jours au minimum, le parasite subit une division multiple asexuée et libère des cellules filles appelées mérozoïtes hépatocytaires.

La capacité que possède particulièrement *P. vivax* de survivre dans des zones climatiques différentes est due au fait que ce parasite peut demeurer en latence dans le foie de son hôte pendant des mois et même des années à l'état quiescent de bradysporozoïtes ou hypnozoïtes (Lyssenko, 1976).



**Au niveau des globules rouges ou hématie :** Chaque mérozoïtes hépatocytaires pénètre dans un globule rouge du sang et subit une autre division multiple cette fois-ci endo-érythrocytaire pour libérer des cellules filles appelées mérozoïtes endo-érythrocytaires accompagnés par le paludisme et des gamétocytes (♂ et ♀). Cette phase érythrocytaire dure 72 heures chez *P. malariae* et 48 heures chez les trois autres espèces plasmodiales de l'homme.

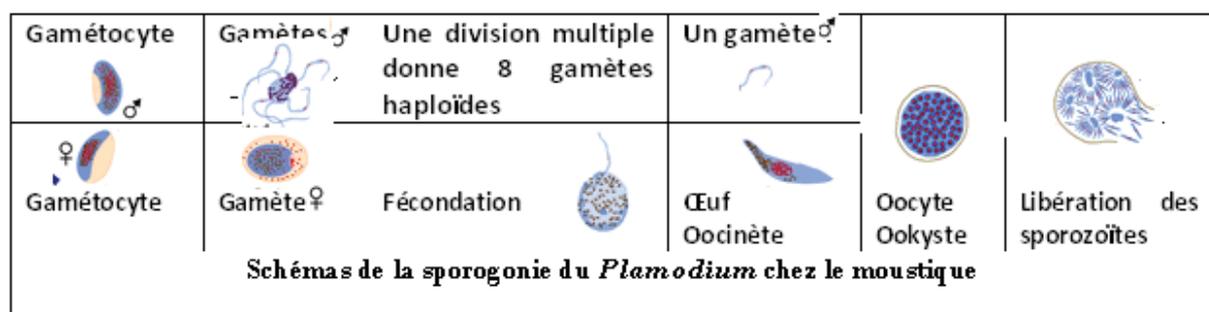
Un mérozoïte → 8 mérozoïtes en 48H puis, 64 mérozoïtes en 48H puis, 512 mérozoïtes en



48H soit, 584 mérozoïtes en 6 jours et ainsi de suite...

### Evolution du plasmodium chez le moustique: la sporogonie

Les gamétocytes libérés en deuxième phase de la multiplication végétative du plasmodium chez l'homme produisent des gamètes (♂ et ♀) et entrent en multiplication sexuée dans l'organisme du moustique conduisant à la formation des sporozoïtes (10 000 environ par génération). Lors d'un repas sanguin, le moustique absorbe les formes sanguines du parasite et seuls les gamétocytes résistent à la digestion dans l'estomac du moustique. A ce niveau, les gamétocytes ♂ par ex-flagellation donnent chacun 8 microgamètes et les gamétocytes ♀ donnent chacun un seul gamète femelle. Il y a fécondation de gamètes ♂ et ♀ et formation d'un œuf ou zygote appelé ookinète (œuf qui bouge). Le zygote est un hybride qui a les mêmes caractères que les gamètes parentaux (♂ et ♀). L'œuf évolue progressivement dans l'organisme du moustique pour donner les sporozoïtes du *Plasmodium*. La durée moyenne du cycle sporogonique est de 15 jours. Selon la température, l'humidité et l'espèce (plasmodiale et anophélienne), ce cycle peut varier de 10 à 40 jours.



C'est au niveau de la sporogonie que l'expression d'un gène peut être modifiée conduisant à des mutations génétiques et de comportement du *Plasmodium*. Au cours de la multiplication sexuée chez le moustique le nouveau parasite peut hériter d'une falsification de matériels génétiques issus du gamète ♂ et du gamète ♀. Le transfert horizontal d'ADN résistant permet ainsi au *Plasmodium* et à son vecteur de s'adapter au nouvel environnement pour leur survie. Des mutations favorables s'accumulent au cours des générations et expliquent l'augmentation de la résistance.

**Le trophozoïte.** L'accumulation d'une quantité suffisante d'ADN chez le trophozoïte permet la multiplication de son noyau. La multiplication du trophozoïte donne naissance à des mérozoïtes qui n'ont autre trophisme que dans les globules rouges.

**Le schizonte.** Élément en forme de plasmode (d'où le nom plasmodium) le schizonte est une cellule plurinucléée en forme de plasmode = fruit de l'accumulation d'ADN par le trophozoïte.

**Le mérozoïte.** Le mérozoïte est une toute petite cellule de 1 à 2 microns munie d'un complexe ou système de pénétration. Après libération, il reste moins de 5mn seulement avant de pénétrer dans le globule rouge. Si en une ou deux minutes il n'y pénètre pas, il va être phagocyté. On distingue deux types de mérozoïte : les mérozoïtes hépatocytaires sont libérés à la suite de la multiplication du parasite dans le foie et les mérozoïtes endo-érythrocytaires libérés en même temps que les gamétocytes du plasmodium à la suite de la multiplication érythrocytaire.

**Le gamétocyte.** D'une forme caractéristique en faux (d'où le nom de *falciparum*), les gamétocytes ♂ et ♀ n'ont aucune pathogénicité et ne pénètrent donc pas dans des hématies.

**Le sporozoïte:** Le sporozoïte (cellules issues d'une spore) est la forme méta cyclique infectante issue de la sporogonie. Ce sont des cellules fusiformes allongées de 15microns de long sur 1micron de diamètre avec noyau central. Il n'a autre trophisme que le foie c'est-à-dire ne peut demeurer que dans le foie. Pendant son séjour dans l'organisme du moustique, le Plasmodium acquiert un potentiel terrible d'accumulation de l'ADN. Ce qui permet de former plusieurs cellules (jusqu'à 10 000 noyaux) donnant des sporozoïtes. Dans la glande salivaire du moustique, les sporozoïtes subissent une sorte d'éducation. Ils disposent en fin d'éducation de deux protéines importantes (le TRAP et la CSP) qui sont des antigènes du moustique et non des anticorps car le moustique ne fait pas d'anticorps. Le CSP est responsable de l'éducation du sporozoïte (sa mobilité et sa pénétration dans le foie). Le sporozoïte adhère la cellule hépatique grâce au CSP.

Au tant il est difficile d'évaluer la productivité larvaire des gîtes sans associer les femelles de ponte, autant il serait difficile de dissocier le cycle biologique de l'anophèle et celui du *Plasmodium* de l'Homme. La ponte chez le moustique passe toujours par l'hôte vertébré à travers son sang que la femelle utilise pour développer ses œufs.

## **Annexes-2.**

### **Le cycle de vie de l'anophèle dans la nature**

Le développement complet du moustique passe par six stades repartis entre le milieu aquatique (5/6) et le milieu terrestre (1/6).

#### ***De l'œuf à l'éclosion de la larve.***

Les œufs pondus par la femelle à la surface de l'eau éclosent en donnant de toutes petites larves L<sub>1</sub>.

#### ***De la larve à la nymphe.***

Les larves du 1<sup>er</sup> stade L<sub>1</sub> subissent deux mues successives pour donner des larves L<sub>2</sub> puis L<sub>3</sub> qui entrent en maturité pour donner des larves du stade III-IV de Christopher, le dernier stade larvaire avant de former les nymphes.

#### ***De la nymphe à l'émergence des imagos.***

La nymphe ne se nourrit pas. Elle contient déjà le jeune adulte ailé qu'elle ne tarde pas à libérer après une mue nymphale. Le temps d'éclosion de l'œuf à l'imago peut changer selon l'espèce d'*An. gambiae s. l* en réponse aux composantes chimiques des gîtes larvaires.

#### ***Le cycle gonotrophique de l'émergence à la 1<sup>ère</sup> ponte.***

Avant la première ponte le moustique peut prendre successivement deux repas de sang, afin de mûrir ses œufs. Après, il entrera dans son cycle gonotrophique correspondant à la période de temps qui sépare deux pontes successives.

#### ***L'âge épidémique du moustique.***

Afin de transmettre le *Plasmodium*, la femelle d'anophèle doit atteindre un **âge critique de survie** couvrant la durée de la sporogonie : c'est le stade épidémiologiquement dangereux. Cet âge critique correspondant au cycle gonotrophique du *Plasmodium* se situerait entre environ 9 à 12 jours.

**Annexes-3.**

**Structure des gîtes d'anophèles dans la mare Dèbo en saison sèche**



**Structure des gîtes larvaires d'anophèles au début de la saison pluvieuse**



**Structure des gîtes larvaires d'anophèles en fin de saison des pluies**



## **Annexes-4.**

### **Quelques définitions opérationnelles liées à mon travail**

#### **Paludisme ou malaria.**

Le paludisme peut être défini dans un contexte politique, économique, socio-anthropologique et entre autres. Du point de vue expression clinique d'infection chez l'homme, le paludisme est une érythrocytopathie hémolysante et fébrile due à un protozoaire parasite du genre *Plasmodium* transmis par la piqûre infectante d'un moustique du genre *Anopheles*.

#### **Le polymorphisme du plasmodium.**

Le plasmodium prend sept formes successives au cours de sa propagation chez l'homme et le moustique. Il effectue deux types de multiplication au cours de son cycle: une multiplication végétative schizogonique dans le foie et le sang chez l'homme et une multiplication sexuée sporogonique chez le moustique.

#### **Immunité de l'hôte.**

Il est courant d'observer, dans les enquêtes paludométriques, une grande disparité entre le volet entomologie indiquant la quantité de transmission potentielle et le volet parasitologique représenté habituellement par la prévalence parasitaire.

Chez l'homme sans immunité acquise contre le paludisme, une seule piqûre d'anophèle infecté de sporozoïtes suffit au développement du parasite jusqu'aux manifestations cliniques du paludisme.

Chez l'individu prémuni, la situation est plus complexe. Les parasitémies patentes ne se traduisent pas fréquemment en Afrique sub-saharienne par une maladie : l'accès fébrile ne survient que lorsqu'une certaine densité parasitaire est atteinte. Ce seuil pyrogénitique est variable selon le degré d'immunité de l'hôte, lui-même conditionné par le rythme et la quantité d'inoculations.

#### **Effet linéaire**

**Veut dire** que la réponse est proportionnelle à l'effet que l'on applique. "La cellule répond à son environnement"

**Effet non linéaire :** la réponse cellulaire est non proportionnelle à l'effet appliqué.

#### **Sporogonie**

**C'est** la partie du cycle où il y a échange de gènes (♂ et ♀) et formation d'un nouveau type de parasite, le sporozoïte, avec des qualités nouvelles et qui assure la pérennité de l'espèce.

## Méthodes bio-cliniques du diagnostic de l'infection plasmodiale

### Par la mise en évidence du parasite dans le sang du malade.

#### **Le Frottis Mince (FM) : permet :**

- l'étude morphologique des hématozoaires,
- le diagnostic différentiel entre les espèces plasmodiales.

Son délai d'exécution est court (15 mn) par rapport à celui de la Goutte Epaisse (30 mn).

Son inconvénient est qu'il ne permet pas de détecter des parasitémies de faible densité, 100 à 300 parasites/microlitre de sang.

#### **La Goutte Epaisse (GE) :**

Examen de référence de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), est largement utilisée pour le diagnostic de routine. Sa sensibilité est 10 à 20 fois plus élevée que celle du FM. Le problème du diagnostic d'espèce se pose rarement et l'incertitude est le plus souvent sans conséquence sur la conduite thérapeutique. La densité parasitaire est estimée par le pourcentage d'hématies parasitées. La GE détecte des parasitémies de 10 à 20 parasites/microlitre de sang.

#### **Test QBC (Quantitative Buffy-Coat) :**

Le principe consiste à centrifuger le tube contenant le sang mélangé à l'acridine orange. Avec le microscope à fluorescence à l'objectif 50 en immersion, faire la mise au point au niveau de la couche leucocytaire et rechercher les parasites au niveau de la couche érythrocytaire dont les noyaux sont colorés par l'acridine orange. Cette méthode ne permet pas de porter un diagnostic d'espèce ni une densité parasitaire.

### Tests de détection rapide

#### ***ParaSight F* :**

Il consiste en la recherche dans le sang total de l'antigène protéique riche en histidine de type II (HRP II) de *Plasmodium falciparum*.

#### ***OptiMAL IT* :**

Il consiste à mettre en évidence dans le sang la Lactodéshydrogénase (LDH) de *P. falciparum* et de *P. vivax*.

***Indice plasmodique (IP)***= pourcentage de personnes ayant des parasites dans le sang)

## Définitions de base du diagnostic clinique

### 1. Physiopathologie du paludisme

#### *Accès palustre simple*

Pour la fièvre, le facteur déclenchant est la présence du pigment malarique ou hémozoïne dans le sang. Il provient de l'éclatement des hématies parasitées et agirait sur les centres bulbaires thermo-régulateurs. La fièvre peut avoir une allure continue (cycle endo-érythrocytaire mal synchronisé) ou avoir une périodicité (cycle endo-érythrocytaire bien synchronisé avec libération régulièrement répétée de pigment malarique dans le sang) (Encyclopédie Médico-chirurgicale, 1984)

L'hépatomégalie et surtout la splénomégalie sont la conséquence de hyperactivité du système monocyte-macrophage chargé de débarrasser l'organisme aussi bien du pigment malarique que des débris érythrocytaires.

#### *Paludisme grave et compliqué*

Seule l'espèce *falciparum* est responsable du paludisme grave et compliqué. Il s'observe chez des sujets non immuns (jeunes enfants, expatriés, sujets vivants en zone hypo-endémique). Malgré de nombreuses études récentes, le mécanisme du paludisme grave et compliqué reste encore mal éclairé. Quatre hypothèses ont été avancées :

- Une augmentation de la perméabilité de la barrière méningée entraînant une fuite du liquide céphalo-rachidien et un œdème cérébral.
- Une coagulation intra-vasculaire disséminée.
- Des phénomènes immuno-pathologiques avec dépôts d'immuns complexes.
- Des mécanismes toxiques faisant intervenir des cytokines telles que le Tumor Necrosis Factor ou TNF.

Le phénomène de cyto-adhérence de certaines souches de *P. falciparum* lié à la présence de protubérances particulières ('`Knobs') qui les rendent adhérentes aux cellules endothéliales des capillaires cérébraux et encombrent la lumière vasculaire est retenu actuellement par la plupart des paludologues pour expliquer le neuro paludisme (Encyclopédie Médico-chirurgicale, 1984)

### 2. Aspects cliniques du paludisme.

Les manifestations cliniques du paludisme sont diverses dans leur expression et leur gravité et dépendent à la fois du parasite (espèce plasmodiale et densité parasitaire) et de son hôte (réceptivité génétique et état immunitaire du malade). En général, on distingue quatre manifestations cliniques de la maladie :

#### *Le paludisme de primo-invasion*

Il frappe les sujets neufs et les enfants de moins de 5 ans. Il associe habituellement.

- une fièvre à 39-40 °, continue, parfois irrégulière,
- Malaise général courbatures, céphalées, douleurs abdominales, nausées, vomissements et diarrhée (classique "ambarras gastrique fébrile") et des myalgies.

L'examen physique trouve une discrète hépatomégalie douloureuse sans splénomégalie.

#### *L'accès palustre simple*

Les accès se produisent selon une périodicité de 36 à 48 heures pour *plasmodium falciparum*. Il évolue de façon stéréotypée en 3 phases:

- Phase de frissons (durée une heure) sensation de froid intense, le malade grelotte et accumule des couvertures. La température monte à 39°, le pouls rapide, la tension artérielle est basse, il existe parfois une splénomégalie.

- Phase de chaleur( 2 à 6 heures) la température atteint 40°, la peau est brûlante. Le malade rejette les couvertures. Soit, nausées, céphalées sont fréquentes. La rate diminue de volume.
- Phase de sueurs (1 à 2 heures) abondantes, le malade mouille ses draps. La température chute et est suivie de sensation de bien-être.

L'accès palustre est considéré comme simple car il n'est associé à aucun signe de gravité.

### **L'accès palustre grave et compliqué.**

L'O.M.S. l'a définie en 1990 comme étant la présence de formes asexuées de *P. falciparum* dans l'étalement de sang associée à un ou plusieurs des signes cliniques et biologiques suivants.

- troubles de la conscience, coma irréductibles ayant duré plus de 30 minutes,
- Convulsions répétées : plus de 2 épisodes par 24 heures,
- Chute brutale de la pression artérielle systolique  $\geq 70$  mmHg chez l'adulte et  $\geq 50$  mmHg chez l'enfant ;
- Oedème pulmonaire ou syndrome de détresse respiratoire ;
- Ictère cutanéomuqueux;
- Hypoglycémie;  $\leq 2,2$ mmol/(0,4g/l).
- Créatininémie  $\geq 265$   $\mu$ mol/l ;
- Hg  $\leq 7$ g/dl ;
- Ht  $\leq 15\%$
- pH  $\leq 7,25$  ; HCO<sub>3</sub>  $\leq 15$ mmol/l ;
- hyperbilirubinémie  $\geq 50$ mmol/l.

On associe à ces critères les troubles digestifs (vomissement, diarrhée), une densité parasitaire  $\geq 5\%$  d'hématies parasitées, hyper pyrexie  $\geq 40^\circ$  patients à risque (enfants de moins de 5 ans, femmes enceintes, sujets âgés), faiblesse générale empêchant le sujet de s'asseoir ou de marcher sans aide en l'absence d'autres causes neurologiques.

### **La fièvre bilieuse hémoglobinurique.**

Elle est rare. Mais il y a actuellement une résurgence de ce syndrome dû à un accident immuno-allergique à la quinine ou à d'autres molécules qui lui sont chimiquement proches. (ce sont tous les amino-alcools méfloquine, halofantrine).

C'est la conséquence directe de l'apparition des résistances à la chloroquine, halofantrine.

C'est la conséquence directe de l'apparition des résistances à la chloroquine de *p falciparum* en Afrique centrale et de l'ouest justifiant l'utilisation intempestive et itérative de la quinine et autres molécules apparentées elle survient chez des sujets résidents en zone d'endemie chroniquement impaludés il s'agit d'un tableau d'hémolyse aiguë intra-vasculaire associant

- une fièvre élevée
- des vomissements
- des lombalgies suivies d'émission d'urines rouges "porto"
- parfois état de choc et oligo-anurie
- ictère grave et pâleur, hépatosplénomégalie

Biologiquement, il y a une anémie sévère de type hémolytique, une hémoglobinurie, une cylindrurie et une insuffisance rénale. Sur le frottis mince et la goutte épaisse, il existe peu ou pas d'hématozoaires.

### **Le paludisme viscéral évolutif.**

C'est une fébricule qui accompagne d'une altération de l'état général dont l'amaigrissement est le principal symptôme. Sa caractéristique essentielle est la présence d'une volumineuse splénomégalie sensible, constante chez l'enfant.

L'examen clinique retrouve des signes en faveur d'une anémie pâleur, dyspnée, tachycardie, œdème des membres inférieurs. En zone d'endémie, les enfants de 2 à 5 ans sont les plus touchés. La goutte épaisse révèle parfois de rare *Plasmodium falciparum*. L'évolution sous traitement se fait la guérison. En absence de traitement, les poussées se succèdent mais une régression est possible lors de l'acquisition d'immunité efficace.

On supposera que dans une même concession, les réalités des ménages sont presque identiques pour les enfants face au paludisme?

### **Monitoring**

**Terme anglo-saxon.** Le monitoring consiste à faire une série de suivis et une série de mesures des aspects à l'étude par intervalle régulière de temps.

La **Navigation** est le fait de se déplacer d'un point vers un autre tout en connaissant la position à laquelle on se trouve par rapport à la destination

La **Position** est un endroit précis et unique qui est exprimé par un système de coordonnées géographiques

Les **Méridiens de Longitude** sont des cercles imaginaires qui passent par le pôle Nord et le pôle Sud. La longitude est la valeur, en degrés à l'Est ou à l'Ouest de ce cercle imaginaire par rapport au méridien de référence (0°) de longitude ou méridien de Greenwich.

Les **Parallèles de Latitude** sont un autre ensemble de cercles imaginaires perpendiculaires à l'axe des pôles. La latitude est la valeur en degrés de la position angulaire de ce cercle vers le Nord ou vers le Sud par rapport à l'équateur (0° de latitude).

Un "**Waypoint**" est une position précise correspondant à un point particulier indiquant généralement une localité, une maison, un centre de santé, un changement de direction, un obstacle sur la route, etc. Ces positions peuvent être mémorisées à l'avance et ainsi être utilisées pour la navigation. L'appareil sera alors capable de vous guider vers ces points et de vous signaler le moment où ils sont atteints.

La **route** est la direction à suivre pour atteindre la destination. La route est exprimée de façon angulaire par rapport au nord.

**Le paysage** : c'est une coupe d'une situation à un moment précis

**FIT** = Front Inter Tropical

**Harmattan** = vent chaud et sec qui souffle du Nord à l'Est du Mali

**Mousson** = vent humide et frais venant de la mer au sud vers l'ouest du Mali

**Effet de serre** : C'est un phénomène naturel qui contribue à maintenir sur terre la température propice à la vie

**Météo** c'est le jour au jour

**Climat** c'est le global des éléments météorologiques sur une longue période (d'aucun disent 30 ans au minimum). On peut voir en termes de notes d'un élève et moyenne des notes de l'ensemble des élèves d'une classe. Si la météo parle de température le climato parlera de réchauffement. On ne peut donc pas parler de changement climatique sur un ou deux ans mais, que sur un siècle par exemple. Un des **indicateurs écologiques du CC** est la fonte des glaciers qui entourent certaines villes ou villages. Ce désépaississement des glaciers est constaté depuis 1875 dans certains endroits.

**Modélisation:** Le modèle est une représentation mathématique simplifiée, visant à reproduire un processus complexe réel, difficile à expliquer par expérimentations, observations, analyse statistique... qu'on veut comprendre. La simplification consiste à réduire les paramètres du système par élimination des variables non influentes et ne garder que les variables déterminant qui soutiennent le processus.

C'est un **outil** qu'on fabrique à partir de **plusieurs variables** voulant toutes expliquer le même processus naturel. Il intègre des variables très puissantes, significatifs ( $p=0,000$  ou  $0,001$ ) qui sont plus susceptibles à expliquer le processus. La capacité du modèle à expliquer le processus dépend de la sensibilité (la pertinence) des variables qui ont servi à sa construction. Un modèle capable de simuler exactement une situation est élaboré à partir des variables les plus pertinentes pour comprendre cette situation.

Le **SIG** est un **outil** (cette fois-ci un **système**) qui intègre plusieurs types de données pour les présenter en image (carte). Le résultat d'analyse du SIG ne sort ni en tableau, ni en graphe mais, **seulement en carte**. Chaque carte est sortie d'un modèle ou d'un système SIG.

Le **paramètre** est la **variable principale** (valeur moyenne) résultant de la compilation des valeurs ou réponses de la mesure d'une variable. Ex : **prévalence** = densité de présence d'une maladie, **taux** d'infection de la population, seuil limite (qu'il ne faut pas dépasser), **indice** ou indicateur...

Chacune des valeurs ayant servi de construire le paramètre se mesure dans le paramètre (le reflet) selon (répétition) son degré de contribution ou son influence. Il peut être considéré aussi comme un **outil de mesure ou estimation**. Ex : mesurer l'intensité d'un problème à large échelle pour décider une action publique.