

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP

**ECOLE DOCTORALE SCIENCES DE LA VIE, DE LA SANTE ET DE
L'ENVIRONNEMENT**

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Année : 2016

N° d'ordre : 188



THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Entomologie

Présentée par :

El hadji Malick NGOM

**Etude de l'influence des déterminants climatiques et environnementaux sur la
bio-écologie d'*Anopheles arabiensis* (Diptera : Culicidae) et leur implication
dans la transmission et le contrôle du paludisme en zone sahélienne du Sénégal**

Soutenue le 29 janvier 2016 devant le jury composé de :

Président :	Oumar GAYE	Professeur	FMPOS - UCAD
Rapporteurs :	Jacques André-NDIONE	HDR	CSE
	Cheikh SOKHNA	HDR	IRD
	Jean-Louis NDIAYE	Maître de Conférences	FMPOS - UCAD
		Agrégé	
Co-Directeur de thèse	Ibrahima DIA	HDR	IPD
Directeur de thèse :	Ousmane FAYE	Professeur	FST - UCAD

Dédicaces

Ce travail est dédié à la mémoire de mon très cher grand parent **Ababacar**, malgré qu'il n'ait jamais voulu que je fréquente l'école !!!

A mon Adorable grande mère

Aucun mot ni expression ne saurait montrer l'immense amour que j'éprouve pour vous Mame Booy.

Vous m'avez toujours gâté et comblé de bonheur, d'amour, de tendresse et d'affection toute ma vie. Vous n'avez jamais cessé de me soutenir, de m'encourager, de me consoler et surtout de me guider dans le droit chemin. Vous m'avez toujours exhorté d'être croyant, humble et ouvert de cœur dans la vie. En ce moment mémorable pour vous et pour moi, reçoit par ce travail un signe de ma vive considération, reconnaissance et profond estime.

Qu'ALLAH vous préserve et vous accorde une longue vie et une très bonne santé, Mame Booy, je suis très fier de vous.

Il m'est très agréable de remercier mes parents, Ma chère mère **Soukey**, mon Père **Mansour**, mon oncle et maître coranique **Ibrahima**, mes sœurs, frères, cousins, cousines, tantes et amis pour leur soutien quotidien ainsi que leur présence. Je vous remercie spécialement pour vos aides.

REMERCIEMENTS

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre plusieurs institutions de recherche. Il a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre l'Unité d'Entomologie Médicale de l'Institut Pasteur de Dakar (IPD) et le laboratoire d'Ecologie Vectorielle et Parasitaire de l'université Cheikh Anta Diop de Dakar. Il a été financé par le projet (Quantifying Weather & Climate Impacts). Il a été conduit sous la supervision de Dr Ibrahima et Pr Ousmane FAYE.

Je voudrais, ici, remercier et témoigner ma profonde gratitude à :

Dr Ibrahima DIA, chercheur à l'Unité d'entomologie Médicale (UEM) de l'Institut Pasteur de Dakar, qui m'a encadré et a dirigé ce travail. Son souci de perfection sa sagesse, son franc parler ainsi que son dévouement et sa générosité en font une référence particulière pour moi. Sa rigueur scientifique, son ouverture d'esprit en font un scientifique rompu et résolument singulier ! Tout le mérite de ce document lui revient et les imperfections sont à mon propre au passif.

Soyez assuré cher maître de ma profonde reconnaissance et sincère gratitude. Je ne vous remercierai jamais assez.

Pr Ousmane FAYE

Notre maître, père spirituel en entomologie, dont les nombreuses connaissances et publications ont constitué un guide pour la réalisation de ce document. Qu'il trouve ici l'expression de ma très profonde et sincère gratitude.

Pr Omar GAYE

Que je remercie vivement de m'avoir fait honneur de présider mon jury de thèse. J'ai toujours été ému par votre simplicité, votre sens du travail, vos compétences et votre rigueur scientifique reconnue par tous. Vous resterez toujours une référence, un modèle pour moi. Vous trouverez ici l'expression de ma très profonde et sincère gratitude.

Dr Jacques André NDIONE, Directeur de recherche au Centre de Suivi Ecologique Dakar (CSE), je vous adresse mes vifs remerciements pour avoir accepté de juger ce travail malgré votre agenda chargé. Vos qualités scientifiques de chercheur aguerri ont toujours forcé notre admiration. C'est un grand honneur de vous compter parmi le jury.

Dr Cheikh S. SOKHNA, chercheur à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) à Dakar. Je vous remercie également d'avoir accepté de m'honorer de votre présence dans ce jury de thèse. Vos excellentes qualités scientifiques, de formateur et d'enseignement nous ont toujours passionnés. Veuillez trouver ici le témoignage de ma profonde gratitude.

Dr Jean Louis NDIAYE, maître de conférences agrégé à la faculté de Médecine, Pharmacie et d'Odontostomatologie que je remercie sincèrement. Vous me faites un grand honneur en acceptant de siéger dans ce jury de thèse malgré vos multiples occupations. Vos connaissances et vos excellentes qualités d'enseignant ont toujours forcé notre admiration et reconnaissance. C'est un honneur de vous compter parmi le jury.

Dr Mawlouth DIALLO, responsable de l'Unité d'Entomologie Médicale (UEM) de l'Institut Pasteur de Dakar (IPD) que je tiens à remercier. Il m'a accueilli au sein de son équipe et m'a toujours guidé et conseillé. Son ouverture d'esprit, sa rigueur scientifique, son souci de perfection bien connu, sa sagesse, son franc parler ainsi que son dévouement et sa générosité en font une référence particulière pour nous. Il démontre toujours et face à tout sa capacité de leadership, de dynamisme. Veuillez recevoir cher maître le témoignage de ma profonde gratitude.

Je tiens à remercier le **Dr Yamar BA**, pour son aide dans la réalisation de ce travail, sur le terrain comme au laboratoire. Il est à la fois un scientifique de haute qualité et un homme de terrain riches d'une grande expérience. C'est une personne très sincère, généreuse et accessible. Veuillez recevoir toute ma gratitude.

Dr Diawo Diallo qui n'a cessé de nous conseiller. Ses connaissances scientifiques ainsi que sa rigueur en matière de recherche font de lui un imminent jeune chercheur. Je lui exprime toute ma toute ma profonde gratitude.

J'exprime ma profonde gratitude au **Dr Lassana KONATE** qui m'a toujours aidé, conseillé, guidé dès le début de notre formation et inculqué la rigueur scientifique qui fait de lui un excellent enseignant-chercheur. Je vous remercie sincèrement.

J'adresse ma sincère et profonde gratitude au **Pr André SPIEGEL**, Administrateur Général de la Fondation IPD, qui a bien voulu m'accueillir en tant que stagiaire. Je vous remercie vivement pour m'avoir donné l'opportunité de faire cette thèse dans de meilleures conditions.

C'est avec plaisir et joie que j'adresse mes remerciements les plus sincères au Directeur scientifique de la fondation IPD, le **Dr Amadou A SALL**, ainsi que la direction scientifique de la dite fondation pour toute leur assistance qu'ils m'ont apportée durant tout mon stage depuis mon Master 2.

J'associe dans cette même pensée amicale et académique les **Prs Pape Mbacké SEMBENE, Mady NDIAYE** particulièrement ainsi que le corps professoral de la faculté des Sciences et Techniques et de la faculté de Médecine, Pharmacie et Odontostomatologie qui se sont investis à fond dans notre formation. Ils ont un sens très prononcé et un savoir scientifique très pratique.

Je tiens à remercier le personnel du SLAP : **Dr Ngayo SY ; Mr NGOM, Mr DIAGNE, Mr SANE, ISMA** etc. Je vous remercie pour tous vos aides consenties pour la finalisation de cette thèse

Je formule tous mes remerciements au personnel de l'Unité d'Entomologie Médicale de l'Institut Pasteur de Dakar : **Amadou THIAW, Abdou Karim BODIAN, Maodo Malick MANGA** pour leur excellente assistance technique et l'entretien des moustiques ainsi que les matériels de travail sans lesquels cette thèse n'aurait pas été possible dans le temps qui m'était imparti.

Je remercie tout le personnel du Service Technique et Infrastructure de l'IPD pour leur aide et leur assistance qu'ils m'ont procurés. Veuillez recevoir mes sincères reconnaissances.

J'exprime avec plaisir et gaieté de cœur ici mes remerciements à tous les gens qui ont permis à l'aboutissement de ce travail particulièrement mes compagnons de l'Unité d'Entomologie Médicale de l'IPD : **Dr Cheikh Tidiane DIAGNE, Dr Cheikh TALLA, Dr Alioune GAYE, Dr Elhadji NDIAYE, a ma goro Mlles Faty SY et Marième GUEYE, Libasse, Elhadji Amadou, Abdoulaye NIANG, Boubacar MBAYE, Constantin, Dr Badara SAMB, Maryam DIARRA, Ndeye D. FAYE** etc. Tous vos aides et suggestions nous a servis de ressource scientifique.

Je tiens à remercier tout le personnel du Laboratoire d'Ecologie Vectorielle et Parasitaire de l'UCAD qui m'ont toujours aidé et soutenu pour la réalisation de cette thèse

Il m'est agréable de remercier tout le personnel de la fondation IPD : **Jean Pierre VIREY, Abdoulaye FALL, Mme Camille ABBEY, Mame Birame Ndiaye, SANTIAGO, Mme**

GUEYE entre autres ainsi que tout le personnel de la faculté des Sciences et Techniques de l'UCAD particulièrement à ceux du département de Biologie Animale. A tout le monde de près ou de loin qui ont participé a la réalisation de ce travail.

Je remercie vivement toute la population de **Barkédji** particulièrement **Sadio SOW**, **Alioune SY**, mon ami **Didier Fontenille SY** pour leur aide, leur abnégation et leur volonté dans l'échantillonnage des vecteurs dans cette zone et dans les environs de Barkédji.

Je tiens à remercier ma maman **Ndeye SOW**, Mamadou Bangoura, mon ami mon frère **Aboubacar Bangoura**, mon ami **Cheikhou Coulibaly**, mon **Oustaz Alioune TOURE** qui m'ont tout le temps apporté soutien et conseil pour la réussite dans mes études.

Il m'est très agréable et très heureux de remercier ma très chère partenaire, sœur, amie, maman, femme, confidente, **Binta NDOYE**. Elle m'a toujours écouté, assisté, aidé dans tous mes projets. Veuillez recevoir toute ma gratitude et ma reconnaissance.

Je suis très reconnaissant aux personnels scientifiques qui m'ont d'obtenir des références ou données utiles ou de savoir pour la concrétisation de ce travail.

Merci à toutes et à tous !!!

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : GENERALITES	4
1. Le Paludisme au 21 ^{ème} siècle	4
1.1. Introduction	4
1.2. Distribution du paludisme dans le monde	5
1.3. Eco-épidémiologie du paludisme	7
2. Méthodes de contrôle du paludisme	8
3. Les vecteurs du paludisme en Afrique	10
3.1. Systématique et taxonomie	10
3.2. Les vecteurs majeurs	11
3.2.1. Le complexe <i>Anopheles gambiae</i>	11
3.2.2. Le groupe <i>Funestus</i>	13
3.2.3. Le complexe <i>Anopheles nili</i>	14
3.2.4. Le complexe <i>Anopheles moucheti</i>	14
4. La transmission vectorielle du paludisme	15
4.1. Les facteurs de la transmission	15
4.2. Influence des facteurs environnementaux et climatiques sur la transmission	16
4.2.1. La température	16
4.2.2. La pluviométrie	17
4.2.3. L'humidité relative	18
4.2.4. Les types d'occupation des sols	18
5. Stratégies de lutte contre les vecteurs	19
5.1. La lutte anti-larvaire	19
5.2. La lutte anti-adulte	20
6. Présentation du modèle d'étude : l'espèce <i>Anopheles arabiensis</i>	20
6.1. Distribution géographique et habitats préférentiels	20
6.2. Préférences trophiques et comportement de piqûre	21
6.3. Susceptibilité aux insecticides et contrôle anti-vectoriel	21
6.4. <i>An. arabiensis</i> au Sénégal	22
CHAPITRE 2 : METHODOLOGIE GENERALE	24
1. Le pays d'étude : le Sénégal	24
1.1. Situation	24
1.2. Climat et hydrographie	25
1.3. Domaines climatiques et végétations	26
2. Présentation de la zone d'étude	27
2.1. Description	27
2.2. Population et Climat	28
2.3. Choix et caractérisation des sites d'étude	28
3. Méthodes d'échantillonnage des vecteurs	31
3.1. Capture nocturne sur homme	31
3.2. Collecte de vecteurs au repos dans les habitations humaines	32

3.3. Collecte de stades aquatiques	33
4. Traitement et Analyse des échantillons collectés	34
4.1. Sur le terrain	34
4.2. Au laboratoire	35
4.2.1. Identification des vecteurs par la technique de polymérisation en chaîne	35
4.2.2. Identification des moustiques infectés par ELISA	35
4.2.3. Détermination de la source des repas de sang par ELISA	35
4.2.4. Etude de la sensibilité aux insecticides	35
4.2.5. Etude de la durée du cycle gonotrophique	36
5. Analyse des données	36

CHAPITRE 3 : IMPACT DES TYPES D'OCCUPATION DES SOLS SUR LES PROFILS TROPHIQUES D'*AN. ARABIENSIS*.....

1. Problématique	40
2. Résultats.....	41
2.1. Résultats globaux.....	41
2.3. Taux d'anthropophilie.....	48
3. Discussion.....	48

CHAPITRE 4 : INFLUENCE DES TYPES D'OCCUPATION DES SOLS ET DES FACTEURS CLIMATIQUES SUR LES DENSITES ET LES TAUX D'INFECTION PLASMODIALE D'*AN. ARABIENSIS*.....

1. Introduction.....	52
2. Résultats.....	53
2.1. Faune anophélienne	53
2.2. Profil de distribution des espèces du complexe <i>An. gambiae</i>	57
2.3. Variations saisonnières des densités d' <i>An. arabiensis</i>	58
2.4. Influence des paramètres climatiques sur des densités d' <i>An. arabiensis</i>	58
2.5. Taux d'infection plasmodiale	61
3. Discussion.....	63

CHAPITRE 5 : IMPACT DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX ET CLIMATIQUES SUR LA TRANSMISSION ET LE CONTROLE.....

1. Contexte.....	66
2. Résultats globaux	66
2.1. Faune anophélienne et abondance relative.....	66
2.2. Indices de diversité	68
2.3. Densités vectorielles et dynamique des populations	71
2.4. Variations annuelles globales des densités agressives.....	71
2.5. Variations saisonnières des densités agressives	73
2.6. Comportement de piqûres	78
2.6.1. Taux d'endophagie	78
2.6.2. Taux d'agressivité horaire	80
2.7. Paramètres entomologiques de la transmission.....	84
2.7.1. Taux de parturité	84
2.7.2. Taux d'infection plasmodiale	85

2.7.3. Rythme quotidien de piqûres	86
2.7.4. Taux quotidien de survie	87
2.7.5. Espérance de vie (EV) et espérance de vie infectante (EVI)	87
2.7.6. Capacité vectorielle	87
2.7.7. Indice de stabilité	88
2.7.8. Taux d'inoculation entomologique	90
3. Sensibilité aux insecticides	91
4. Discussion	93
 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	 96
 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	 98
 ANNEXE 1 : Technique d'extraction d'ADN de moustique	 119
 ANNEXE 2 : Technique d'identification des espèces du complexe <i>An. gambiae</i> par PCR.....	 120
 ANNEXE 3 : Technique ELISA indirecte pour la détection de moustiques infectés par <i>Plasmodium falciparum</i>	 123
 ANNEXE 4 : Technique ELISA directe pour l'identification de l'origine des repas de sang	 125
 ANNEXE 5 : Protocole d'étude de la sensibilité des vecteurs aux insecticides	 127

INTRODUCTION GENERALE

Le paludisme reste encore de nos jours un sérieux obstacle au développement socio-économique en Afrique. Près de 90% des quelque 300 à 500 millions de cas cliniques recensés chaque année dans le monde se trouvent en Afrique. Plus d'un million de personnes meurent du paludisme chaque année. En 2010, le paludisme a occasionné près de 216 millions de cas et 655 000 décès (OMS, 2013) dont la majorité en Afrique où la situation n'est pas homogène. La décennie passée a été marquée par une évolution de la situation épidémiologique en Afrique avec notamment une diminution de la morbidité et la mortalité globales du fait de l'utilisation de stratégies à efficacité prouvée comme les aspersions intra-domiciliaires d'insecticides, les moustiquaires imprégnées d'insecticide et la disponibilité accrue des traitements très efficaces de combinaison à base de dérivés de l'artémisinine. Malgré ces résultats satisfaisants, il continue encore de tuer environ 2000 personnes par jour, dont la plupart sont des enfants de l'Afrique. Cette situation s'explique pour une bonne partie par plusieurs facteurs favorisant comme l'écosystème, le climat, les vecteurs et les différentes espèces plasmodiales présentes. De tous ces facteurs, les conditions climatiques et environnementales semblent être les plus prépondérants sur la distribution des vecteurs et leur implication dans la transmission (Githeko *et al.*, 2000). C'est dans ce cadre que les bouleversements climatiques observés depuis quelques années sont à l'origine de changements climatiques dont l'impact sur le paludisme suscite bien des interrogations. C'est en particulier dans la partie septentrionale du Sahel caractérisée par un faible niveau de transmission et une forte variabilité des facteurs climatiques et environnementaux qu'il est attendu un retour ou une recrudescence du paludisme.

De nombreuses études suggèrent que les changements climatiques pourraient conduire à une résurgence des maladies climato-sensibles (Bouma *et al.*, 1994 ; Colwell *et al.*, 1998). En effet, l'occurrence de ces changements climatiques constitue des mécanismes pouvant déclencher des phénomènes épidémiques de grande ampleur. Il existe ainsi des possibilités de manifestations épidémiques avec un risque important de morbidité et de mortalité dans toutes les tranches d'âge. Il existe à ce sujet une relation étroite entre la variation du niveau de la transmission et la fréquence des accès palustres et de la mortalité. Dans la partie sahélienne du Sénégal par exemple, il a été ainsi observé que les années à forte pluviométrie sont caractérisées par une forte transmission (Lemasson *et al.*, 1997) accompagnée d'une fréquence élevée des accès et de la

mortalité palustre (Trape *et al.*, 1998 ; Molez *et al.*, 2006 ; Gaye *et al.*, 2002). De plus, des études récentes semblent montrer une hétérogénéité de l'influence des facteurs climatiques selon les types d'occupation des sols ainsi qu'une influence sur le comportement alimentaire des vecteurs du paludisme dans cette zone (Ngom, 2010 ; Faye, 2010). Aux changements globaux ainsi attendus pourraient se superposer une variabilité spatiale pouvant se traduire par une disparité des cas selon les contextes écologiques.

Le système vectoriel est relativement simple dans cette zone avec la présence d'*An. gambiae* et d'*An. arabiensis*, cette dernière étant le vecteur principal. Elle est décrite comme étant plus abondante en zones sahéliennes et soudano-sahéliennes (Faye, 1994) et très peu d'études lui ont été accordées comparé à *An. gambiae* malgré son importance épidémiologique pour diverses raisons : i) elle est considérée comme une espèce de zones sèches où la transmission est limitée dans le temps, ii) son comportement opportuniste à tendance zoophile qui laisse présager de son rôle limité dans la transmission, iii) son homogénéité génétique contrairement à *An. gambiae s.s.* qui comporte plusieurs formes (chromosomiques et moléculaires) adaptées à des environnements contrastés. Son adaptation aux conditions drastiques de ces zones ainsi qu'un comportement exophile prouvé, peuvent entraver, cependant sérieusement les opérations de lutte actuellement mises en place. De plus, les perspectives de modélisation des risques de transmission dans le contexte du changement climatique exigent une maîtrise des facteurs entomologiques liés à cette espèce ainsi que des facteurs exogènes.

Ce travail a comme objectif principal de quantifier l'impact météorologique et climatique sur la santé dans les pays en voie de développement. L'objectif global de cette étude est d'étudier l'impact des paramètres environnementaux (température, humidité, pluviométrie) et des états de surface (occupation et utilisation des sols) sur l'abondance des vecteurs, leurs capacités vectorielles et leur implication dans la transmission du paludisme et son contrôle.

Nous présenterons successivement :

- le chapitre 1 consacré à la présentation des généralités sur le paludisme, ses vecteurs, sa transmission, les méthodes de lutte et le modèle d'étude *An. arabiensis*.

- le chapitre 2 où est présentée la méthodologie générale

- le chapitre 3 qui traite de l'impact des types d'occupation des sols sur les profils trophiques d'*An. arabiensis*

- le chapitre 4 qui traite de l'influence des types d'occupation des sols et des facteurs climatiques sur les densités et les taux d'infestation plasmodiale d'*An. arabiensis*

- le chapitre 5 qui traite de l'impact des facteurs environnementaux et climatiques sur la transmission et le contrôle

La présentation de ces chapitres sera suivie de la présentation de la conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE 1: GENERALITES

1. Le paludisme au 21^{ème} siècle

1.1. Introduction

Le paludisme est l'une des premières parasitoses humaines à transmission vectorielle par sa fréquence et sa gravité. Il est transmis par des moustiques du genre *Anopheles* et implique cinq (5) espèces *plasmodiales* responsables d'accès palustres : *Plasmodium falciparum*, *P. ovale*, *P. malariae*, *P. vivax*, et *P. knowlesi* (OMS, 2010). *P. falciparum* est responsable de la fièvre tierce maligne et est la plus fréquente (98% des cas de paludisme en Afrique, 90 % à Madagascar et aux Comores). *P. vivax* est responsable de la fièvre tierce bénigne. Il est moins virulent que *P. falciparum*. Considéré pendant longtemps comme absent chez les populations d'Afrique de l'ouest et du centre, des études récentes ont montré sa présence chez des populations Duffy-négatif de Madagascar (Ménard *et al.*, 2010) mais également chez des populations noires d'Afrique de l'est et de l'ouest (Mendes *et al.*, 2011 ; Wurtz *et al.*, 2011 ; Niang *et al.*, 2015). *P. ovale* est également responsable de la fièvre tierce bénigne alors que *P. malariae* est responsable de la fièvre quarte bénigne. Une cinquième espèce, *P. knowlesi*, connu auparavant comme responsable du paludisme du singe, a été retrouvé chez l'homme. Il est responsable de la fièvre quarte dans quelques pays d'Asie du sud-est (Cox-Singh *et al.*, 2008). Presque tous les décès sont causés par *P. falciparum*.

Du fait des campagnes de lutte instaurées depuis plus d'un demi-siècle, une réduction notable de l'endémicité a été notée. En effet, en 2009, l'OMS a recensé 225 millions de cas ayant abouti à 781 000 décès alors qu'en 2010, le paludisme a provoqué environ 216 millions de cas et 655 000 décès d'où une diminution de près de 9 millions de cas et de 126 000 décès entre ces 2 années soit une diminution de la mortalité de 42% au niveau mondial et 49% dans la région Africaine (OMS, 2010). Plus de 85% des cas et 90% des décès dus au paludisme surviennent en Afrique sub-saharienne, principalement chez les jeunes enfants de moins de 5 ans. Une diminution du taux de mortalité infantile de 54% a été notée par rapport à 2000 dans cette région africaine (OMS, 2014).

1.2. Distribution du paludisme dans le monde

Le paludisme reste de nos jours l'une des maladies les plus importantes de l'humanité. Il est transmis dans 108 pays habités par environ 3 milliards de personnes et intéresse plusieurs pays d'Amérique latine, 5 pays d'Asie et 30 pays d'Afrique sub-saharienne représentant à eux seuls (pays d'Afrique) un peu plus de 85% des cas palustres et plus de 90% des décès (Sinka *et al.*, 2013). Le paludisme était autrefois répandu dans une grande partie du monde, mais a été éliminé aux Etats-Unis, au Canada, en Europe et en Russie. En revanche, la fédération de Russie (dont la partie Européenne comprenant la région de Moscou) est à surveiller car il y persisterait une transmission du paludisme dû à *P. vivax* espèce capable de se réimplanter temporairement dans tout le sud de l'Europe (par exemple en Italie, Corse, ...). Ainsi, en 2011 *P. vivax* est réapparu en Grèce (cas autochtones). A noter que l'on décrit des cas de paludisme d'aéroport en lien avec l'importation de moustiques infectés dans les bagages ou les cabines des avions venant des zones d'endémie (Sinka *et al.*, 2013). Cependant, plusieurs régions du globe particulièrement l'Afrique, l'Amérique centrale et l'Amérique du Sud, l'Indonésie, et le Sud de l'Asie, restent touchées par ce fléau, bien que le risque ne soit pas exactement le même partout (Figure 1). La transmission se poursuit en Amérique centrale (*P. vivax* essentiellement) mais les Caraïbes sont indemnes à l'exception d'Haïti et d'une partie de la République Dominicaine. Il faut aussi noter qu'il n'y a pas de paludisme dans les 2 départements d'Outre-mer français que sont la Martinique et la Guadeloupe.

En Amérique du sud, la transmission est essentiellement due à *P. falciparum* (avec présence de souches très résistantes aux amino-4-quinoléine dans tout le bassin amazonien) et *P. vivax*. Le paludisme sévit toujours en Guyane française mais essentiellement dans des zones proches des fleuves et en forêt.

Toute l'Asie du Sud-est (Myanmar, Chine du sud, Thaïlande, Vietnam, Cambodge, Laos, Malaisie, Indonésie, Philippines) est touchée par une transmission due à *P. falciparum* (avec présence dans certaines régions de souches multi-résistantes), à *P. vivax* et à *P. knowlesi*. Les autres régions et la péninsule Indienne sont atteintes par *P. vivax* et *P. falciparum* mais ne sont pas concernées par le phénomène de multi-résistance. À la différence de l'Afrique, où la transmission est beaucoup plus homogène, la transmission en Asie se fait sous forme de foyers

disséminés en milieu rural dans les zones de collines boisées. Toutes les grandes villes asiatiques sont indemnes sauf les villes indiennes.

En Océanie, la transmission est hétérogène. Certaines villes sont atteintes (Nouvelle Guinée, Iles Salomon, Vanuatu) ; d'autres en sont totalement dépourvues : Polynésie française, Nouvelle-Calédonie, Wallis et Futuna, Fidji, Hawaï... L'Australie et la Nouvelle-Zélande sont indemnes.

Au Proche et Moyen-Orient, *P. falciparum* sévit sur la côte ouest de la péninsule arabique et au Yémen. Toutes les villes sont indemnes ainsi que Bahreïn, Israël, Jordanie, Liban, Koweït, Qatar. Le risque est faible (*P. vivax*) dans les autres Etats (Syrie, sud-est de la Turquie, Emirats Arabe Unis et Oman ; Sinka *et al.*, 2013).

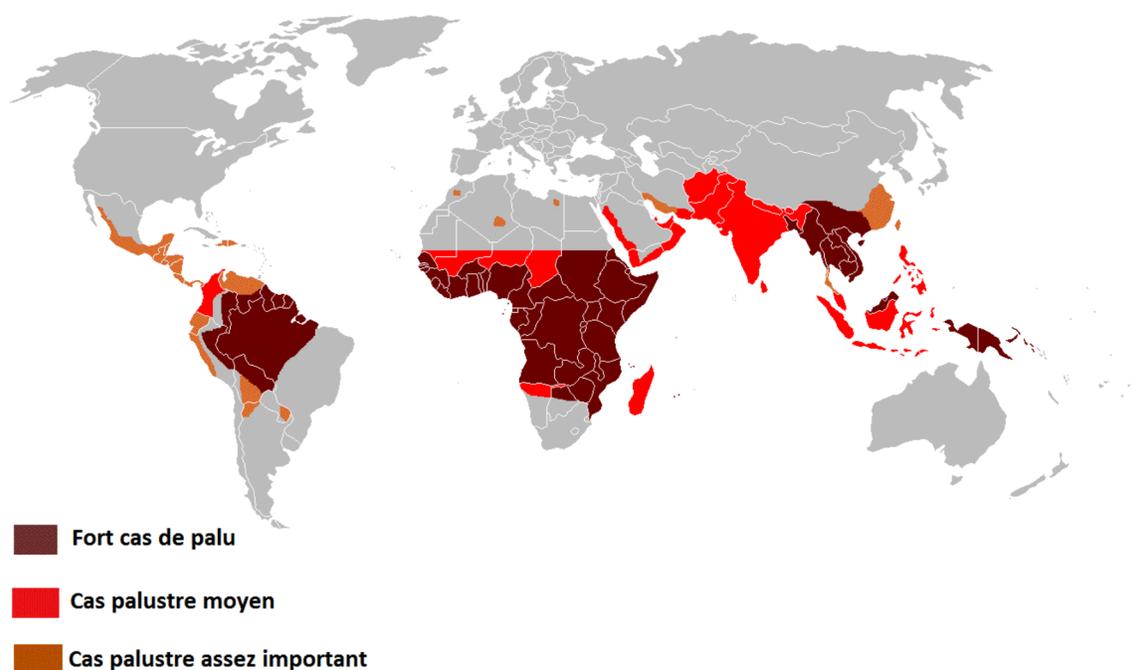


Figure 1 : Distribution du paludisme dans le monde en 2013 (OMS, 2013)

1.3. Eco-épidémiologie du paludisme

Les principaux déterminants de l'intensité de la transmission du paludisme sont la densité, la longévité, les comportements de piqûres, et la capacité vectorielle du moustique vecteur chez qui se déroule le cycle d'incubation extrinsèque du parasite (Figure 2). Parmi les 400 espèces de moustiques décrits, seule une vingtaine assurent la transmission (Rodhain et Perez, 1985 ; White *et al.*, 2014). Les vecteurs les plus efficaces ont une espérance de vie suffisante, sont bien adaptés aux changements environnementaux, possèdent des densités très élevées dans les zones tropicales, se reproduisent facilement et piquent de préférence l'homme. C'est le cas des espèces du complexe *An. gambiae* et *An. funestus*. Dans la plupart des pays de l'Asie du Sud et l'Amérique Centrale, où la transmission est particulièrement faible et saisonnière, *P. falciparum* et *P. vivax* ont des prévalences similaires. Dans ces zones, la plupart des gens reçoivent généralement au moins une piqûre infectante par an. L'intensité de la transmission est beaucoup plus élevée dans les pays d'Afrique sub-saharienne, où *P. falciparum* prédomine, et dans certaines parties de l'Océanie où les taux d'inoculation entomologique peuvent atteindre 1000 piqûres/an (White *et al.*, 2014). Dans de telles situations, la morbidité et la mortalité du paludisme sont élevées durant la petite enfance, mais à l'âge adulte la plupart des infections sont asymptomatiques. Dans la bande sahéenne allant du Sénégal au Soudan, la transmission peut être intense mais largement confinée entre 3 et 4 mois durant la courte saison des pluies. Dans les zones où la transmission est faible, erratique ou focalisée la transmission est de type instable de sorte qu'il n'existe aucune immunité protectrice et les cas de paludisme symptomatiques surviennent dans toutes les classes d'âge. Dans de telles zones, les changements environnementaux ainsi que les conditions économiques et sociales (apparition de fortes pluies après les périodes de sécheresse, de mouvements de populations de grande ampleur, arrêt des mesures de contrôle ou de prévention antipaludique consécutifs par exemple à des conflits armés peuvent entraîner des épidémies avec des taux de mortalité élevés dans tous les groupes d'âge).

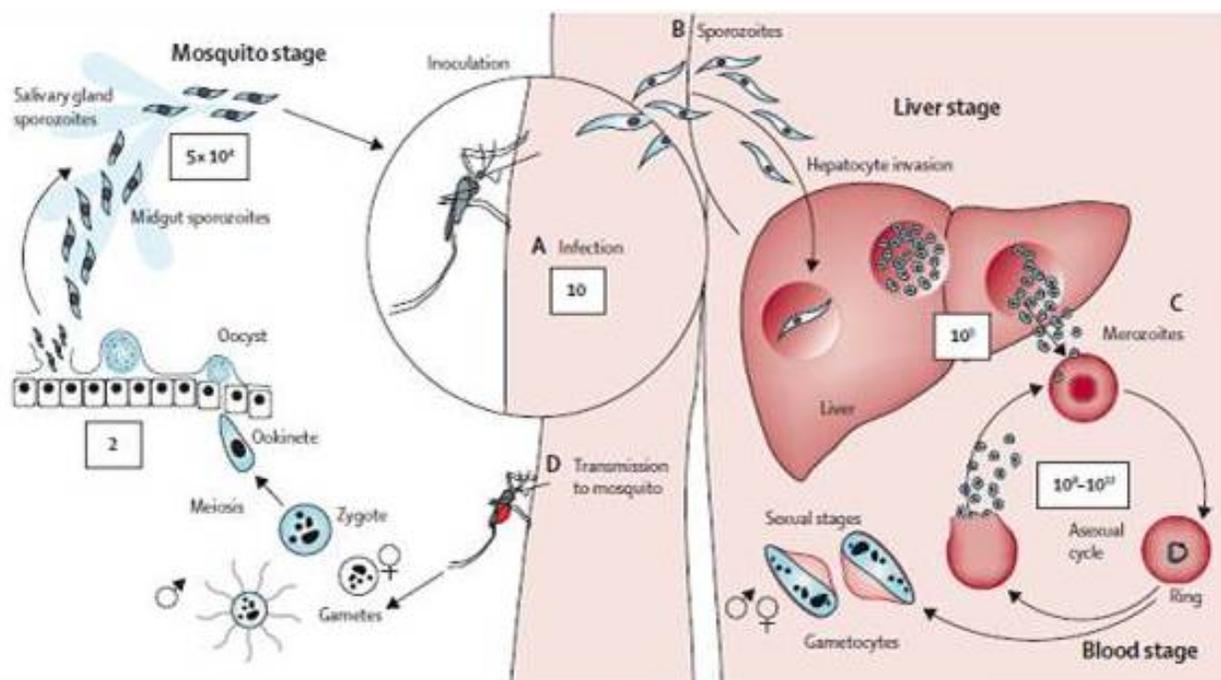


Figure 2 : Cycle de vie de *Plasmodium falciparum* (source : OMS, 2013)

2. Méthodes de contrôle du paludisme

La recrudescence du paludisme a été observée dans les pays tropicaux entre 1970 et 1990 du fait de la combinaison du relâchement des efforts de contrôle et de l'augmentation de la résistance des *Plasmodium* aux antipaludiques et des vecteurs aux insecticides. Depuis lors, une diminution notable de la prévalence a été notée à la suite d'une augmentation substantielle du financement des bailleurs de fonds, l'utilisation de méthodes de contrôle adaptées et appropriées et un enthousiasme accru vers la pré-élimination et l'élimination. La lutte anti-vectorielle reste le principal moyen de réduire la transmission du paludisme au niveau communautaire. C'est actuellement la seule intervention qui peut diminuer les fortes transmissions à des niveaux quasiment nuls. Au niveau individuel, la protection contre les piqûres de moustique représente le premier moyen de prévention contre le paludisme. Parmi les moyens de contrôle anti-vectoriel disponibles, l'utilisation des moustiquaires imprégnées d'insecticides et les pulvérisations d'insecticides à effet rémanent à l'intérieur des habitations sont les plus efficaces (OMS, 2014). Leur utilisation unique ou combinée a permis de réduire considérablement le fardeau dû au paludisme.

En effet, le paludisme a régressé au cours des dernières années dans toutes les régions du monde sous l'effet de l'amélioration de la lutte anti-vectorielle (distribution massive de moustiquaires imprégnées d'insecticides à longue durée d'action et plus localement aspersion intra-domiciliaire d'insecticides) mais également de l'aménagement de l'environnement pour une diminution des gîtes des anophèles.

D'autres méthodes ont été suggérées pour l'élimination voire l'éradication des populations vectrices à travers la production et le lâcher de mâles stériles (OMS, 2014), l'amélioration du diagnostic rapide (test de diagnostic rapide) et des traitements (à base de dérivés d'artémisinine), les traitements préventifs intermittents chez les femmes enceintes et les enfants mais également des changements sociaux (urbanisation, développement économique) et climatiques. Dans le cas de la lutte anti-vectorielle, les résultats satisfaisants obtenus sont le fait pour une bonne partie d'une connaissance accrue du cycle de vie du moustique de son comportement mais également de sa longévité. Cependant, au cours de ces dernières années, une résistance aux pyréthrinoïdes, seules catégories d'insecticides utilisées pour l'imprégnation des moustiquaires, a fait son apparition dans de nombreux pays (OMS, 2014). L'Afrique sub-saharienne et l'Inde, caractérisées par des niveaux élevés de transmission, suscitent de grandes préoccupations à cet égard. La mise au point de nouveaux insecticides pour l'imprégnation des moustiquaires est alors devenue une priorité.

Par rapport à la vaccination, un des objectifs de la Malaria Vaccine Initiative (MVI), sponsorisée par la Fondation Bill et Melinda Gates, est de mettre au point un vaccin antipaludique pour la décennie 2010-2020. Un vaccin contre le stade pré-érythrocytaire de *P. falciparum*, le candidat vaccin RTS,S/AS01, est actuellement évalué dans le cadre d'un vaste essai clinique en Afrique subsaharienne. Il réduirait de 55,8% le risque de développer un accès palustre et de 47,3% le risque de développer une forme sévère de paludisme chez les enfants de 5 à 17 mois, et seulement de 31,3% (accès palustre) et de 26,0% (forme sévère) chez les nourrissons de 6 à 12 semaines, ce qui constitue une différence substantielle. La mise au point de vaccins contre les stades sanguins asexués dont la principale cible est le mérozoïte est moins avancée. Plusieurs protéines parasitaires sont impliquées dans ce processus complexe, dont la

protéine MSP-3 et AMA. Actuellement, aucun candidat vaccin n'a montré une efficacité suffisante et durable pour être utilisé en santé publique (Aubry et Gaüzere, 2015).

3. Les vecteurs du paludisme en Afrique

3.1. Systématique et taxonomie

Les vecteurs du paludisme humain sont des moustiques de la sous-famille des *Anophelinae*, ils appartiennent tous au genre *Anopheles* Meigen, un taxon qui comprend environ 400 espèces décrites dont une soixantaine seulement sont vecteurs de *Plasmodium* humains et une vingtaine, à elles seules, sont à l'origine de la plupart des cas de paludisme. Du fait de la diversité des écosystèmes africains et des changements qu'ils subissent sous l'effet des activités humaines, les systèmes vectoriels palustres sont très variés et en perpétuelle évolution. Les observations de terrain faites depuis plus d'une décennie, renforcées par des études de génétique et de biologie moléculaire, ont permis de s'apercevoir que ces systèmes sont plus complexes qu'on ne pensait. C'est ainsi que des espèces jumelles (ou cryptiques) ont été décrites parmi lesquels les complexes *An. gambiae*, *An. nili* et *An. moucheti*. D'autres observations sont pour le moment plus difficiles à interpréter, et refléteraient probablement des adaptations locales de populations à divers environnements sans que des barrières génétiques aient encore pu se mettre en place, comme ce qui est le cas chez *An. funestus*.

Parmi les espèces vectrices, les espèces du complexe *An. gambiae* (représentées principalement par *Anopheles gambiae*, *Anopheles coluzzii*, *Anopheles arabiensis*) et *Anopheles funestus* (Figure 3) assurent l'essentiel de la transmission. Ces quatre espèces sont d'excellents vecteurs qui se relayent au cours des saisons et ont une longévité élevée et une préférence trophique prononcée pour l'homme. C'est ce qui explique la quasi-continuité de la transmission anophélienne des *Plasmodiums* humains dans les zones de sympatrie. D'autres espèces assurent également la transmission du paludisme mais ont un rôle moindre : c'est le cas notamment d'*An. nili*, *An. moucheti*, *An. melas*, *An. merus* et *An. mascarensis* alors que d'autres espèces ont un rôle vecteur faible ou nul : *An. coustani*, *An. paludis*, *An. flavicosta*, *An. ziemanni*, *An. brunnipes*, *An. gibbinsi*, *An. hancocki*, *An. welcomei*, *An. rufipes*, *An. hargreavesi*, *An. pretoriensis*, *An. pharoensis*, *An. squamosus* (Fontenille et al., 2003).



Figure 3 : *An. gambiae* et *An. funestus* : deux vecteurs majeurs du paludisme en Afrique (source : <http://www.editions.ird.fr/>)

3.2. Les vecteurs majeurs

3.2.1. Le complexe *Anopheles gambiae*

Il regroupe incontestablement les vecteurs les plus efficaces du paludisme en Afrique Sub-saharienne et est constitué d'au moins 7 espèces présentant une morphologie très identique: il s'agit d'*An. amharicus* Hunt, Coetzee et Wilkerson, *An. arabiensis* Patton, *An. gambiae* Giles, *An. bwambae* White, *An. coluzzii* Coetzee et Wilkerson, *An. comorensis* Brunhes, Le Goff et Geoffroy, *An. melas* Theobald, *An. merus* Dönitz et *An. quadriannulatus* Theobald, Coetzee et Fettene (Coetzee *et al.*, 2013). L'identification de ces espèces peut être faite à partir de critères cytogénétiques, éthologiques, géographiques, biochimiques ou moléculaires. *An. gambiae*, *An. coluzzii* et *An. arabiensis* sont les plus importants vecteurs du paludisme du complexe et les plus répandus sur le continent africain (Figure 4). Les 2 premiers sont retrouvés dans les régions de forêt, mais sont également présents dans les zones de savane alors que ; le troisième, plus adapté aux zones sèches, est présent au Sahel, mais également dans les savanes humides en sympatrie avec les 2 premiers. Leur zone de recouvrement est très large.

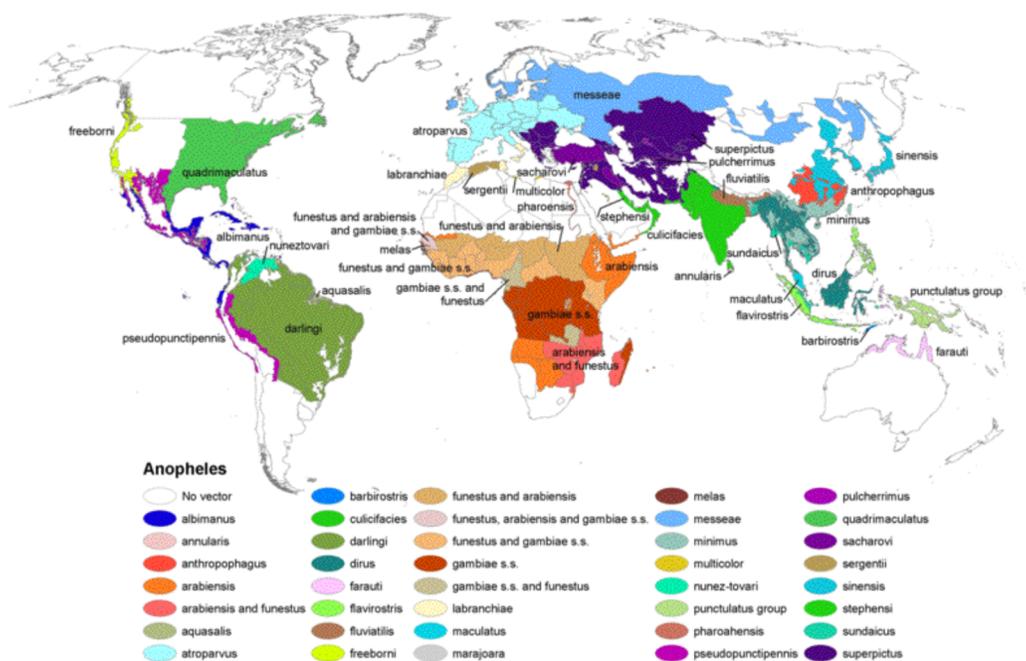


Figure 4 : Carte de distribution des vecteurs du paludisme dans le monde (Sinka *et al.*, 2013)

An. melas et *An. merus* sont deux espèces inféodées aux gîtes d'eau saumâtre. Leur répartition géographique est de ce fait limitée aux zones côtières bien qu'elles puissent pénétrer loin à l'intérieur des terres au niveau des estuaires. Ils occupent respectivement les mangroves des côtes occidentales et orientales d'Afrique (Figure 4) où elles peuvent jouer un rôle local dans la transmission du paludisme. Ils sont toutefois préférentiellement zoophiles. *An. merus* a été identifié sur la côte Ouest de Madagascar, il est également présent sur l'île Maurice mais semble absent de La Réunion. *An. melas* rencontrée sur les côtes occidentales de l'Afrique est peu anthropophile, endophage mais exophile ; ses larves vivent dans les eaux saumâtres. *An. merus* est son équivalent sur la côte orientale de l'Afrique. Ces deux espèces interviennent peu dans la transmission et assurent par contre la transmission d'un paludisme dit côtier (Akogbeto *et al.*, 1995). *An. bwambae* et *An. quadriannulatus* sont uniquement zoophiles et n'interviennent pas dans la transmission du paludisme (Mouchet *et al.*, 2004). *An. bwambae* est rencontrée en Ouganda tandis qu'*An. quadriannulatus* a une distribution discontinue de l'Ethiopie à l'Afrique du Sud. Les autres espèces ont une répartition focalisée et ne participent pas dans la transmission (Coetzee *et al.*, 2013).

3.2.2. Le groupe *Funestus*

Il a été décrit pour la première fois par Gillies et De Meillon (1968) pour désigner un groupe d'espèces morphologiquement proche de l'espèce *An. funestus*. Le groupe est constitué de 5 sous-groupes dont 3 sont présents dans la région afrotropicale (Dia *et al.*, 2013) : le sous-groupe *Funestus* composé de 7 espèces (*An. funestus*, *An. funestus-like*, *An. aruni*, *An. confusus*, *An. parensis*, *An. vaneedeni* et *An. longipalpis* type C ; le sous-groupe *Rivulorum* composé de 4 espèces (*An. rivulorum*, *An. rivulorum-like*, *An. brucei* et *An. fuscivenosus*) et le sous groupe *Minimus* qui comprend les espèces *An. lesoni* et *An. longipalpis* type A. L'espèce nominale est considérée comme l'un des vecteurs majeurs du paludisme avec *An. gambiae*, *An. arabiensis* et *An. coluzzii* et est considérée comme l'un des vecteurs les plus compétents au monde (Dia *et al.*, 2013). Il se développe dans un large éventail d'habitats à travers la région afro-tropicale et semble être moins abondant en zone de forêt qu'en zone de savane (Danis et Mouchet, 1991). Il est également présent en haute altitude (jusqu'à 900 m à Madagascar et 2000 m au Kenya).

La différenciation des espèces du groupe se fait sur des caractères morphologiques très discrets soit à l'état larvaire ou adulte (Gillies et De Meillon, 1968). À l'exception d'*An. funestus*, seuls *An. rivulorum*, *An. lesoni* et *An. parensis* ont été incriminés dans la transmission du paludisme (Wilkes *et al.*, 1996 ; Temu *et al.*, 2007 ; Mulamba *et al.*, 2014). Malgré l'infection possible d'*An. vaneedeni* au laboratoire, son rôle vectoriel n'a jamais été mis en évidence (De Meillon *et al.*, 1977).

Du fait de son rôle prépondérant dans la transmission, de nombreuses études bioécologiques et génétiques ont été conduites chez *An. funestus* et ont pu mettre en évidence la présence de deux formes chromosomiques dénommées Kiribina et Folonzo (Costantini *et al.*, 1999 ; Dia *et al.*, 2000). Les études réalisées au Sénégal ont pu montrer la présence de ces formes caractérisées par une différenciation, ce qui suggérait la présence d'espèces cryptiques (Lochouarn *et al.*, 1998). L'utilisation d'outils microsatellites n'a cependant pas pu confirmer cette différenciation (Cohuet *et al.*, 2004) alors qu'au Burkina Faso, cette différenciation a été mise en évidence (Michel *et al.*, 2005) avec des comportements contrastés entre formes (Guelbeogo *et al.*, 2014).

Du fait des caractéristiques particulières de ses gîtes larvaires, le retour ou la réémergence d'*An. funestus* a été observée dans des zones d'où l'espèce avait disparu (Elissa *et* Karch, 2005 ; Konate *et al.*, 2001).

3.2.3. Le complexe *Anopheles nili*

Il a été décrit à partir d'observations morphologiques, écologiques et comportementales de différentes populations d'Afrique au sud du Sahara. Celles-ci ont ainsi permis de suggérer la présence de plusieurs unités taxonomiques avec 4 espèces distinctes : *An. nili*, *An. somalicus*, *An. carnevalei* et *An. ovengensis* (Gillies et de Meillon, 1968 ; Gillies et Coetzee, 1987 ; Antonio-Nkondjio *et al.*, 2002). La différenciation morphologique est basée sur des caractéristiques morphologiques soit au stade larvaire soit au stade adulte (Antonio-Nkondjio et Simard, 2013). Alors que l'implication d'*An. nili*, *An. carnevalei* et *An. ovengensis* a été mise en évidence, *An. somalicus* est une espèce connue comme zoophage.

Parmi les espèces de ce complexe, *An. nili* possède l'aire de répartition la plus large car étant retrouvé dans plusieurs zones de savanes humides et de forêts dégradées d'Afrique de l'ouest, du centre et de l'est alors que les autres espèces ont une distribution focalisée (Antonio-Nkondjio et Simard, 2013).

D'une manière générale, les populations forestières d'*An. nili* sont anthropophiles et endophages alors que les populations de savane ont un comportement exophile et exophage (Awono-Ambene *et al.*, 2004 ; Dia *et al.*, 2003).

Au Sénégal, *An. nili* a été observé uniquement dans la partie orientale où son rôle dans la transmission du paludisme a été décrit (Dia *et al.*, 2003).

3.2.4. Le complexe *Anopheles moucheti*

C'est un complexe regroupant les espèces *An. moucheti moucheti*, *An. moucheti bervoetsi* et *An. nigriensis* identifiables au stade adulte ou larve sur la bases de caractères morphologiques mineurs (Brunhes *et al.*, 1998). *An. moucheti* est largement distribué à travers l'Afrique de l'ouest et l'Afrique centrale alors que les deux autres espèces ne sont connues que dans leur localité

d'origine type au Nigéria près de Lagos pour *An. moucheti nigeriensis* et à Tsakalakuku en République Démocratique du Congo pour *An. bervoetsi* (Antonio-Nkondjio et Simard, 2013).

Sur le plan vectoriel, *An. moucheti* est l'un des meilleurs vecteurs du paludisme dans les régions de forêts équatoriales particulièrement dans les villages situés le long de rivières ou de fleuves avec un courant lent où se développent ses stades aquatiques autour de la végétation ou des débris dans l'eau (Antonio-Nkondjio *et al.*, 2009 ; Ayala *et al.*, 2009). *An. moucheti* est d'ailleurs souvent le vecteur majeur dans les villages de forêts profondes avec des taux d'infection plasmodiale pouvant atteindre les 3%. Plusieurs indications reflètent un comportement anthropophile dans l'environnement humain, certaines populations de l'espèce montrant un comportement zoophile (Antonio-Nkondjio et Simard, 2013).

Des études de sensibilité aux insecticides conduites en 2007 dans plusieurs localités du Cameroun ont montré une sensibilité complète au DDT, à la perméthrine et à la deltaméthrine (Antonio-Nkondjio et Simard, 2013).

4. La transmission vectorielle du paludisme

La transmission des *Plasmodium* et la biologie des principaux vecteurs en Afrique sont connues dans leurs grandes lignes depuis plus de 50 ans et est assurée par une soixantaine de vecteurs. Chaque espèce a une aire de distribution bien délimitée.

4.1. Les facteurs de la transmission

La transmission du paludisme implique 3 acteurs que sont : (i) le parasite (genre *Plasmodium*) qui est l'agent de la maladie, un protozoaire ; (ii) l'insecte, l'anophèle femelle vecteur qui assure la transmission, et (iii) l'homme qui est l'hôte intermédiaire du parasite (Thomas *et al.*, 2010). La transmission est plus intense aux endroits où les espèces de vecteurs ont une durée de vie relativement longue (ce qui permet au parasite de compléter son cycle de développement à l'intérieur du moustique) et piquent plutôt l'homme que les animaux (anthropophilie). L'évaluation de la transmission dépend impérativement des paramètres entomologiques (densité, longévité, fréquence, taux de parturité, taux d'agressivité, indice sporozoïtique, et taux d'inoculation entomologique). L'évaluation de ces paramètres

entomologiques permet d'avoir une idée sur la nature de la transmission qui sévit dans chaque localité définie.

Parmi les facteurs pouvant influencer la transmission, les paramètres climatiques particulièrement le régime des précipitations, la température et l'humidité, constituent les prépondérants. Ces facteurs ont d'ailleurs permis de décrire plusieurs faciès épidémiologiques en Afrique (Mouchet *et al.*, 1993) qui sont des zones où le paludisme est caractérisé par un certain mode de transmission qui se traduit par un certain niveau d'endémie de la maladie et une incidence particulière de ses manifestations cliniques modulées par l'acquisition d'une immunité (Faye, 1994). Au niveau local, d'autres facteurs comme les types d'occupation des sols, l'irrigation, l'urbanisation ou la déforestation entre autres, peuvent influencer la transmission.

4.2. Influence des facteurs environnementaux et climatiques sur la transmission

D'une manière générale, les facteurs climatiques et environnementaux influencent considérablement la distribution géographique et l'épidémiologie du paludisme (Lindsay *et al.*, 1998). Cette influence peut s'effectuer principalement à divers niveaux avec des conséquences variées : (i) la distribution spatiale et l'abondance relative des espèces vectrices, (ii) la durée de l'incubation extrinsèque des *Plasmodium* transmis, (iii) le contact homme-vecteur. Il est cependant important de relever que cette influence est assurée par les paramètres impliqués (pluviométrie, température, humidité et type d'occupation des sols entre autres) dont chacun assure un effet particulier et spécifique sur le vecteur.

4.2.1. La température

Elle influence principalement la durée du cycle d'incubation extrinsèque du *Plasmodium* mais également la durée du développement pré-imaginal.

Chez *P. falciparum*, on estime que la durée du cycle de développement sporogonique est impossible au-delà de 35°C et en deçà de 18°C alors que *P. vivax* supporterait des températures plus modérées jusqu'à 15°C. Chez *P. falciparum*, la durée du cycle d'incubation extrinsèque est estimée respectivement à 20, 11 et 9 jours à 20°C, 24°C et 30°C alors que chez *P. vivax* la durée est de 16, 9 et 7 jours aux mêmes températures.

Chez les vecteurs, le développement des phases aquatiques dure une dizaine de jours chez *An. gambiae* s.l. et une vingtaine de jours chez *An. funestus* à la température de 25°C. La température est en fait un facteur critique du fait de son rôle sur le taux de développement des stades aquatiques aux stades adultes (Lassiter *et al.*, 1995). Chez *An. gambiae*, des études ont montré que la température de l'eau a un effet marqué sur la longévité (Bayoh et Lindsay, 2004). En effet, aux températures extrêmes de 10-12°C et 38-40°C, les stades aquatiques meurent en quelques jours. De plus, les taux de mortalité larvaire les plus élevés sont observés en deçà de 18°C et au-delà de 32°C. Il faut cependant souligner que si des températures basses sont rarement observées en Afrique tropicale, les températures élevées sont souvent observées durant la saison sèche pendant laquelle, l'abondance des vecteurs est faible voire nulle dans plusieurs zones.

4.2.2. La pluviométrie

Elle joue un rôle important dans la disponibilité et la qualité des gîtes larvaires. Du fait qu'elle est caractérisée selon la zone par un rythme et une abondance particulière, elle détermine la faune anophélienne présente, leur abondance ainsi que leur dynamique saisonnière.

Chez les espèces du complexe *An. gambiae* (particulièrement *An. gambiae* et *An. arabiensis*) dont certains gîtes caractéristiques sont constitués par de petites collections d'eau claire, l'absence de pluies est caractérisée par une diminution de l'abondance des vecteurs et de la transmission (Gage *et al.*, 2008). Dans la partie sahélienne de l'Afrique, des sécheresses répétées ont été associées à une diminution de la transmission (Mouchet *et al.*, 1996 ; Julvez *et al.*, 1997). C'est ainsi que dans ces zones, on estime que les diminutions répétées de la pluviométrie augmentent la possibilité de manifestations épidémiques du fait de l'augmentation de la proportion de personnes non-immunes.

Concernant la dynamique des populations, les densités des populations d'*An. gambiae* suivent en général les pics de pluviométrie (Kabbale *et al.*, 2013) alors que chez des espèces comme *An. funestus*, les pics de densités maximales sont observés en fin de saison des pluies et en début de saison sèche.

Bien qu'il existe une relation directe entre la pluviométrie et la transmission, celle-ci n'est

pas toujours linéaire puisque de fortes pluies sont souvent associées à une diminution de la transmission (Lindsay *et al.*, 2000). Parmi les explications possibles, on peut citer particulièrement le lessivage des gîtes (Najera *et al.*, 1998).

Sur un autre plan, le profil pluviométrique affecte l'humidité relative, qui a un impact sur la survie des populations adultes.

4.2.3. L'humidité relative

Comme la température, l'humidité relative est un des facteurs climatiques qui influence la physiologie et ainsi la distribution des moustiques (Wigglesworth, 1972). L'humidité est étroitement liée à la température de sorte que l'effet individuel de chacun de ces deux facteurs est difficile à mettre en évidence. Cependant, l'un des rôles prépondérants de l'humidité relative est son implication dans la survie des populations adultes et en particulier sur la longévité des vecteurs. L'humidité relative intervient également dans le rythme et la dynamique des piqûres des vecteurs. Il a été en effet observé chez l'espèce *An. gambiae* que le rythme des piqûres suivait une évolution nycthémérale de l'humidité relative (Haddow, 1945). On estime d'ailleurs que l'activité diurne de nombreuses espèces d'insectes a lieu pendant la nuit, du fait que l'humidité relative atteint son maximum durant cette période (Barrozo *et al.*, 2004). Sur un autre plan, l'association de l'humidité relative avec la température permet de prédire la distribution des espèces sur la base de l'indice de saturation (Lindsay *et al.*, 1998).

En effet, dans les régions où coexistent *An. gambiae* et *An. arabiensis*, il est généralement observé que la dernière prédomine dans les zones plus chaudes et plus sèches, ce qui a été soutenu par plusieurs études. C'est ainsi que *An. arabiensis* est souvent l'espèce prédominante durant les mois les plus sèches de l'année (White, 1972 ; Rishikesh *et al.*, 1985) ; ce qui n'est pas le cas durant la saison des pluies où presque tous les moustiques collectés en zone de sympatrie sont représentés par *An. gambiae*

4.2.4. Les types d'occupation des sols

De tous les facteurs environnementaux, c'est celui dont l'influence sur la distribution des espèces est la plus remarquable. Il est en effet bien connu que la distribution des espèces au niveau

macro et micro-géographique est liée aux grands domaines phytogéographiques. Chez les vecteurs majeurs du paludisme, il est bien connu qu'*An. gambiae*, *An. arabiensis* et *An. funestus* ont des zones de répartition liée à la végétation. *An. gambiae* prédomine dans les zones humides, *An. arabiensis* dans celles plus arides alors que *An. funestus* est inféodé aux zones avec de la végétation aquatique émergente ou flottante (Coluzzi *et al.*, 1985 ; Gillies et De Meillon, 1968). D'autres espèces comme *An. melas*, *An. merus*, *An. nili* ou *An. moucheti* sont prédominantes dans des zones de mangroves ou de cours d'eau à courant (Akogbeto et Yakoubou, 1999, Nkondjio *et al.*, 2009). L'influence d'autres facteurs agissant sur l'occupation des sols a été mise en évidence (Ijumba *et al.*, 2002 ; Keiser *et al.*, 2005). Au niveau micro-géographique, des études récentes ont montré que des différences pouvaient être attribuées à l'occupation des sols (Jacob *et al.*, 2007 ; Mwangangi *et al.*, 2010). Il a d'ailleurs été mis en évidence un lien direct entre l'augmentation ou la baisse du risque paludéen en fonction du type d'occupation des sols (Krefis *et al.*, 2011).

5. Stratégies de lutte contre les vecteurs

Le contrôle des vecteurs fait appel à plusieurs stratégies de lutte en fonction des espèces, leurs comportements et leurs stades de développement. Les nombreuses méthodes utilisées présentent pour chacune un impact spécifique puisque leur efficacité et leur sélection dépendent à la fois du comportement du vecteur, de sa bio-écologie mais également du contexte épidémiologique. En fonction de la méthode utilisée et de la stratégie sélectionnée, la lutte peut s'appliquer à différents stades.

5.1. La lutte anti-larvaire

Cette méthode est difficile à appliquer dans le cadre de la lutte contre les vecteurs du paludisme. Son application nécessite que les gîtes des vecteurs soient limités dans l'espace, facilement repérables et accessibles. C'est le cas particulièrement des zones urbaines et péri-urbaines. Il existe des méthodes alternatives à efficacité localisée qui nécessite une bonne connaissance du comportement des vecteurs ainsi que sa biologie (poissons larvivores, champignons, bactéries).

5.2. La lutte anti-adulte

Cette méthode fait appel principalement à l'utilisation d'insecticides (pulvérisation intra domiciliaire avec un insecticide rémanent, moustiquaires ou matériaux imprégnés). La pulvérisation a été pendant longtemps l'une des méthodes de choix pour la lutte contre les vecteurs du paludisme du fait du comportement endophile notée chez la plupart d'entre eux. La découverte de l'effet toxique et efficace des insecticides a par la suite été associée à la barrière physique constituée par les moustiquaires imprégnées pour lesquelles un intérêt particulier leur a été accordé depuis les années 90. Cet outil constitue maintenant un moyen efficace de réduction de la morbidité et la mortalité palustres. Il permet en effet de diminuer le contact homme-vecteur par un effet répulsif ou d'éliminer les vecteurs en les empêchant d'atteindre les hôtes. En plus de cet outil, un intérêt particulier a été accordé à la lutte génétique basée sur l'utilisation de vecteurs à compétence vectorielle altérée suite à une manipulation génétique. Le principe de cette méthode repose sur la diffusion d'un ou plusieurs gènes pouvant bloquer le développement du parasite au sein de populations naturelles.

6. Présentation du modèle d'étude : l'espèce *Anopheles arabiensis*

Il est l'un des membres du complexe *An. gambiae* et un des plus importants vecteurs du paludisme en Afrique sub-saharienne et dans les îles voisines. Comparé au membre le plus étudié du groupe (*An. gambiae*), il est considéré comme une espèce zoophile, exophage et exophile caractérisée par des comportements trophiques et de repos variables et largement dépendants de la localisation géographique.

6.1. Distribution géographique et habitats préférentiels

An. arabiensis est l'espèce ayant la répartition géographique la plus large parmi les espèces du complexe *An. gambiae*. Il est trouvé dans presque toute la région subsaharienne d'Afrique, à Madagascar et dans les îles avoisinantes (Ile Maurice, Ile de la Réunion). En Afrique de l'Ouest, il a été retrouvé dans des zones côtières en zone de savane guinéenne au Bénin où seule l'espèce *An. gambiae* était connue auparavant (Djogbénou *et al.*, 2010).

Il est considéré d'une manière générale comme une espèce de savanes sèches et souvent de savanes boisées. Ses habitats aquatiques sont similaires à ceux de l'espèce *An. gambiae* : gîtes

d'eau douce claire de petite taille temporaires et ensoleillés. Cependant, il est capable de se développer contrairement à *An. gambiae* dans une large gamme d'habitats y compris des gîtes à courant lent, partiellement ombragés et une variété de gîtes naturels ou anthropiques. Des stades aquatiques ont été retrouvés dans des eaux turbides et parfois saumâtres. Les aires de riziculture sont parfois aussi favorables au développement des stades aquatiques. Dans ces environnements, leurs densités sont largement dépendantes de la taille des plants, les densités les plus élevées étant observées bien avant la maturité du riz.

6.2. Préférences trophiques et comportement de piqûre

An. arabiensis a un comportement alimentaire variable selon la disponibilité de l'homme et d'autres hôtes alternatifs, puisque plusieurs études ont mis en évidence soit un comportement anthropophile ou zoophile. D'ailleurs, certains auteurs ont mis en évidence l'association entre le contexte écologique, la disponibilité des hôtes et la structuration génétique des populations. Une analyse relativement exhaustive de Tirados *et al.*, (2006) a permis de suggérer l'existence d'un gradient Est-Ouest avec les populations d'Afrique de l'Ouest caractérisées par des niveaux élevés d'anthropophilie et une préférence endophage et endophile, alors que les populations d'Afrique de l'Est seraient caractérisées par un comportement zoophile et exophage. Il est à ce titre à relativiser puisque selon le contexte, des populations zoophiles sont présentes dans l'une ou l'autre partie de ces deux zones d'Afrique (Lemasson *et al.*, 1997 ; Fontenille *et al.*, 1997a, Fontenille *et al.*, 1997b).

Le comportement de piqûre est également très variable, mais l'activité alimentaire se passe d'une manière générale au cours de la nuit. Les pics d'agressivité les plus élevés sont observés soit en début de soirée ou dans la seconde partie de la nuit (Tirados *et al.*, 2006 ; Oyewole et Awolola, 2006 ; Lemasson *et al.*, 1997). Des cas d'exophilie ont été rapportés chez *An. arabiensis* et ont été associés à la présence d'inversions chromosomiques spécifiques (Coluzzi *et al.*, 1979 ; Ralisoa et Coluzzi, 1987 ; Petrarca *et al.*, 2000).

6.3. Susceptibilité aux insecticides et contrôle anti-vectoriel

D'une façon générale, les études réalisées sur la sensibilité des populations d'*An. arabiensis* aux insecticides ont montré que la résistance est moins fréquente que chez *An. gambiae s.s.*

Jusqu'à récemment, cette espèce a été complètement sensible au DDT et aux pyréthriinoïdes dans plusieurs pays au Sud de l'Afrique (Botswana, Namibie, Swaziland, Zambie, Zimbabwe) (ANVR, 2005). Cependant, la résistance au DDT a été signalée en Afrique du Sud. Des indications de résistance au DDT ont été décrites en Erythrée et en Ethiopie ainsi qu'une résistance croisée au DDT et aux pyréthriinoïdes au nord Cameroun (Ndjemai *et al.*, 2009). Des phénomènes de résistance multiple ont été mis en évidence chez cette espèce. Il s'agit plus explicitement des organochlorés BHC (benzene hexachloride) et DDT (Haridi, 1972), à l'organophosphate malathion (Hemingway, 1983) et à plusieurs pyréthriinoïdes (Abdalla *et al.*, 2008). Plusieurs mécanismes ont été mis en évidence et associés aux résistances observées. C'est en particulier la mutation kdr leucine-phénylalanine (kdr-Ouest) au Burkina Faso (Diabate *et al.*, 2004), au Togo et en Afrique de l'Est (Kulkarni *et al.*, 2006 ; Matambo *et al.*, 2007 ; Himeidan *et al.*, 2007). De plus, depuis sa première mise en évidence en Afrique de l'Ouest, la résistance kdr (kdr-Est) a été mise en évidence chez *An. arabiensis* (Djegbe *et al.*, 2011 ; Ochomo *et al.*, 2015). D'autres mécanismes ont été mis en évidence. Il s'agit en particulier de phénomènes d'élévation d'antioxydants à la suite de pratiques agricoles (Muller *et al.*, 2008) ou à des phénomènes de détoxification métabolique due à des monooxygénases ou des estérases (Cisse *et al.*, 2015). Chez les autres classes d'insecticides, la mutation ace-1 responsable d'une résistance croisée entre carbamates et organophosphates a été récemment mise en évidence au Burkina Faso (Dabiré *et al.*, 2014). Au Sénégal, les études réalisées jusqu'ici ont permis de démontrer la présence des deux mutations kdr chez *An. arabiensis* dans deux quartiers de la ville de Dakar (Pagès *et al.*, 2008, Ndiath *et al.*, 2015).

6.4. *An. arabiensis* au Sénégal

Au Sénégal, la présence d'*An. arabiensis* a été signalée dans toutes les zones climatiques avec un gradient de distribution croissante du sud vers le nord. C'est ainsi qu'en zone sahélienne, elle a été l'espèce prédominante mais également dans la zone des Niayes (Vercruysse et Jancloes, 1981, Petrarca *et al.*, 1987, Faye *et al.*, 1992, 1993). La même observation a été faite dans la zone centrale du Ferlo (Lemasson *et al.*, 1997 ; Dia *et al.*, 2005) mais également dans la zone de Niakhar (Robert *et al.*, 1998). Dans la partie nord du pays, elle est l'espèce prédominante dans la vallée du fleuve Sénégal (Carrara *et al.*, 1990, Faye *et al.*, 1993). Des études récentes conduites dans la basse vallée du fleuve Sénégal, la zone du lac de Guiers et la basse vallée du Ferlo ont

confirmé ces résultats (Dia *et al.*, 2008). Dans la région du Saloum, elle reste également l'espèce prédominante (Fontenille *et al.*, 1997a, 1997b, Niang *et al.*, 2013). Au sud du Sénégal, c'est plutôt *An. gambiae* qui a été l'espèce prédominante dans les années 80 (Bryan *et al.*, 1982, 1987, Faye, 1987, Faye *et al.*, 1992, 1993), mais les observations faites depuis quelques années mettent en évidence une prédominance d'*An. arabiensis* (Caputo *et al.*, 2008 ; Niang *et al.*, 2014).

CHAPITRE 2 : METHODOLOGIE GENERALE

1. Le pays d'étude : le Sénégal

1.1. Situation

Le Sénégal est situé à l'extrême Ouest du continent africain entre le 12°28' et 16°41' de latitude Nord et 11°21' et 17°32' de longitude Ouest avec une superficie de 196 722 km² et près de 14 000 000 d'habitants (Figure 5). Il est limité au Nord et au Nord-est par la Mauritanie, à l'Est et au Sud-Est par le Mali, au sud par les Républiques de Guinée Conakry et de Guinée Bissau et à l'Ouest par l'Océan Atlantique sur une façade de plus de 500 km. La Gambie forme une enclave à l'intérieur du pays à partir de l'Ouest. C'est un pays à relief relativement plat, constitué essentiellement de plaines et de plateaux (altitude inférieure à 50 m sur les trois quarts du territoire) avec un point culminant situé à l'extrême Sud-Est (région de Kédougou) du Sénégal dans les contreforts du Fouta-Djalon et à l'ouest par les massifs volcaniques de la Presqu'île du Cap-Vert.



Figure 5 : Le Sénégal dans le monde (Source : Wikimedia, 2011)

1.2. Climat et hydrographie

Il est de type tropical sahélien et est soumis à la fois à des facteurs géographiques et atmosphériques malgré la relative uniformité du relief. Les températures suivent le rythme des saisons. Leurs évolutions et leurs distributions résultent de la conjonction des facteurs cosmiques, météorologiques et géographiques. Les minima thermiques sont atteints pendant les mois de décembre et janvier et les maxima durant la saison des pluies et en été (avril-juin). Sur le littoral nord, les températures sont modérées (16-30°C). Elles s'approchent de 40°C ou plus dans les régions de Tambacounda et de Matam et peuvent atteindre 45°C dans le Centre-Est du pays (Ferlo). La présence d'une façade maritime de plus de 500 km et la situation à l'extrême Ouest du continent africain entraînent des différences climatiques entre la zone côtière et les régions de l'intérieur. De plus, la circulation atmosphérique facilitée par l'absence d'obstacles montagneux place le territoire sous les effets de l'alizé maritime, de l'harmattan (alizé continental) et de la mousson. Ces différentes masses d'air déterminent ainsi deux saisons bien différenciées :

- la saison sèche : de novembre à juin avec sur la région côtière la prédominance de l'alizé maritime, vent frais et humide non pluvieux issu de l'anticyclone des Açores tandis que l'intérieur est sous l'influence de l'harmattan, alizé continental saharien sec avec des écarts de températures sensibles entre le jour et la nuit Cette saison comprend une période fraîche et humide de décembre à février et une période chaude et sèche avec les maxima thermiques les plus élevés.

- la saison des pluies ou hivernage : elle se manifeste de juin ou juillet à octobre ou novembre d'abord au sud puis gagne progressivement le reste du pays. C'est durant cette saison que souffle la mousson provenant de l'anticyclone de Sainte-Hélène. Les pluies diminuent cependant en durée et en intensité du sud au nord avec 1500 mm dans la région méridionale (Ziguinchor), 800 mm dans la zone centrale (Kaolack) et 330 mm au nord (Podor). Dans la région méridionale, la saison dure 4 à 5 mois alors qu'au nord, elle est réduite à 2 mois. La moitié septentrionale connaît une insécurité climatique depuis les années 60 avec la rareté des pluies, leur brièveté et des variations sensibles notées d'une année à l'autre.

Le réseau hydrographique est peu dense et est de régime tropical avec d'importantes différences de débit entre la saison des pluies et la saison sèche, avec parfois un tarissement des

cours d'eau. Il est alimenté principalement par 3 systèmes de cours d'eau permanents : les fleuves Sénégal, Gambie et Casamance qui prennent leur source dans les montagnes du Fouta-Djalon en Guinée. Malgré le fait qu'ils sont en eau toute l'année, ils subissent cependant les effets de la saison sèche avec une infiltration de l'eau de mer qui remonte leur lit sur de longues distances pendant l'étiage. De petits cours d'eau côtiers le complètent. D'autres ressources en eau de surface sont constituées par le lac de Guiers, le bassin de l'Anambé, la cuvette de Ngalanka, les vallées fossiles du Sine, du Saloum et du Ferlo et les marigots ou bas-fonds d'une capacité annuelle de plus de 90 Millions de m³.

1.3. Domaines climatiques et végétations

La variété des conditions bioclimatiques et la diversité de son substratum géologique font que le Sénégal recèle plusieurs types de sols aux aptitudes inégales : sols sec, boueux et sablonneux du Sahel jusqu'aux latérites dans les régions sahélienne et sahélo-soudanienne. L'influence du climat et du réseau hydrographique ainsi que la nature des sols déterminent plusieurs zones bioclimatiques dont les limites sont actuellement imprécises du fait des forts changements climatiques constatés depuis les années 70. On distingue ainsi 5 zones bioclimatiques :

- la zone sahélienne est située en dessous de l'isohyète 300 mm. L'amplitude thermique est de 25°C avec des températures maximales de plus 40°C enregistrées en avril-juin et des températures minimales de 20°C en décembre-janvier. La saison pluvieuse dure 1 à 2 mois. La végétation est composée d'une brousse clairsemée où prédominent généralement des épineux.

- la zone soudano-sahélienne située entre les isohyètes 300 et 500 mm. La période pluvieuse dure 3 mois soit de juillet à septembre. Les maxima thermiques sont enregistrés en avril-mai (40°C) et en septembre-octobre 35°C et les minima en décembre-janvier 18°C et en août (23°C). La végétation est constituée de steppe, de brousse clairsemée et de savanes arborée et arbustive avec de nombreux arbres épineux.

- la zone soudanienne est située entre les isohyètes 500 et 1200 mm et est subdivisée en une zone soudanienne nord (entre 500 et 1000 mm) et une zone soudanienne sud (entre 1000 et 1200

mm). Les précipitations sont échelonnées entre 5 et 7 mois de mai à octobre avec des amplitudes thermiques élevées et souvent supérieures à 25°C. Les maxima thermiques se situent en avril-mai avec 40°C et en octobre avec 35°C et les minima inférieurs à 15°C en décembre-janvier et entre 20 et 25°C en août. La végétation est composée de savane boisée avec par endroits une forêt claire avec un tapis de hautes herbes.

- la zone soudano-guinéenne (sub-guinéenne) est la zone la plus arrosée du pays avec une période de précipitations allant d'avril à novembre et des niveaux de pluviométrie entre 1200 et 1600 mm. L'amplitude thermique est de 20°C avec des températures maximales de 35°C et 30°C en juin et octobre et des températures minimales de 15°C et 25°C en décembre-janvier et en août. La végétation se compose d'une forêt dense à l'état naturel, d'une savane boisée, d'une forêt sèche dense et de plantations de palmiers à huile.

- la zone des Niayes représentée par des dépressions inter-dunaires situées à l'arrière du cordon littoral de la grande côte. Elle est soumise à l'action de l'alizé maritime et de la mousson. Les températures moyennes mensuelles les plus élevées sont entre 27 et 28°C. La pluviométrie est faible. Les précipitations sont irrégulières et diminuent du sud vers le nord. La végétation est composée de palmiers à huile et de cocotiers accompagnés de nombreuses espèces arbustives et herbacées. Dans les zones exondées se rencontrent de nombreuses mares avec à leurs rives de nombreuses espèces arbustives et herbeuses et dans l'eau d'hydrophytes telles que nénuphars, lentilles et laitues d'eau. La disponibilité en eau favorise également les cultures maraîchères et légumières.

2. Présentation de la zone d'étude

2.1. Description

Le cadre de l'étude se situe dans la zone sahélienne au centre du Sénégal dans la zone sylvo-pastorale du Ferlo, dans le département de Linguère, région de Louga. La saison des pluies y est courte et s'étend généralement de juillet à octobre. Le niveau pluviométrique se situe selon les années entre 300 et 500 mm. La température moyenne annuelle est de 28,8°C avec un minimum moyen mensuel de 24,4°C en janvier et un maximum de 35,5°C en mai. Sur le plan géo-morphologique, cette zone est située sur les vallées fossiles du Ferlo et est entourée par des

bas-fonds qui collectent l'eau sous forme de mares temporaires dès que les précipitations commencent. Ces mares demeurent les principales sources en eau entre juillet et février. Elles permettent ainsi aux populations de disposer de d'eau de boisson mais également d'abreuver le bétail. La végétation dans cette zone est constituée principalement de savane arborée, de savane arbustive, de steppe et de sol nu.

2.2. Population et Climat

La population de la zone est essentiellement constituée de peulhs et de wolofs, ainsi qu'une minorité de sérères constitués souvent de nomades. L'élevage est l'une des principales activités économiques et le bétail (ovins, bovins, caprins), la volaille et les équins constituent les principaux animaux domestiques. Il s'y ajoute l'agriculture et le commerce dans une moindre mesure. La population peulh est constituée principalement de nomades qui en dehors de la saison des pluies se déplace avec le bétail vers des lieux où elle trouve de l'eau et de la nourriture. La construction de 3 écoles élémentaires ainsi qu'un collège d'enseignement fonctionnel a permis un bon niveau de scolarisation des enfants dans cette zone malgré le comportement nomade de la population Peulh. L'approvisionnement en eau potable est assuré par l'unique forage présent aussi bien en saison sèche qu'en saison des pluies. Durant cette dernière, les petits villages alentour se ravitaillent en eau au niveau des mares temporaires. La zone est dotée d'un poste de santé avec une maternité, ce qui permet d'assurer les soins médicaux, les consultations et les accouchements. L'essentiel des habitations est constitué de constructions en dur (ciments ou banco) avec des toits en zinc et des cases en palissades avec des toits de paille.

Le climat est de type sahélien particulièrement chaud et sec, les sols sont sableux peu évolués et se sont développés à partir des dunes, avec un tapis herbacé dominé par des graminées et des arbustes (vallées fossiles) et de plantes épineuses, avec l'existence de nombreuses mares. Le relief de cette zone est presque entièrement plat.

2.3. Choix et caractérisation des sites d'étude

Les sites d'étude ont été sélectionnés parmi les villages situés dans un rayon de 15 km autour du village de Barkédji (15°17'N, 14°53'W). C'est ainsi que les prospections de terrain ont permis d'identifier 28 villages y compris le village de Barkédji.

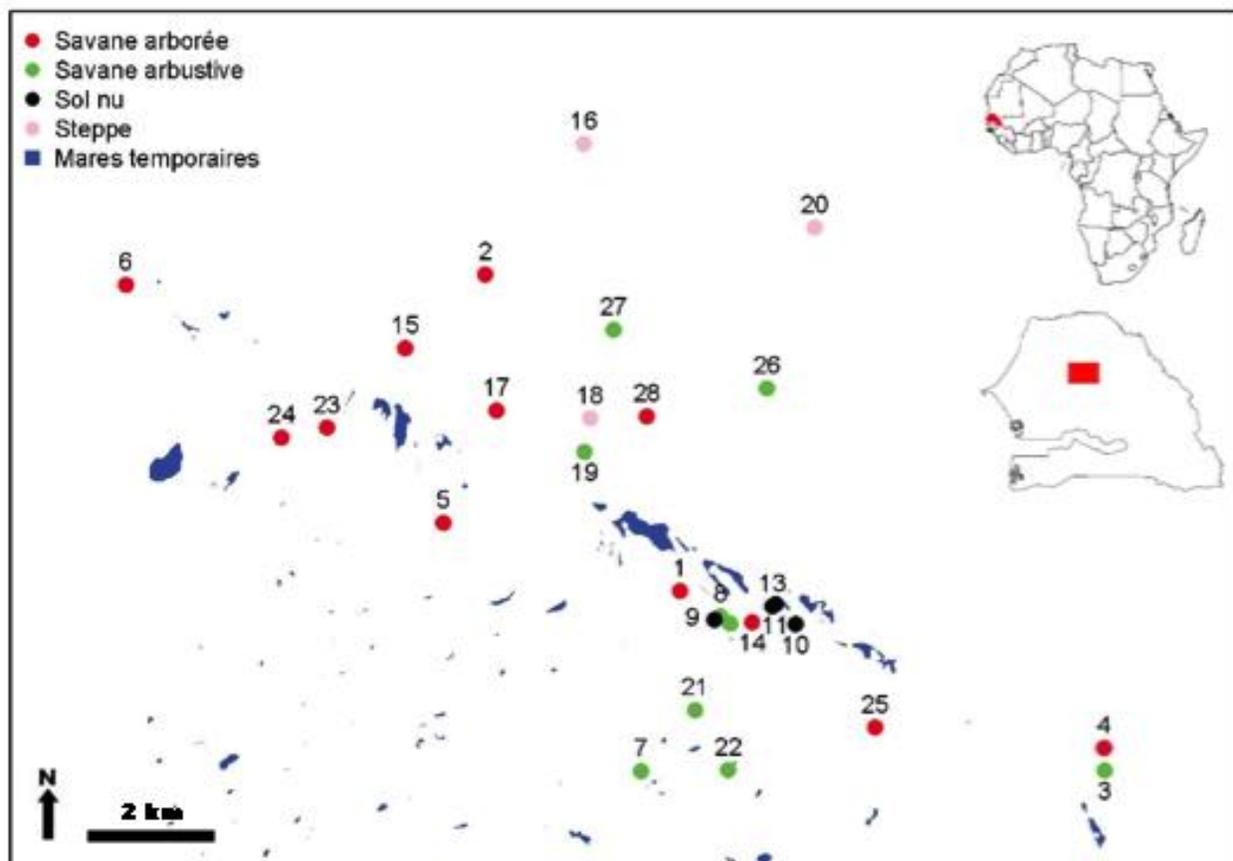


Figure 6 : Localisation géographique des sites visités

La Figure 6 présente l'ensemble des villages identifiés au cours des missions de reconnaissance géographique. La sélection des sites a été complétée par la détermination des types d'occupation des sols par le Centre de Suivi Ecologique de Dakar à partir d'une image satellite SPOT5, 10 m. La démarche a consisté à l'interprétation de la photo satellite grâce à une cartographie prospective de l'occupation du sol afin de disposer des niveaux discriminants permettant un choix des sites. Les classes de végétations ont été décrites selon une combinaison des systèmes FAO (1997) et CSA (1956). C'est ainsi que 4 principaux types d'occupation des sols ont été identifiés parmi les sites identifiés dans la zone d'étude : savane arborée, savane arbustive, sol nu et steppe. C'est à l'issue de cette analyse et de l'étude de l'accessibilité des sites en toute saison que les sites présentés au Tableau 1 et à la Figure 6 ont été choisis pour conduire les études entomologiques. C'est ainsi que sur un total de 16 sites retenus pour l'étude de l'influence des types d'occupation des sols sur les préférences trophiques, 14 ont été ensuite conservés pour l'étude de l'influence des types d'occupation des sols et des paramètres

climatiques sur les densités et taux d'infection d'*An. arabiensis* et 6 sur l'impact des facteurs environnementaux et climatiques sur la transmission à travers une étude bimensuelle pendant trois années successives (2010, 2011 et 2012).

Tableau 1 : Liste et caractéristiques des villages

Numéro	Villages	Type d'occupation des sols	Longitudes W	Latitudes N
1	Barkedji	Savane arborée	15°17'00	14°53'00
2	Belel Diabi	Savane arborée	15°18'35	14°53'09
3	Keur Alpha	Savane arbustive	15°14'42	14°47'57
4	Keur Racine	Savane arborée	15°15'11	14°47'50
5	Dague Nabe	Savane arborée	15°17'04	14°52'96
6	Diabal	Savane arborée	15°18'53	14°56'05
7	Keur Sidaty	Savane arbustive	15°15'11	14°51'37
8	Keur Mounirou	Savane arbustive	15°16'11	14°50'48
9	Keur Gallo	Sol nu	15°16'15	14°51'01
10	Keur Mamadou	Sol nu	15°16'23	14°51'06
11	Keur Kalidou	Savane arbustive	15°16'17	14°51'86
12	Keur Aliou	Sol nu	15°15'86	14°50'30
13	Keur Dadal	Sol nu	15°16'25	14°51'01
14	Keur Guellou	Savane arborée	15°16'42	14°51'10
15	Keur Adama	Savane arborée	15°17'50	14°53'33
16	Keur Bandji	Steppe	15°19'34	14°52'20
17	Keur Bathiel	Savane arborée	15°17'32	14°52'43
18	Keur Daha	Steppe	15°17'31	14°52'17
19	Keur Demba	Savane arbustive	15°17'36	14°52'29
20	Keur Diallo	Steppe	15°19'10	14°50'24
21	Keur Amath	Savane arbustive	15°14'17	14°51'13
22	Keur Karoumbel	Savane arbustive	15°15'00	14°51'24
23	Niakha	Savane arborée	15°17'28	15°54'18
24	Niakha Ndiaybe	Savane arborée	15°15'56	14°50'18
25	Wella Soylo	Savane arborée	15°15'30	14°50'12
26	Wouro Samba Kibel	Savane arbustive	15°17'39	14°51'02
27	Wouro Sileymani	Savane arbustive	15°18'20	14°52'08
28	Wouro Thilli	Savane arborée	15°17'31	14°51'36

Les données climatiques (température, humidité et pluviométrie) ont été collectées à l'aide de stations météorologiques installées dans les différents sites retenus (Figure 7).



Figure 7 : Station météorologique pour la mesure de la pluviométrie, la température et l'humidité

3. Méthodes d'échantillonnage des vecteurs

La collecte des populations de vecteurs a été effectuée à l'aide de plusieurs techniques d'échantillonnage.

3.1. Capture nocturne sur homme

Cette méthode a été utilisée pour collecter les moustiques agressifs. La collecte a été faite par des hommes adultes et volontaires, assis dans l'obscurité à l'intérieur (chambre) et à l'extérieur (cour, véranda) des habitations. Ils allument une torche pour piéger les femelles qui se posent sur leurs jambes dénudées à l'aide de tubes à hémolyse. Dans chacun des villages sélectionnés, les collectes ont été faites dans des concessions par deux équipes (une à l'intérieur et une à l'extérieur) constituée de deux agents (Figure 8). Dans chaque concession, deux agents travaillent simultanément de 20h à 01h, l'un à l'intérieur et l'autre à l'extérieur. Ils ont été relayés

par deux autres entre 01h et 06h du matin. À la fin de chaque tranche horaire, les tubes sont mis dans des sacs portant le lieu et l'heure de capture.

Dans chaque village, deux nuits de capture consécutives ont été effectuées dans le village de Barkédji et une nuit dans les autres. Ces captures ont eu lieu toutes les deux semaines du mois de juillet au mois de décembre en 2010, 2011 et 2012.



Figure 8 : Capture nocturne à appât humain des vecteurs

3.2. Collecte de vecteurs au repos dans les habitations humaines

Celle-ci a été effectuée par aspersions intra-domiciliaires d'insecticides (pyréthrinoides) dans les chambres à coucher. Ces aspersions ont été faites le matin pour collecter les femelles gorgées avant la digestion de leur repas sanguin pris la nuit. Des draps blancs sont étalés sur tout le plancher de la chambre. Une fois les portes, fenêtres et issues fermées ; une personne asperge à l'intérieur alors qu'une seconde pulvérise sur les issues par lesquelles les moustiques pourraient éventuellement s'échapper (Figure 9). Après 10 minutes d'attente pour que les insectes tombent, les draps sont sortis et tous les moustiques ont été récupérés à l'aide de pinces souples et mis dans des pots sur lesquels sont mentionnées toutes les informations utiles (numéro de la concession et de la chambre, nombre de personnes ayant passé la nuit).



Figure 9 : Collecte de vecteurs au repos dans les habitations

3.3. Collecte de stades aquatiques

Des collectes de stades aquatiques ont été effectuées à l'intérieur et au alentour des villages dans des collections d'eau pour la recherche de stades aquatiques de moustiques. Il s'agissait de petites mares, au bord des cours d'eau où le courant est faible, de flaques d'eau, de traces de pas ou pneus contenant de l'eau non loin des habitations (des eaux non polluées essentiellement). Ces collectes ont été faites entre 10h et 15h (Figure 10). Les larves et nymphes recueillies ont été mises dans des bacs séparément portant le type de gîtes puis transportés à l'insectarium pour leur maintien en élevage.



Figure 10 : Collecte larvaire dans différents gîtes

4. Traitement et Analyse des échantillons collectés

4.1. Sur le terrain

Les spécimens adultes collectés sont identifiés, triés et dénombrés selon le genre, l'espèce et le sexe genre/espèce en utilisant des clés d'identification conventionnelles (Edwards, 1941, Gillies et De Meillon, 1968). Parmi les femelles agressives collectées (capture nocturne à appât humain), 10 à 100% (selon la taille des récoltes) sont disséquées pour la détermination de leur âge physiologique (parturité) en utilisant la technique de Detinova (1962). Chez les femelles endophiles collectées à l'état gorgé, le sang est prélevé sur papier filtre de type WHATMAN pour la détermination de la source au laboratoire par ELISA. Tous les spécimens sont ensuite mis dans des tubes numérotés contenant du gel de silice pour des tests complémentaires au laboratoire. Les stades aquatiques collectés ont été maintenus en élevage (Figure 11) jusqu'à l'émergence puis les femelles testées aux insecticides pour déterminer leur sensibilité.

4.2. Au laboratoire

4.2.1. Identification des vecteurs par la technique de polymérisation en chaîne

L'ADN génomique des individus appartenant au complexe *An. gambiae* a été extrait à partir des pattes et des ailes d'après la technique de Collins *et al.*, (1987) puis les différentes espèces et formes moléculaires identifiées à l'aide de la technique de Fanello *et al.*, (2002). Les détails des techniques d'extraction et d'identification sont présentés aux ANNEXES 1 et 2.

4.2.2. Identification des moustiques infectés par ELISA

Les têtes et thorax des anophèles ont été testés en ELISA pour la recherche de l'antigène CSP de *P. falciparum* suivant la technique de Burkot *et al.*, (1984) et Wirtz *et al.*, (1987). Cette technique est basée sur la recherche de la CSP à l'aide d'un anticorps monoclonal anti-CSP (anticorps de capture) et un anticorps monoclonal anti-CSP conjugué avec une peroxydase. Le complexe ainsi formé est révélé par un substrat de la peroxydase. Le détail de la technique est présenté en ANNEXE 3.

4.2.3. Détermination de la source des repas de sang par ELISA

L'origine des repas de sang pris par les vecteurs a été déterminée par la technique ELISA de Beier *et al.*, (1988). Cette technique est basée sur la recherche d'Immunoglobulines G (IgG) spécifiques de l'homme, du bœuf, du mouton, de la poule et du cheval. Ces anticorps sont marqués avec une peroxydase qui en présence de son substrat permet de révéler la présence de l'IgG par une réaction colorée. Le détail de la technique est présenté en ANNEXE 4.

4.2.4. Etude de la sensibilité aux insecticides

L'étude de la sensibilité aux insecticides a été réalisée suivant la technique normalisée de l'OMS récemment révisée (WHO, 2013). Les moustiques adultes émergeant des stades aquatiques collectés sur le terrain ont été exposés dans des tubes spéciaux provenant du kit fourni par l'OMS avec des papiers imprégnés des différents insecticides à tester à des concentrations diagnostiques déterminées. Le protocole est présenté en ANNEXE 5.

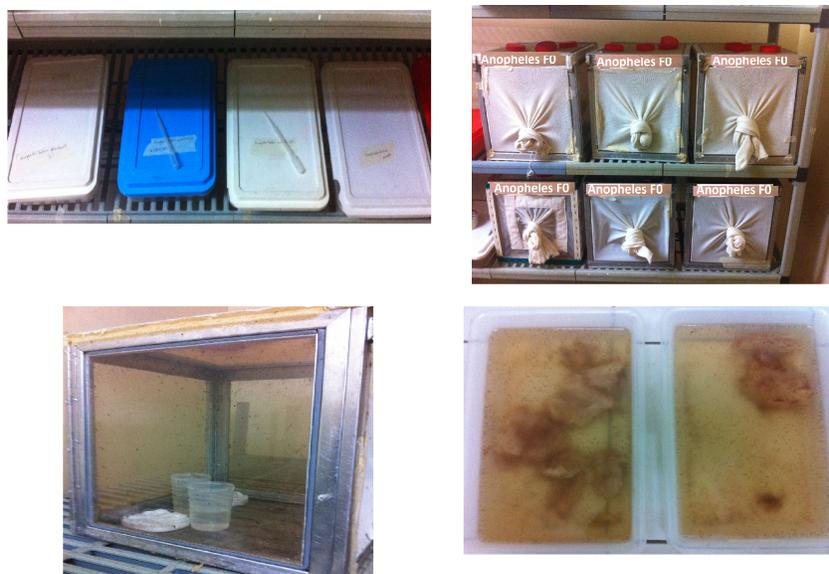


Figure 11 : Elevage des vecteurs collectés sur le terrain en Insectarium

4.2.5. Etude de la durée du cycle gonotrophique

Les expérimentations ont été réalisées dans des conditions contrôlées en insectarium (photo-périodicité de 12 : 12, humidité autour de $80 \pm 10\%$ et une température entre $25-28^{\circ}\text{C}$). Les larves collectées sur le terrain ont été acheminées à l'insectarium où elles ont été maintenues jusqu'à l'émergence des adultes. Des femelles ont été d'abord gorgées et mises dans des pots individuels avec un seul pondoïr. Chaque pondoïr a ensuite été quotidiennement inspecté puis en cas de ponte, le pondoïr retiré et remplacé par un nouveau.

5. Analyse des données

Les résultats de terrain et de laboratoire obtenus au cours de cette étude ont été saisis dans une base de données et les paramètres suivants estimés :

- **abondance** :

Elle représente la proportion relative d'une espèce par rapport aux autres espèces présentes.

- taux d'agressivité :

Il est exprimé par le terme *ma* qui signifie la densité anophélienne agressive pour l'homme. Il est estimé en nombre de piqûres d'anophèle par unité de temps (par nuit, mois) et est calculé par le rapport entre le nombre de moustiques collectés sur le nombre de collecteurs utilisés.

- densité au repos :

Elle est déterminée par le rapport entre nombre de moustiques collectés au repos sur le nombre total de chambres prospectées.

- taux de parturité :

Il représente le pourcentage de moustiques ayant pondu au moins une fois et est estimé à partir du rapport en pourcentage du nombre de moustiques pares sur le nombre total de moustiques disséqués

- taux quotidien de survie :

Il permet de suivre la dynamique des populations vectorielles dans le temps et dans l'espace. Il est obtenu selon la formule de Davidson (1954) par le calcul $p=TA^{1/x}$ où x = durée du cycle gonotrophique en jours et TP le taux de parturité

-durée du cycle gonotrophique :

Elle a été déterminée à travers des expérimentations au laboratoire et a été estimée à 3 jours.

- durée du cycle d'incubation extrinsèque

Elle est notée n et est calculée à partir de la formule de Moskovsky : $111/T-18$ Avec T=température moyenne (évaluée au cours de l'étude dans chaque site) et 18 est la température seuil à partir de la quelle le développement de l'espèce n'est plus possible.

- espérance de vie et espérance de vie infectante :

Elles ont été calculées à partir du taux quotidien de survie et permettent d'estimer l'âge épidémiologiquement dangereux des populations de vecteurs. L'espérance de vie est déterminée

par la formule $1/-\log(p)$ où p = taux quotidien de survie et l'espérance de vie infectante : $p^n/-\log(p)$

- capacité vectorielle :

Elle est définie comme le nombre de contacts potentiellement infectants par la population vectrice à partir d'un individu et par jour. En d'autres termes, en un jour, un individu sera piqué en moyenne par ma femelles dont une fraction pn a une espérance de vie infectante EVI . Chaque jour de sa survie, un moustique prendra a repas sur homme. Elle est estimée par la formule : $CV = ma^2 p^n / -\log(p)$.

- indice de stabilité :

Il est défini d'après Macdonald (1957) comme étant le nombre de piqûres sur homme qu'effectue une femelle vectrice au cours de sa vie. Il dépend de la fréquence des repas de sang sur homme (a) et de la probabilité de survie durant une journée. Il est estimé par la formule $IS = a / -\log(p)$. L'indice de stabilité permet de différencier les zones à paludisme stable de celles à paludisme instable. Pour une valeur supérieure à 2,5, on est en présence d'un paludisme stable. Entre 2,5 et 0,5, la situation est intermédiaire. Une valeur inférieure à 0,5 témoigne d'une instabilité dans la transmission palustre.

En plus de ces paramètres, la corrélation entre les paramètres climatiques et environnementaux et les densités des vecteurs a été étudiée. La biodiversité de la faune anophélienne a été étudiée à l'aide des indices écologiques suivants :

- richesse spécifique :

Elle correspond au nombre total d'espèces présentes dans un faciès ou site de collecte donné.

- indice de diversité de Shannon :

Il permet de quantifier le nombre d'espèces présentes ainsi que leurs abondances relatives. Il permet ainsi de mesurer l'hétérogénéité de la biodiversité d'une zone durant une période donnée. Les valeurs les plus élevées indiquent les biodiversités les plus élevées.

- indice de dominance de Simpson :

Il détermine la probabilité pour que deux individus pris au hasard dans un milieu puissent appartenir à la même espèce. Il est surtout utilisé dans les cas où les indices de Shannon sont égaux. Il prend en compte les espèces abondantes et minimise les espèces rares.

- similarité :

Elle permet d'étudier le degré de proximité de différents milieux écologiques par rapport aux espèces présentes ou absentes.

Pour l'étude de la sensibilité aux insecticides, le nombre de moustiques abattus a été relevé à 10, 15, 20, 30, 40, 50 et 60 mn d'exposition. Les temps de KD50 et KD95 (temps nécessaire pour que 50% et 95% des moustiques exposés soient abattus) ont été déterminés. Les taux de mortalité ont été mesurés 24h après exposition par la proportion en pourcentage du nombre de moustiques morts sur le nombre total testé.

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R (version 3.0.1).

CHAPITRE 3 : IMPACT DES TYPES D'OCCUPATION DES SOLS SUR LES PROFILS TROPHIQUES D'*AN. ARABIENSIS*

1. Problématique

Pour la plupart des maladies à transmission vectorielle, le comportement de piqûre est un facteur important dans l'épidémiologie des maladies transmises. La connaissance des habitudes alimentaires est une étape importante dans la mise en œuvre de stratégies de contrôle efficace (Tirados *et al.*, 2006). Dans le cas du paludisme, la fréquence des piqûres des vecteurs chez l'homme affecte la probabilité qu'un vecteur en contact avec un porteur de gamétocytes devienne infecté et capable de transmettre des *Plasmodium* humains. Cette probabilité est plus importante chez les vecteurs qui ne piquent exclusivement que l'homme. Elle reflète ainsi le degré de contact homme-vecteur qui peut être utilisé dans la mise en œuvre et l'évaluation de l'impact de mesures de contrôle (Garrett-Jones *et al.*, 1980).

Bien que le paludisme soit connu comme une maladie transmise entre hommes, les animaux domestiques peuvent avoir un rôle significatif dans l'épidémiologie de cette maladie à travers l'attraction ou la répulsion qu'ils peuvent exercer sur les vecteurs. C'est ainsi que dans la prévention de la transmission, les animaux domestiques qui vivent à proximité immédiate de l'homme peuvent attirer les vecteurs et réduire ainsi la transmission des *Plasmodium* (Muriu *et al.*, 2008). L'interaction entre l'homme et d'autres hôtes alternatifs peut être plus prononcée dans les zones à forte concentration de bétail particulièrement les zones pastorales. La présence du bétail à proximité des habitations humaines peut donner différents profils trophiques des vecteurs qui incluent des repas uniques sur homme ou animal ou des repas mixtes avec les deux (Massebo *et al.*, 2013). C'est le cas dans la principale zone pastorale du Sénégal où des études entomologiques ont montré des préférences trophiques hétérogènes des vecteurs du paludisme (Lemasson *et al.*, 1997). Dans cette zone, l'élevage est pratiqué de manière traditionnelle avec une dynamique saisonnière marquée par un pastoralisme nomadique lié à la disponibilité de l'eau et de pâturage. En fait, durant la saison sèche, le manque de pâturage et d'eau conduit à la concentration du bétail à proximité des sites possédant des forages et incite certains éleveurs à quitter la zone. En saison des pluies, ils reviennent dans la zone pastorale, ce qui augmente ainsi la taille du bétail (en plus d'autres éleveurs venant d'autres régions du Sénégal). Cette situation

associée aux conditions climatiques favorables aux vecteurs, augmente ainsi le risque d'émergence de maladies à transmission vectorielle comme la fièvre de la vallée du Rift ou West Nile qui sont endémiques dans la zone (Traoré-Lamizana *et al.*, 2001) mais affectent également la transmission du paludisme.

L'utilisation des animaux domestiques vivant à proximité des habitations humaines pour réduire le contact avec les vecteurs, a été suggérée comme une stratégie efficace pour éviter la transmission (Mahande *et al.*, 2007). Des études conduites au Kenya ont montré dans ce cadre que la proportion de vecteurs gorgés de sang humain était significativement plus faible dans les zones de fortes concentrations d'animaux domestiques (Ijumba *et al.*, 1990, Githeko *et al.*, 1994), alors que Seyoum *et al.*, (2002) ont montré que la présence du bétail dans les habitations tend à augmenter les fréquences de piqûres des vecteurs sur homme. Ainsi, le comportement de piqûre peut être largement influencé par les facteurs environnementaux ainsi que leurs caractéristiques innées (Tuno *et al.*, 2010).

Prenant en compte la distribution spatiale des villages selon les types d'occupation des sols, nous avons analysé dans cette partie, les profils trophiques des vecteurs dans la zone sylvo-pastorale du Ferlo où l'élevage est la principale activité humaine.

2. Résultats

2.1. Résultats globaux

Au total, 1886 repas sanguins provenant de femelles d'*An. gambiae* s.l. ont été analysés par ELISA (Tableau 2). La plupart de ces repas ont été pris sur un seul hôte (homme ou animal). La proportion de repas sanguins non identifiés a été estimée à 8,4% alors que 14,4% des repas ont été pris sur deux hôtes vertébrés différents. Tous les repas sanguins collectés des villages de sol nu ont été identifiés. Les proportions de repas non identifiés n'ont pas été statistiquement différentes entre les 3 autres types d'occupation des sols ($\chi^2=4,8$, ddl=2, p=0,09).

2.2. Préférences trophiques

Globalement, dans la zone d'étude, la majorité des repas sanguins ont été pris sur homme

(40,1%) et sur bœuf (16,1%). Les proportions de repas pris sur cheval, mouton et poule ont été estimées respectivement à 13,3%, 6,6% et 1,1% (Figure 12).

Tableau 2 : Repas sanguins des femelles d'*An. gambiae* s.l. suivant les 5 hôtes potentiels dans tous les villages étudiés

N°	Villages	Type d'occupation	Testés	Hôtes vertébrés										Mixtes	Négatifs
				Homme		Bœuf		Mouton		Poule		Cheval			
				Nb.	%	Nb.	%	Nb.	%	Nb.	%	Nb.	%		
1	Barkédji	Savane arborée	675	237	35,11	90	13,33	57	8,44	6	0,89	139	20,59	77	69
2	Keur Alpha	Savane arbustive	136	32	23,53	44	32,35	9	6,62	0	0	8	5,88	30	13
3	Keur Racine	Savane arborée	80	28	35,00	7	8,75	9	11,25	0	0	11	13,75	3	22
4	Dague Nabe	Savane arborée	134	79	58,96	4	2,99	9	6,72	0	0	10	7,46	20	12
5	Diabal	Savane arborée	141	88	62,41	3	2,13	6	4,26	0	0	24	17,02	13	7
6	Keur Dadal	Sol nu	17	11	64,71	2	11,76	1	5,88	0	0	1	5,88	2	0
7	Keur Adama Sow	Savane arbustive	21	13	61,90	3	14,29	0	0,00	0	0	4	19,05	1	0
8	Keur Aliou	Sol nu	16	5	31,25	5	31,25	0	0,00	0	0	3	18,75	3	0
9	Keur Gallo	Sol nu	20	14	70,00	3	15,00	0	0,00	0	0	1	5,00	2	0
10	Keur Adama	Savane arborée	26	8	30,77	2	7,69	8	30,77	0	0	3	11,54	3	2
11	Keur Bandji	Steppe	26	15	57,69	0	0,00	0	0,00	0	0	6	23,08	3	2
12	Keur Demba	Savane arbustive	25	12	48,00	0	0,00	2	8,00	1	4	0	0,00	9	1
13	Keur Diallo	Steppe	99	68	68,69	4	4,04	1	1,01	0	0	8	8,08	14	4
14	Niakha	Savane arborée	120	43	35,83	33	27,50	8	6,67	8	6,67	0	0,00	7	21
15	Niakha Ndiaybe	Savane arborée	308	77	25,00	104	33,77	9	2,92	5	1,62	29	9,42	79	5
16	Wouro Samba Kibel	Savane arbustive	42	26	61,90	0	0,00	5	11,90	0	0	4	9,52	7	0

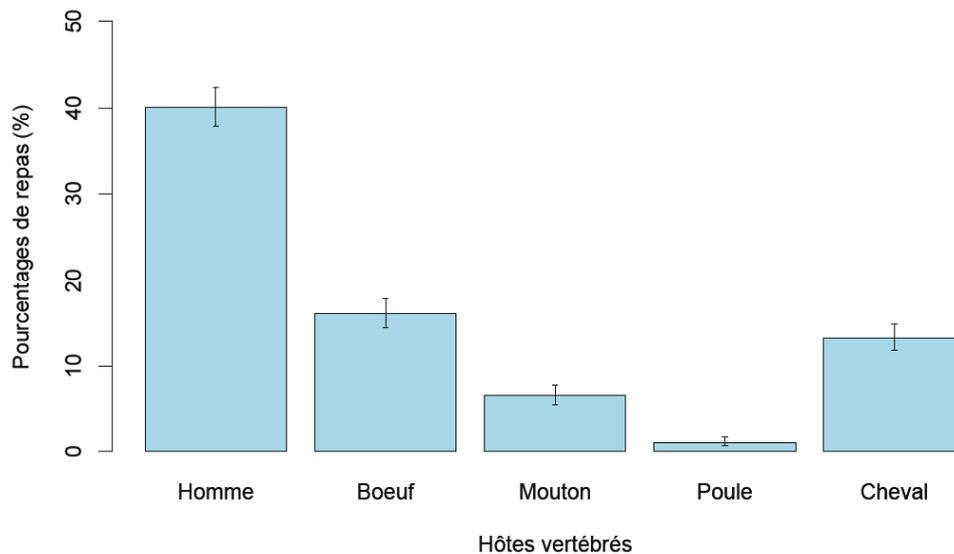


Figure 12 : Variations globales des proportions de repas pris sur chacun des 5 hôtes vertébrés testés (les barres indiquent l'intervalle de confiance à 95%)

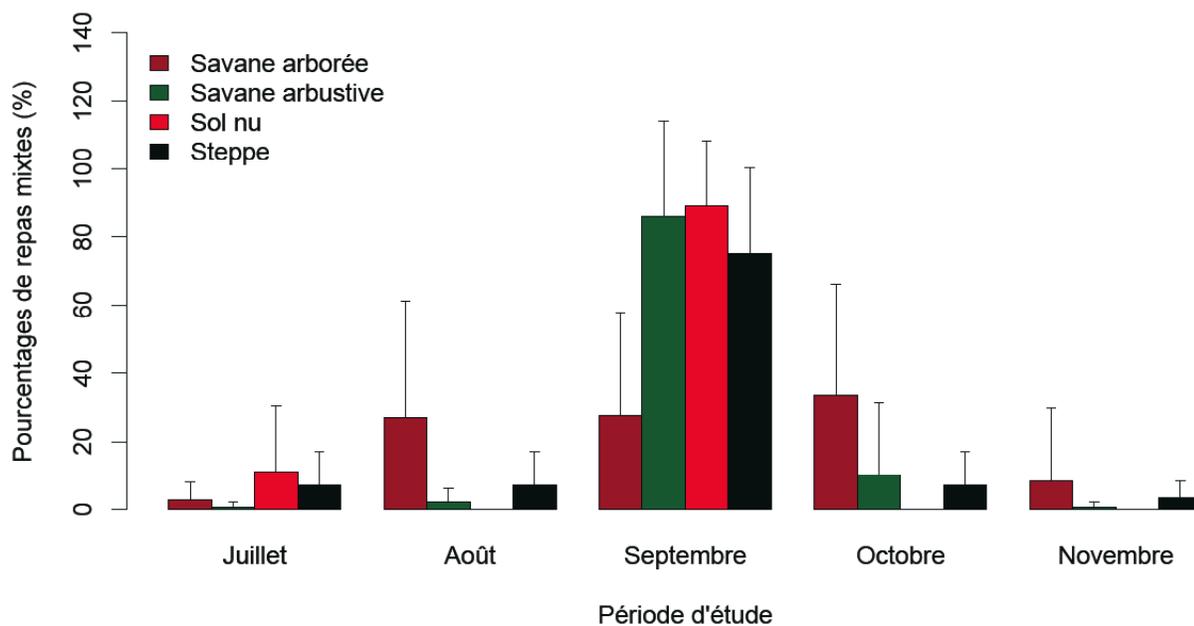


Figure 13 : Variations temporelles des proportions de repas mixtes (homme-animal) dans chacun des 4 types d'occupation des sols

Aucune différence significative n'a été observée entre le nombre de repas mixtes sur homme-animal entre les 4 types d'occupation des sols pour chacun des 5 mois d'étude ($F= 0,71$,

$p = 0,6$ pour juillet, $F=2,2$, $p=0,1$ pour août, $F=3,4$, $p=0,8$ pour septembre, $F=0,9$, $p=0,5$ pour octobre, $F=0,7$, $p=0,6$ pour novembre ; Figure 13). Du point de vue spatiale, dans presque tous les villages, les repas sanguins pris sur homme ont été prédominants. La distribution des repas pris sur bovin a été hétérogène et semble être constitué de deux clusters localisés respectivement autour des mares de Kangalédji et Niakha (Figure 14). Les proportions de repas pris sur mouton ont été relativement faibles (entre 1 et 31%). Les repas de ce type ont été observés dans 12 des 16 villages (Figure 10). Les repas pris sur poule ont été observés seulement dans deux villages de savane arborée (Barkédji et Niakha) alors que les repas pris sur cheval ont été observés dans presque tous les villages (exceptés dans deux villages de savane arborée et 2 villages de savane arbustive).

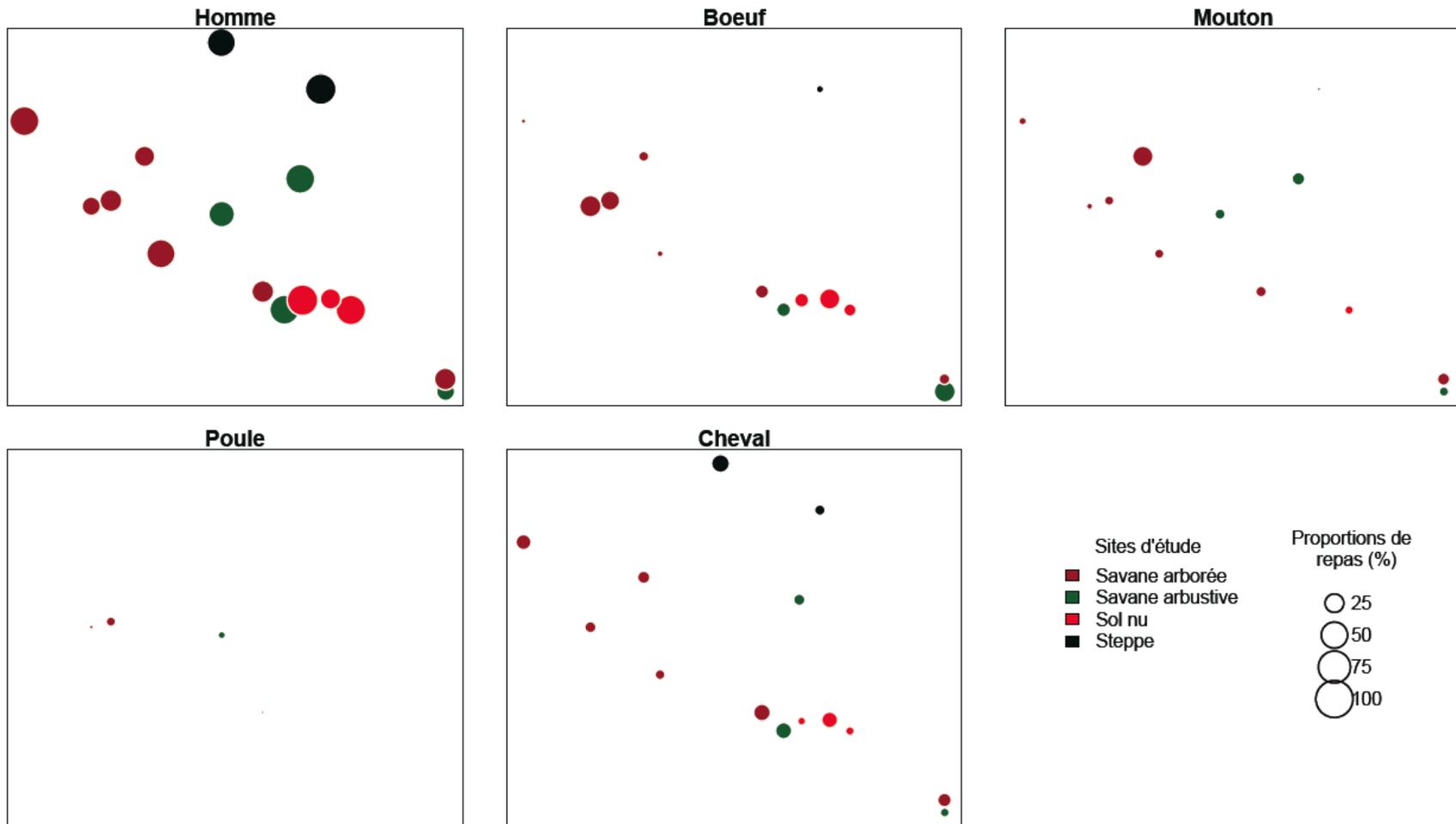


Figure 14 : Variations spatiales des proportions de repas sanguins pris sur chacun des 5 hôtes vertébrés testés

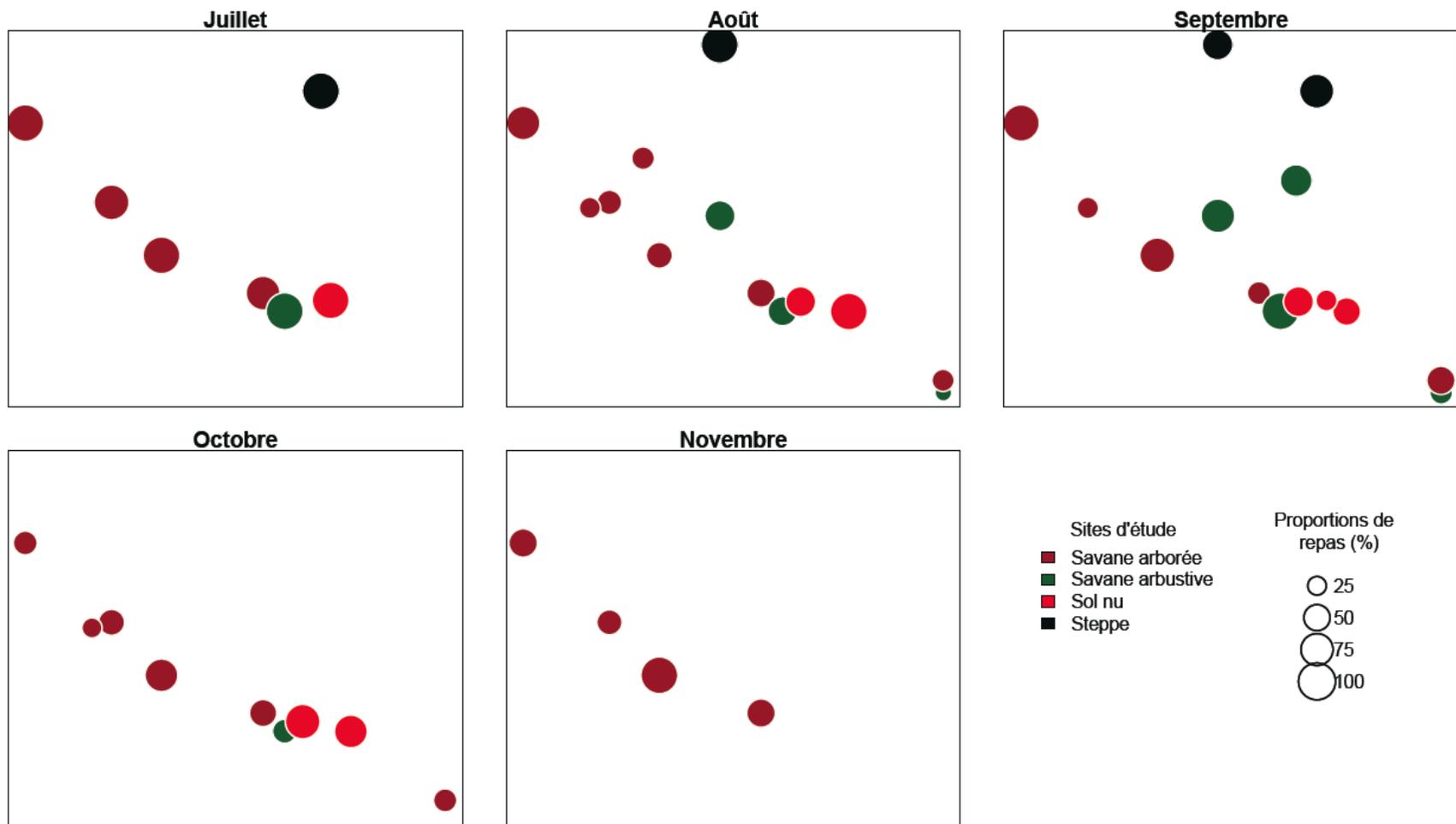


Figure 15 : Variations temporelles des proportions de repas sanguins pris sur homme

2.3. Taux d'anthropophilie

Les proportions de repas pris sur homme ont été estimées entre 25-62,4%, 23,5-61,9%, 31,3-70% and 57,7-68,7% respectivement dans les villages de savane arborée, savane arbustive, sol nu et steppe. Ces proportions ont été statistiquement différentes entre villages de savane arborée ($\chi^2= 86,4$, ddl=6, $p< 0,0001$) et villages de savane arbustive ($\chi^2= 28,6$, ddl=3, $p<0,0001$) mais ni entre villages de sol nu ($\chi^2= 6,1$, ddl=3, $p=0,11$) ni entre villages de steppe ($\chi^2= 0,7$, ddl=1, $p=0,41$).

Les taux d'anthropophilie ont été très hétérogènes en juillet au début de la saison des pluies (Figure 15). Les taux les plus élevés (entre 90 et 100%) ont été observés seulement dans 8 villages (4 villages de savane arborée, 2 de savane arbustive, 1 de sol nu et 1 de steppe). C'est essentiellement durant la saison des pluies (août et septembre) que les repas pris sur homme ont été observés dans toute la zone d'étude. Les taux d'anthropophilie ont été plus élevés en septembre (entre 33,3 et 83,3%) qu'en août (entre 34,1 et 97,8%) dans les villages de savane arborée, entre 20 et 66,7% en août et 37,3 et 100% en septembre dans les villages de savane arbustive. Pour les autres villages (steppe et sol nu), les différences ont été moins marquées, mais les repas pris sur homme ont été plus uniformément distribués en septembre (Figure 15). En fin de saison des pluies, les taux d'anthropophilie ont été faibles dans les villages de savane arbustive et de sol nu alors qu'aucun repas pris sur homme n'a été observé dans les villages de steppe en novembre. Dans les villages de savane arborée, les taux d'anthropophilie ont connu une augmentation en octobre (entre 30 et 79,3%) et novembre (entre 46,6 et 100%).

3. Discussion

L'évaluation des préférences trophiques des vecteurs est difficile dans les conditions naturelles et dépend des méthodes de collecte des vecteurs (Garrett-Jones, 1964). A côté des vecteurs avec un comportement trophique spécifique, il existe d'autres vecteurs dont les comportements alimentaires dépendent largement de la présence et de l'accessibilité d'hôtes alternatifs (Lyimo et Ferguson, 2009). Ainsi, pour éviter ou minimiser les possibles biais liés aux méthodes de collecte, et de pouvoir comparer les comportements alimentaires des vecteurs entre villages et type d'occupation des sols, les femelles gorgées ont été collectées dans les habitations humaines et loin des parcs à animaux et autres abris des animaux domestiques.

Les résultats obtenus au cours de cette étude ont montré que les repas simples sur homme ou animal ont été prédominants en comparaison des repas mixtes. Dans chacun des 4 types d'occupation des sols, les repas pris sur homme ont été plus fréquemment observés. Ces proportions sont cependant probablement sous-estimées puisque la méthode ELISA utilisée est incapable de détecter des repas cryptiques multiples sur homme alors que l'inclusion de ces fréquences peuvent contribuer à une meilleure estimation du taux d'inoculation entomologique (Norris *et al.*, 2010, Scott et Takken, 2012). D'un autre côté, la prise de repas simples sur animal pourrait constituer une barrière à la transmission (Bruce-Chwatt *et al.*, 1966). Pour cette raison, plusieurs communautés ont utilisé le bétail près ou à l'intérieur des habitations humaines pour orienter les vecteurs des humains aux animaux (Burkot *et al.*, 1988).

Sur un autre plan, presque tous les repas mixtes ont été pris sur homme et animal avec des proportions allant jusqu'à 36% dans un village de savane arbustive (Keur Demba). Ceci peut contribuer à une réduction de la transmission à travers une perte de *Plasmodium*. En fait, Muriu *et al.*, (2008) ont suggéré qu'au cours d'un repas d'un moustique infectant sur un hôte non humain, une perte d'un certain nombre de sporozoïtes est attendue et pourrait être d'une importance particulière pour le contrôle du paludisme. Un tel phénomène serait plus marqué dans les villages de savane arbustive où les proportions de repas mixtes les plus élevées ont été observées. Cette situation pourrait indiquer également que les troupeaux mixtes sont rares dans la zone ou que le bétail vit à proximité immédiate de l'homme dans la zone.

Globalement, les proportions les plus élevées de ces repas mixtes ont été observées en septembre dans les villages de savane arbustive, de sol nu et de steppe et en octobre dans les villages de savane arbustive. Cette période correspond dans la zone à la période de densités maximales des vecteurs (Lemasson *et al.*, 1997, Ba *et al.*, 2006). Cette observation pourrait être le résultat de réactions de défense des vertébrés comme l'ont suggéré Boreham et Garrett-Jones (1973). Ainsi, plusieurs repas sont nécessaires durant le même cycle gonotrophique pour réaliser une réplétion complète.

Selon les villages, la plupart des repas simples ont été pris sur homme, cheval et à un degré moindre sur mouton. Des études précédentes sur les préférences trophiques dans le village de Barkédji ont montré une prédominance de repas pris sur homme et bœuf (Lemasson *et al.*, 1997). Bien que moins largement distribués, les repas pris sur bœuf ont été relativement

importants et associés aux villages de sol nu (partie sud-ouest de la zone d'étude) et deux villages de savane arborée (Niakha et Niakha Ndiaybe situés dans la partie nord-ouest de la zone d'étude). En fait, les zones de sol nu représentent les lieux de prédilection où le bétail est parqué y compris les grands ruminants (autour de la mare de Kangalédji). Les deux villages de savane arborée (Niakha et Niakha Ndiaybe) sont situés près de la plus grande mare de la zone (mare de Niakha), qui constitue la principale source d'eau pour l'homme et le bétail. Il est ainsi attendu que les moustiques qui prennent leurs repas sanguins sur ces animaux se retrouvent au repos dans ces deux villages.

La plus grande distribution des repas pris sur homme et mouton peut être expliquée par la disponibilité de ces hôtes quelque soit le village ou le type d'occupation considérés. En effet, dans la majorité des concessions des villages de savane arborée, les petits ruminants, particulièrement moutons et chèvres sont gardés à l'intérieur des concessions. Les faibles proportions de repas pris sur poule sont le résultat de la rareté de cet hôte ou une attractivité réduite sur les vecteurs comme ce qui a été déjà observé dans la zone (Lemasson *et al.*, 1997) ou ailleurs au Sénégal (Konaté *et al.*, 1999).

Nos données montrent une large distribution des repas pris sur homme durant les mois d'août et septembre dans la zone d'étude. Durant cette période, l'eau et le pâturage sont disponibles pour le bétail. Ainsi, la plupart des troupeaux est gardée loin des concessions, ce qui réduit ainsi le contact avec l'homme et la possibilité de prise de repas sur le bétail. En octobre et novembre, la distribution des repas pris sur homme est restreinte aux villages situés le long de l'axe Nord-Ouest Sud-Est qui correspond à la distribution des principales mares temporaires de la zone à cette période. Ces observations suggèrent ainsi que les différences observées sont dues à la localisation spécifique des villages et ne sont pas ou sont peu influencées par des types d'occupation des sols. De plus, la présence de larges surfaces herbeuses autour des villages de steppe, sol nu et savane arbustive permet de garder le bétail loin de l'environnement humain, alors que dans les villages de savane arborée, le bétail est habituellement maintenu à proximité des habitations.

Cette étude a ainsi permis de démontrer que dans cette zone pastorale, les vecteurs du paludisme montrent des préférences trophiques hétérogènes liées à la localisation spécifique des villages et semblent peu ou pas influencées par la distribution des types d'occupation des sols. Elle a également révélé que les variations temporelles des taux d'anthropophilie sont

influencées par la présence des surfaces en eau (mares temporaires) dans la zone. Ainsi, toute stratégie visant à contrôler les vecteurs dans cette zone devrait prendre en compte cette hétérogénéité dans le choix et la mise en œuvre de mesures de contrôle efficaces.

CHAPITRE 4 : INFLUENCE DES TYPES D'OCCUPATION DES SOLS ET DES FACTEURS CLIMATIQUES SUR LES DENSITES ET LES TAUX D'INFECTION PLASMODIALE D'*AN. ARABIENSIS*

1. Introduction

De nombreuses maladies à transmission vectorielle sévissent dans les zones tropicales et sub-tropicales où les conditions environnementales et climatiques sont propices à leur développement (Githeko *et al.*, 2000). Les impacts des changements climatiques récemment observés à travers le monde sur ces maladies ne sont pas encore bien établis. Plusieurs études suggèrent cependant que les changements climatiques pourrait conduire à une réémergence des maladies à transmission vectorielle comme le paludisme (Bouma *et al.*, 1994 ; Colwell *et al.*, 1998) et, il est bien connu que la transmission du paludisme et son incidence pourraient être fortement influencées par les changements spatiaux et temporels de l'environnement (Rogers *et al.*, 2002). Ceci est particulièrement important dans les zones non-endémiques caractérisées par de faibles niveaux de transmission et une forte variabilité des paramètres environnementaux et climatiques, où un retour ou une émergence de paludisme sont attendus. En guise d'exemple, des études récentes conduites au Kenya ont suggéré une augmentation des épidémies dues au paludisme qui ont été attribuées à des changements dans les types d'occupation des sols (Lindblade *et al.*, 2000 ; Patz *et al.*, 2000). Des observations similaires sont attendues dans le Sahel (bordure sud du désert du Sahara) caractérisé par des particularités écologiques incluant une variabilité inter-annuelle de la pluviométrie (Lebel *et al.*, 2003). Les populations humaines de cette zone sont principalement des paysans éleveurs dont les ressources dépendent principalement des pluies pour l'agriculture et l'élevage du bétail. Sur un autre point, la disponibilité d'eau et de pâturage détermine les peuplements et déplacements des populations avec un impact direct sur les types d'occupation des sols.

Bien que l'impact des types d'occupation des sols ou des pratiques agricoles sur la présence des vecteurs et leur distribution à l'échelle macro-géographique ait été étudié dans plusieurs contexte (Ijumba *et al.*, 2002 ; Keiser *et al.*, 2005), les données à l'échelle micro-géographique sont rares. Des observations récentes indiquent que des différences à une échelle réduite peuvent avoir d'importantes conséquences sur le paludisme et son épidémiologie (Mwangangi *et al.*, 2010 ; Jacob *et al.*, 2007). Krefis *et al.*, (2011) ont montré un lien direct entre l'augmentation ou la diminution du risque associé au paludisme en relation avec les types d'occupation des sols. Chez les vecteurs du paludisme, très peu

d'études ont été conduites sur la corrélation entre les paramètres environnementaux comme les types d'occupation des sols sur les populations imaginaires contrairement aux stades aquatiques (Minakawa *et al.*, 2004, 2005). Cependant, comme l'abondance des populations imaginaires est positivement associée à la disponibilité d'habitats propices au développement des populations pré-imaginaires (Fillinger *et al.*, 2004 ; Shililu *et al.*, 2007), des résultats obtenus sur l'impact des facteurs environnementaux sur les populations pré-imaginaires sont souvent extrapolés pour l'estimation des densités des populations imaginaires.

La présente étude a été ainsi entreprise à la suite de l'étude des préférences trophiques, pour examiner l'influence des différents types d'occupation des sols sur l'abondance des vecteurs du paludisme et leurs taux d'infection dans des sites retenus dans la zone d'étude. Ces informations sont importantes pour la compréhension de l'influence des déterminants environnementaux (types d'occupation des sols) et climatiques (température, humidité et pluviométrie) à une échelle micro-géographique afin de mieux apprécier la pression vectorielle mais également la gestion des risques et la mise en œuvre de stratégies de contrôle adaptées.

2. Résultats

2.1. Faune anophélienne

Au cours de cette étude, 7652 anophèles appartenant à 6 espèces ont été collectées par la méthode de collecte au repos dans les habitations humaines dans les différents types d'occupation des sols (Tableau 3). *An. gambiae* s.l. a été l'espèce prédominante dans tous les types d'occupation des sols, *An. rufipes* a été également collecté dans tous les types d'occupation des sols mais a été plus abondant dans les villages de savane arborée et de savane arbustive. *An. funestus*, *An. pharoensis* et *An. domicola* ont été collectés seulement dans les villages de savane arborée alors que *An. welcomei* a été rare et observé uniquement dans les villages de sol nu.

Tableau 3 : Nombre et abondance (%) des espèces anophéliennes collectées dans chaque type d'occupation des sols

Types d'occupation des sols/Villages	<i>An. funestus</i>		<i>An. gambiae</i>		<i>An. pharoensis</i>		<i>An. rufipes</i>		<i>An. welcomei</i>		<i>An. domicola</i>	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
Savane arborée												
Barkedji	4	0,10	3670	90,82	5	0,12	362	8,96	0	0,00	0	0,00
Dague Nabe	1	0,24	404	95,28	0	0,00	18	4,25	0	0,00	1	0,24
Diabal	1	0,13	681	91,53	0	0,00	62	8,33	0	0,00	0	0,00
Keur Bathiel	0	0,00	42	85,71	0	0,00	7	14,29	0	0,00	0	0,00
Niakha	1	0,12	717	82,99	1	0,12	145	16,78	0	0,00	0	0,00
Niakha Ndiaybe	1	0,14	602	83,15	0	0,00	121	16,71	0	0,00	0	0,00
Savane arbustive												
Keur Alpha	0	0,00	139	96,53	0	0,00	5	3,47	0	0,00	0	0,00
Wouro Thilli	0	0,00	28	90,32	0	0,00	3	9,68	0	0,00	0	0,00
Sol nu												
Keur Dadal	0	0,00	231	94,67	0	0,00	13	5,33	0	0,00	0	0,00
Keur Aliou	0	0,00	55	93,22	0	0,00	4	6,78	0	0,00	0	0,00
Keur Gallo	0	0,00	85	93,41	0	0,00	5	5,49	1	1,10	0	0,00
Steppe												
Keur Bandji	0	0,00	142	98,61	0	0,00	2	1,39	0	0,00	0	0,00
Keur Daha	0	0,00	46	97,87	0	0,00	1	2,13	0	0,00	0	0,00
Keur Diallo	0	0,00	44	95,65	0	0,00	2	4,35	0	0,00	0	0,00
Total	8	0,10	6886	89,99	6	0,08	750	9,80	1	0,01	1	0,01

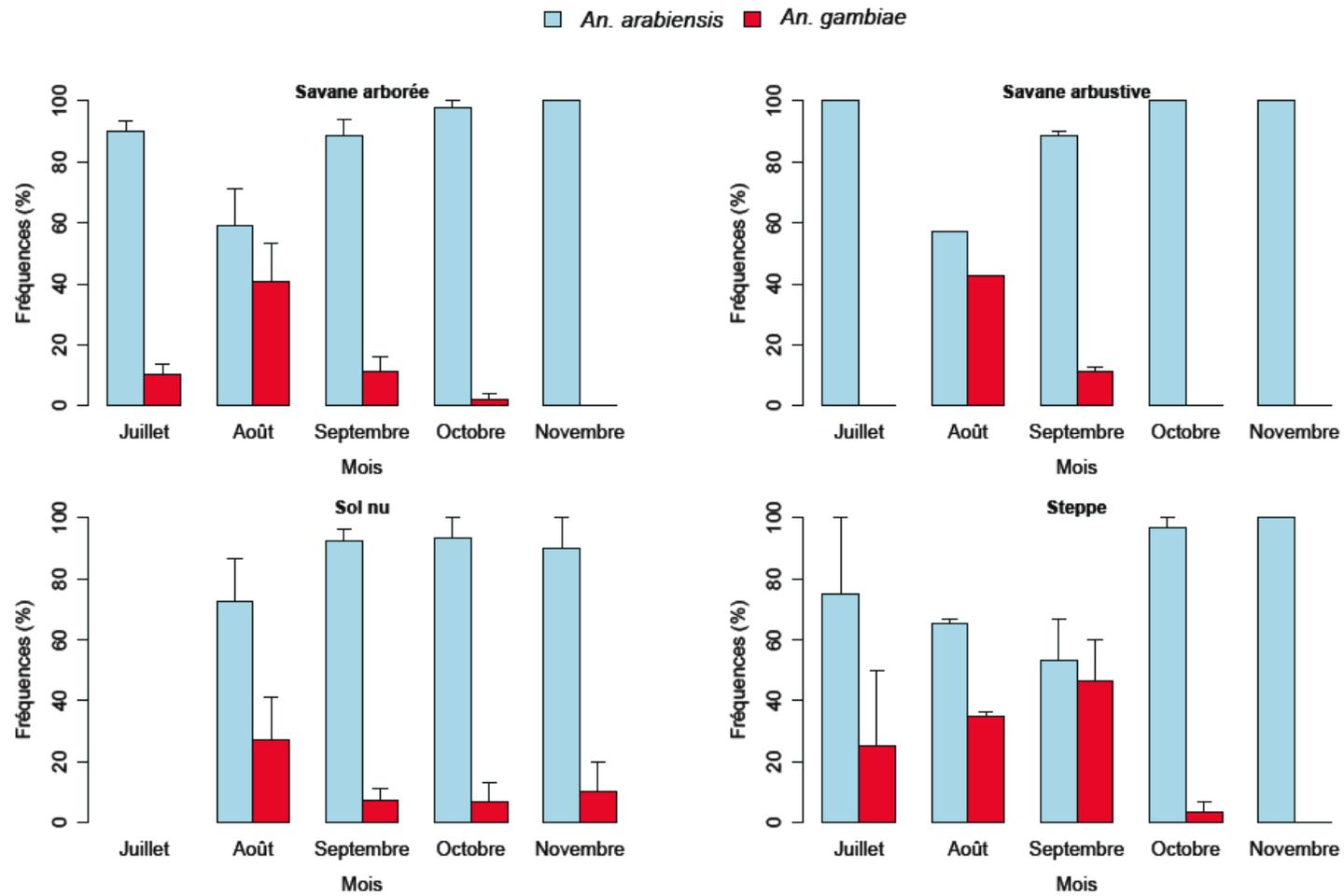


Figure 16 : Variations des fréquences d'*An. arabiensis* et d'*An. gambiae* dans chacun des types d'occupation des sols

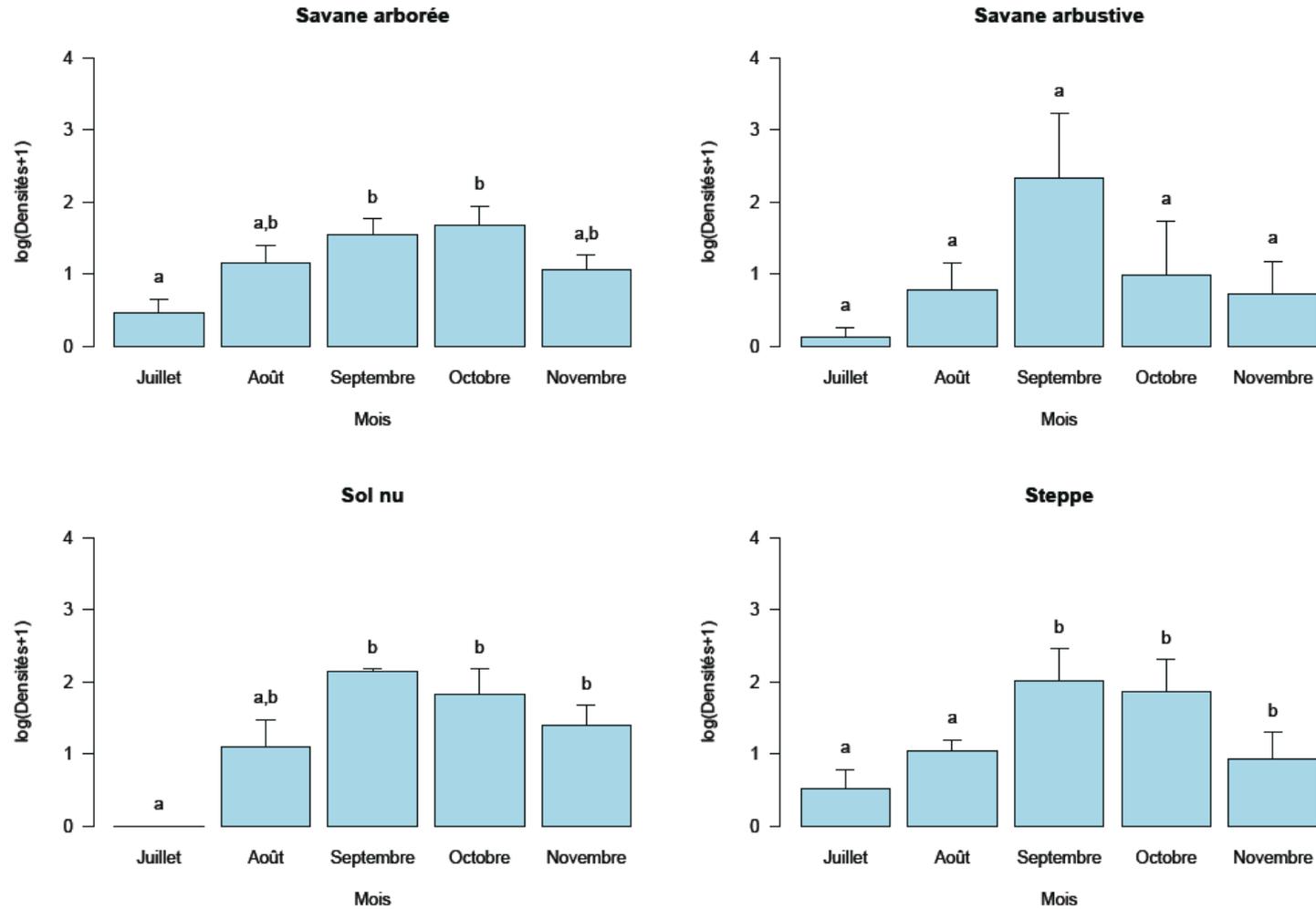


Figure 17 : Variations temporaires de la densité moyenne d'*An. arabiensis* dans les quatre types de sol

2.2. Profil de distribution des espèces du complexe *An. gambiae*

Globalement, 863 spécimens appartenant au complexe *An. gambiae* ont été identifiés par PCR. Seuls *An. arabiensis* et *An. coluzzii* ont été trouvés présents dans la zone d'étude. *An. arabiensis* étant l'espèce prédominante car constituant 81,8% (706/863) des spécimens identifiés. Aucune différence statistiquement significative n'a été observée entre les proportions d'*An. arabiensis* entre les 4 types d'occupation des sols ($\chi^2=4,45$, ddl=3, p=0,22). Les proportions relatives des deux espèces ont varié en fonction des types d'occupation des sols et des mois de collecte.

An. arabiensis a été l'espèce prédominante dans les villages de savane arborée et de savane arbustive quelque soit le mois de collecte. De plus, elle a été la seule espèce collectée à la fin de la saison des pluies en novembre (Tableau 4 et Figure 16). L'espèce *An. coluzzii* a été absente ou a présenté de faibles proportions au début de la saison des pluies en juillet (Figure 16). Ses fréquences ont ensuite augmenté graduellement atteignant des maxima en août ou septembre avant de connaître une diminution régulière. Dans les villages de savane arbustive, *An. coluzzi* a été collecté seulement en août et septembre avec les fréquences respectives de 42,9% et 11,1% (Tableau 4 et Figure 16).

Tableau 4 : Variations mensuelles des fréquences d'*An. arabiensis* (\pm se) dans chacun des 4 types d'occupation des sols

Types d'occupation des sols	Période d'étude				
	juillet	août	septembre	octobre	novembre
Savane arborée	89,9 \pm 3,4 ^b	59 \pm 12,1 ^a	88,8 \pm 5,1 ^b	98 \pm 2 ^b	100 ^b
Savane arbustive	100 ^{b,c}	57,1 ^a	88,7 \pm 1,3 ^b	100 ^{b,c}	100 ^c
Sol nu	-	72,7 \pm 13,8 ^a	92,5 \pm 3,8 ^a	93,3 \pm 6,7 ^a	90 \pm 10 ^a
Steppe	75 \pm 25 ^{a,b}	65,3 \pm 1,4 ^{a,b}	53,3 \pm 13,3 ^a	96,7 \pm 3,3 ^{a,b}	100 ^b

Pour les différents types d'occupation des sols, les moyennes avec des lettres différentes sont significativement différentes (p<0,05), Les comparaisons ont été faites entre les mois de collecte pour chaque type d'occupation des sols

Dans les villages de sol nu et de steppe, les deux espèces ont été collectées presque durant toute la période de collecte (4 mois durant les 5 mois de collecte). Les fréquences les plus faibles d'*An. arabiensis* ont été observées en août et septembre respectivement (Tableau 4 et Figure 16).

2.3. Variations saisonnières des densités d'*An. arabiensis*

Globalement, 2695 chambres à coucher ont été visitées durant les séances d'échantillonnage, permettant la collecte de 6886 anophèles. Le nombre moyen de spécimens par chambre (SPC) a été estimé à 3,5. Les moyennes pour les villages situés dans les différents types d'occupation des sols ont été $3 \pm 0,45$, $3,79 \pm 2,32$, $3,87 \pm 0,84$ et $3,94 \pm 1,25$ respectivement pour la savane arborée, savane arbustive, sol nu et steppe. Ces densités moyennes ont été statistiquement comparables ($F=0,26$, $p=0,85$). Cependant, des différences statistiquement significatives ont été observées entre les moyennes mensuelles dans les villages de savane arborée et de sol nu (Figure 17). Globalement, les densités moyennes ont été faibles au début de la saison des pluies avec un maximum de 1SPC dans tous les types d'occupation des sols. Elles ont ensuite augmenté légèrement atteignant un pic en septembre pour les villages de savane arbustive, sol nu et steppe alors que pour les villages de savane arborée, le pic a été observé en octobre (Figure 17).

2.4. Influence des paramètres climatiques sur des densités d'*An. arabiensis*

Cette influence a été étudiée dans 4 villages représentatifs de chacun des 4 types d'occupation des sols : Barkédji (savane arborée), Keur Alpha (savane arbustive), Keur Aliou (sol nu) et Keur Diallo (steppe). Entre ces différents villages, la température moyenne et l'humidité relative moyenne ont connu des variations similaires alors que la pluviométrie a été hétérogène en termes de profils, fréquences et volumes. La pluviométrie a été maximale en septembre dans le village de Barkédji alors que dans les trois autres villages, le pic a été observé en août (Figure 18). Le nombre de SPC le plus élevé a été observé très tôt après le pic pluviométrique soit en octobre ou septembre à Barkédji ou en août et septembre pour les trois autres villages. Une corrélation positive non significative a été observée avec la pluviométrie ($r=0,09$, $p=0,71$) et l'humidité ($r=0,25$, $p=0,29$) alors qu'une corrélation négative a été observée avec la température ($r=-0,09$, $p=0,68$) (Figure 19).

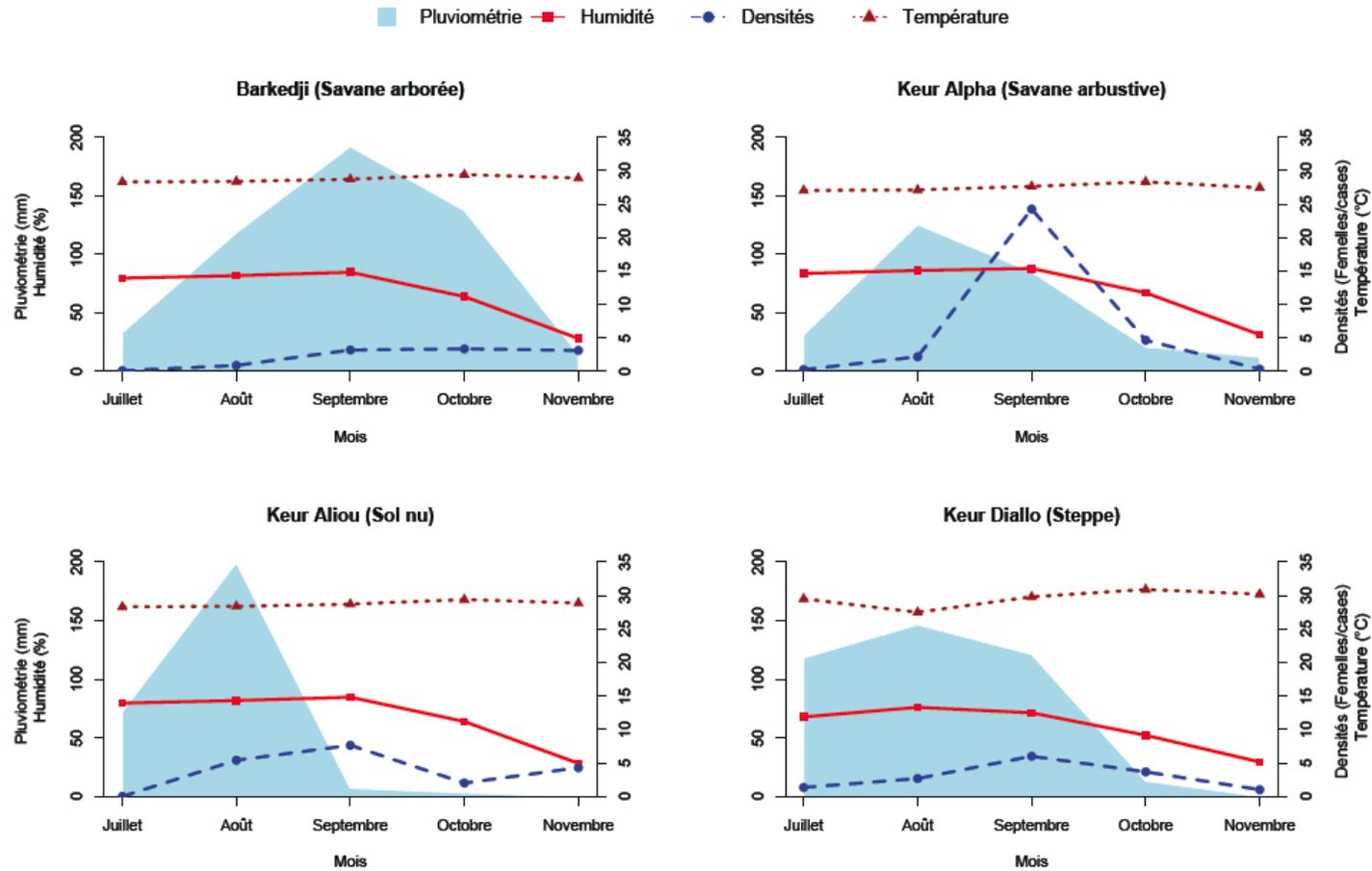


Figure 18 : Variations des densités d'*An. arabiensis* en fonction de la pluviométrie, la température et l'humidité relative dans les différents types d'occupation des sols

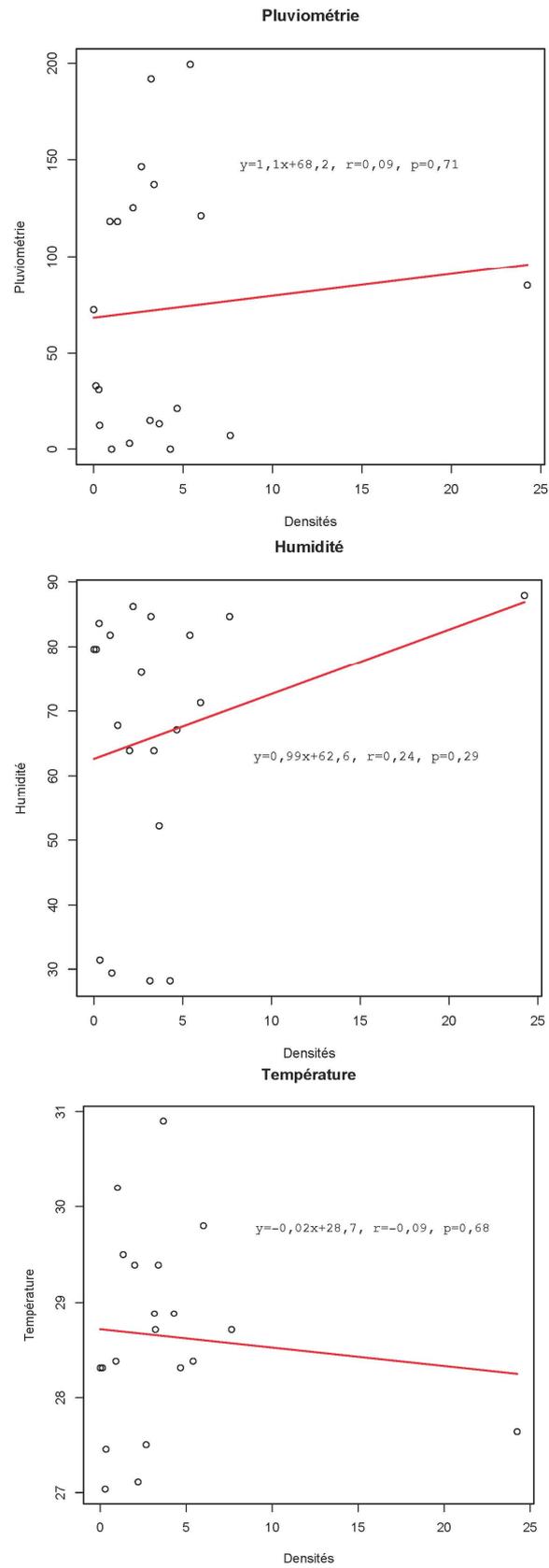


Figure 19 : Corrélation entre les densités d'*An. arabiensis* et les facteurs climatiques

2.5. Taux d'infection plasmodiale

Les têtes et thorax de 3768 *An. gambiae* s.l. ont été testés en ELISA pour la recherche de l'antigène CSP de *P. falciparum* (Tableau 5). Aucun spécimen n'a été trouvé porteur de l'antigène CSP dans les villages de savane arbustive et de steppe. Globalement, 11 femelles ont été positives dont 10 dans les villages de savane arborée (6 à Barkédji en août, 2 à Niakha en septembre et 2 à Niakha Ndiaybe en septembre) et 1 dans un village de sol nu (Keur Aliou en août), Les taux d'infection moyens ont été estimés à 0,34% en savane arborée et 0,37% en sol nu. Aucune différence statistiquement significative n'a été observée entre les 4 types d'occupation des sols ($\chi^2=0,84$, ddl=4, p=0,84). Un résultat similaire a été observé entre les villages de savane arborée ($\chi^2=2,49$, ddl=5, p=0,78) alors que les taux d'infection ont été statistiquement significatifs entre les villages de sol nu ($\chi^2=13,94$, ddl=2, p<0,001).

Tableau 5 : Taux d'infection moyens d'*An. arabiensis* dans les différents villages

Villages	Négatifs	Positifs	Total	ICSP (IC 95%)	OR (IC 95%)	p
Savane arborée						
Barkedji	1705	6	1711	0,35 (0,16-0,76)	1	
Dague Nabe	227	0	227	0	-	0,37
Diabal	301	0	301	0	-	0,30
Keur Bathiel	29	0	29	0	-	0,75
Niakha	606	2	608	0,33 (0,09-1,19)	1,07 (0,21-5,30)	0,94
Niakha Ndiaybe	367	2	369	0,54 (0,15-1,95)	0,64 (0,13-3,21)	0,59
Savane arbustive						
Keur Alpha	110	0	110	0	-	-
Wouro Thilli	18	0	18	0	-	-
Sol nu						
Keur Dadal	195	0	195	0	1	
Keur Aliou	17	1	18	5,55 (0,9-25,76)	-	0,001
Keur Gallo	55	0	55	0	-	-
Steppe						
Keur Bandji	80	0	80	0	-	-
Keur Daha	17	0	17	0	-	-
Keur Diallo	30	0	30	0	-	-

IC= intervalle de confiance, ICSP=indice circumsporozoïtique

3. Discussion

Toutes les espèces anophéliennes collectées durant cette étude ont été déjà décrites dans la zone (Traoré-Lamizana *et al.*, 2001). Cependant, la liste n'est pas exhaustive puisque d'autres espèces connues dans la zone n'ont pas été collectées même si l'étude a été faite de façon longitudinale. Ceci pourrait s'expliquer par la méthode de collecte qui ne cible que les espèces endophiles associées à l'environnement humain.

An. arabiensis a été l'espèce la plus commune durant cette étude, *An. pharoensis* et *An. funestus*, connus comme vecteurs du paludisme au Sénégal, ont été également présents mais à des fréquences faibles. *An. pharoensis* a été déjà décrite dans la zone (Traoré-Lamizana *et al.*, 1994) alors que *An. funestus* n'a jamais été observé durant les précédentes études entomologiques sur les vecteurs du paludisme dans la zone (Lemasson *et al.*, 1997 ; Dia *et al.*, 2005). La présence d'*An. funestus* dans cette partie du territoire sénégalais, confirme le retour de cette espèce dans le bassin du fleuve Sénégal qui a été décrit durant une étude récente (Dia *et al.*, 2008). Cette espèce a été décrite dans le bassin du fleuve Sénégal dans les années 70, mais a par la suite disparu suite aux sécheresses récurrentes puis a réapparu dans les années 2000 dans la basse vallée du fleuve Sénégal (Konaté *et al.*, 2001). Sa présence dans notre zone d'étude, étend ainsi l'aire recolonisée vers le Ferlo. Ceci est probablement dû à la restauration et la présence de gîtes aquatiques favorables qui sont constitués par des habitats permanents ou semi-permanents avec une végétation flottante ou émergente. Notre zone d'étude regorge de gîtes de cette nature qui sont constitués par les mares temporaires qui sont couvertes de végétation le plus souvent du milieu à la fin de la saison des pluies (Lacaux *et al.*, 2007).

La présence d'*An. funestus* n'a été limitée que dans les villages de savane arborée à des fréquences faibles (0,01%). Ainsi, son implication dans la transmission du paludisme serait faible ou inexistante. Comme *An. arabiensis*, *An. rufipes* a été observé dans tous les types d'occupation des sols. Du fait des proportions relativement élevées d'*An. rufipes*, l'implication de cette espèce dans la transmission nécessite des études spécifiques puisqu'une étude récente réalisée au Burkina Faso a démontré son implication dans la transmission de *Plasmodium* humains (Da *et al.*, 2013).

Les variations observées dans les proportions relatives des espèces du complexe *An. gambiae* dans les 4 types d'occupation des sols, pourraient exprimer des caractéristiques adaptatives différentes de ces espèces. *An. arabiensis* a été l'espèce prédominante dans toute la zone d'étude. Cette observation est en accord avec la distribution de cette espèce qui est plus fréquente dans les zones de savane sèches ou humides (Coetzee *et al.*, 2000). Cependant, il est à noter que les proportions les plus élevées de cette espèce ont été observées durant les périodes les plus sèches notamment en juillet et en novembre.

Malgré les densités moyennes comparables observées dans les 4 types d'occupation des sols, des variations significatives n'ont été observées entre les différents mois de collecte que dans les villages de savane arborée et de sol nu. La transmission du paludisme pourrait être ainsi plus élevée dans ces villages en septembre et octobre puisque les densités les plus élevées ainsi que les moustiques infectés par *P. falciparum* ont été observés durant ces deux mois. Des indications supplémentaires sont fournies par les résultats obtenus au cours de l'étude de l'influence des types d'occupation sur les profils trophiques (Chapitre 3) qui a montré que c'est principalement durant la saison des pluies que les repas sanguins pris sur homme sont plus fréquents et largement distribués dans la zone. Les taux d'anthropophilie étaient plus élevés en septembre dans les villages de savane arborée alors que dans les villages de sol nu, les différences ont été moins marquées mais les repas sanguins pris sur homme ont été uniformément distribués en septembre. Les résultats de Lemasson *et al.*, (1997) sont également en faveur de la transmission maximale durant cette période puisqu'ils ont montré durant deux années successives, un pic de transmission à la fin du mois de septembre ou en octobre. Dans les villages de savane arbustive et de steppe, l'absence d'infection plasmodiale chez les vecteurs mais également l'homogénéité des variations saisonnières des densités pourrait conduire à une faible transmission en comparaison aux villages de savane arborée et de sol nu. Cependant, du fait du faible nombre de villages investigués, ces résultats devraient être confirmés par des études longitudinales plus intensives.

L'étude de l'influence des paramètres climatiques sur les densités vectorielles a montré une corrélation positive non significative de la pluviométrie dans les 4 types d'occupation des sols. Cette observation est similaire à celle de Bi *et al.*, (2003). En fait, les stades aquatiques d'*An.*

arabiensis se développent dans de petits habitats temporaires ouverts ensoleillés (Gimnig *et al.*, 2001). Dans notre zone d'étude, ces types d'habitats sont prédominants et dépendent des pluies comme ce qui a été observé ailleurs (Lindblade *et al.*, 1999 ; Koenraadt *et al.*, 2004). Une corrélation positive non significative a été également observée pour l'humidité relative alors qu'une corrélation négative non significative a été observée pour la température. Ces observations pourraient être dues à la relative uniformité de l'humidité relative et la température dans les 4 types d'occupation des sols. Ceci est également soutenu par le fait que, si on considère que la température de l'eau influence le développement des stades aquatiques chez les anophèles (Lyimo *et al.*, 1992), l'uniformité de la température contribue ainsi à une influence similaire dans les 4 types d'occupation des sols.

Ainsi, comme les conditions environnementales sont liées aux conditions météorologiques, des études additionnelles avec un suivi étroit des paramètres climatiques sont nécessaires pour étudier leurs relations avec les paramètres entomologiques. Ceci est renforcé par le fait que les paramètres climatiques peuvent dramatiquement modifier l'abondance, la longévité, l'infection des vecteurs et la transmission (Bomblies et Eltahir, 2009). De telles informations sont importantes en santé publique, car elles permettent d'aider à l'installation des populations dans les sites mais également la surveillance et la modélisation pour la mise en place de système d'alerte et d'interventions appropriées et efficaces.

CHAPITRE 5 : IMPACT DES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX ET CLIMATIQUES SUR LA TRANSMISSION ET LE CONTROLE

1. Contexte

De toutes les maladies transmissibles par les moustiques, le paludisme est l'une des plus redoutables et dont la variabilité spatio-temporelle est fortement liée aux déterminants environnementaux. C'est pourquoi certains pensent qu'à chaque localité correspond une situation palustre spécifique (Fane, 2011). Sa complexité serait ainsi liée à la forte interaction du *Plasmodium*, de son vecteur et l'hôte humain avec l'environnement ; ce qui fait que la capacité vectorielle est fortement associée au climat (Craig *et al.*, 1999). Ces observations font ainsi ressortir la nécessité pour chaque contexte de caractériser les vecteurs et la transmission pour une mise en place correcte de stratégie de contrôle. Dans la région sahélienne, le pic de multiplication des gîtes s'observe avec le pic des précipitations. En effet il a été ainsi observé que les années à forte pluviométrie sont caractérisées par une forte transmission du paludisme dans le village de Barkédji (Lemasson *et al.*, 1997) accompagnée d'une fréquence élevée des accès et de la mortalité palustres (Molez *et al.*, 2006). Compte tenu des hétérogénéités observées au cours des deux études présentées aux deux derniers chapitres (3 et 4), il a été jugé indispensable de caractériser la transmission ainsi que ses paramètres dans les différents types d'occupation des sols de la zone. C'est ainsi que la présente étude a été réalisée dans 6 villages (Barkéji, Niakha, Kangaléji, Keur Banji, Wouro Samba Kibel et Wouro Sileymani) appartenant aux 4 types d'occupation des sols identifiés (savane arborée, savane arbustive, steppe et sol nu) au cours de trois années successives (2010, 2011 et 2012) à travers des collectes bimensuelles.

2. Résultats globaux

2.1. Faune anophélienne et abondance relative

Entre 2010 et 2012, 252 séances de collecte sur sujets humains ont été effectuées. Elles ont permis de collecter 2621 femelles d'anophèles appartenant à 7 espèces : *An. coustani*, *An. flavicosta*, *An. funestus*, *An. gambiae* s.l., *An. pharoensis*, *An. rufipes* et *An. ziemanni* (Tableau 6). Quelque soit le village et l'année considérée, *An. gambiae* a été l'espèce prédominante suivie d'*An. pharoensis*.

Tableau 6 : Abondance des anophèles collectés de 2010, 2011 et 2012 dans les différents villages

Villages	Années	<i>An. coustani</i>	<i>An. flavicosta</i>	<i>An. funestus</i>	<i>An. gambiae</i>	<i>An. pharoensis</i>	<i>An. rufipes</i>	<i>An. ziemanni</i>	Total
Barkedji	2010	0 (0)	0 (0)	0 (0)	930 (98,94)	9 (0,96)	1 (0,11)	0 (0)	940
	2011	0 (0)	0 (0)	0 (0)	284 (98,27)	5 (1,73)	0 (0)	0 (0)	289
	2012	0 (0)	0 (0)	0 (0)	273 (95,12)	14 (4,88)	0 (0)	0 (0)	287
Kangaledji	2010	1 (0,37)	1 (0,37)	0 (0)	256 (93,77)	11 (4,03)	0 (0)	4 (1,47)	273
	2011	0 (0)	0 (0)	0 (0)	38 (100)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	38
	2012	0 (0)	0 (0)	0 (0)	73 (100)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	73
Keur Bandji	2010	0 (0)	0 (0)	1 (3,70)	25 (92,59)	1 (3,70)	0 (0)	0 (0)	27
	2011	0 (0)	0 (0)	0 (0)	4 (66,67)	2 (33,33)	0 (0)	0 (0)	6
	2012	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (50)	1 (50)	0 (0)	0 (0)	2
Niakha	2010	0 (0)	0 (0)	0 (0)	217 (99,54)	1 (0,46)	0 (0)	0 (0)	218
	2011	0 (0)	0 (0)	0 (0)	122 (99,19)	1 (0,81)	0 (0)	0 (0)	123
	2012	0 (0)	0 (0)	0 (0)	151 (96,79)	5 (3,21)	0 (0)	0 (0)	156
W. S. Kibel	2010	1 (1,79)	0 (0)	0 (0)	55 (98,21)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	56
	2011	0 (0)	0 (0)	0 (0)	12 (70,59)	3 (17,65)	0 (0)	2 (11,76)	17
	2012	0 (0)	0 (0)	0 (0)	24 (96)	1 (4)	0 (0)	0 (0)	25
W. Sileymani	2010	0 (0)	0 (0)	0 (0)	64 (98,46)	1 (1,54)	0 (0)	0 (0)	65
	2011	0 (0)	0 (0)	0 (0)	6 (66,67)	2 (22,22)	0 (0)	1 (11,11)	9
	2012	0 (0)	0 (0)	0 (0)	13 (76,47)	4 (23,53)	0 (0)	0 (0)	17
Total		2 (0,08)	1 (0,04)	1 (0,04)	2548 (97,21)	61 (2,33)	1 (0,04)	7 (0,27)	2621

L'identification moléculaire des espèces du complexe *An. gambiae* par PCR, à partir de 2557 spécimens, a montré que *An. arabiensis* et *An. coluzzi* sont les seules présentes dans les 6 villages (Tableau 7). Quelque soit le village et l'année considérés, *An. arabiensis* a été l'espèce prédominante et la seule présente à Keur Bandji (steppe). Aucune différence significative n'a été observée entre les fréquences d'*An. arabiensis* entre les 6 villages ($\chi^2=4,87$, ddl=5, p=0.43). *An. coluzzii* a présenté des proportions faibles et n'a pas été rencontré dans le village de steppe (Keur Bandji).

Tableau 7 : Identification des espèces du complexe *An. gambiae* collectées dans les 6 villages

Villages	Années	<i>An. arabiensis</i>		<i>An. coluzzii</i>		Total
		N	%	N	%	
Barkedji	2010	928	99,4	6	0,6	934
	2011	288	100	0	0	288
	2012	258	97,7	6	2,3	264
Kangaledji	2010	267	98,9	3	1,1	270
	2011	38	100	0	0	38
	2012	61	95,3	3	4,7	64
Keur Bandji	2010	26	100	0	0	26
	2011	6	100	0	0	6
	2012	1	100	0	0	1
Niakha	2010	214	99,1	2	0,9	216
	2011	119	96,7	4	3,3	123
	2012	140	97,9	3	2,1	143
Wouro Samba Kibel	2010	55	100	0	0	55
	2011	16	94,1	1	5,9	17
	2012	25	100	0	0	25
Wouro Sileymani	2010	64	98,5	1	1,5	65
	2011	9	100	0	0	9
	2012	13	100	0	0	13
Total		2528	98,9	29	1,1	2557

2.2. Indices de diversité

De façon générale, le nombre d'espèce le plus élevé a été collecté en 2010 (7 espèces) et le plus faible en 2012 (2). En 2010, le plus grand nombre d'espèces a été collecté à Kangalédji (5 espèces), suivis de Barkédji et Keur Bandji (3 espèces) alors qu'en 2011, c'est dans les villages de steppe (Wouro Samba Kibel et Wouro Sileymani) que le plus grand nombre d'espèces a été collecté (3 espèces). En 2010, le nombre d'espèces collectées a été constant à l'exception de Kangalédji (Tableau 8).

Tableau 8 : Indices de diversité spécifique de la faune anophélienne dans les différents villages

Années	Indices	Barkedji	Kangaledji	Keur Bandji	Niakha	W. S. Kibel	W. Sileymani
2010	Richesse spécifique	3	5	3	2	2	2
	Indice de Shannon	0,062	0,293	0,315	0,029	0,089	0,079
	Indice de Simpson	0,021	0,119	0,140	0,009	0,035	0,030
2011	Richesse spécifique	2	1	2	2	3	3
	Indice de Shannon	0,087	0	0,636	0,048	0,804	0,849
	Indice de Simpson	0,034	0	0,444	0,016	0,457	0,494
2012	Richesse spécifique	2	1	2	2	2	2
	Indice de Shannon	0,200	0	0,693	0,142	0,168	0,545
	Indice de Simpson	0,093	0	0,500	0,062	0,077	0,360

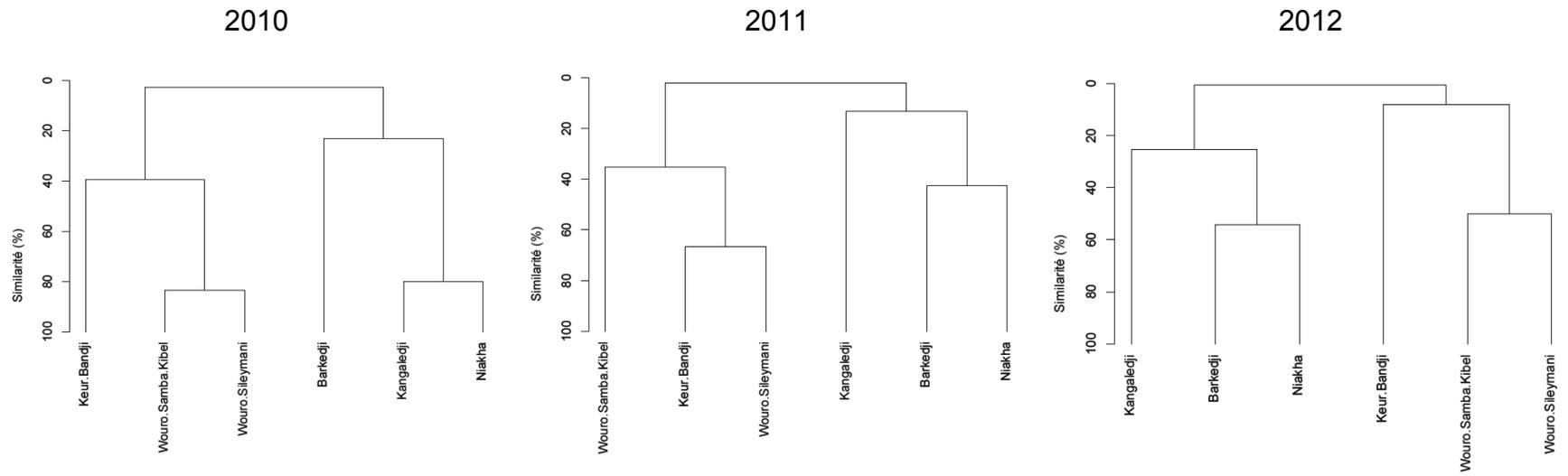


Figure 20 : Dendrogramme de similarité des différents villages

L'analyse des indices de l'indice de Shannon montre que la valeur la plus élevée a été observée en 2010 à Keur Bandji alors qu'aussi bien en 2011 et 2012 les valeurs les plus élevées ont été observées à Keur Bandji et Wouro Sileymani (Tableau 8).

L'étude du degré de similarité ou de ressemblance entre les différents villages tenant en compte l'absence ou la présence des espèces, a montré que durant les trois années, les villages de savane arbustive appartiennent au même cluster (sont donc très proches du point de vue des espèces collectées dans ces villages), alors que pour les villages de savane arborée c'est surtout en 2011 et 2012 qu'une telle observation a été faite. Les villages de steppe et de sol nu ne montrent pas de tendance particulière (Figure 20).

2.3. Densités vectorielles et dynamique des populations

Compte tenu de leurs abondances et de leurs rôles vectoriels, les analyses suivantes concerneront uniquement *An. gambiae* (que nous confondrons avec *An. arabiensis*) et *An. pharoensis*.

Les densités agressives moyennes d'*An. arabiensis* ont été estimées à $3 \pm 0,4$, $5,2 \pm 1,4$, $1,2 \pm 0,4$, $5,4 \pm 0,9$, $2 \pm 0,5$ et $2 \pm 0,7$ respectivement pour Barkédji, Kangalédji, Keur Bandji, Niakha, Wouro Samba Kibel et Wouro Sileymani. Les valeurs respectives chez *An. pharoensis* sont : $0,19 \pm 0,02$, $0,9 \pm 0,2$, $0,7 \pm 0,2$, $0,6 \pm 0,1$, $1 \pm 0,5$ et $0,5 \pm 0$. Ces densités ont connu des variations selon le lieu de capture, l'année et la période. Chez *An. gambiae*, ces densités ont été statistiquement significatives entre Niakha et Barkédji ($p=0,03$), Keur Bandji et Kangaledji ($p=0,03$), Wouro Samba Kibel et Kangalédji ($p=0,03$), Wouro Sileymani et Kangaledji ($p=0,03$), Niakha et Keur Bandji ($p=0,004$), Wouro Samba Kibel et Niakha ($p=0,003$) et Wouro Sileymani et Niakha ($p=0,003$). Chez *An. pharoensis*, les densités ont été comparables entre les villages à l'exception du village de Barkédji où des différences significatives ont été observées avec chacun des autres villages ($10^{-5} < p < 0,01$).

2.4. Variations annuelles globales des densités agressives

L'analyse des variations des densités agressives des femelles d'*An. arabiensis* entre les trois années d'étude montre globalement que les densités les plus élevées ont été observées en

2010 quelque soit le village considéré (Tableau 9). Cependant, elles n'ont été significativement différentes que dans le village de Barkédji où les densités observées en 2010 ont été plus élevées en comparaison à celles de 2011 et 2012. Les densités les plus faibles ont été observées dans les villages de steppe (Keur Bandji) et de savane arbustive (Wouro Samba Kibel et Wouro Sileymani).

Lorsque les comparaisons ont été faites entre villages en fonction des trois années d'étude, l'analyse des densités montre qu'aucune différence significative n'a été observée au cours des années 2010 et 2012. Cependant, au cours de l'année 2011, les densités ont été significativement différentes entre les 6 villages, les densités les plus élevées étant observées dans les villages de savane arborée (Niakha et dans une moindre mesure à Barkédji). Elles ont été cependant comparables entre les villages de savane arbustive (Wouro Samba Kibel et Wouro Sileymani), de sol nu (Kangalédji) et de steppe (Keur Bandji).

Chez *An. pharoensis*, l'analyse des densités agressives montre une distribution hétérogène. L'analyse comparée dans les villages où elle a été collectée au cours des trois années d'étude montre des densités comparables à l'exception de Keur Bandji (steppe) où c'est en 2011 que la densité la plus élevée a été observée (Tableau 9).

L'analyse des densités entre villages, montre comme chez *An. arabiensis*, l'absence de différence significative entre les densités d'*An. pharoensis* au cours de l'année 2010, ce qui n'a pas été le cas en 2011 et 2012. Durant ces deux dernières années, une tendance similaire a été observée avec des densités comparables entre Niakha (savane arborée) et Keur Bandji (steppe) qui ont présenté des densités significativement différentes avec Barkédji (savane arborée) en 2011 et Kangalédji (savane arbustive).

Tableau 9 : Variations annuelles des taux d'agressivité d'*An. arabiensis* et *An. pharoensis* dans les 6 villages

Villages	<i>An. arabiensis</i>			<i>An. pharoensis</i>		
	2010	2011	2012	2010	2011	2012
Barkédji	5,53±0,75	1,69±0,42	1,71±0,26	0,19±0,06	0,21±0,04	0,19±0,00
Kangalédji	6,74±2,52	2,37±0,76	4,56±1,02	0,92±0,24	-	-
Keur Bandji	1,56±0,54	0,67±0,17	0,5±0,0	0,5±0,00	1±0,00	0,5±0,00
Niakha	6,03±1,60	6,1±2,35	4,44±0,97	0,5±0,00	0,5±0,00	0,62±0,13
Wouro Samba Kibel	2,5±1,10	1,5±0,71	1,5±0,45	-	1,5±0,00	0,5±0,00
Wouro Sileymani	2,91±1,25	0,75±0,14	1,08±0,20	0,5±0,00	0,5±0,00	0,5±0,00

2.5. Variations saisonnières des densités agressives

Les Figures 21 à 26 présentent les variations saisonnières des densités agressives d'*An. arabiensis* et d'*An. pharoensis* dans les différents villages à chaque quinzaine durant la période d'étude de juillet 2010 à novembre 2012 en relation avec la pluviométrie. D'une façon générale, les densités agressives saisonnières les plus élevées ont été observées dans les deux villages de savane arborée et celui de sol nu.

L'analyse des variations de la pluviométrie montre une hétérogénéité dans la fréquence et le rythme des pluies malgré la relative localisation des villages dans la même zone.

Chez *An. arabiensis*, une dynamique bi ou tri-modale a été observée avec parfois un pic d'agressivité décalée par rapport à la fin de la saison des pluies.

Dans les deux villages de savane arborée, les populations d'*An. arabiensis* ont montré une dynamique similaire avec trois pics d'agressivité en 2010. Il est remarquable de noter dans ces deux villages qu'un des pics est décalé par rapport à la saison des pluies. En 2011, les densités agressives ont été moins faibles qu'en 2010 mais ont présenté également un pic décalé par rapport à la saison des pluies. Le même phénomène a été observé en 2012.

Dans le village de sol nu, les densités observées en 2010 ont été plus élevées par rapport à 2011 et 2012. Deux pics d'agressivité ont été observés aussi bien en 2010 qu'en 2012 alors qu'en 2011, les populations d'*An. arabiensis* ont montré un seul pic. Contrairement aux villages de

savane arborée, un pic décalé par rapport à la saison des pluies n'a été observé qu'en 2010. Pour 2011 et 2012, les pics d'agressivité ont été observés juste à la fin de la saison des pluies.

C'est dans les villages de steppe et de savane arbustive que les densités les plus faibles ont été observées quel que soit l'année considérée, l'année 2010 présentant les densités les plus élevées par rapport à 2011 et 2012. Lorsqu'elles sont présentes, les pics d'agressivité des femelles d'*An. arabiensis* sont observés en milieu ou en fin de saison des pluies.

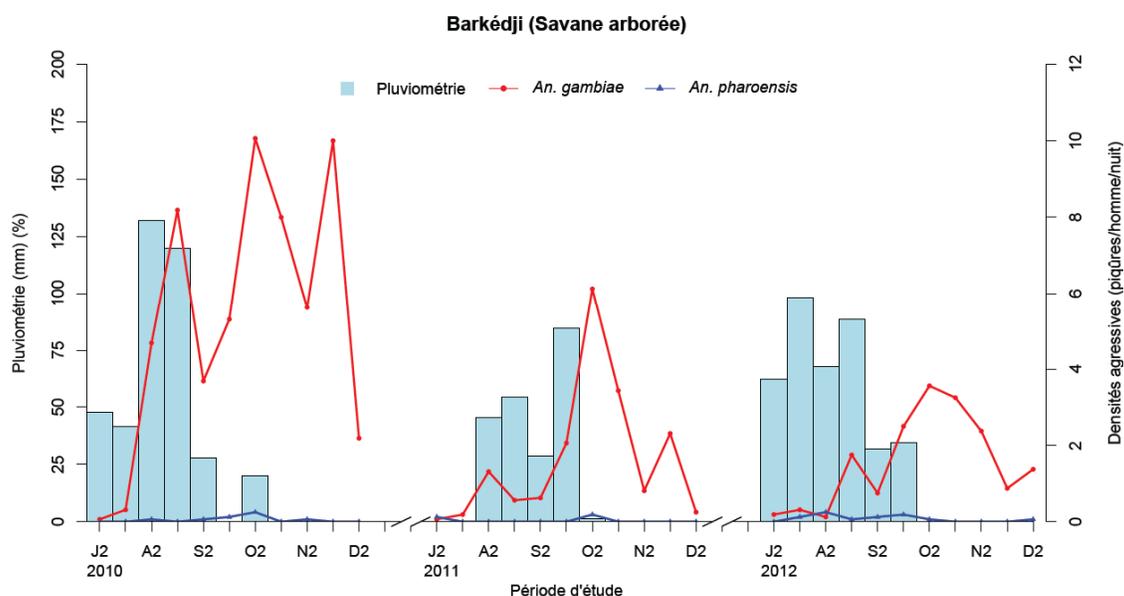


Figure 21 : Variations des densités agressives d'*An. arabiensis* et d'*An. pharoensis* dans le village de Barkédji (savane arborée)

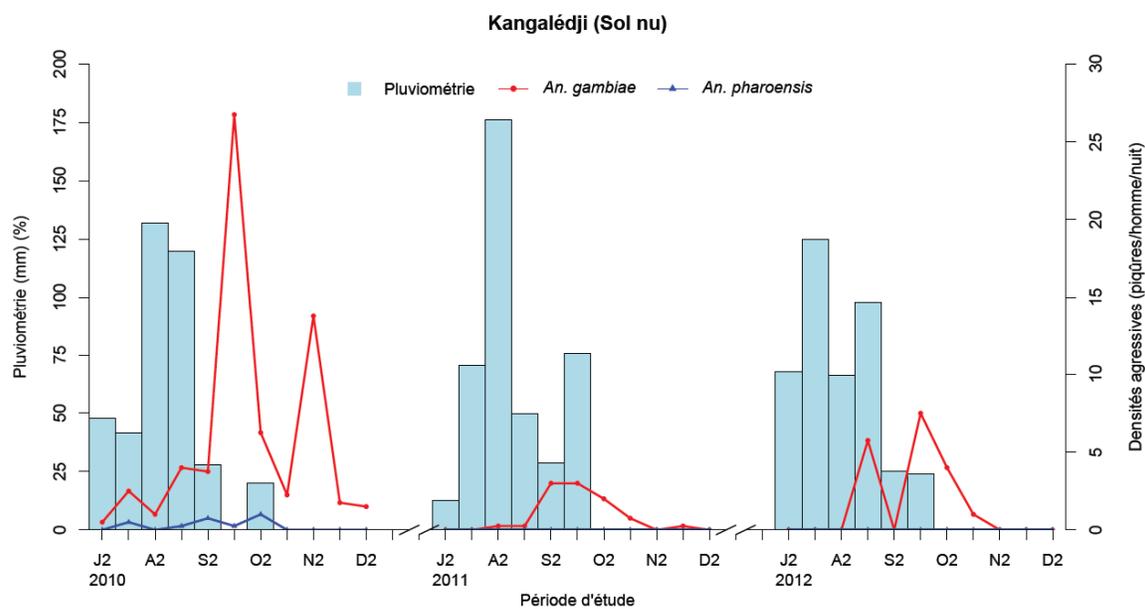


Figure 22 : Variations des densités agressives d'*An. arabiensis* et d'*An. pharoensis* dans le village de Kangalédji (sol nu)

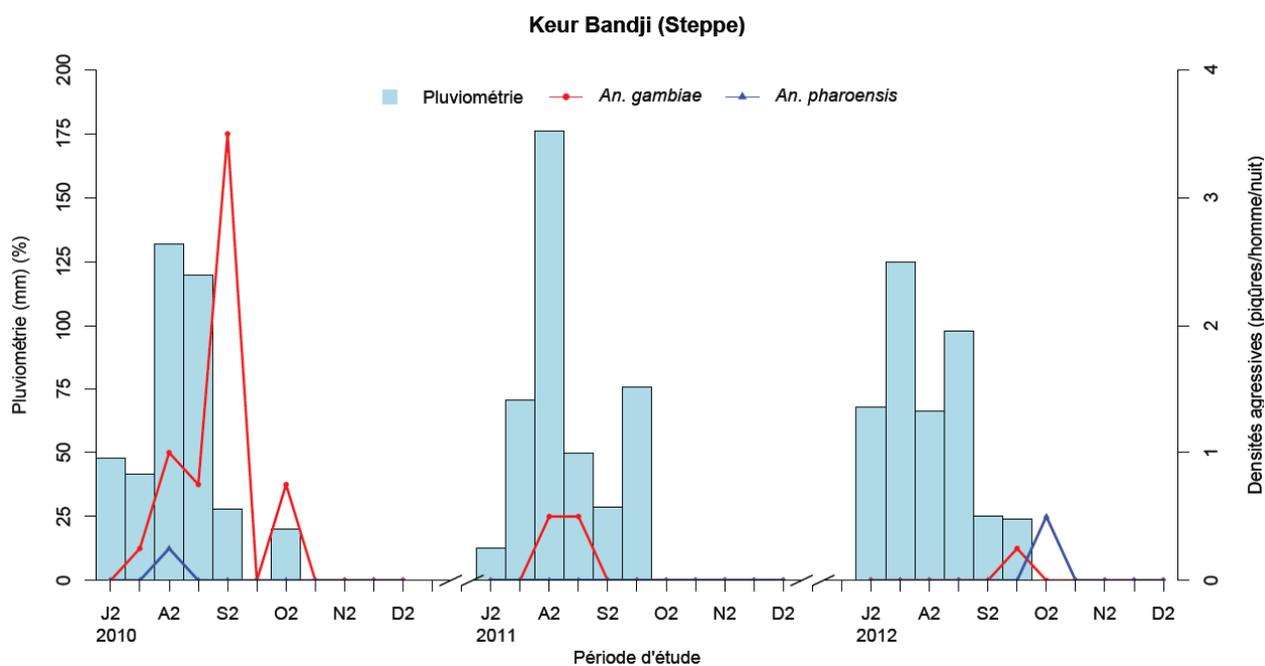


Figure 23 : Variations des densités agressives d'*An. arabiensis* et d'*An. pharoensis* dans le village de Keur Bandji (steppe)

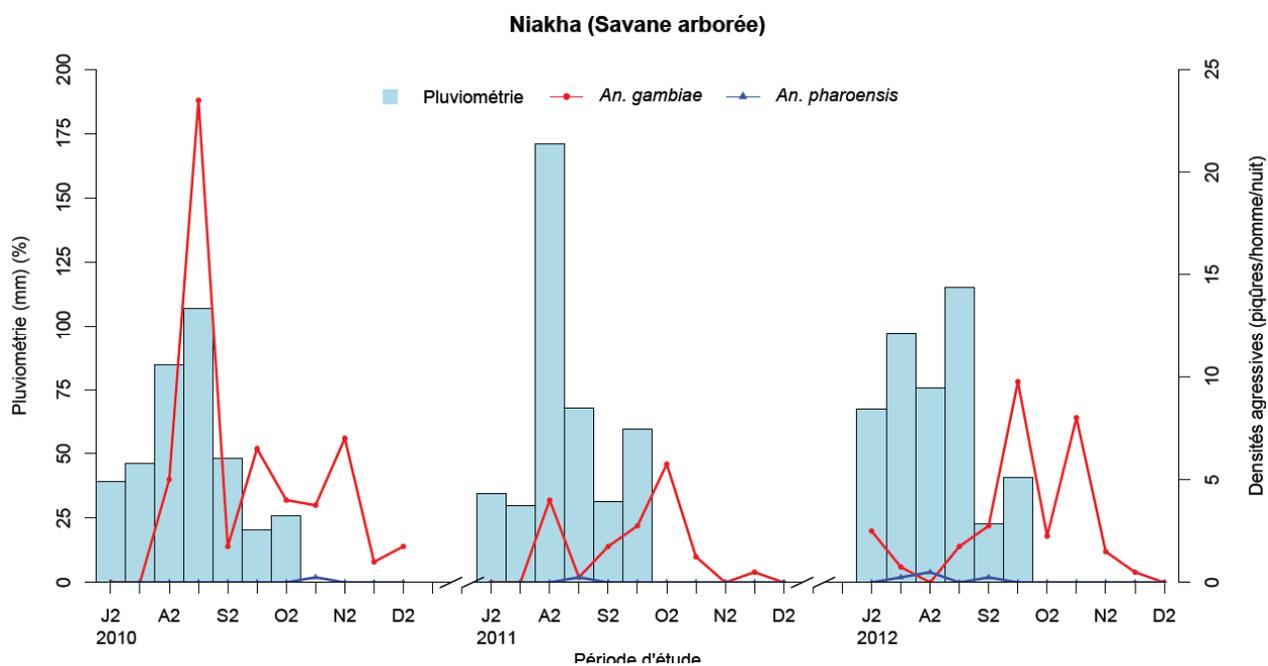


Figure 24 : Variations des densités agressives d'*An. arabiensis* et d'*An. pharoensis* dans le village de Niakha (savane arborée)

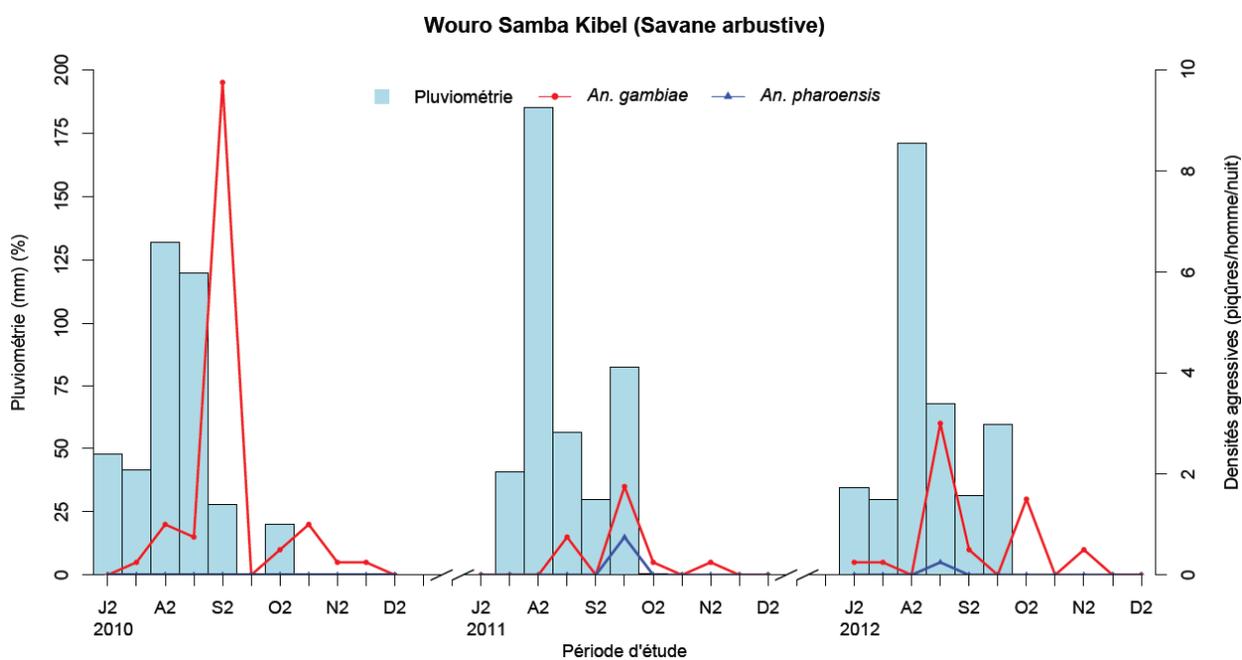


Figure 25 : Variations des densités agressives d'*An. arabiensis* et d'*An. pharoensis* dans le village de Wouro Samba Kibel (savane arbustive)

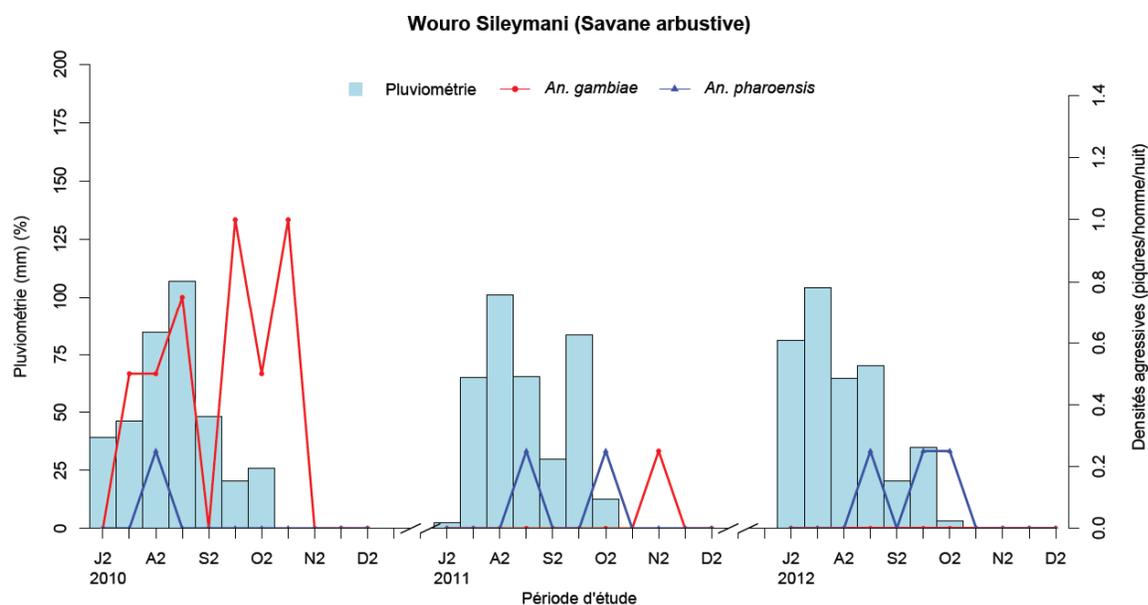


Figure 26 : Variations des densités agressives d'*An. arabiensis* et d'*An. pharoensis* dans le village de Wouro Sileymani (savane arbustive)

L'étude des corrélations entre les densités agressives d'*An. arabiensis* et la pluviométrie montre globalement l'absence de corrélation significative quelque soit le village et l'année. Plus spécifiquement, une corrélation positive a été observée pour la plupart des villages (sur 28 corrélations, seules 7 ont été négatives). Il est à noter que pour le village de Barkédji, les corrélations ont été négatives quelque soit l'année (Tableau 10).

Tableau 10 : Corrélations entre les densités agressives d'*An. arabiensis* et la pluviométrie

Villages	Paramètres	2010	2011	2012	Toutes
Barkédji	r	-0,08	-0,10	-0,59	-0,07
	p	0,81	0,76	0,06	0,70
Kangalédji	r	-0,34	0,02	0,05	-0,16
	p	0,30	0,95	0,87	0,37
Keur Bandji	r	0,25	0,51	1	0,22
	p	0,47	0,11	0,99	0,21
Niakha	r	0,59	0,34	-0,16	0,24
	p	0,05	0,31	0,63	0,18
Wouro Samba Kibel	r	0,02	0,25	0,04	0,04
	p	0,95	0,45	0,90	0,81
Wouro Sileymani	r	0,24	-0,28	-	0,08
	p	0,48	0,40	-	0,66

Chez *An. pharoensis*, l'analyse de la dynamique temporelle des densités agressives montrent une distribution hétérogène selon les périodes de collecte et de l'année. Dans les deux villages de savane arborée, les densités ont été très faibles par rapport à celles d'*An. arabiensis*. Les rares femelles collectées l'ont été soit au cours ou à la fin de la saison des pluies.

Dans le village de sol nu, les femelles d'*An. pharoensis* n'ont été collectées que durant l'année 2010 pendant la saison des pluies alors que dans le village de steppe, elles ont été collectées au cours de la saison des pluies 2010 et à la fin de la saison des pluies 2012 à des densités très faibles.

Dans les deux villages de savane arbustive, si les femelles d'*An. pharoensis* n'ont été collectées, qu'au cours des saisons des pluies 2011 et 2012 dans le village de Wouro Samba Kibel, elles ont été collectées pendant chacune des trois années dans le village de Wouro Sileymani. Dans ce dernier village, elles ont été les seules collectées durant la saison des pluies 2011 alors qu'en 2012, *An. pharoensis* a été la seule espèce collectée.

Compte tenu du faible nombre d'individus collectés, il n'a pas été possible d'étudier la corrélation entre les densités agressives d'*An. pharoensis* et la pluviométrie.

2.6. Comportement de piqûres

2.6.1. Taux d'endophagie

Les taux d'endophagie estimés à partir du rapport en pourcentage du nombre de moustiques collectés à l'intérieur sur le nombre total de moustiques collectés montrent globalement un comportement à tendance exophage chez les populations d'*An. arabiensis* quelque soit le village considéré. Durant les trois années d'étude, les taux d'endophagie ont varié entre 27,9% dans le village de Kangalédji à 47% dans le village de Barkédji (Tableau 11). Ces taux ont été significativement différents entre les 6 villages ($\chi^2=49,3$, ddl=5, $p<0,0001$).

Tableau 11 : Variations des taux d'endophagie entre les 6 villages

Villages	Total	Int.	Ext.	TE (IC 95%)	OR	IC 95%	p
Barkédji	1516	712	804	47 (44,4-49,5)	1		
Kangalédji	384	107	277	27,9 (23,4-32,6)	0,44	0,34-0,56	0,0001
Keur Bandji	35	13	22	37,1 (21,5-55,1)	0,67	0,33-1,33	0,25
Niakha	497	201	296	40,4 (36,1-44,9)	0,77	0,62-0,94	0,01
Wouro Samba Kibel	98	38	60	38,8 (29,1-49,2)	0,71	0,47-1,09	0,11
Wouro Sileymani	91	33	58	36,3 (26,4-47)	0,64	0,41-0,99	0,05

Int. : Intérieur, Ext.=Extérieur, TE=Taux d'endophagie, OR : Odds ratio, IC=Intervalle de confiance

L'analyse des taux d'endophagie entre les différents villages a montré par rapport au village de Barkédji où le taux le plus élevé a été observé, une différence statistiquement significative avec le village de Kangalédji (sol nu) et Niakha, l'autre village de savane arborée (Tableau 11). Les taux ont été cependant comparables avec le village de steppe (Keur Bandji) et les deux villages de savane arbustive (Wouro Samba Kibel et Wouro Sileymani).

Tableau 12 : Variations des taux d'endophagie entre les trois années d'étude pour chacun des 6 villages

Villages	Années	Total	Int.	Ext.	TE (IC95%)	OR	IC 95%	p
Barkédji	2010	940	463	477	49,3 (46-52,5)	1		
	2011	289	117	172	40,5 (34,8-46,4)	0,7	0,54-0,91	0,009
	2012	287	132	155	46,0 (40,1-51,9)	0,88	0,67-1,14	0,33
Kangalédji	2010	273	64	209	23,4 (18,5-28,9)	1		
	2011	38	9	29	23,7 (11,4-40,2)	1,01	0,46-2,25	0,97
	2012	73	34	39	46,6 (34,8-58,6)	2,85	1,66-4,88	0,0001
Keur Bandji	2010	27	12	15	44,4 (25,5-64,7)	1		
	2011	6	1	5	16,7 (0,4-64,1)	0,25	0,02-2,44	0,21
	2012	2	0	2	0	-	-	0,23
Niakha	2010	218	107	111	49,1 (42,3-55,9)	1		
	2011	123	18	105	14,6 (8,9-22,1)	0,18	0,10-0,31	0,0001
	2012	156	76	80	48,7 (40,6-56,8)	0,98	0,65-1,49	0,94
Wouro Samba Kibel	2010	56	22	34	39,3 (26,5-53,2)	1		
	2011	17	0	17	0,0	-	-	0,002
	2012	25	16	9	64,0 (42,5-82)	2,74	1,03-7,30	0,04
Wouro Sileymani	2010	65	26	39	40 (28-52,9)	1		
	2011	9	1	8	11,1 (0,3-48,2)	0,18	0,02-1,59	0,09
	2012	17	6	11	35,3 (14,2-61,7)	0,81	0,27-2,49	0,72

Int. : Intérieur, Ext.=Extérieur, TE=Taux d'endophagie, OR : Odds ratio, IC=Intervalle de confiance

Lorsque les taux d'endophagie ont été comparés à l'échelle de chaque village entre les trois années d'étude, il a été observé différentes tendances selon les villages. Les taux d'endophagie ont varié entre 11,1% dans le village de Wouro Sileymani en 2011 à 64% dans le village de Wouro Samba Kibel en 2012. Dans les deux villages de savane arborée (Barkédji et Niakha), les taux d'endophagie observés en 2011 ont été significativement plus bas par rapport aux taux observés en 2010 alors que ceux observés en 2012 ont été comparables avec les taux observés en 2010. Une tendance similaire a été observée dans le village de Wouro Samba Kibel (savane arbustive) alors que dans le second village de savane arbustive (Wouro Sileymani) et dans le village de steppe (Keur Bandji), aucune différence significative entre les taux d'endophagie estimés pour chacune des trois années. Dans le village de sol nu, les taux observés en 2012 ont été significativement plus élevés par rapport à 2010 et 2011 (Tableau 12).

2.6.2. Taux d'agressivité horaire

L'étude des variations horaires des taux d'agressivité d'*An. arabiensis* dans les 6 villages, montre que quelque soit le village considéré, l'essentiel des piqûres dues à cette espèce sont reçues à l'extérieur. Les taux d'agressivité horaires les plus faibles ont été observés dans le village de steppe et les villages de savane arbustive ($0,011 \pm 0,003$ à Keur Bandji, $0,03 \pm 0,004$ à Wouro Samba Kibel et $0,03 \pm 0,006$ à Wouro Sileymani). Aucune différence significative n'a été observée entre ces trois villages. Les densités observées dans les deux villages de savane arborée ont été également comparables à celles observées dans le village de sol nu mais ont été significativement différentes de celles observées dans les villages de savane arbustive et de steppe ($p < 0,001$).

L'analyse de la dynamique des piqûres selon les heures de collecte montre dans les deux villages de savane arborée une augmentation régulière de l'agressivité à partir du crépuscule atteignant un pic au début de la seconde partie de la nuit soit entre 0h et 1h soit entre 1h et 2h (Figures 27 et 28). Il s'ensuit une diminution régulière du nombre de piqûres reçues jusqu'au petit matin.

Dans le village de sol nu, l'essentiel des piqûres était reçu à l'extérieur des chambres à coucher. Les piqûres étaient cependant reçues à chacune des heures de la nuit avec un maximum

dans la seconde partie de la nuit à l'extérieur (entre 3h et 4h) alors que le pic d'agressivité des femelles endophages est observé à la fin de la première partie de la nuit entre 0h et 1h (Figure 29).

Dans le village de steppe (Keur Bandji), la dynamique de l'agressivité horaire des femelles d'*An. arabiensis* a été très hétérogène. La piqûre de ces femelles était reçue durant certaines tranches horaires soit à l'intérieur (entre 0h et 1h et entre 4h et 5h) soit à l'extérieur (entre 20h et 22h et entre 1h et 2h). Durant les tranches horaires où les femelles étaient agressives aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur, les femelles agressives étaient constituées pour l'essentiel de femelles exophages à l'exception de la tranche horaire 23h-24h où les femelles étaient plus endophages qu'exophages (Figure 30).

Dans les deux villages de savane arbustive, l'agressivité a été observée durant chacune des tranches horaires à l'exception de la tranche 5h-6h dans le village de Wouro Sileymani où aucune femelle endophage n'a été collectée. Si dans le village de Wouro Samba Kibel, le pic d'agressivité maximale a été observé dans la seconde partie de la nuit entre 2h et 4h à l'extérieur, dans le village de Wouro Sileymani, les femelles exophages ont été plus agressives tout au début de la seconde partie de la nuit entre 0h et 2h (Figures 31 et 32).

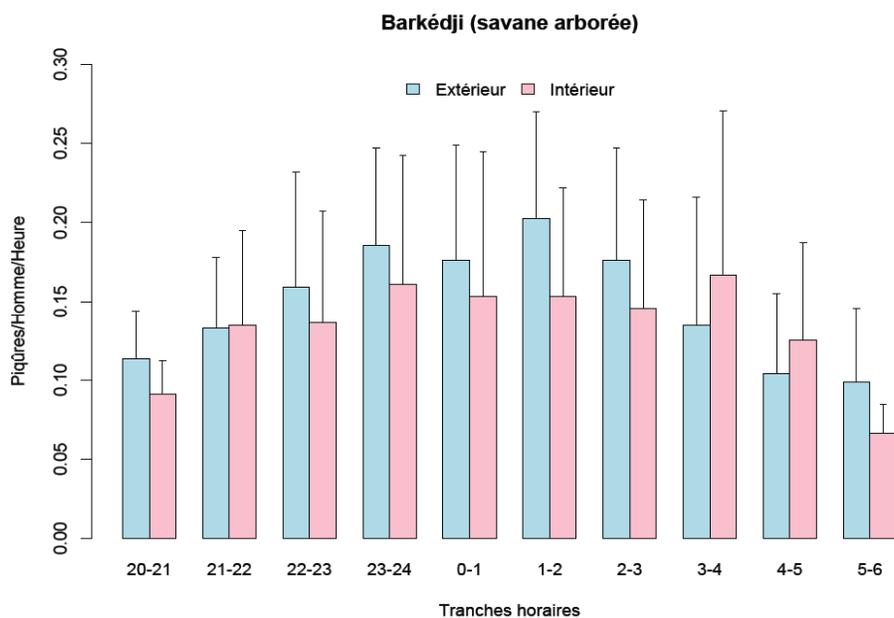


Figure 27 : Variations horaires de l'agressivité des femelles d'*An. arabiensis* à Barkédji (savane arborée)

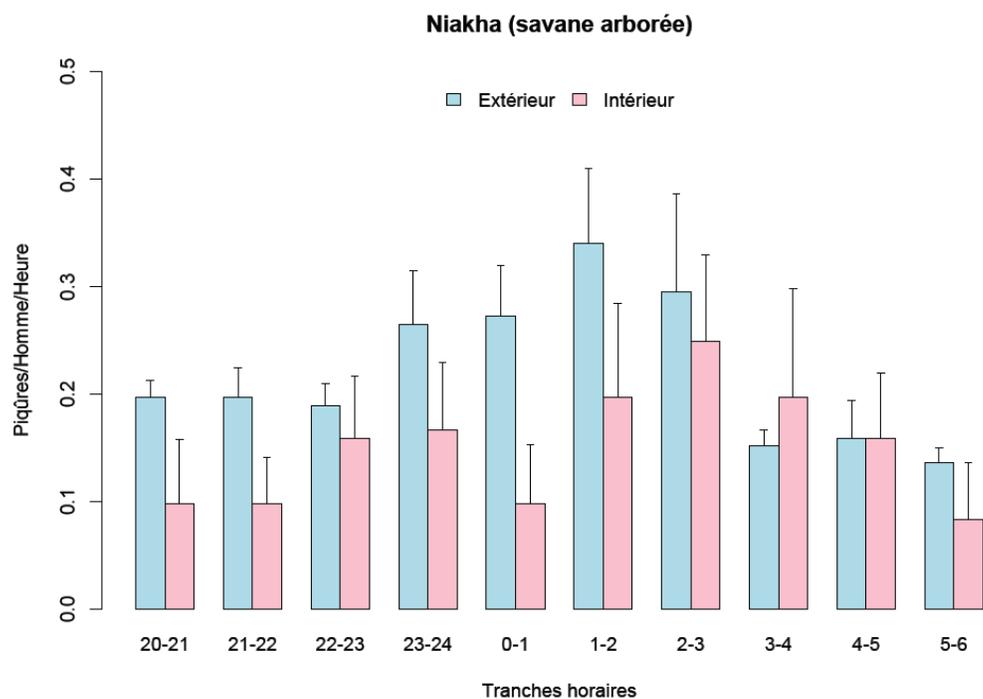


Figure 28 : Variations horaires de l'agressivité des femelles d'*An. arabiensis* à Niakha (savane arborée)

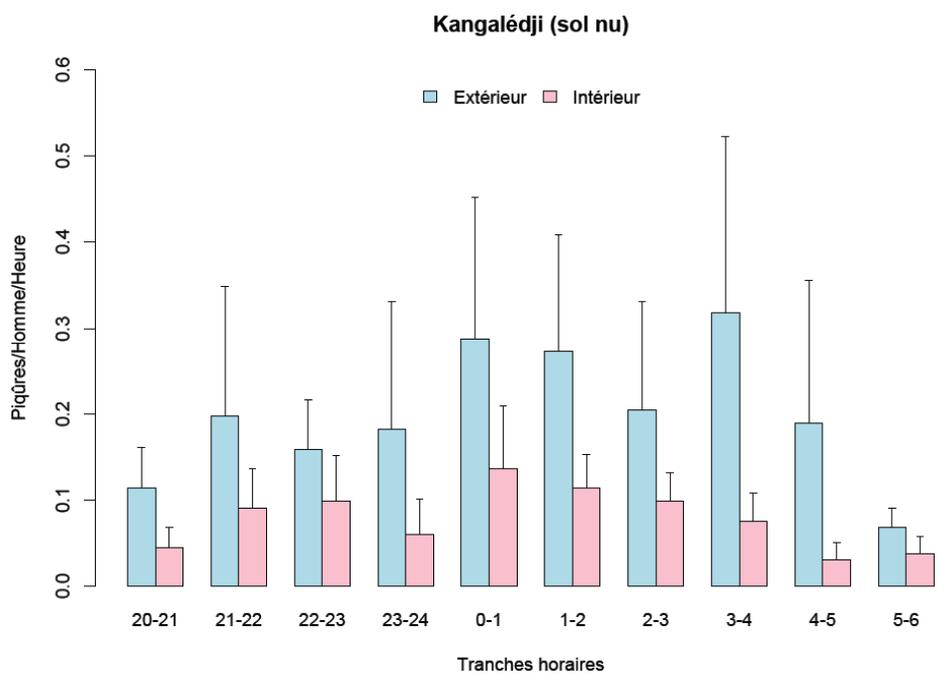


Figure 29 : Variations horaires de l'agressivité des femelles d'*An. arabiensis* à Kangalédji (sol nu)

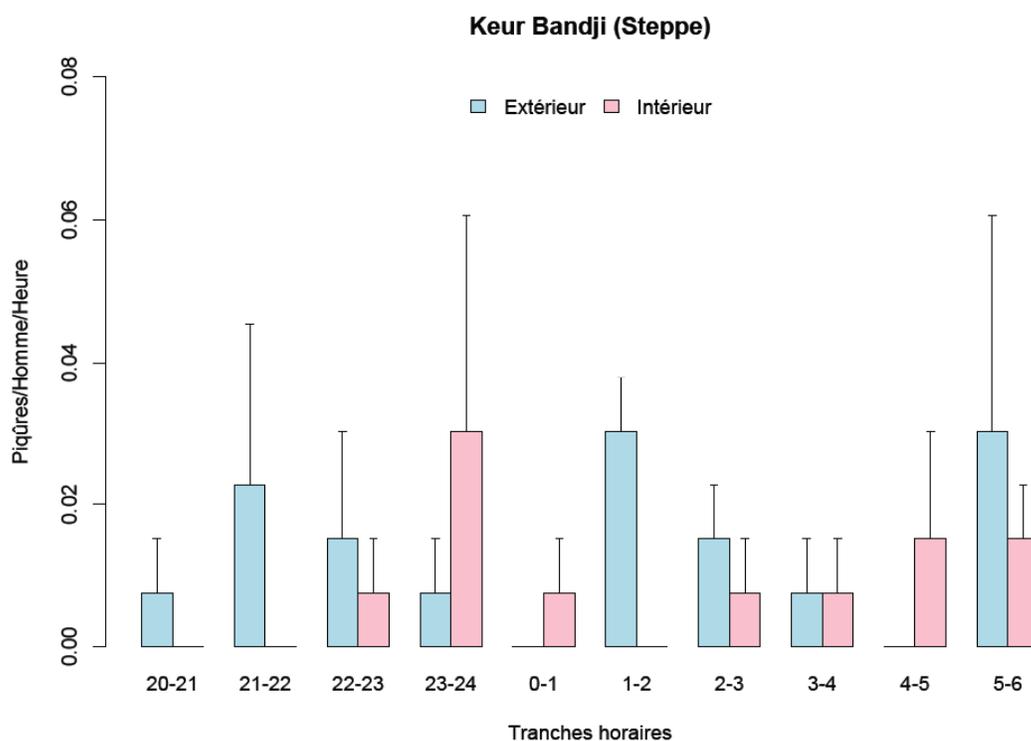


Figure 30 : Variations horaires de l'agressivité des femelles d'*An. arabiensis* à Keur Bandji (steppe)

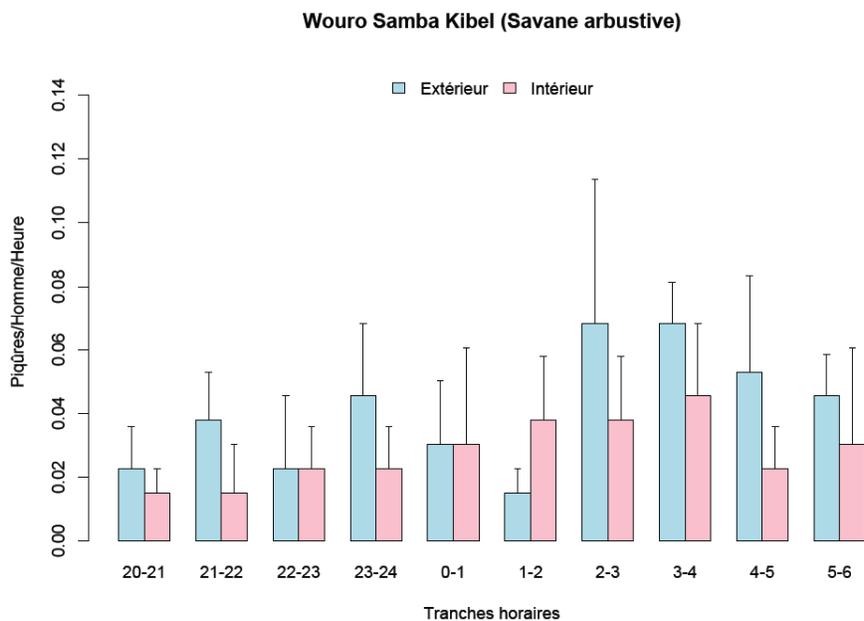


Figure 31 : Variations horaires de l'agressivité des femelles d'*An. arabiensis* à Wouro Samba Kibel (savane arbustive)

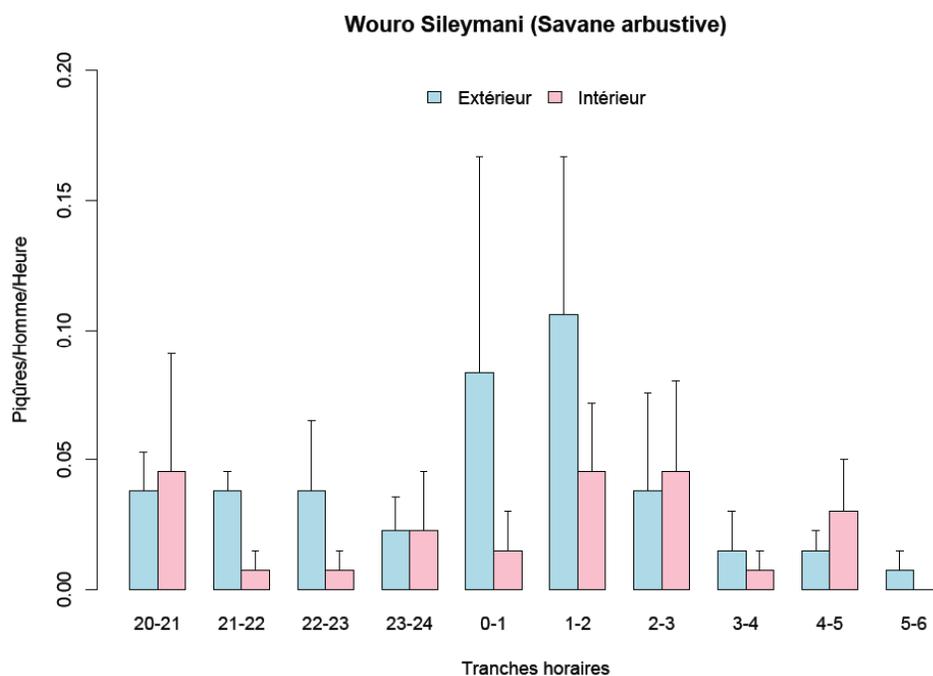


Figure 32 : Variations horaires de l'agressivité des femelles d'*An. arabiensis* à Wouro Sileymani (savane arbustive)

2.7. Paramètres entomologiques de la transmission

2.7.1. Taux de parturité

Les taux de parturité ont été estimés à partir du rapport en pourcentage entre le nombre de moustiques pares et le nombre de moustiques disséqués. Durant les trois années d'étude, les taux de parturité ont varié entre 44,4% dans le village de Barkédji à 72,2% dans le village de Wouro Sileymani (Tableau 13). Ces taux ont été significativement différents entre les 6 villages ($\chi^2=19,1$, ddl=5, $p=0,002$).

L'analyse des taux de parturité entre les différents villages a montré par rapport au village de Barkédji où le taux le plus faible a été observé, une différence statistiquement significative avec tous les autres villages à l'exception du village de Kangalédji, cette différence étant plus marquée avec l'autre village de savane arborée (Niakha). Aucune différence significative n'a cependant été observée avec le village de sol nu (Tableau 13).

Tableau 13 : Variations des taux de parturité chez *An. arabiensis* entre les 6 villages

Villages	Total	Pares	Nullipares	TP (IC 95%)	OR	IC 95%	p
Barkédji	869	386	483	44,4 (41,1-47,8)	1	-	-
Kangalédji	179	81	98	45,3 (37,8-52,8)	1,03	0,75-1,43	0,83
Keur Bandji	17	12	5	70,6 (44-89,7)	3	1,04-8,60	0,03
Niakha	189	104	85	55 (47,6-62,3)	1,53	1,11-2,10	0,008
Wouro Samba Kibel	14	10	4	71,4 (41,9-91,6)	3,12	0,97-10,05	0,04
Wouro Sileymani	18	13	5	72,2 (46,5-90,3)	3,25	1,15-9,20	0,01

2.7.2. Taux d'infection plasmodiale

Globalement, sur un total de 1934 femelles d'*An. arabiensis* testées en ELISA pour la recherche de l'antigène circumsporozoitique de *P. falciparum*, 149 ont été trouvées porteuses de l'antigène. A l'exception du village de Wouro Sileymani, des femelles infectées ont été trouvées dans chacune des autres villages (Tableau 14). Le taux d'infection moyen dans la zone a été estimé à 7,7% (IC 95% : 6,6%-9%).

Tableau 14 : Variations des taux d'infection plasmodiale chez les femelles d'*An. arabiensis* en dans les 6 villages

Villages	Total	Pos.	Neg.	TIP (IC 95%)	OR	IC 95%	p
Barkédji	1289	94	1195	7,3 (5,9-8,9)	1	-	-
Kangalédji	338	23	315	6,8 (4,4-10)	0,93	0,58-1,49	0,75
Keur Bandji	27	4	23	14,8 (4,2-33,7)	2,21	0,75-6,52	0,14
Niakha	189	21	168	11,1 (7-16,5)	1,59	0,96-2,62	0,07
Wouro Samba Kibel	74	7	67	9,5 (3,9-18,5)	1,32	0,59-2,97	0,49
Wouro Sileymani	17	0	17	0 (0-19,5)	-	-	0,25

Pos.= positif, Neg.=négatif, TI=taux d'infection plasmodiale, OR=odds ratio, IC=intervalle de confiance

Dans les villages où des femelles infectées ont été trouvées, les taux d'infection étaient compris entre 6,8% à Kangalédji à 14,8% à Keur Bandji. Aucune différence significative n'a été observée entre les 6 villages (Tableau 15).

Lorsque l'analyse a été effectuée dans chacun des 6 villages entre les trois années d'étude, malgré de fortes variations observées entre les taux d'infection, des différences significatives n'ont été observées qu'en deux occasions. Il s'agit notamment du village de Barkédji (savane arborée) où le taux d'infection observé en 2011 a été significativement différent par rapport aux

deux autres années et dans le village de Bandji (steppe) pour l'année 2011 où la seule femelle testée a été porteuse de l'antigène CSP de *P. falciparum*.

Chez *An. pharoensis*, sur 53 femelles testées en ELISA, l'antigène CSP n'a été trouvé que chez 5 femelles collectées en savane arborée et en sol nu (2 collectées à Barkédji en octobre 2010 et septembre 2012, 1 à Kangalédji en octobre 2010 et 2 à Niakha en novembre 2010 et en août 2012). Aucune différence significative n'a été observée entre les taux d'infection observés dans les 6 villages ($\chi^2=4,18$, ddl=5, p=0,52).

Tableau 15 : Variations des taux d'infection *plasmodiale* chez les femelles d'*An. arabiensis* en fonction des villages et des trois années d'étude

Villages	Années	Total	Pos.	Neg.	TIP (IC95%)	OR	IC 95%	p
Barkédji	2010	930	59	871	6,3 (4,9-8,1)	1		
	2011	129	21	108	16,3 (10,4-23,8)	2,87	1,68-4,91	<0,0001
	2012	230	14	216	6,1 (3,4-10)	0,96	0,52-1,74	0,88
Kangalédji	2010	256	21	235	8,2 (5,1-12,3)	1		
	2011	13	1	12	7,7 (0,2-36)	0,93	0,11-7,53	0,95
	2012	69	1	68	1,4 (0-7,8)	0,16	0,02-1,24	0,05
Keur Bandji	2010	25	3	22	12 (2,5-31,2)	1		
	2011	1	1	0	100 (2,5-100)	-	-	0,02
	2012	1	0	1	0 (0-97,5)	-	-	0,72
Niakha	2010	127	13	114	10,2 (5,6-16,9)	1		
	2011	40	6	34	15 (5,7-29,8)	1,54	0,55-4,38	0,41
	2012	22	2	20	9,1 (1,1-29,2)	0,88	0,18-4,18	0,87
Wouro Samba Kibel	2010	55	7	48	12,7 (5,3-24,5)	1		
	2011	1	0	1	0 (0-97,5)	-	-	0,70
	2012	18	0	18	0 (0-18,5)	-	-	0,11
Wouro Sileymani	2010	17	0	0	0 (0-19,5)	-	-	-
	2011	0	0	0	0	-	-	-
	2012	0	0	0	0	-	-	-

Pos.= positif, Neg.=négatif, TI=taux d'infection plasmodiale, OR=odds ratio, IC=intervalle de confiance

2.7.3. Rythme quotidien de piqûres

Ce paramètre a été estimé à partir des données obtenues au Chapitre 3 (taux d'anthropophilie) et des taux d'agressivité.

Les études expérimentales ont montré que globalement la durée du cycle gonotrophique des femelles était de 3 jours. Par conséquent, nous avons estimé le rythme de piqûres des femelles d'*An. arabiensis* à 0,33. Sachant que les taux d'anthropophilie obtenus au chapitre 3 ont été respectivement de 35,11%, 57,69%, 35,83%, 61, 90%, 64,71% et 48% respectivement pour Barkédji, Keur Bandji, Niakha, Wouro Samba Kibel et Wouro Sileymani, le rythme quotidien de piqûres moyen a été de 0,167. Les valeurs les plus élevées ont été obtenues à Kangalédji (sol nu) et Wouro Samba Kibel (savane arbustive) et les plus faibles dans les villages de savane arborée (Tableau 16).

2.7.4. Taux quotidien de survie

Le taux quotidien moyen a été estimé à 0,838. Les valeurs les plus élevées ont été observées dans les villages savane arbustive (Wouro Samba Kibel et Wouro Sileymani) et dans le village de steppe (Keur Bandji) (Tableau 16).

2.7.5. Espérance de vie (EV) et espérance de vie infectante (EVI)

L'espérance de vie moyenne a été estimée à 6,533 jours avec des valeurs comprises entre 3,697 jours (Barkédji) et 9,2 jours (Wouro Sileymani). Concernant l'EVI, elle est en moyenne de 0,0275 jour avec les valeurs oscillant entre 0,016 à Barkédji et 0,038 à Keur Bandji (Tableau 16).

2.7.6. Capacité vectorielle

La capacité vectorielle a été en moyenne de 0,0125 et 0,005 à Barkédji, 0,019 à Kangalédji, 0,009 à Keur Bandji, 0,019 à Niakha, 0,012 à Wouro Samba Kibel et 0,011 à Wouro Sileymani. En d'autres termes, à partir d'un sujet infectant piqué par respectivement 3 femelles, 5,2 femelles, 1,2 femelles, 5,4 femelles, 2 femelles et 2 femelles à Barkédji, Kangalédji, Keur Bandji, Niakha, Wouro Samba Kibel et Wouro Sileymani, le nombre de nouvelles infections par jour correspond aux valeurs respectives obtenues pour la capacité vectorielle en absence de tout facteur limitant la transmission (Tableau 16).

2.7.7. Indice de stabilité

A l'exception du village de Barkédji, les valeurs obtenues dans les autres villages sont toutes inférieures comprises entre à 0,5 et 2,5. Le paludisme est donc de stabilité intermédiaire à instable dans la zone d'étude (Tableau 16).

Tableau 16 : Paramètres entomologiques de la transmission

Paramètres	Barkédji	Kangalédji	Keur Bandji	Niakha	W. S. Kibel	W. Sileymani
Nombre de PHN (ma)	3	5,2	1,2	5,4	2	2
Taux de parturité (TP)	0,444	0,453	0,706	0,55	0,714	0,722
Rythme quotidien de piqûre sur homme (a)	0,1155	0,2145	0,1914	0,1188	0,2046	0,1584
Durée du cycle gonotrophique en jours (x)	3	3	3	3	3	3
Taux quotidien de survie (p)	0,763	0,768	0,89	0,819	0,894	0,897
Durée du cycle extrinsèque (n)	10,37	10,37	9,57	9,57	11,68	10,37
Taux de survie après n jours	0,06	0,065	0,327	0,148	0,27	0,324
Espérance de vie en jours (1/-log p)	3,697	3,788	8,581	5,008	8,925	9,2
Espérance de vie infectante	0,016	0,017	0,038	0,029	0,03	0,035
Indice de stabilité	0,427	0,812	1,642	0,595	1,826	1,457
Capacité vectorielle	0,005	0,019	0,009	0,019	0,012	0,011

2.7.8. Taux d'inoculation entomologique

Le taux d'inoculation entomologique (TIE) évalué par le produit entre les densités agressives et les taux d'infection plasmodiale par le nombre de piqûres infectées par homme par nuit (PIHN). Le taux d'inoculation entomologique moyen a été estimé respectivement à $0,23 \pm 0,06$ PIHN, $0,20 \pm 0,08$, $0,04 \pm 0,03$, $0,21 \pm 0,07$, $0,05 \pm 0,03$ et 0 PIHN à Barkédji, Kangelédji, Keur Bandji, Niakha, Wouro Samba Kibel et Wouro Sileymani.

Globalement, la transmission n'a été effective durant toute la période d'étude (de juillet 2010 à décembre 2012) que dans les deux villages de savane arborée et dans le village de sol nu. Dans le village de steppe, elle n'a été perceptible qu'en 2010 et 2011 alors que dans les deux villages de savane arbustive, elle n'a été perceptible que dans le village de Wouro Samba Kibel en 2010 (Figure 33).

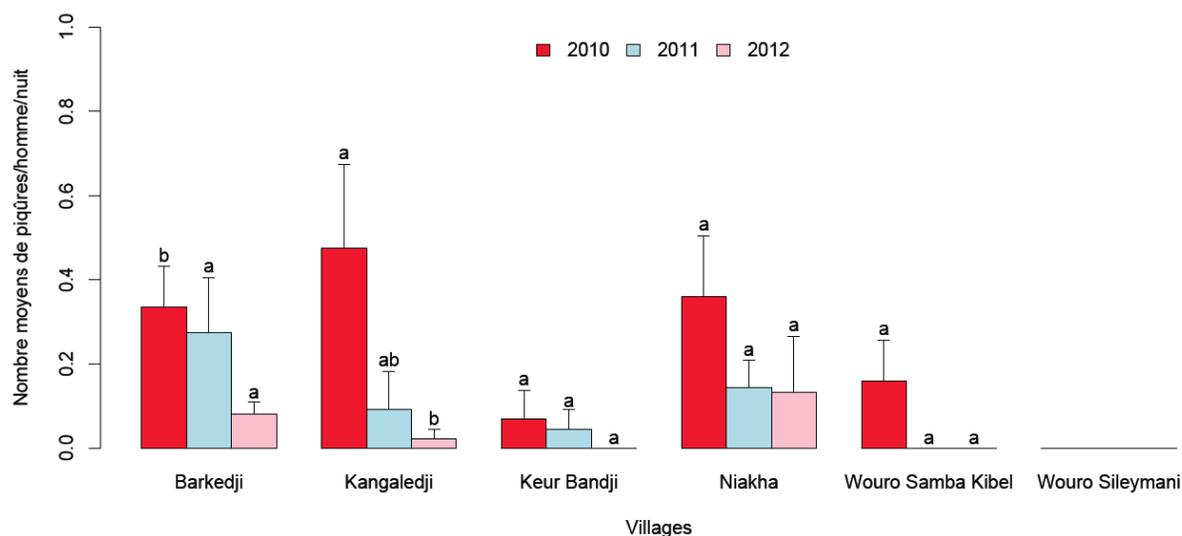


Figure 33 : Variations annuelles des taux d'inoculation entomologique dans les 6 villages. Des lettres différences au dessus des barres indiquent des différences statistiquement significatives

L'analyse comparée des TIE moyens entre les différentes années d'étude dans chacun des villages, montre l'absence de différence significative entre Wouro Samba Kibel, Keur Bandji et Niakha. Des différences significatives ont cependant été observées dans les villages de Barkédji et Kangelédji. Dans le village de Barkédji, le TIE a été significativement plus élevé en 2010 comparativement à 2011 et 2012. Il en a été de même dans le village de Kangelédji (Figure 33).

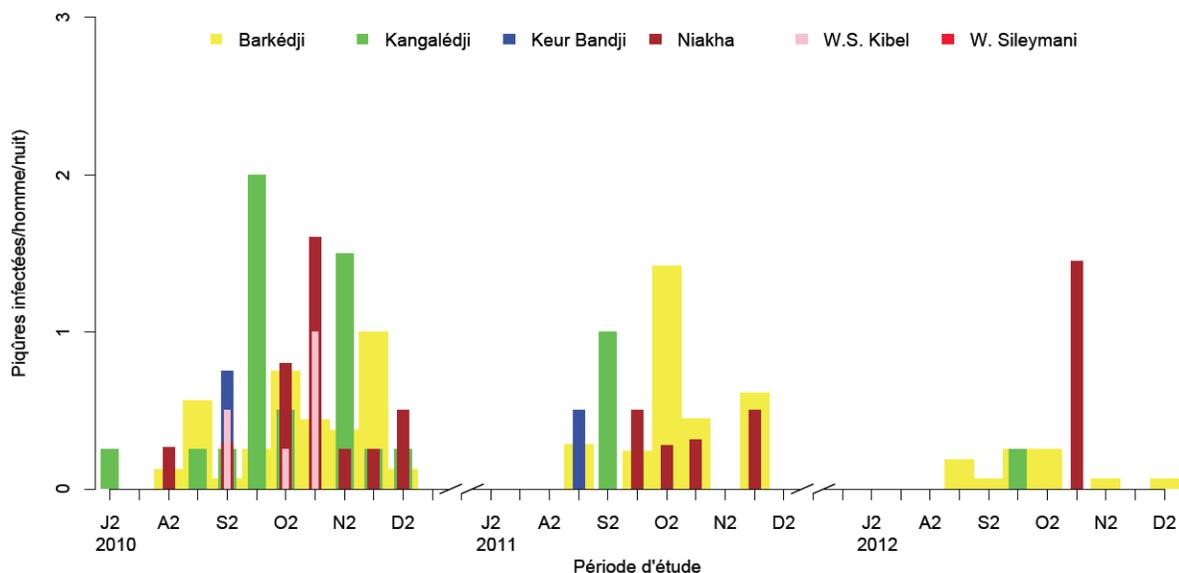


Figure 34 : Variations saisonnières des taux d'inoculation entomologique dans les 6 villages

L'analyse de la dynamique temporelle de la transmission montre d'une manière générale une transmission étalée durant la saison des pluies avec un pic observé selon les années et les villages entre septembre et novembre. Dans les deux villages de savane arborée, la transmission paraît plus stable en comparaison avec les autres villages en termes d'intensité et de fréquence. Pour le cas particulier du village de Barkédji, elle a été observée durant presque toutes les quinzaines investiguées. Dans les autres villages, elle a été un peu moins régulière et parfois très sporadique (Figure 34).

3. Sensibilité aux insecticides

L'étude de la sensibilité aux insecticides a été réalisée à partir de stades aquatiques d'*An. gambiae* collectées dans le village de Barkédji au cours de la saison des pluies de 2012 et 2013. Les insecticides utilisés étaient un organochloré (DDT), 3 pyréthriinoïdes (deltaméthrine, lambdacyhalothrine et perméthrine) et un carbamate (bendiocarb).

La figure 35 présente les taux de mortalité 24h après exposition. Aussi bien pour 2012 que pour 2013, les populations montrent une résistance au DDT et à la deltaméthrine. Pour la lambdacyhalothrine, une baisse de sensibilité a été observée en 2012 alors que les populations ont été sensibles à la perméthrine pour 2013) et au bendiocarb aussi bien pour 2012 que 2013.

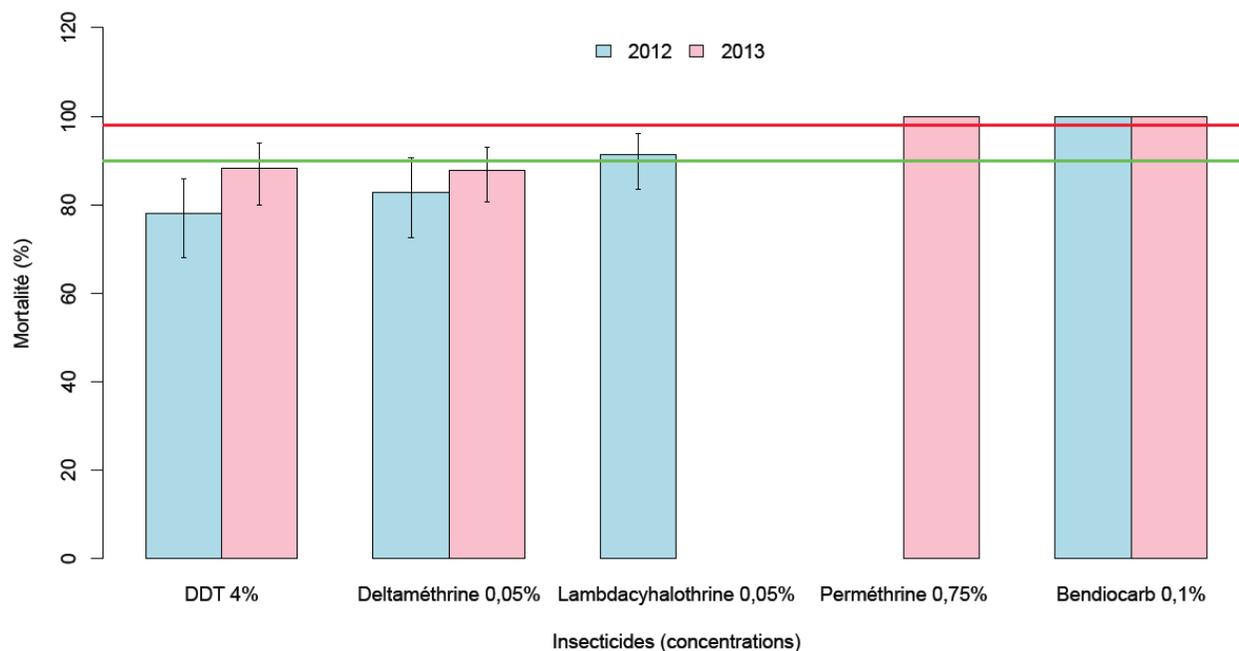


Figure 35 : Mortalité observée avec les insecticides testés. Les lignes vertes et rouges indiquent respectivement les limites de 90 et 98%.

L'étude des KD50 et KD95 pour le DDT et les pyréthriinoïdes indiquent que les résistances observées pour le DDT sont associées à un allongement des temps de KD50 et KD95 par rapport à la souche témoin (KD50=11,8 mn et KD95=18,4 mn). Pour la lambdacyhalothrine, les temps de KD50 et KD95 sont moins faibles par rapport à ceux observés chez les insecticides pour lesquels les populations de Barkédji sont résistantes (Tableau 17). Quelque soit l'année considérée, les KD50 et KD95 ont toujours été plus élevés pour le DDT en comparaison aux autres insecticides.

Tableau 17 : Variations des KD50 et KD95 pour le DDT et les pyréthriinoïdes testés

Insecticides		2012	2013
DDT	Nombre testé		
	KD50	59,45 (50,70-74,34)	30,79 (28,11-33,67)
	KD95	385,06 (241,68-794,79)	68,78 (59,27-84,59)
Deltaméthrine	Nombre testé		
	KD50	28,46 (25,18-32,22)	7,64 (4,94-9,60)
	KD95	164,93 (119,26-267,52)	22,88 (19,14-30,98)
Perméthrine	Nombre testé	-	
	KD50	-	8,06 (5,54-9,86)
	KD95	-	21,99 (18,60-29,28)
Lambdacyhalothrine	Nombre testé		-
	KD50	22,96 (20,94-25,01)	-
	KD95	78,23 (66,32-97,16)	-

4. Discussion

Au cours de cette étude, la présence de 7 espèces anophéliennes a été mise en évidence parmi la vingtaine d'espèces décrites au Sénégal (Diagne *et al.*, 1994).

L'étude des indices de diversité a montré un caractère plus ou moins constant du nombre d'espèces collectées dans les villages par année ; les différences observées étant dues à des variations entre les années. L'étude des similarités a montré par ailleurs que les villages de savane (arborée comme arbustive) étaient très proches en considérant les espèces présentes ou absentes. Une telle observation serait ainsi en faveur d'une implication des types d'occupation des sols dans la présence ou l'absence de certaines espèces.

Comme les études antérieures l'avaient montré (Lemasson *et al.*, 1997 ; Dia *et al.*, 2005), *An. arabiensis* a été l'espèce prédominante quelque soit le type d'occupation considérée. *An. coluzzii* a été également observé à l'exception du village de steppe durant les trois années d'étude. Ce résultat pourrait indiquer malgré la faible présence d'*An. coluzzii* une adaptation différentielle selon le type d'occupation, ce qui mériterait des études plus poussées pour étayer cet hypothèse.

En plus d'*An. arabiensis*, *An. pharoensis* a été également bien représenté dans les différents

villages puisqu'étant collecté dans chacun des 6 villages pendant chacune des trois années d'étude à l'exception du village de sol nu en 2011 et 2012.

Quelque soit le village et le type d'occupation des sols considérés, les densités agressives ont été plus élevées en 2010. Entre les 6 villages, les densités les plus faibles ont été observées dans les villages de savane arbustive et de steppe en comparaison des villages de savane arborée et de sol nu. Les conditions de développement seraient ainsi plus favorables dans ces derniers.

L'analyse des variations saisonnières ont montré d'une manière générale des pics d'agressivité décalés par rapport à la pluviométrie à l'exception des villages de steppe et de savane arbustive où ces pics ont été localisés en milieu ou en fin de saison des pluies. Ces observations semblent corroborer celles de Lemasson *et al.*, (1997) qui avaient observé des résultats similaires au cours de deux années d'étude successives (1994 et 1995). Cependant, aucune corrélation significative n'a été observée avec la pluviométrie même si dans certains cas une corrélation positive a été observée. En effet, sur les 28 corrélations, seules 7 ont été négatives. Ces observations sont à mettre en relation directe avec la biologie des stades aquatiques d'*An. arabiensis* qui se fait dans des collections claires, ensoleillées issues pour la plupart des pluies (Gimnig *et al.*, 2001). Cette association ainsi que les variations observées dans le rythme et la fréquence des pluies dans les différents villages expliqueraient ainsi les dynamiques différentes des populations d'*An. arabiensis* entre les 6 villages.

L'étude des comportements de piqûres montre des tendances plus exophages qu'endophages dans l'ensemble des villages avec un maximum d'agressivité horaire dans la seconde partie de la nuit. Ces résultats diffèrent de ceux observés dans la zone par Lemasson *et al.*, (1997) qui avaient montré des tendances plus endophages. Ces changements opérés seraient le résultat d'une adaptation des populations aux mesures de contrôle mises en place (moustiquaires imprégnées particulièrement) à l'image de ce qui a été observé récemment chez d'autres espèces comme *An. funestus* (Moiroux *et al.*, 2012 ; Sougoufara *et al.*, 2014).

A l'exception du village de Wouro Sileymani, la transmission a été perceptible dans les 5 autres villages, les plus élevées étant observées dans les villages de savane arborée et de sol nu

durant les trois années d'étude. L'analyse temporelle a montré en plus un pic entre septembre et novembre (entre le milieu et la fin de la saison des pluies), ce qui est en général le cas dans cette zone (Robert *et al.*, 1998 ; Lemasson *et al.*, 1997).

L'étude des paramètres de la transmission montre des indices de stabilité faible ($<0,5$), ce qui caractérise un paludisme instable quelque soit le type d'occupation et montre ainsi une uniformité de l'endémicité dans cette zone.

L'utilisation des mesures de contrôle classiques (moustiquaires imprégnées, aspersions intradomiciliaires) pourraient se révéler problématiques au vu des variations observées dans les dynamiques d'*An. arabiensis* et son comportement (tendance exophage). Cette situation est en plus exacerbée par les niveaux de résistance aux insecticides observés avec le DDT et les pyréthrinoïdes utilisés (deltaméthrine et lambda-cyhalothrine). Des mesures ciblant les populations exophages devraient ainsi être explorées dans le cadre des stratégies de contrôle envisagées dans cette zone.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Cette étude a permis de mettre en évidence encore une fois la prédominance d'*An. arabiensis* dans cette partie sahélienne du Sénégal. Il a été le seul vecteur identifié dans chacune des quatre types d'occupation des sols identifiés. Il a cependant présenté des caractéristiques bio-écologiques différentes selon les types d'occupation des sols et les paramètres climatiques étudiés. Il a été en particulier démontré que dans cette zone pastorale, *An. arabiensis* présente des préférences trophiques hétérogènes liées à la localisation spécifique des villages et des types d'occupation des sols. Sur le plan temporel, les taux d'anthropophilie ont été influencés par la présence de surfaces en eau qui détermine dans cette zone les aires de regroupement des populations humaines et animales. L'étude de l'influence des paramètres climatiques sur les densités vectorielles a montré une forte association avec la pluviométrie qui est très hétérogène dans la zone en terme de rythme, dynamique et quantité.

La transmission a été relativement faible par rapport aux autres zones bio-géographiques du Sénégal mais plus élevée dans les villages de savane arborée et de sol nu qui serait ainsi les sites les plus à risque par rapport aux villages de savane arbustive et de steppe. Cette hétérogénéité a été associée aussi bien aux facteurs climatiques étudiés (humidité, température et pluviométrie particulièrement) mais également à la localisation spécifique des villages.

L'étude de la sensibilité aux insecticides a montré une résistance aux pyréthriinoïdes (deltaméthrine et lambdacyhalothrine principalement). Ainsi, du fait du comportement exophage d'*An. arabiensis* dans la zone, l'utilisation des stratégies de lutte actuelles basées sur les moustiquaires imprégnées et les aspersion intradomiciliaires pourrait s'avérer problématique. Il existe cependant, des possibilités de gestion de la résistance observée par l'utilisation d'autres insecticides de la classe des carbamates vis-à-vis desquels les populations ont manifesté une bonne sensibilité.

En perspective, cette étude devrait se poursuivre dans le cadre de l'établissement d'un système d'information géographique pour la mise en place progressive d'un système d'alerte précoce à travers le développement ou la validation de modèles existants. Cette stratégie pourrait se superposer à la politique d'amélioration de la surveillance des cas et la réponse rapide, mise en

place par le Programme National de Lutte contre le Paludisme (PNLP) et permettre à terme de participer aux processus de planification et d'amélioration des interventions préventives des épidémies dans cette zone de paludisme instable. Sur un autre plan, la préservation de l'efficacité des interventions actuelles nécessite de développer des stratégies de lutte contre les populations exophages d'*An. arabiensis* de cette zone associées à des études spécifiques de la biologie du comportement et des études de surveillance de la résistance aux insecticides et de détermination des mécanismes impliqués.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdalla H, Matambo TS, Koekemoer LL, Mnzava AP, Hunt RH, Coetzee M, 2008 – Insecticide susceptibility and vector status of natural populations of *Anopheles funestus* from Sudan. *Transactions of The Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 102 : 263-271.
- African Network for Vector Resistance (ANVR), 2005 - Atlas of insecticide resistance in malaria vectors of the WHO African region. OMS, 1-27.
- Akogbeto M, Chippaux JP, Coluzzi M, 1995 – Etude Entomologique sur la Transmission du Paludisme Côtier Lagunaire : Cas d'un village construit sur un lac d'eau saumâtre. *Médecine Tropicale* 75 : 219-227.
- Akogbeto M & Yakoubou S, 1999 - Resistance of malaria vectors to pyrethrins used for impregnating mosquito nets in Benin, West Africa. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique* 92 : 123-130.
- Antonio-Nkondjio C, Ndo C, Costantini C, Awono-Ambene H, Fontenille D, Simard F, 2009 - Distribution and larval habitat characterization of *Anopheles nili* and *An. moucheti* along river networks in south Cameroon. *Acta Tropica* 112 : 270-276.
- Antonio-Nkondjio C, Simard F, 2013 - Highlights on *Anopheles nili* and *Anopheles moucheti*, Malaria Vectors in Africa. INTECH open science Chapter 8 : 221-238.
- Antonio-Nkondjio C, Simard F, Cohuet A, Fontenille D, 2002 - Morphological variability in *Anopheles moucheti* is not indicative of speciation : evidences from sympatric south Cameroon populations. *Infection Genetics and Evolution* 2 : 69-72.
- Aubry P, Gaüzère BA, 2015 - Médecine Tropicale des pays de l'Océan indien. 25 pages

- Awono-Ambene HP, Kengne P, Simard F, Antonio-Nkondjio C, Fontenille D., 2004 - Description and bionomics of *Anopheles (Cellia) ovengensis* (Diptera : Culicidae), a new malaria vector species of the *Anopheles nili* group from south Cameroon. *Journal of Medical Entomology* 41(4) : 561-568.
- Ayala D, Costantini C, Ose K, Kamdem GC, Antonio-Nkondjio C, Agbor JP, Awono Ambene HP, Fontenille D, Simard F, 2009 - Habitat suitability and ecological niche profile of major malaria vectors in Cameroon. *Malaria Journal* 8 : 307.
- Ba Y, Diallo D, Dia I, Diallo M, 2006 - Comportement trophique des vecteurs du virus de la fièvre de la vallée du Rift : implications dans l'épidémiologie de la maladie. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique* 99(4) : 283–289.
- Barrozo RB, Schilman PE, Minoli SA, Lazzari CR, 2004 - Daily rhythms in disease vector insects. *Biological Rhythm Research* 35 : 79-92.
- Bayoh MN, Lindsay SW, 2004 - Temperature-related duration of aquatic stages of the Afrotropical malaria vector mosquito *Anopheles gambiae* in the laboratory. *Medical and Veterinary Entomology* 18 : 174–179.
- Beier JC, Perkins PV, Wirtz RA, Koros, J., Diggs, D., Gargan II, T.P., Koech, D.K 1988 - Bloodmeal identification by direct enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA), tested on *Anopheles* (Diptera : Culicidae) in Kenya,” *Journal of Medical Entomology* 25, 9–16.
- Bi P, Tong S, Donald K, Parton K, Ni J, 2003 - Climatic variables and transmission of malaria : a 12-year data analysis in Shuchen County. *China Public Health Reports* 118 : 65.
- Bomblies A, Eltahir EA, 2009 - Assessment of the impact of climate shifts on malaria transmission in the Sahel. *Ecohealth* 6 : 426–437.
- Boreham PFL, Garrett-Jones C, 1973 - Prevalence of mixed blood meals and double feeding in a

malaria vector (*Anopheles sacharovi* Favre). *Bulletin of The World Health Organisation* 48 : 605–614.

Bouma MJ, Sondorp HE, Van der Kaay HJ, 1994 - Health and climate change. *The Lancet* 343 : 302.

Bruce-Chwatt LJ, Garrett-Jones C, Weitz B, 1966 - Ten year study (1955–1964) of host selection by anopheline mosquitoes. *Bulletin of The World Health Organisation* 35 : 405–439.

Brunhes J, Le Goff G, Manga L, Geoffroy B, 1998 - *Anopheles* afro-tropicaux. IV - Mise au point sur les espèces et sous-espèces du groupe *Anopheles (Cellia) moucheti* ; rehabilitation d'*An. (Cellia) multicinctus* et d'*An. (Cellia) garnhami basilewskyi*. *Annales de la Société Entomologique de France* 34 : 397-405.

Bryan JH, Di Deco MA, Petrarca V, Coluzzi M, 1982 -Inversion polymorphism and incipient speciation in *Anopheles gambiae* s.s. in the Gambia (West Africa). *Genetica* 59 : 167-176.

Bryan JH, Petrarca V, Di Deco MA, Coluzzi M, 1987 - Adult behaviour of members of the *Anopheles gambiae* complex in the Gambia with special reference to *An. melas* and its chromosomal variants. *Parassitologia* 29 : 221-249.

Burkot TR, Graves PM, Paru R, Lagog M, 1988 - Mixed blood feeding by the malaria vectors in the *Anopheles punctulatus* complex (*Diptera : Culicidae*). *Journal of Medical Entomology* 25 : 205–213.

Burkot TR, Williams JL, Schneider I 1984 - Identification of *Plasmodium falciparum* infected mosquitoes by a double antibody enzyme-linked immunosorbent assay. *American Journal of Tropical Medecine and Hygiene* 33 : 783-788.

Caputo B, Nwakanma D, Jawara M, Adiamoh M, Dia I, Konate L, Petrarca V, Conway DJ, della Torre A, 2008 – *Anopheles gambiae* along The Gambia, with particular reference to the

molecular forms of *An. gambiae* s.s. *Malaria Journal* 7 : 182.

Carrara GC, Petrarca V, Niang M, Coluzzi M, 1990 - *Anopheles pharoensis* and transmission of *Plasmodium falciparum* in the Senegal River delta, West Africa. *Medical and Veterinary Entomology* 4 : 421–424.

Cisse MB, Keita C, Dicko A, Dengela D, Coleman J, Lucas B, Mihigo J, Sadou A, Belemvire A, George K, Fornadel C, Beach R., 2015 - Characterizing the insecticide resistance of *Anopheles gambiae* in Mali. *Malaria Journal* 14 : 327.

Coetzee M, Craig M, le Sueur D, 2000 - Distribution of African malaria mosquitoes belonging to the *Anopheles gambiae* complex. *Parasitology Today* 16 : 74–77.

Coetzee M, Hunt RH, Wilkerson R, Della Torre A, Coulibaly MB, Besansky NJ, 2013 - *Anopheles coluzzii* and *Anopheles amharicus*, new members of the *Anopheles gambiae* complex. *Zootaxa*. 3619 : 246–274.

Cohuet A, Dia I, Simard F, Raymond M, Fontenille D, 2004 – Population structure of the malaria vector *Anopheles funestus* in Senegal based on microsatellite and cytogenetic data. *Insect Molecular Biology* 13 (3) : 251-258.

Collins FH, Mendez MA, Rasmussen MO, Mehaffey PC, Besansky NJ, Finnerty V, 1987 - A ribosomal RNA gene probe differentiates member species of the *Anopheles gambiae* complex. *Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 37(1) : 37-41.

Coluzzi M, Petrarca V, Di Deco MA, 1985 - Chromosomal inversion intergradation and incipient speciation in *Anopheles gambiae*. *Bollettino di Zoologia* 52 : 45-63.

Coluzzi M, Sabatini A, Petrarca V, Di Deco MA, 1979 – Chromosomal differentiation and adaptation to human environment in the *Anopheles gambiae* complex. *Transactions of The Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 73 : 483-497.

Colwell RR, Epstein PR, Gubler D, Maynard N, McMichael AJ, Patz JA, Sack RB, Shope R, 1998 - Climate change and human health. *Science* 279 : 968–969.

Conseil Scientifique pour l’Afrique (CSA) : Phytogéographie (Yangambi). Londres : CCTA, 1956 : 35.

Costantini C, Sagnon NF, Ilboudo-Sanogo E, Coluzzi M, Boccolini D, 1999 – Chromosomal and bionomic heterogeneities suggest incipient speciation in *Anopheles funestus* from Burkina Faso. *Parassitologia* 41 : 595-611.

Cox-Singh J, Singh B, 2008 - Knowlesi malaria : newly emergent and of public health importance? *Trends in Parasitology* 24, 406-410

Craig MH, Snow RW, le Sueur DA, 1999 - Climate-based distribution model of malaria transmission in Sub-Saharan Africa. *Parasitology Today* 15(3) : 105-111.

Da DF, Diabate A, Mouline K, Lefèvre T, Awono-Ambene HP, Ouedraogo JB, Dabiré KR, 2013 - *Anopheles rufipes* remains a potential malaria vector after the first detection of infected specimens in 1960 in Burkina Faso. *Journal of Infectious Disease and Therapy* 1 : 1–3.

Dabiré RK, Namountougou M, Diabaté A, Soma DD, Bado J, Toé HK, Bass C, Combarry P, 2014 - Distribution and Frequency of kdr Mutations within *Anopheles gambiae s.l.* Populations and First Report of the Ace.1G119S Mutation in *Anopheles funestus* from Burkina Faso (West Africa). *Plos One* 31, 9(7) : e101484

Danis M, Mouchet J, 1991 – Paludisme. *Editions Marketing Ellipses / AUPELF*, Paris.

Davidson G, 1954 – Estimation of the survival-rate of anopheline mosquitoes in nature. *Nature* 174 : 792-793.

De Meillon B, Van Eeden GJ, Coetzee L, Coetzee M, Meiswinkel R, Du Toit CLN, Hansford

CF, 1977 - Observations on a species of the *Anopheles funestus* subgroup, a suspected exophilic vector of malaria parasites in northeastern Transvaal, South Africa. *Mosquito News* 37 (4) : 657-661.

Detinova TS, 1962 - *Age Grouping Methods in Diptera of Medical Importance with Special Reference to Some Vectors of Malaria*, WHO Monograph, Geneva, Switzerland.

Dia I, Diallo D, Duchemin JB, Ba Y, Konate L, Costantini C, Diallo M, 2005 - Comparisons of human-landing catches and odor-baited entry traps for sampling malaria vectors in Senegal. *Journal of Medical Entomology* 42 : 104–109.

Dia I, Diop T, Rakotoarivony I, Kengne P, Fontenille D, 2003 - Bionomics of *Anopheles gambiae* Giles, *An. arabiensis* Patton, *An. funestus* Giles and *An. nili* (Theobald) (Diptera : Culicidae) and transmission of *Plasmodium falciparum* in a Sudano-Guinean zone (Ngari, Senegal). *Journal of Medical Entomology* 40 (3) : 279-283.

Dia I, Guelbeogo M, Ayala D, 2013 - Advances and perspectives in the study of the malaria mosquito *Anopheles funestus*. In "*Anopheles* mosquitoes – New insights into malaria vectors", edited by Sylvie Manguin. InTech Publisher, Chapter 7 : 197-220.

Dia I, Konate L, Samb B, Sarr JB, Diop A, Rogerie F, Faye M, Riveau G, Remoue F, Diallo M, Fontenille D, 2008 - Bionomics of malaria vectors and relationship with malaria transmission and epidemiology in three physiographic zones in the Senegal River Basin. *Acta Tropica* 105 : 145–153.

Dia I, Lochouarn L, Boccolini D, Costantini C, Fontenille D, 2000 - Spatial and temporal variations of the chromosomal inversion polymorphism of *Anopheles funestus* in Senegal. *Parasite* 7 : 179-184.

Diabate A, Brengues C, Baldet T, Dabiré KR, Hougard JM , Akogbeto M, Kengne P, Simard F,

Guillet P, Hemingway J, Chandre F, 2004 The spread of the Leu-Phe kdr mutation through *Anopheles gambiae* complex in Burkina Faso : genetic introgression and de novo phenomena. *Tropical Medicine and International Health* 9 (12) : 1267–1273.

Diagne N, Fontenille D, Konate L, Faye O, Traoré-Lamizana M, Legros F, Molez JF, Trape JF, 1994 - Les Anophèles du Sénégal. Liste commentée et illustrée. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique* 4 : 267-277.

Djegbe I, Boussari O, Sidick A, Martin T, Ranson H, Chandre F, Akogbeto M, Corbel V, 2011 - Dynamics of insecticide resistance in malaria vectors in Benin : first evidence of the presence of L1014S *kdr* mutation in *Anopheles gambiae* from West Africa . *Malaria Journal* 10 : 261.

Djogbénou L, Pasteur N, Bio-Bangana S, Baldet T, Irish SR, Akogbeto M, Weill M, Chandre F, 2010 - Malaria vectors in the Republic of Benin : distribution of species and molecular forms of the *Anopheles gambiae* complex. *Acta Tropica* 114 (2) : 116-122.

Edwards FW, 1941 – Mosquitoes of the Ethiopain region. III. Culicine adults and pupa. British Museum (Natural history). London.

Elissa N, Karch S, 2005 - Re-emergence of *Anopheles funestus* and its possible effect on malaria transmission on Mayotte Island, Indian Ocean. *Journal of the American Mosquito Control Association* 21 (4) : 472-473.

Fane M, 2011 - Impact du climat sur l'écologie et la transmission du paludisme : analyse du risque palustre dans le septentrion malien. Thèse de doctorat. Université de Grenoble, 145 pages.

Fanello C, Santolamazza F, Della Torre A, 2002 - Simultaneous identification of species and molecular forms of the *Anopheles gambiae* complex by PCR-RFLP. *Medical and Veterinary Entomology* 16 : 461–464.

FAO : Africover, classification de l'occupation du sol. RSC Séries 1997. 70 : 80 pages.

- Faye ND, 2010 - Etude de quelques aspects de la biologie des vecteurs du paludisme (*Diptera : Culicidae*) en relation avec l'occupation des sols et les facteurs climatiques en zone sahélienne du Sénégal. Master Biologie Animale n° 43(option entomologie médicale). Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 42 pages.
- Faye O, 1987 - Contribution à l'étude des *Anophelinae* (Diptera. Culicidae) et de la transmission du paludisme dans le zone du barrage anti-sel de Bignona (Ziguinchor, Sénégal). Thèse de doctorat de troisième cycle de l'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar. 202 pages.
- Faye O, 1994 - Le paludisme au Sénégal : écologie de la parasitose et perspectives de lutte. Thèse de doctorat és Sciences Naturelles de l'Université Cheikh Anta DIOP. Dakar. 285 pages.
- Faye O, Diallo S, Gaye O, Ndir O, Faye O, 1992 - Efficacité comparée de l'utilisation des pièges lumineux du type CDC et des sujets humains pour l'échantillonnage des populations anophéliennes. Résultats obtenus dans la zone de Bignona(Sénégal). *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique* 85 : 185-189.
- Faye O, Fontenille D, Herve JP, Diack PA, Diallo S, Mouchet J, 1993 - Le paludisme en zone sahélienne du Sénégal. 1. Données entomologiques sur la transmission. *Annales de la Société Belge de Médecine Tropicale* 73 : 21-30.
- Fillinger U, Sonye G, Killeen GF, Knols BG, Becker N, 2004 - The practical importance of permanent and semi-permanent habitats for controlling aquatic stages of *Anopheles gambiae sensu lato* mosquitoes : operational observations from a rural town in western Kenya. *Tropical Medicine and International Health* 9 : 1274–1289.
- Fontenille D, Cohuet A, Awono-Ambene H.P, Antonio-Nkondjio C, Wondji C, Kengne P, Dia I, Boccolini D, Duchemin J.B, Rajaonarivelo V, Dabire R, Adja-Akre M, Ceainu C, Le Goff G. & Simard F, 2003 - Systématique et biologie des anophèles vecteurs de *Plasmodium* en Afrique, données récentes. *Médecine Tropicale* 63 : 247-253.

Fontenille D, Lochouarn L, Diagne N, Sokhna C, Lemasson JJ, Diatta M, Konate L, Faye F, Rogier C, Trape JF, 1997a - High annual and seasonal variations in malaria transmission by anopheline and vector species composition in Dielmo, a holoendemic area in Senegal. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 56 : 247-253.

Fontenille D, Lochouarn L, Diatta M, Sokhna C, Dia I, Diagne N, Lemasson JJ, Ba K, Tall A, Rogier C, Trape JF, 1997b - Four years entomological study of the transmission of seasonal malaria in Senegal and the bionomics of *Anopheles gambiae* and *Anopheles funestus*. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 91 : 647-652.

Gage KL, Burkot TR, Eisen RJ, Hayes EB, 2008 - Climate and vector borne diseases. *American Journal of Preventive Medicine* 35 : 436-450.

Garrett-Jones C, 1964 - The human blood index of malaria vectors in relation to epidemiological assessment. *Bulletin of The World Health Organization* 30 : 241-261.

Garrett-Jones C, Boreham PFL, Pant CP, 1980 - Feeding habits of anophelines (*Diptera* : *Culicidae*) in 1971-1978, with reference to the human blood index : a review. *Bulletin of Entomological Research* 70 : 165-185.

Gaye O, Konate L, Faye A, Fall IS, Diame M, Coly B, Sambou B, Ly A, 2002 - Analyse des épidémies de paludisme survenues au niveau de la vallée du fleuve Sénégal. 5^{ème} Congrès de la SOAP, Dakar, 10-14 avril 2002.

Gillies MT, Coetzee M, 1987 - A supplement to the *Anophelinae* of Africa South of the Sahara. Publication of South African Institute for Medical Research 55 : 143 pages.

Gillies, M.T., De Meillon, B., 1968. The Anophelinae of Africa south of the Sahara (Ethiopian zoogeographical region). Publication of South African Institute for Medical Research 54, 343 pages.

- Gimnig JE, Ombok M, Kamau L, Hawley WA, 2001 - Characteristics of larval anopheline (*Diptera : Culicidae*) habitats in Western Kenya. *Journal of Medical Entomology* 38 : 282–288.
- Githeko AK, Lindsay SW, Confalonieri UE, Patz JA, 2000 - Changement climatique et maladies à transmission vectorielle : une analyse régionale. *Bulletin de l'Organisation Mondiale de la santé* 78 : 1136-1147.
- Githeko AK, Service MW, Mbogo CM, Atieli FK, Juma FO, 1994 - Origin of blood meals in indoor and outdoor resting malaria vectors in western Kenya. *Acta Tropica* 58(3-4) : 307–316
- Guelbeogo WM, Sagnon NF, Liu F, Besansky NJ, Costantini C, 2014 – Behavioural divergence of sympatric *Anopheles funestus* populations in Burkina Faso. *Malaria Journal* 13 : 65.
- Haddow AJ, 1945 - The mosquitoes of Bwamba County, Uganda. II- Biting activity with special reference to the influence of microclimate. *Bulletin of Entomological Research* 36 : 33-73.
- Haridi A, 1972 - Inheritance of DDT resistance in species A and B of the *Anopheles gambiae* complex. *Bulletin of The World Health Organization* 47 : 619–626.
- Hemingway J, 1983 - Biochemical studies on Malathion resistance in *Anopheles funestus* from Sudan. *Transactions of The Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 77 : 477–480.
- Himeidan YE, Chen H, Chandre F, Martin J. Donnelly, and Guiyan Yan, 2007 - Short report : permethrin and DDT resistance in the malaria vector *Anopheles funestus* from eastern Sudan. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 77(6) : 1066–1068.
- Ijumba JN, Mwangi RW, Beier JC, 1990 - Malaria transmission potential of *Anopheles* mosquitoes in the Mwea-Tebera irrigation scheme, Kenya. *Medical and Veterinary*

Entomology 4(4) : 425–432.

Ijumba JN, Shenton FC, Clarke SE, Mosha FW, Lindsay SW, 2002 - Irrigated crop production is associated with less malaria than traditional agricultural practices in Tanzania. *Transactions of The Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 96 : 476–480.

Jacob BG, Muturi E, Halbig P, Mwangangi J, Wanjogu RK, Mpanga E, Funes J, Shililu J, Githure J, Regens JL, Novak RJ, 2007 - Environmental abundance of *Anopheles* (Diptera : Culicidae) larval habitats on land cover change sites in Karima Village, Mwea Rice Scheme, Kenya. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 76 : 73–80.

Julvez J, Michault A, Ali Halidi MA, 1997. Evaluation de la situation du Paludisme à Mayotte, archipel des Comores. *Médecine Tropicale* 57 (3 suppl) : 79.

Kabbale FG, Akol AM, Kaddu JB, Onapa AW, 2013 - Biting patterns and seasonality of *Anopheles gambiae sensu lato* and *Anopheles funestus* mosquitoes in Kamuli District, Uganda. *Parasites and Vectors* 6 : 340.

Keiser J, De Castro MC, Maltese MF, Bos R, Tanner M, Singer BH, Utzinger J, 2005 - Effect of irrigation and large dams on the burden of malaria on a global and regional scale. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 72 : 392–406.

Koenraadt CJM, Githeko AK, Takken W, 2004 - The effects of rainfall and evapotranspiration on the temporal dynamics of *Anopheles gambiae s.s.* and *Anopheles funestus* in a Kenyan village. *Acta Tropica* 90 : 141–153.

Konate L, Diop A, Sy N, Faye MN, Deng Y, Izri A, Faye O, Mouchet J, 2001 - Comeback of *Anopheles funestus* in Sahelian Senegal. *The Lancet* 358 : 336.

Konaté L, Faye O, Gaye O, Sy N, Diop A, Diouf M, Trape JF, Molez JF, 1999 - Zoophagie et hôtes alternatifs des vecteurs du paludisme au Sénégal. *Parasite* 6(3) : 259–267.

- Krefis AC, Schwarz NG, Nkrumah B, Acquah S, Loag W, Oldeland J, Sarpong N, Adu-Sarkodie Y, Ranft U, May J, 2011 - Spatial analysis of land cover determinants of malaria incidence in the Ashanti Region. Ghana. *PLoS One* 6 : 17905.
- Kulkarni MA, Rowland M, Alifrangis M, Mosha FW, Matowo J, Malima R, Peter J, Kweka E, Lyimo I, Magesa S, Salanti A, Rau ME, Drakeley C., 2006 - Occurrence of the leucine-to-phenylalanine knockdown resistance (kdr) mutation in *Anopheles funestus* populations in Tanzania, detected by a simplified high-throughput SSOP-ELISA method. *Malaria Journal* 5 : 56.
- Lacaux JP, Tourre YM, Vignolles C, Ndione JA, Lafaye M, 2007 - Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing : application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment* 106 : 66–74.
- Lassiter M, Apperson C, Roe R, 1995 - Juvenile hormone metabolism during the fourth stadium and pupal stage of the southern house mosquito *Culex quinquefasciatus* Say. *Journal of Insect Physiology* 41 : 869–876.
- Lebel T, Diedhiou A, Laurent H, 2003 - Seasonal cycle and interannual variability of the Sahelian rainfall at hydrological scales. *Journal of Geophysical Research* 108 : 83–89.
- Lemasson JJ, Fontenille D, Lochouart L, Dia I, Simard F, Ba K, Diop A, Diatta M, Molez JF, 1997 - Comparison of behavior and vector efficiency of *Anopheles gambiae* and *An. arabiensis* (Diptera : Culicidae) in Barkedji, a sahelian area of Senegal. *Journal of Medical Entomology* 34 : 396-403.
- Lindblade KA, Walker ED, Onapa AW, Katungu J, Wilson ML, 1999 - Highland malaria in Uganda : prospective analysis of an epidemic associated with El Niño. *Transactions of The Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 93 : 480–487.
- Lindblade KA, Walker ED, Onapa AW, Katungu J, Wilson ML, 2000 - Land use change alters

malaria transmission parameters by modifying temperature in a highland area of Uganda. *Tropical Medicine and International Health* 5 : 263–274.

Lindsay SW, Bodker R, Malima R, Msangeni HA, Kisinza W, 2000 - Effect of 1997-98 El Nino on highland malaria in Tanzania. *The Lancet* 355 : 989–990.

Lindsay SW, Parson L, Thomas CJ, 1998 - Mapping the ranges and relative abundance of two principal African malaria vectors, *Anopheles gambiae sensu* and *An. arabiensis*, using climate data. *Proceedings of the Royal Society of London Series Biological Sciences* 265 : 847-854.

Lochouarn L, Dia I, Boccolini D, Coluzzi M, Fontenille D, 1998 - Bionomical and cytogenetic heterogeneities of *Anopheles funestus* in Senegal. *Transactions of The Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 92 (6) : 607-612.

Lyimo EO, Takken W, Koella JC, 1992 - Effect of rearing temperature and larval density on larval survival, age at pupation and adult size of *Anopheles gambiae*. *Entomologia Experimentalis Applicata* 63 : 265–271.

Lyimo IN, Ferguson HM, 2009 - Ecological and evolutionary determinants of host species choice in mosquito vectors. *Trends in Parasitology* 25(4) : 189–196.

Macdonald G, 1957 – The epidemiology and control of malaria. Oxford University Press, London.

Mahande A, Mosha F, Mahande J, Kweka E, 2007 - Feeding and resting behaviour of malaria vector, *Anopheles funestus* with reference to zooprophylaxis. *Malaria Journal* 6 : 100.

Massebo F, Balkew M, Gebre-Michael T, Lindtjørn B, 2013 - Blood meal origins and insecticide susceptibility of *Anopheles funestus* from Chano in South-West Ethiopia. *Parasites and Vectors* 6 : 44.

- Matambo TS, Abdalla H, Brooke BD, Koekemoer LL, Mnzava A, Hunt RH, Coetzee M, 2007 - Insecticide resistance in the malarial mosquito *Anopheles funestus* and association with the kdr mutation. *Medical and Veterinary Entomology* 21 : 97-102.
- Ménard D, Barnadas C, Bouchier C, Henry-Halldin C , Gray LR, Ratsimbao A, Thonier V, Carod JF, Domarle O, Colin Y, Bertrand O, Picot J, King CL, Grimberg BT, Mercereau-Puijalon O, Zimmerman PA, 2010 - *Plasmodium vivax* clinical malaria is commonly observed in Duffy-negative Malagasy people. *Proceedings of The National Academy of Science* 107 : 5967-5971.
- Mendes C , Dias F , Figueiredo J , Mora VG , Cano J , de Sousa B , do Rosário VE , Benito A, Berzosa P, Arez AP, 2011 - Duffy negative antigen is no longer a barrier to *Plasmodium vivax* - Molecular Evidences from the African West Coast (Angola and Equatorial Guinea). *PLoS Neglected Tropical Diseases* 5 : 1192.
- Michel AP, Guelbeogo WM, Grushko O, Schemerhorn BJ, Kern M, 2005 – Molecular differentiation between chromosomally defined incipient species of *Anopheles funestus*. *Insect Molecular Biology* 14 : 375-387.
- Minakawa N, Munga S, Atieli F, Mushinzimana E, Zhou G, Githeko AK, Yan G, 2005 - Spatial distribution of anopheline larval habitats in western kenyan highlands : effects of land cover types and topography. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 73 : 157–165.
- Minakawa N, Sonye G, Mogi M, Yan G, 2004 - Habitat characteristics of *Anopheles gambiae s.s.* larvae in a Kenyan highland. *Medical and Veterinary Entomology* 18 : 301–305.
- Moiroux N, Gomez MB, Pennetier C, Elanga E, Djènantin A, Chandre F, Djègbé I, Guis H, Corbel V, 2012 - Changes in *Anopheles funestus* Biting Behavior Following Universal Coverage of Long-Lasting Insecticidal Nets in Benin. *Journal of Infectious Diseases* 206 (10) : 1622-1629.

- Molez JF, Diop A, Gaye O, Lemasson JJ, Fontenille D, 2006 - Morbidité palustre à Barkedji, village du Ferlo, en zone sahélienne du Sénégal. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique* 99 : 187-190.
- Mouchet J, Carnevale P, Coosemans M, Fontenille D, Ravaonjanahary C, Richard A, Robert V, 1993 – Typologie du paludisme en Afrique. *Cahiers Santé* 3 : 220-238.
- Mouchet J, Carnevale P, Coosemans M, Julvez J, Manguin S, Richard-Lenoble D, Sircoulon J, 2004 - Biodiversité du paludisme dans le monde, Éditions John Libbey Eurotext.
- Mouchet J, Faye O, Julvez J, Manguin S, 1996 - Drought and malaria retreat in the Sahel, WestAfrica. *The Lancet* 348 (9043) : 1735-1736.
- Mulamba C., Irving H., Riveron MJ, Mukwaya LG, Birungi J, Wondji CS, 2014 - Contrasting Plasmodium infection rates and insecticide susceptibility profiles between the sympatric sibling species *Anopheles parensis* and *Anopheles funestus* s.s : a potential challenge for malaria vector control in Uganda. *Parasites and Vectors* 7 : 71.
- Muller P, Chouaibou M, Pignatelli P, Etang J, Walker ED, Donnelly MJ, Simard F, Ranson H, 2008 - Pyrethroid tolerance is associated with elevated expression of antioxidants and agricultural practice in *Anopheles funestus* from an area of cotton fields in Northern Cameroon. *Molecular Ecology* 17 : 1145–1155.
- Muriu SM, Muturi EJ, Shililu JI, Mbogo CM, Mwangangi JM, Jacob BG, Irungu LW, Mukabana RW, Githure JI, Novak RJ, 2008 - Host choice and multiple blood feeding behaviour of malaria vectors and other anophelins in Mwea rice scheme, Kenya. *Malaria Journal* 7 : 43.
- Mwangangi JM, Shililu J, Muturi EJ, Muriu S, Jacob B, Kabiru EW, Mbogo CM, Githure J, Novak RJ, 2010 - *Anopheles* larval abundance and diversity in three rice agro-village complexes Mwea irrigation scheme, central Kenya. *Malaria Journal* 9 : 228.

- Najera JA, Kouznetzov RL, Delacollette C, 1998 - *Malaria Epidemics : Detection and Control, Forecasting and Prevention*. Geneva : World Health Organization. *WHO. MAL. 98 : 1084*.
- Ndiath MO, cailleau A, Orlandi-Pradines, Bessell P, Pages F, Trape JF, Rogier C, 2015 - Emerging knock-down resistance in *Anopheles funestus* populations of Dakar, Senegal : first evidence of a high prevalence of kdr-e mutation in West African urban area. *Malaria Journal* 14 : 364.
- Ndjemai HN, Patchoké S, Atangana J, Etang J, Simard F, Bilong CF, Reimer L, Cornel A, Lanzaro GC, Fondjo E, 2009 - The distribution of insecticide resistance in *Anopheles gambiae s.l.* populations from Cameroon : an update. *Transactions of The Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 103(11) : 1127-1138.
- Ngom EHM, 2010 - Préférences trophiques et taux d'anthropophilie des vecteurs du paludisme en relation avec les types d'occupation des sols dans la zone du Ferlo. Master Biologie Animale n°44 (option entomologie médicale). Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 32 pages.
- Niang EA, Konaté L, Diallo M, Faye O, Dia I, 2014 - Reproductive Isolation among Sympatric Molecular Forms of *An. gambiae* from Inland Areas of South- Eastern Senegal. *PLoS One* 9 (8) : e104622.
- Niang EA, Toure A, Ngom EM, Konate L, Faye O, Diallo M, Dia I, 2013 – Pattern of malaria transmission in an area selected for vaccine and clinical trials. *Journal of Tropical Medicine* 2013 : 1-7.
- Niang M, Thiam LG, Sow A, Loucoubar C, Bop NS, Diop F, Diouf B, Niass O, Manssourou A, Varela ML, Perraut R, Sall AA, Toure A, 2015 - A molecular survey of acute febrile illnesses reveals *Plasmodium vivax* infections in Kedougou, southeastern Senegal. *Malaria Journal* 14 : 281.

- Norris LC, Fornadel CM, Hung WC, Pineda FJ, Norris DE, 2010 - Frequency of multiple blood meals taken in a single gonotrophic cycle by *Anopheles funestus* mosquitoes in Macha, Zambia. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 83 (1) : 33–37.
- Ochomo E, Subramaniam K, Kemei B, Rippon E, Bayoh NM, Kamau L, Atieli F, Vulule JM, Ouma C, Gimnig J, Donnelly MJ, Mbogo C, 2015 - Presence of the knockdown resistance mutation, *Vgsc-1014F* in *Anopheles gambiae* and *An. arabiensis* in western Kenya. *Parasites and Vectors* 8 : 616.
- OMS, 2014 - Rapport 2014 sur le paludisme dans le monde : distribution du paludisme dans le monde. Division du Paludisme et autres Maladies parasitaires, *Organisation mondiale de la Santé*. 28 pages.
- OMS, 2013 - Rapport 2013 sur le paludisme dans le monde. Division du Paludisme et autres Maladies parasitaires, *Organisation mondiale de la Santé*. 28 pages.
- OMS, 2010 - Rapport 2010 sur le paludisme dans le monde. Division du Paludisme et autres maladies parasitaires, *Organisation mondiale de la Santé*.
- Oyewole IO, Awolola TS, 2006 - Impact of urbanization on bionomics and distribution of malaria vectors in Lagos, southwestern Nigeria. *Journal Vector Borne Diseases* 43(4) : 173-178.
- Pagès F, Texier G, Pradines B, Gadiaga L, Machault V, Jarjaval F, Penhoat K, Berger F, Trape JF, Rogier C, Sokhna C, 2008 - Malaria transmission in Dakar : a two-year survey. *Malaria Journal* 7 : 178.
- Patz JA, Graczyk TK, Geller N, Vittor AY, 2000 - Effects of environmental change on emerging parasitic diseases. *International Journal of Parasitology* 30 : 1395–1405.

- Petrarca V, Nugud AD, Elkarim-Ahmed MA, Haridi AM, Di Deco MA, Coluzzi M, 2000 – Cytogenetics of the *Anopheles gambiae* complex in Sudan , with special reference to *An. arabiensis* : relationships with East and West african populations. *Medical and Veterinary Entomology* 14 : 149-164.
- Petrarca V, Vercruyssen V, Coluzzi M, 1987 - Observations on the *Anopheles gambiae* complex in the Senegal River Basin, West Africa. *Medical and Veterinary Entomology* 1 : 303–312.
- Ralisoa RBO, Coluzzi M, 1987 - Genetical investigations on zoophilic and exophilic *Anopheles funestus* from Antananarivo area (Madagascar). *Parassitologia* 29 (1) : 93-97.
- Rishikesh N, Di Deco M, Petrarca V, Coluzzi M, 1985 - Seasonal variations in indoor resting *Anopheles gambiae* and *Anopheles funestus* in Kaduna, Nigeria. *Acta Tropica* 42 : 165-170.
- Robert V, Dieng H, Lochouart L, Traoré SF, Trape JF, Simondon F, Fontenille D, 1998 - La transmission du paludisme dans la zone de Niakhar, Sénégal. *Tropical Medicine and International Health* 3 (8) : 667-677.
- Rodhain F, Perez C, 1985 – Précis d'entomologie médicale et vétérinaire. Maloine. s. a. éditeur. Paris, 458 pages.
- Rogers DJ, Randolph SE, Snow RW, Hay SI, 2002 - Satellite imagery in the study and forecast of malaria. *Nature* 415 : 710–715.
- Scott TW, Takken W, 2012 - Feeding strategies of anthropophilic mosquitoes result in increased risk of pathogen transmission. *Trends in Parasitology* 28 (3) : 114–121.
- Seyoum A, Balcha F, Balkew M, Ali A, Gebre-Michael T, 2002 - Impact of cattle keeping on human biting rate of anopheline mosquitoes and malaria transmission around Ziway, Ethiopia. *East African Medical Journal* 79 (9) : 485–490.

- Shililu J, Mbogo C, Ghebremeskel T, Githure J, Novak R, 2007 - Mosquito larval habitats in a semiarid ecosystem in Eritrea : impact of larval habitat management on *Anopheles funestus* population. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* 76 : 103–110.
- Sinka ME, Bangs MJ, Manguin S, Coetzee M, Mbogo CM, Hemingway J, Patil AP, Temperley WH, Gething PW, Kabarias CW, Okaras RM, 2013 - The dominant *Anopheles* vectors of human malaria in Africa, Europe and the Middle East : occurrence data, distribution maps and bionomic précis. *Parasites and Vectors* 3 : 117.
- Sougoufara S, Diédhiou SM, Doucouré S, Diagne N, Sembène PM, Harry M, Trape JF, Sokhna C, Ndiath MO, 2014 - Biting by *Anopheles funestus* in broad daylight after use of long - lasting insecticidal nets : a new challenge to malaria elimination. *Malaria Journal* 13 : 125.
- Temu EA, Minjas JN, Tuno N, Kawada H, Takagi M, 2007 - Identification of four members of the *Anopheles funestus* (Diptera : Culicidae) group and their role in *Plasmodium falciparum* transmission in Bagamoyo coastal Tanzania. *Acta Tropica* 102 (2) : 119-125.
- Thomas F, Rigaud T, Brodeur J, 2010 - Evolution of parasite-induced behavioral alterations. Pages 661-669 dans M. Breed et J. Moore (éds.), *Encyclopedia of Animal Behaviour*. Elsevier.
- Tirados I, Costantini C, Gibson G, Torr SJ, 2006 - Blood-feeding behaviour of the malarial mosquito *Anopheles funestus* : implications for vector control. *Medical and Veterinary Entomology* 20 : 425-437.
- Traoré-Lamizana M, Fontenille D, Diallo M, Ba Y, Zeller HG, Mondo M, Adam F, Thonnon J, Maiga A, 2001 - Arbovirus surveillance from 1990 to 1995 in the Barkedji area (Ferlo) of Senegal, a possible natural focus of Rift Valley Fever virus. *Journal of Medical Entomology* 38(4) : 480–492.
- Traore-Lamizana M, Zeller HG, Mondo M, Hervy JP, Adam F, Digoutte JP, 1994 - Isolations of

West Nile and Bagaza viruses from mosquitoes (Diptera : Culicidae) in central Senegal (Ferlo). *Journal of Medical Entomology* 31 : 934–938.

Trape JF, Pison G, Preziosi MP, Enel C, Desgrées du Loù A, Delaunay V, Samb B, Lagarde E, Molez JF, Simondon F, 1998 - Impact of chloroquine resistance on malaria mortality. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 321 : 689-697.

Tuno N, Kjaeransen J, Badu K, Kruppa T, 2010 - Blood-feeding behaviour of *Anopheles gambiae* and *Anopheles melas* in Ghana, West Africa. *Journal of Medical Entomology* 47(1) : 28–31.

Vercruysse J, Jancloas M, 1981 - Etude entomologique sur la transmission du paludisme humain dans la zone urbaine de Pikine (Sénégal). *Cahiers ORSTOM, série Entomologie médicale et Parasitologie* 19 : 165-178.

White GB, 1972 – The *Anopheles gambiae* complex and malaria transmission around Kisumu, Kenya. *Transactions of The Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 66 : 572-581.

White NJ, Pukrittayakamee S, Hien TT, Faiz MA, Mukuolu OA, Dondorp AM, 2014 - Malaria. *The Lancet* 383 : 721-735.

WHO, 2013 – Test procedures for insecticide resistance monitoring in malaria vector mosquitoes. Geneva. World Health Organization.

Wigglesworth VB, 1972 -*The Principles of Insect Physiology*, London, Chapman and Hall.

Wilkes TJ, Matola YG, Charlwood JD, 1996 - *Anopheles rivulorum*, a vector of human malaria in Africa. *Medical and Veterinary Entomology* 10 (1) : 108-110.

Wirtz RA, Zavala F, Charoenvit Y, 1987 - Comparative testing of monoclonal antibodies against *Plasmodium falciparum* sporozoites for ELISA development. *Bulletin of the World Health Organization* 65 : 39–45.

Wikimedia Commons (Own work), June 2011 – Senegal map worldwide.

Wurtz N, Lekweiry KM, Bogreau H, Pradines B, Rogier C, Boukhary AOMS, Hafid JE, Salem MSOA, Trape JF, Basco LK, Briolant S, 2011 - Vivax malaria in Mauritania includes infection of a Duffy-negative individual. *Malaria Journal* 10 : 336.

ANNEXE 1 : Technique d'extraction d'ADN de moustique**Méthode de Collins et *al.*, (1987)**

- Placer les pattes (ou ailes) de moustiques dans un tube numéroté ;
- Broyer avec un piston propre dans 100ml de tampon de broyage ;
- Incuber le broyat pendant 30mn à 65°C au bain sec (à allumer 30mn à l'avance) ;
- Ajouter 14ml d'acétate de potassium 8M (58,89 g dans 75 ml d'eau distillée) ;
- Vortexer fort ;
- Incuber dans de la glace pendant 30 mn ;
- Centrifuger (à + 4 si possible) à 14 000 tours/mn pendant 15 mn ;
- Retirer le surnageant puis le mettre dans un nouveau tube numéroté. Changer de pointe à chaque moustique. (éviter de toucher le culot, sinon, centrifuger de nouveau) ;
- Ajouter 200ml d'éthanol 100° ou 95° à -20°C. Laisser incuber au congélateur pendant au moins 20 mn. (Les échantillons peuvent être stockés à ce stade à -20°C ou -80°C) ;
- Centrifuger (à + 4°C si possible) à 14 000 tours /mn pendant 20 mn ;
- Jeter l'alcool, (garder le culot à peine visible) ;
- Ajouter 200ml d'éthanol 70° à -20°C ;
- Jeter l'alcool en tournant délicatement le tube. Vider le reste à la pipette ;
- Sécher le culot au Speed Vac (chauffage medium) pendant 20 mn ;
- Reconstituer dans 100 ml d'eau bi-distillée, agiter doucement puis laisser au réfrigérateur à + 4°C au moins pendant 12h.
- Conserver à -80°C

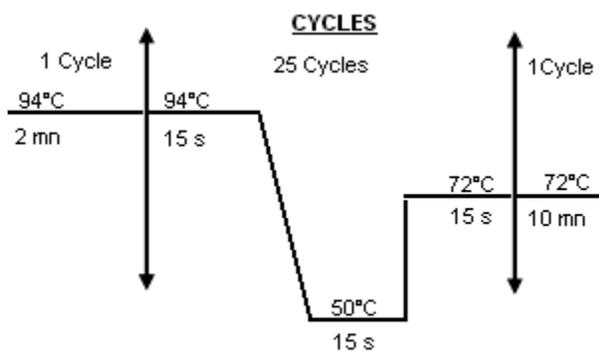
ANNEXE 2 : Technique d'identification des espèces du complexe *An. gambiae* par PCR de Scott *et al.*, (1993) et Fanello *et al.*, (2002)

- Préparer une fiche PCR avec les numéros des moustiques à identifier en plus des témoins positifs et le marqueur de poids moléculaire
- Mettre (10,5 µl) le mix dans chaque tube

Tableau 2 : Volume des réactifs constituant le mix

Réactifs	Volume (µl/1 tube)
Eau	6,7
Tampon	1,5
dNTP	0,1
UN	0,5
GB	0,5
AR	0,5
ML	0,5
Taq	0,2

- Ajouter (2 µl) l'ADN de moustique par tube en respectant l'ordre indiqué sur la fiche (changer de cône pour chaque moustique pour éviter la contamination)
- Fermer les tubes et mettre dans le thermocycleur.
- Programmer les conditions de PCR et la démarrer



a) Identification des espèces du complexe *Anopheles gambiae* s.l.

Figure 1 : Conditions de la PCR classique (amplification)

- Préparer le gel d'agarose 1,5% pour l'électrophorèse
- Mettre le gel dans la cuve à migration contenant du TBE 1X
- Déposer sur un papier parafilm autant de gouttes de bleu de charges que de puits à charger
- Mettre 10 µl de marqueur de taille dans le premier puits
- Mélanger les produits de la PCR avec le bleu de charge et déposer dans les puits
- Fermer la cuve et faire migrer (100mV, 300mA) pendant 20mn
- Lire et photographier le gel sous UV

Pour les espèces du complexe *An. gambiae*, les bandes attendues sont à 390 paires de bases chez *An. gambiae* et 315 paires de bases chez *An. arabiensis*.

Pour les espèces *An. gambiae*, l'identification des formes moléculaires M et S se fait par digestion après l'amplification.

En effet les tubes, révélant contenir des espèces *An. gambiae*, sont ajoutés en plus du mix qui est déjà, du mix de digestion qui est constitué comme suit : de l'eau biomoléculaire, du Tampon 10XM et de l'Enzyme Hha1 (Tableau 3)

Tableau 3 : Mix de digestion

Réactifs	Volume (µl/1 tube)
Eau	7,75
Tampon 10XM	2
Hha1	0,25

Dans chaque tube, nous avons ajouté 10µl de solution de mix de digestion dans l'ADN amplifié. Les tubes sont fermés et placés dans l'étuve (37°C) pendant 4 heures au minimum ou toute la nuit. Les fragments d'ADN amplifiés sont digérés avec une enzyme de restriction (Favia et *al.*, 1997) ; cette enzyme (Hha1 : *Haemophilus haemoliticus*) coupe le fragment au niveau des sites de restriction de la manière suivante.



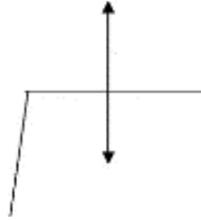


Figure 2 : Fragment de longueur d'ADN lors de la digestion

Ainsi, la digestion de deux ADN différents pour un locus donné produit des fragments de longueurs différents dont la migration sur un gel d'agarose à 1,5% (100ml TBE 1X + 1,5g d'agarose) permet de déterminer les formes moléculaires M et S chez *An. gambiae* s.s.

Pour les formes moléculaires, la forme S migre à 475 paires de bases, la forme M à 727 paires de bases et la bande à 1300 paires de bases caractéristiques de l'espèce *An. gambiae* s.s. apparaît pour tous les spécimens testés

ANNEXE 3 : Technique ELISA indirecte pour la détection de moustiques infectés par *Plasmodium falciparum*

Technique modifiée d'après Burkot *et al.*, (1984) et Wirtz. *et al.*, (1987)

- Préparer les têtes-thorax des moustiques, les mettre dans des tubes eppendorf numérotés en prenant bien soin de remplir en même temps les fiches pour chaque plaque. Sur les fiches, marquer les témoins négatifs (colonne 1 et puits H10 et H12 selon le schéma de la plaque) et le témoin positif (puits H11).
- Mettre dans chaque puits 20 µl de NP 40 (détergent qui va fragiliser les membranes) et laisser incuber au moins 1 h sur la paillasse ou la nuit à +4°C.
- Broyer les têtes-thorax des moustiques préalablement préparés dans 2 fois 190 µl de BB puis conserver au congélateur (-20°C).
- Préparer les solutions d'anticorps de capture (pour une plaque, ajouter 20 µl d'anticorps de capture dans 5 ml de PBS 1X)
- Sensibiliser les plaques. Mettre 50 µl d'anticorps monoclonaux de capture dans chaque puits et laisser incuber la nuit sur la paillasse.
- Saturer les puits après avoir vider les plaques (ne pas les laver) en mettant 205 µl de BB par puits et laisser sur paillasse pendant 1h.

BB : Pour 1 litre, on met dans 1litre de PBS 1X

- 5g de caséine
- 0,1g de Thiomerosal
- 0,04g de Phenol Red
- 10g d'Albumine Bovine

Laisser agiter pendant 2h

- Distribuer 50 µl de broyat de moustique par puits et du BB pour les témoins négatifs (colonne 1 et puits H10 et H12 selon le schéma de la plaque) et le témoin positif dans le puits H11. Laisser incuber sur paillasse pendant 2h.
- Vider les plaques et laver 2 fois au PBS/Tween 20 par remplissage puis rejet de la solution de lavage et en tapotant fort les plaques sur du papier buvard afin d'éliminer le liquide résiduel.

- Environ 10 mn avant la fin de l'incubation, préparer les solutions d'anticorps conjugués (pour une plaque ajouter 7,5 µl d'anticorps conjugués dans 5 ml de BB).
- Mettre 50 µl d'anticorps dans chaque puits puis laisser incuber sur la paillasse pendant 1 h. ceci permet la fixation des anticorps anti-IgG sur leurs antigènes correspondants s'ils sont présents.
- Laver 4 fois au PBS/Tween afin d'éliminer les anticorps anti-IgG non fixés.
- Mettre 100 µl de substrat de peroxydase dans chaque puits laisser incuber à l'obscurité pendant 30 mn. Les puits positifs sont colorés en bleu.

Substrat Peroxydase

Pour 3 plaques :

- 5mg d'Orthotolidine dans 0,25ml de N,N dimethylformamide
- 30ml de Tampon Citrate
- 4 µl d'eau oxygénée à 30%

Le Tampon Citrate est préparé comme suit:

- Dans 200ml d'eau bi-distillée, dissoudre 4,48g d'Hydroxyde de Sodium
- Ajouter 11,77g d'Acide Citrique puis 400ml d'eau bi-distillée
- Ajuster le PH à 4 avec de l'Acide Chlorhydrique 1N puis compléter à 1 litre avec de l'eau bi-distillée

- Arrêter la réaction par l'ajout de 50 µl d'acide sulfurique 4N.
- Lire les résultats au spectrophotomètre à 450 et 620 nm. Sont retenus positifs les puits dont la densité optique est 2 fois supérieure à la moyenne des densités optiques des témoins négatifs.

ANNEXE 4 : Technique ELISA directe pour l'identification de l'origine des repas de sang

Technique modifiée d'après Beier *et al.*, (1988)

- Préparer le tampon « Repas de sang »

Pour 1 litre :

On met 5g de Caséine dans 100ml de NaOH 0,1N (0,4g dans 100ml H₂O)

Faire bouillir jusqu'à totale dissolution

- 900 ml de PBS 1X
- 250µl de Tween 20
- 0,1g de Thiomerosal
- 0,02g de Phenol Red

Agiter pendant 2h

- Découper les spots puis les mettre dans des tubes eppendorf numérotés. Ajouter 800 µl de PBS 1X (5 pastille dans 1 litre d'eau bi-distillée) et vortexer 1 ou 2 fois puis laissé éluer au moins pendant 2h.
- Préparer les témoins positifs (sang dilué au 1/100)
- Prendre soin de faire le schéma de la plaque.
- Sensibiliser les plaques
- Distribuer 50 µl de chaque éluât par hôte à tester. Mettre 50 µl de PBS 1X dans chacun des puits témoins négatifs (colonnes 1 et 7 selon le schéma de la plaque) et 50 µl de sérum dilué au 1/100 pour chaque témoin positif (puits 8A à 12A selon le schéma de la plaque). Cette étape permet de fixer les IgG sur les parois des puits.
- Incuber les plaques, recouvrir par du papier aluminium, pendant 3 h ou la nuit sur la paillasse.
- Préparer les anticorps conjugués à la peroxydase avec les sérums hétérologues afin de limiter les réactions croisées.

Tableau 1 : Préparation des anticorps conjugués à la peroxydase

Hôtes	Dilutions
Homme	1/2000
Bœuf	1/2000
Mouton	1/2000
Poule	1/500
Cheval	1/500

- Vider les plaques et les laver 2 fois au PBS/Tween 20 (qui est préparé de la façon suivante: pour 1 litre, on prend 1 litre de PBS 1X, on ajoute 500 μ l de Tween 20) par remplissage puis rejet de la solution de lavage et en tapotant fort les plaques sur du papier buvard afin d'éliminer le liquide résiduel
- Mettre 50 μ l d'anticorps de chaque espèce dans les puits de la colonne correspondante puis laisser incuber sur la paillasse pendant 1h. Cette étape permet la fixation des anticorps anti-IgG sur leurs antigènes correspondants s'ils sont présents.
- Par le même procédé que le double lavage, laver 4 fois au PBS/Tween afin d'éliminer les anticorps anti-IgG non fixés.
- Mettre 100 μ l de substrat de peroxydase dans chaque puits, laisser incuber à l'obscurité pendant 30 mn. Les puits positifs sont colorés en bleu.
- Arrêter la réaction par l'ajout de 50 μ l d'acide sulfurique 4N.
- Lire les résultats au spectrophotomètre à 450 et 620 nm. Sont retenus positifs les puits dont la densité optique est 2 fois supérieure à la moyenne des densités optiques des témoins négatifs.

Figure 1 : Différentes étapes de l'ELISA directe pour l'identification de l'origine des repas de sang

ANNEXE 5 : Protocole d'étude de la sensibilité des vecteurs aux insecticides

Les tests de sensibilité sont faits selon le protocole de l'OMS (WHO, 2013) qui comprend les étapes suivantes :

- Les feuilles blanches normales de rame de papier sont découpées suivant les dimensions de 12x15 cm ;
- Ces feuilles (12x15 cm) sont placées dans les tubes verts fixés, sur les tiroirs ;
- Les cages de moustiques à tester sont ramenées de l'insectarium au laboratoire où aura lieu le test ;
- 25 femelles âgées entre 2 et 5 jours sont introduites dans les tubes verts à l'aide de l'aspirateur. Pour chaque insecticide l'idéal est d'avoir 4 tubes de 25 soit 100 femelles.

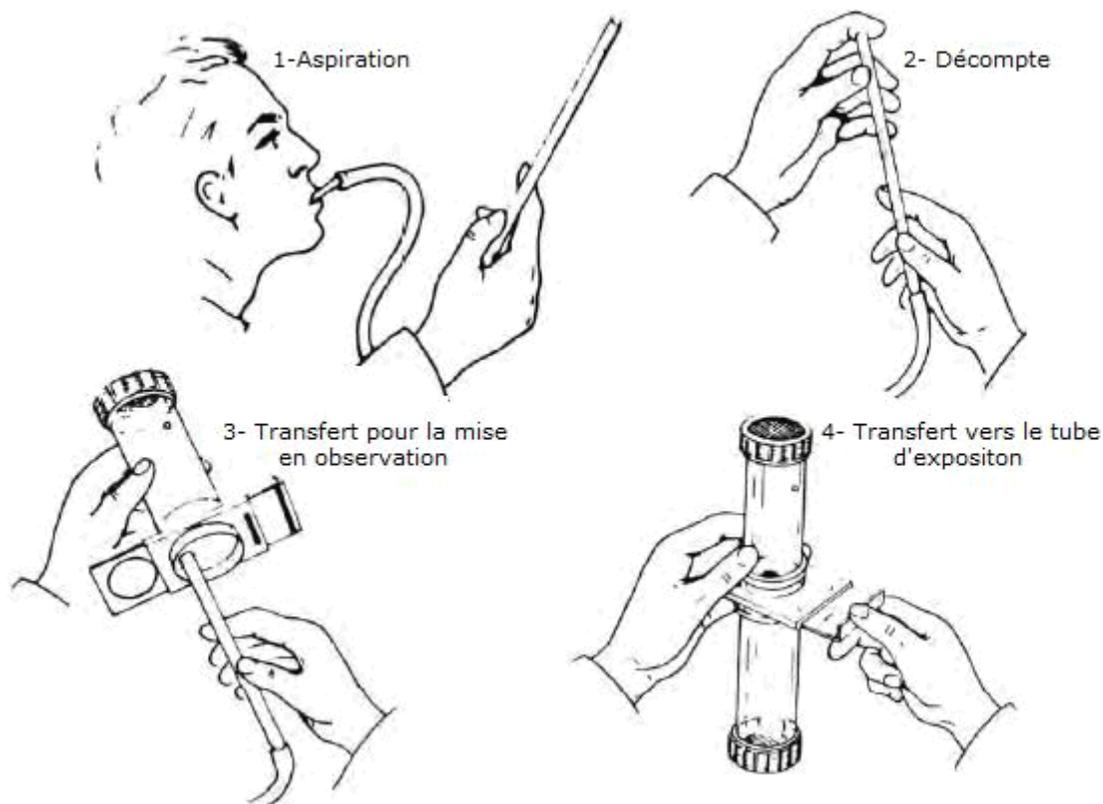


Figure : Processus de test aux insecticides selon la procédure standard de l'OMS

Une fois le comptage terminé, les femelles sont placées mises en observation pendant une heure, sans eau sucrée ou eau miellée à 10%, avant l'exposition pour contrôler qu'il n'y ait pas de mortalité suite au transfert ;

Pendant l'heure d'observation après le comptage, les papiers imprégnés d'insecticide sont placés dans les tubes rouges. Pour éviter une éventuelle contamination, les papiers imprégnés d'insecticides seront manipulés avec des gants. Les tubes rouges témoins doivent

- recevoir des papiers imprégnés du mélange d'huile-acétone seul sans insecticide. Les papiers témoins devront être placés dans les tubes avant les papiers contenant les insecticides ;
- Les tubes rouges sont fixés sur le tiroir, puis après ouverture de la tirette, les femelles sont soufflées délicatement mais le plus rapidement possible dans le tube rouge. Le tube vert est ensuite dévissé ;
- Pendant toute la durée d'exposition (1 heure), les tubes sont maintenus en position verticale ;
- Pour les pyréthriinoïdes, le nombre de moustiques assommés (KD) est noté à intervalle régulier au cours de l'exposition afin d'établir une droite de régression du %KD en fonction du temps (5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, et 60 mn) pendant l'heure de contact. Si à la fin de l'heure d'exposition le pourcentage de KD est inférieur à 80%, une dernière lecture est réalisée à 80 min (c'est à dire 20 min après le transfert dans les tubes d'observation verts) ;
- Au bout d'une heure d'exposition, les moustiques sont re-transférés dans les tubes d'observation et mis en observation pendant 24 heures avec un coton imbibé de d'eau sucrée ou eau miellée à 10% ;
- Après l'exposition, les papiers imprégnés sont replacés dans leur emballage (la face non imprégnée du papier est marquée d'une croix pour signifier chaque utilisation) et conservés au frigo (selon les insecticides voir les instructions sur l'emballage pour le temps de conservation). Le nombre d'utilisation ne doit pas excéder 6 tests ;
- La mortalité est déterminée 24 heures après l'exposition ;
- Pour la lecture de la mortalité, s'assurer que tous les moustiques survivants dans le tube sont posés sur les parois ou sur le toit du tube. Dévisser délicatement le tube et le poser sur la paillasse et faire le décompte des moustiques morts sur le tiroir. Revisser le tube sur le tiroir après avoir pris soin de conserver individuellement les morts dans des tubes Eppendorf avec du silicagel. Mettre le tube contenant les moustiques survivants à -20 °C pour les assommer et faciliter le comptage et la conservation (individuellement dans des tubes Eppendorf avec du

silicagel). Procéder à la même opération pour l'ensemble des répliques par insecticide pour avoir le total des morts et des survivants.

Interprétation des résultats des tests :

Une population est sensible si la mortalité > 98%, Une population tolérante si la mortalité est comprise entre 80% - 97% et une population est résistante si la mortalité est < 80%.

Les taux de mortalité sont calculés comme suit :

Mortalité dans le tube témoin : $C = (\text{nombre de moustiques morts}) / (\text{nombre de moustiques testés})$ dans le tube témoin.

Mortalité dans les tubes d'exposition : $E = (\text{nombre de moustiques morts}) / (\text{nombre de moustiques testés})$ dans les tubes d'exposition contenant de l'insecticide.

Si le taux de mortalité du tube témoin se situe entre 5 et 20%, le taux de mortalité suite à l'exposition, E, est corrigé par la formule d'Abbott :

Taux de mortalité corrigé : $E' = [(E - C) / (100 - C)] \times 100$

Où E est la mortalité suite à l'exposition (non corrigée) exprimée en % et C est la mortalité du lot témoin exprimée en %.

Si la mortalité du lot témoin est inférieure à 5 %, il n'est pas nécessaire de corriger E

Si la mortalité de contrôle est supérieure à 20 %, il faut annuler l'expérience

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR
ECOLE DOCTORALE ED-SEV
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES
THESE DE DOCTORAT
Spécialité : Entomologie

Prénoms et nom du candidat : El hadji Malick NGOM

Titre : Etude de l'influence des déterminants climatiques et environnementaux sur la bio-écologie d'*Anopheles arabiensis* (Diptera : Culicidae) et leur implication dans la transmission et le contrôle du paludisme en zone sahélienne du Sénégal

Date et lieu de soutenance : le 29 janvier 2016

Jury :	Président : Oumar GAYE	Professeur, FMPOS-UCAD
	Membres : Jacques André-NDIONE	HDR, CSE
	Cheikh SOKHNA	HDR, IRD
	Jean-Louis NDIAYE	Maître de Conférences Agrégé, FMPOS-UCAD
	Ibrahima DIA	HDR, IPD
	Ousmane FAYE	Professeur, FST-UCAD

Résumé

De par sa situation géographique, le Sahel constitue une zone sujette à de fortes variations des paramètres environnementaux et climatiques. Il est caractérisé par un niveau faible de transmission palustre, ce qui implique que la détermination de l'impact de ces paramètres sur *An. arabiensis* (vecteur majeur dans cette zone) et la transmission du paludisme est indispensable pour une mise en place de stratégies efficaces et appropriées. La présente étude entrait dans ce cadre et avait comme objectif d'étudier l'influence des paramètres environnementaux (température, humidité, pluviométrie) et des états de surface (occupation et utilisation des sols) sur l'abondance des vecteurs, leurs capacités vectorielles et leur implication dans la transmission du paludisme et son contrôle.

Les résultats de cette étude montrent une hétérogénéité de l'influence des paramètres environnementaux et climatiques sur le comportement trophique d'*An. arabiensis* dans cette zone. Il a été en particulier observé que la localisation spécifique des sites avait une influence marquée sur le profil trophique des vecteurs avec des taux d'anthropophilie fortement influencée par la présence de surfaces en eau ainsi que les types d'occupation des sols. Ces derniers ainsi que la température, l'humidité et surtout la pluviométrie ont présenté également une forte influence sur les densités des vecteurs ainsi que leur taux d'infestation plasmodiale ; les villages de savane arborée et de sol étant identifiés comme les sites présentant les densités vectorielles et les taux d'infection à *Plasmodium falciparum* les plus élevés en comparaison aux villages de savane arbustive et de steppe. Ces résultats ont été par la suite confirmés au cours d'études longitudinales bi-mensuelles pendant trois années successives (2010, 2011 et 2012) dans 6 villages appartenant à ces 4 types d'occupation des sols. Bien que plus élevés dans les villages de savane arborée et de sol nu, les niveaux de transmission ont été relativement faibles (paludisme instable) par rapport aux autres zones bio-géographiques du pays.

L'utilisation des mesures de contrôle classiques (moustiquaires imprégnées, aspersions intradomiciliaires) pourraient se révéler problématique au vu des variations observées dans les dynamiques d'*An. arabiensis* et son comportement (tendance exophage). Cette situation est en plus exacerbée par les niveaux de résistance aux insecticides observés avec le DDT et les pyréthriinoïdes utilisés (deltaméthrine et lambda-cyhalothrine). Ainsi, la préservation de l'efficacité des interventions actuelles nécessite de développer des stratégies de lutte contre les populations exophages d'*An. arabiensis* de cette zone associées à des études spécifiques de la biologie du comportement et des études de surveillance de la résistance aux insecticides et de détermination des mécanismes impliqués.

Mots clés : *Anopheles arabiensis*, facteurs environnementaux et climatiques, paludisme, transmission, contrôle