

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

REPUBLIQUE DU MALI
Un Peuple - Un But - Une Foi



Université des sciences, des Techniques et des
Technologies de Bamako (U.S.T.T.B)
FACULTE DE PHARMACIE



Année Universitaire : 2024 - 2025

Thèse N°....

Dynamique de la population adulte d'*Anopheles gambiae* *sensu lato* en zone sahélienne au Mali de 2016 à 2024

THESE

Présentée et soutenue publiquement le : 27/8/2026 devant le

Jury de la **Faculté de Pharmacie**

Par : M. OUMAR KANE

Pour obtenir le grade de Docteur en Pharmacie

(Diplôme d'État)

JURY

Président : **M. Sory Ibrahim DIAWARA**, Directeur de Recherche (FMOS)

Membres : **M. Moussa KEITA**, Maître-Assistant (FMOS)

Mme. Merepen dite Agnès GUINDO, Assistante (FAPH)

Co-directeur : **M. Zana Lamissa SANOGO**, Chargé de Recherche (FAPH)

Directeur de thèse : **M. Karim TRAORE**, Maître de Conférences (FAPH)

Ce travail réalisé au Centre de Recherche et de Formation en Entomologie Médicale et des Maladies Infectieuses de la Faculté de Médecine et d'Odontostomatologie (IDMERTC/FMOS) a bénéficié de l'appui financier du gouvernement américain à travers le LMVR/NIH/NIAID-USA

DEDICACE ET REMERCIEMENTS

DEDICACE

Je dédie cette thèse

A Elhadji Mamadou CISSE,

Après le départ de mon père, une grande épreuve de ma vie, tu as été pour moi un véritable pilier. Par ta présence, ton affection, tes conseils et tes encouragements constants, tu as été un soutien inestimable tu m'as permis de continuer le chemin et de croire en mes capacités lorsque le doute m'envahissait.

Tu as été un père pour moi. Grâce à toi, j'ai trouvé la force de poursuivre mes études et d'aller jusqu'au bout de ce parcours. Ce parcours porte l'empreinte de tes accompagnements, de ta générosité et de ta bienveillance. Sans toi, ce chemin aurait été beaucoup plus difficile.

Que ce modeste travail soit le témoignage de ma profonde reconnaissance, de mon respect et de ma sincère gratitude pour tout ce que tu as fait pour moi.

REMERCIEMENTS

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

A Dieu, le Tout-Puissant, l'Omnipotent, l'Omniscient, Maître du monde et des cieux, de m'avoir donné la santé et la chance de poursuivre mes études malgré des obstacles.

A mon pays : le Mali, terre d'accueil, de souveraineté et d'intégrité. Pour m'avoir soigné, éduqué et protégé. Chère patrie, que Dieu te donne la force et le courage nécessaires pour relever tes défis.

A ma mère Djénébou TRAORE,

Femme de courage et de sacrifice, aucune parole ne saurait traduire pleinement la profondeur de ma gratitude et de mon affection pour toi. Tout au long de ma vie, tu as été pour moi un exemple de courage, de patience et de persévérance. Par tes sacrifices silencieux, tes conseils et tes prières, tu as éclairé mon chemin et m'as donné la force d'aller toujours de l'avant.

Malgré les épreuves de la vie et les responsabilités que tu as portées avec dignité, tu n'as jamais cessé de croire à l'avenir de tes enfants. Ton soutien indéfectible, ton amour inconditionnel et ta confiance en moi ont été la source de ma motivation et de ma détermination à poursuivre mes études.

Aujourd'hui, l'aboutissement de ce travail est aussi le tien, car il est le fruit de tes sacrifices, de ton dévouement et de ton immense amour.

Que ce modeste travail soit pour toi le témoignage de mon profond respect, de ma reconnaissance infinie et de mon amour filial.

Qu'Allah te garde encore plus longtemps avec nous dans la santé et le bonheur.

A la mémoire de mon père feu Bah KANE,

Tu serais certainement fier de voir l'aboutissement de ce travail. Même si la vie ne t'a pas laissé le temps d'en être témoin, ton amour, tes sacrifices et les valeurs que tu m'as transmises continuent d'éclairer mon chemin. Cette thèse est le reflet de l'éducation et de la détermination que tu as semés en moi.

A la famille CISSE,

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à la famille qui m'a accueilli et soutenu tout au long de ce parcours. Votre hospitalité et votre soutien constant, ont contribué à créer un environnement propice à la réussite de ce travail.

Aux familles KANE, DEMBELE et DIARRA,

Je tiens sincèrement à vous remercier pour vos soutiens. Particulièrement, Feue Bafili KANE, Bourama DEMBELE, Oumar DEMBELE, Ramata DIARRA, Fati DIARRA... Vos gestes, au moment où j'en avais réellement besoin, m'ont profondément touché. Que Dieu vous le rende au centuple.

A mes frères et sœurs,

Je vous adresse du fond du cœur ma profonde gratitude. Votre amour, votre soutien indéfectible et vos encouragements ont été pour moi une force dans les moments difficiles et une lumière sur mon chemin. Ce travail est aussi le vôtre. Recevez ici toute ma reconnaissance et mon affection.

A tous mes amis et camarades de la 16^e promotion du numerus clausus de la section pharmacie baptisée feu Docteur Mamadou B. COULIBALY.

En particulier, Saidou DIOP, Balkissa MAIGA, Nahan KEITA, merci pour votre franche collaboration et le soutien mutuel pendant les moments difficiles que nous avons passés ensemble à la faculté. C'est l'occasion pour moi aujourd'hui de vous renouveler toute ma reconnaissance.

A mes professeurs : du premier cycle, particulièrement M. Adama FOMBA, du second cycle, du lycée et de l'université (FMOS/FAPH), votre contribution sans faille m'a permis d'aller jusqu'au bout de mes études. Merci, chers professeurs.

A mes encadreur :

- Professeur Adama DAO : Je vous remercie pour l'opportunité et la confiance que vous m'avez accordées en m'acceptant dans votre laboratoire. Votre accueil, votre assistance, vos enseignements et vos conseils ont permis la réalisation de ce travail. Veuillez recevoir, cher maître, le témoignage de ma profonde gratitude.

- Professeur Alpha Seydou YARO : L'amour que vous portez à votre prochain, votre disponibilité, vos enseignements, vos conseils pour moi ont été d'un apport inestimable tant sur le plan professionnel que social. Vous trouverez ici l'expression de ma très profonde et sincère gratitude.
- M. Moussa DIALLO : Votre sens du travail bien fait, vos conseils, vos enseignements et vos encouragements m'ont beaucoup aidé pour la réalisation de ce travail. Soyez assuré de ma profonde reconnaissance et sincère gratitude. Je ne vous remercierai jamais assez.
- Dr. Zana Lamissa SANOGO : Votre esprit d'équipe, votre accompagnement et surtout vos critiques et suggestions qui m'ont été d'un grand apport pour mener à bien ce travail.

Veillez recevoir mes sincères reconnaissances.

- Dr. Djibril SAMAKE : Votre discernement, votre disponibilité, vos explications, votre aptitude à aider les autres ont contribué à parfaire ce travail. Veuillez recevoir toute ma gratitude et ma reconnaissance.
- Dr. Boubacar COULIBALY : Je vous adresse mes sincères remerciements pour vos encouragements et vos conseils à mon égard durant cette thèse. Je vous remercie sincèrement.
- Dr. Mahamoud M. KOUREICHI : J'exprime ma profonde gratitude pour votre accompagnement rigoureux dans l'analyse de données.

A nos collaborateurs : Je remercie tout le personnel du laboratoire : LMVR, NIAID, NIH pour le financement et l'appui matériel idoine à la réalisation de ce travail. Je remercie aussi particulièrement Dr. Tovi Lehmann, votre esprit critique et votre conscience professionnelle ont fait de vous un scientifique de renommée internationale.

A mes aînés et collègues de travail : Mamou SANOGO, Alassane Dit ASSITOUN, Josué POUDIOUGO, Djibril MAIGA, Yaya Zié COULIBALY, Siramini DEMBELE, Abdoulaye S. ARAMA, Mariam SISSOKO, Mamadou TRAORE, Ousmane YOSSE, Awa TRAORE, Kadiatou CISSE, Tawé Emmanuel DEMDELE, Salia KANE, Yacouba DEMBELE, Salif THIAM, Mamoutou BENGALY, Safiatou CAMARA, ATTAHER Ali ; ces moments passés ensemble m'ont stimulé l'esprit d'équipe, de cohésion, de partage et de sacrifice pour son prochain. Merci pour l'aide qui a permis de parfaire ce travail.

HOMMAGES
AUX MEMBRES DU JURY

HOMMAGE AUX MEMBRES DU JURY

A notre Maître et Président du jury :

Pr. Sory Ibrahim DIAWARA

- ❖ Docteur en médecine,
- ❖ Directeur de Recherche à la FMOS de l'USTTB,
- ❖ Chercheur au Centre de Recherche et de Formation en Entomologie Médicale et des Maladies Infectieuses (IDMERTC) de l'USTTB.

Cher Maître,

Vous nous faites un grand honneur de présider ce jury. Votre expertise scientifique, votre rigueur académique et votre expérience constituent une référence dans votre discipline. Nous vous remercions pour l'intérêt porté à ce travail et pour l'honneur que vous nous faites en l'évaluant.

Veillez agréer l'expression de notre profonde gratitude, de notre très haute considération et de notre profond respect.

A notre Maître et Directeur :

Pr. Karim TRAORE

- ❖ Docteur en pharmacie,
- ❖ Maître de conférences en Pharmacologie à la FAPH/USTTB,
- ❖ PhD en Pharmacologie,
- ❖ Master en Neuro-pharmacologie,
- ❖ Chercheur au Centre de Recherche et de Formation en Entomologie Médicale et des Maladies Infectieuses (IDMERTC) de l'USTTB.

Cher Maître,

En acceptant de diriger cette thèse, vous nous avez offert un encadrement scientifique d'une grande qualité. Votre exigence méthodologique, la pertinence de vos orientations et votre constante disponibilité ont été déterminantes dans la conduite de cette recherche.

Veillez recevoir l'expression de notre profonde reconnaissance, de notre très haute considération et de notre profond respect.

A notre Maître et membre du jury :

Docteur Moussa KEITA

- ❖ PhD en Entomologie et Parasitologie médicale,
- ❖ Maître-Assistant en Entomologie-Parasitologie à la Faculté de Médecine et d'Odonto-Stomatologie (FMOS),
- ❖ Chercheur au Centre de Recherche et de Formation en l'Entomologie Médicale et des Maladies Infectieuses (IDMERTC) de l'USTTB.

Cher Maître,

En acceptant de présider ce jury, vous nous faites un grand honneur. Nous vous remercions pour l'intérêt que vous portez à ce travail et pour le temps consacré à son évaluation.

Veillez trouver ici l'expression de notre profonde gratitude, de notre très haute considération et de notre profond respect.

A notre Maître et membre du jury

Docteur Merepen Dite Agnès GUINDO

- ❖ Docteur en Pharmacie,
- ❖ Assistante en Immunologie à la FAPH/USTTB,
- ❖ Chercheur au Centre de Recherche et de Formation en l'Entomologie Médicale et des Maladies Infectieuses (IDMERTC) et Centre de Recherche et de Formation sur les Parasites et les Microbes (PMRTC) de l'USTTB.

Chère Maître,

C'est pour nous un grand honneur que vous acceptiez de siéger parmi notre honorable jury. Vos qualités professionnelles, humaines, et votre ouverture d'esprit font de vous un maître apprécié de tous.

Permettez-nous de vous exprimer notre gratitude et nos remerciements les plus sincères.

A notre Maître et Co-Directeur :

Docteur Zana Lamissa SANOGO

- ❖ PhD en Entomologie médicale,
- ❖ Chargé de Recherche à la FAPH,
- ❖ Chercheur au Centre de Recherche et de Formation sur l'Entomologie Médicale et des Maladies Infectieuses (IDMERTC) de l'USTTB,
- ❖ Chargé de cours d'éthique et bioéthique au département de recherche en santé publique à la faculté de médecine et d'odontostomatologie (FMOS).

Cher Maître,

Votre accompagnement scientifique, vos observations pertinentes et vos conseils avisés ont contribué de manière significative à la qualité de cette recherche. Nous vous remercions pour votre disponibilité et votre engagement tout au long de ce travail.

Veillez agréer l'expression de notre profonde gratitude et de notre haute considération.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

% : Pourcentage

°C : Degré Celsius

ADN : Acide désoxyribonucléique

ADF: Augmented Dickey-Fuller (Test de Dickey-Fuller augmenté)

An. : *Anopheles*

ARIMA : AutoRegressive Integrated Moving Average (Modèle autorégressif intégré à moyenne mobile)

Bp : Base paire

CCF : Fonction de corrélation croisée

Coll. : Collecté

FAPH : Faculté de Pharmacie

FMOS : Faculté de Médecine et d'Odonto-Stomatologie

H : Heure

IDMERTC : Centre de Recherche et de Formation en Entomologie Médicale et des Maladies Infectieuses

Kdr: Knockdown resistance

Km: Kilomètre

KPSS: "Test de Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin"

LMVR : Laboratory of Malaria and Vector Research (Laboratoire de Recherche sur le Paludisme et les Vecteurs)

Min : Minute

ml : Millilitre

mm : Millimètre

N : nombre

NIAID : National Institute of Allergy and Infectious Diseases (Institut National des Allergies et des Maladies Infectieuses)

NIH : National Institutes of Health (Instituts nationaux de la santé)

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PCR : Polymerase Chain Reaction (Réaction de polymérisation en chaîne)

PTC: Programmable Thermal Controller (Thermocycleur à effet Peltier)

STL: “Seasonal and Trend decomposition using Loess”

s.l. : Sensus lato

s.s. : Sensus stricto

USTTB : Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako

UV : Ultraviolet

μl : Microlitre

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : <i>Anopheles</i> femelle et mâle	8
Figure 2 : Cycle biologique du moustiques Anophèles (Harper, 2023)	8
Figure 3 : Carte du cercle de Banamba montrant le site d'étude (Cissé, 2023)	13
Figure 4 : Densité mensuelle moyenne par case d' <i>Anopheles gambiae s.l.</i> pendant les différentes années à Thierola de 2016 à 2024	22
Figure 5: Composition d' <i>Anopheles gambiae s.l.</i> de 2016 à 2024.....	24
Figure 6 : Variation par analyse de séries temporelles de la fréquence des espèces du complexe <i>Anopheles gambiae</i> entre 2016 et 2024	26
Figure 7 : Corrélation croisée entre <i>An. coluzzii</i> et <i>An. gambiae</i>	26
Figure 8 : Photo d'un gel après migration.....	XXI

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Composition des espèces <i>An. gambiae s.l.</i> pendant les différentes saisons à Thierola de 2016 à 2024	23
Tableau 2 : Ajustement d'un modèle GARCH sur les résidus du modèle ARIMA d' <i>An. coluzzii</i>	Erreur ! Signet non défini.

TABLE DES MATIERES

Dédicace	II
REMERCIEMENTS	III
Hommage aux membres du jury	VII
Liste des sigles et abréviations	XII
Liste des figures.....	XIV
Liste des tableaux.....	XV
Table des matières	XVI
1. Introduction.....	2
2. OBJECTIFS	5
2.1. Objectif général.....	5
2.2. Objectifs spécifiques	5
3. GENERALITES.....	7
3.1. Le paludisme.....	7
3.1.1. Définition	7
3.1.2. Agents pathogènes.....	7
3.1.3. Situation épidémiologique	7
3.2. Les vecteurs du paludisme	7
3.2.1. Position systématique.....	7
3.2.2. Morphologie générale	8
3.3. Le complexe <i>Anopheles gambiae</i>	9
3.3.1. Composition spécifique.....	9
3.3.2. Répartition géographique	9
3.3.3. Importance vectorielle	9
3.4. Bio-écologie des anophèles en zone sahélienne	9
3.4.1. Caractéristiques écologiques.....	9
3.4.2. Gîtes larvaires.....	9
3.4.3. Comportement trophique et de repos	10
3.4.4. Cycle gonotrophique	10
3.5. Dynamique des populations d' <i>An. gambiae s.l.</i> en zone sahélienne	10
3.5.1. Fluctuation saisonnière.....	10

3.5.2.	Persistance en saison sèche.....	10
3.6.	Influence des facteurs climatiques.....	11
3.7.	Lutte antivectorielle.....	11
3.8.	Relation densité vectorielle et transmission.....	11
4.	Matériels et méthodes.....	13
4.1.	Site et période d'étude.....	13
4.1.1.	Description du site d'étude.....	13
4.1.2.	Relief et Hydrographie du site d'étude.....	14
4.1.3.	Climat et végétation.....	14
4.1.4.	Faune.....	14
4.1.5.	Activités économiques.....	15
4.2.	Échantillonnage.....	15
4.3.	Traitement des échantillons : Identification des espèces d' <i>An. gambiae s.l.</i> par la technique moléculaire.....	16
4.4.	Paramètres mesurés.....	16
4.5.	Analyse des données.....	17
4.6.	Étapes de l'analyse des séries temporelles.....	17
4.6.1.	Préparation des données.....	17
4.6.2.	Exploration descriptive des séries.....	17
4.6.3.	Décomposition saisonnière.....	17
4.6.4.	Tests de stationnarité.....	18
4.6.5.	Modélisation ARIMA saisonnière.....	18
4.6.6.	Validation diagnostique des modèles.....	19
4.6.7.	Analyse des corrélations croisées.....	20
4.6.8.	Analyse de la volatilité (GARCH).....	20
4.7.	Considérations éthiques.....	20
5.	RESULTATS.....	22
5.1.	Variations temporelles des densités d' <i>An. gambiae s.l.</i> à Thierola de 2016 à 2024.	22
5.2.	Composition de la population d' <i>Anopheles gambiae s.l.</i> à Thierola de 2016 à 2024	23

5.2.1. Composition mensuelle de la population d' <i>An. gambiae s.l</i> pendant les différentes saisons.....	23
5.2.2. Variation interannuelle de la composition du <i>Anopheles gambiae s.l</i> à Thierola de 2016 à 2024.....	24
5.2.3. Variation par analyse de séries temporelles de la fréquence des espèces du complexe <i>Anopheles gambiae</i> à Thierola entre 2016 et 2024.....	25
5.2.4. Analyse de corrélation croisée entre <i>An. coluzzii</i> et <i>An. gambiae</i>	26
5.2.5. Absence d'effet GARCH	27
6. COMMENTAIRES ET DISCUSSION	29
6.1. Variation mensuelle de la densité d' <i>Anopheles gambiae s.l</i>	29
6.2. Variation de la composition du complexe <i>Anopheles gambiae</i>	30
6.3. Variation temporelle de la fréquence des espèces du complexe <i>Anopheles gambiae</i>	31
7. CONCLUSION	33
8. RECOMMANDATION	34
9. Références.....	35
10. Annexes	XIX
11. FICHE SIGNALITIQUE	XXIV
12. SERMENT DE GALIEN	XXVII

INTRODUCTON

1. INTRODUCTION

Le paludisme demeure l'une des principales maladies parasitaires affectant les populations d'Afrique subsaharienne, où sa transmission est étroitement associée à la présence, à l'abondance et à la dynamique spatio-temporelle des moustiques du complexe *Anopheles gambiae* (*An. gambiae s.l.*) (OMS, 2025). Ce complexe regroupe plusieurs espèces morphologiquement proches mais écologiquement et biologiquement différenciées, dont *Anopheles coluzzii*, *Anopheles gambiae* et *Anopheles arabiensis* (Coetzee et al., 2013). La compréhension de la dynamique de leurs populations constitue ainsi un élément essentiel pour mieux caractériser la transmission du paludisme et optimiser les stratégies de lutte antivectorielle.

Au Sahel de la population anophélienne présente des particularités remarquables. La saison sèche qui s'étend sur plusieurs mois entraîne une réduction considérable, voire une disparition des eaux de surface servant de gîtes larvaires (Dao et al., 2014). Cependant, après les premières pluies, les populations adultes d'*An. gambiae s.l.* réapparaissent. Cette réapparition s'explique par la persistance en saison sèche de certaines espèces (Adamou et al., 2011; Dao et al., 2014; Lehmann et al., 2010) ou par une migration à longue distance (Huestis et al., 2019).

Ces différents travaux ont profondément renouvelé la compréhension de l'écologie des vecteurs au Sahel en montrant que l'absence apparente de moustiques pendant certaines périodes de la saison sèche ne signifie pas nécessairement une disparition complète des populations. Toutefois, ces travaux se reposaient sur une fenêtre temporelle et relativement limitée. La dynamique d'une population de moustiques ne dépend pas uniquement de la saisonnalité, elle peut également être influencée par les variations interannuelles des précipitations, de la température, de l'humidité, de la disponibilité des gîtes larvaires, des modifications de l'occupation des sols et, plus largement, par les changements environnementaux et climatiques. Une analyse de séries temporelles sur une longue est donc indispensable pour distinguer des variations saisonnières récurrentes et des changements interannuels sur une longue période.

Dans cette perspective, nous avons proposé d'étudier la dynamique des populations adultes d'*An. gambiae s.l.* de 2016 à 2024. Une période d'observation de neuf années a permis d'aller au-delà de la simple description des cycles saisonniers et d'examiner la stabilité ou la modification des

caractéristiques des populations d'*Anopheles gambiae* s.l. Cette étude offre notamment la possibilité d'identifier les périodes de maximum et de minimum d'abondance, de caractériser la saisonnalité, de comparer les années entre elles et d'évaluer la régularité des fluctuations observées chez les différentes espèces du complexe.

Cette approche est particulièrement pertinente dans un contexte où les interventions de lutte antivectorielle et les changements environnementaux peuvent modifier la structure et la dynamique des populations de moustiques, dont les variations d'abondance peuvent affecter le potentiel vectoriel et la persistance de la transmission du paludisme. L'analyse des séries temporelles constitue ainsi un outil pertinent pour comprendre la dynamique à long terme des vecteurs et orienter la surveillance ainsi que l'adaptation des stratégies de lutte antivectorielle au Sahel.

OBJECTIFS

2. OBJECTIFS

2.1. Objectif général

Étudier la dynamique de la population adulte d'*Anopheles gambiae s.l.* à Thierola, un village en zone sahélienne au Mali de 2016 à 2024.

2.2. Objectifs spécifiques

- Déterminer les variations mensuelles de la densité d'*Anopheles gambiae s.l.* de 2016 à 2024 ;
- Déterminer les variations de la composition des espèces d'*Anopheles gambiae s.l.* de 2016 à 2024.

GENERALITES

3. GENERALITES

3.1. Le paludisme

3.1.1. Définition

Le paludisme est une maladie parasitaire fébrile causée par des protozoaires du genre *Plasmodium* (*P.*) et transmise à l'homme par la piqure infectante de moustiques femelles du genre *Anopheles*. Cette maladie reste un problème majeur de santé publique, notamment dans les régions tropicales et subtropicales en représentant un lourd fardeau sanitaire en Afrique subsaharienne (OMS, 2023).

3.1.2. Agents pathogènes

Chez l'homme, cinq espèces de *Plasmodium* sont responsables du paludisme : *Plasmodium falciparum*, *Plasmodium malariae*, *Plasmodium ovale*, *Plasmodium vivax* et *Plasmodium knowlesi* (Mouchet, 2004; Mouchet & Carnevale, 1991). La majorité des infections humaines sont causées par *P. falciparum*, qui est responsable de formes sévères et de la plupart des décès liés à cette maladie (Mouchet & Carnevale, 1991).

3.1.3. Situation épidémiologique

Au niveau mondial, le paludisme a causé 282 millions de nouveaux cas dans 80 pays endémiques, contre 273 millions en 2023 et 230 millions en 2015 (OMS, 2025). La région africaine de l'OMS concentre 94 % des cas et 95 % des décès, dont 75 % chez les enfants de moins de cinq ans (OMS, 2025). Au Mali, la transmission est stable dans le sud, saisonnière dans la zone sahélienne et instable dans le nord du pays, reflétant les variations écologiques et climatiques régionales (OMS, 2022).

3.2. Les vecteurs du paludisme

3.2.1. Position systématique

Les moustiques vecteurs du paludisme appartiennent à l'embranchement des Arthropodes, à la classe des Insectes, à l'ordre des Diptères, à la famille des Culicidés et au genre *Anopheles* (Carnevale & Robert, 2009).

3.2.2. Morphologie générale

Les moustiques adultes présentent des caractères morphologiques distinctifs : chez la femelle, les palpes sont de longueur égale à la trompe et la position de repos est oblique. Les ailes sont généralement ornées de taches sombres caractéristiques. Leur cycle biologique (figure 2) comprend les stades œuf, larve, nymphe et adulte, et sa durée est fortement influencée par la température et la disponibilité en eau (Carnevale & Robert, 2009).



Figure 1 : *Anopheles* femelle et mâle

Source : <https://www.fotografonaturalista.com/risorsefotografia/portfolio/invertebrati/106-anopheles-gambiae>

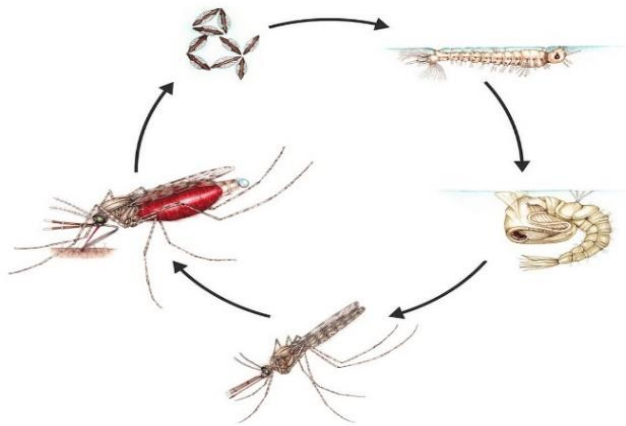


Figure 2 : Cycle biologique du moustiques Anophèles (Harper, 2023)

3.3. Le complexe *Anopheles gambiae*

3.3.1. Composition spécifique

Le complexe *Anopheles gambiae* comprend plusieurs espèces morphologiquement similaires mais génétiquement distinctes. Les principales espèces présentes au Mali sont *Anopheles coluzzii*, *Anopheles gambiae* et *Anopheles arabiensis*. Chacune possède des comportements écologiques et des préférences d'habitat spécifiques (Coetzee et al., 2013).

3.3.2. Répartition géographique

Anopheles coluzzii est surtout présente dans les zones sahéliennes et les périmètres irrigués, *An. gambiae* est majoritairement trouvée dans les zones humides, tandis qu'*An. arabiensis* occupe les milieux plus secs. Ces différences de répartition reflètent l'adaptation écologique des espèces aux conditions locales de température et d'humidité (Nicholson, 2013).

3.3.3. Importance vectorielle

Les membres du complexe *Anopheles gambiae* sont des vecteurs efficaces en raison de leur forte anthropophilie, de leur longévité et de leur capacité à transmettre le parasite *Plasmodium*. Ils représentent ainsi la principale menace pour la santé humaine dans les zones sahéliennes (Godfray, 2013).

3.4. Bio-écologie des anophèles en zone sahélienne

3.4.1. Caractéristiques écologiques

Le sahel se caractérise par un climat sahélien avec une pluviométrie annuelle comprise entre 400 et 600 mm en moyenne et une longue saison sèche allant de novembre à mai (Lehmann et al., 2014). Les températures y sont élevées et variables, influençant directement la disponibilité des gîtes larvaires pour les moustiques et la dynamique de leurs populations (Nicholson, 2013).

3.4.2. Gîtes larvaires

En zone sahélienne, les gîtes larvaires sont principalement temporaires et se forment après les pluies. Les mares, flaques, ornières et rizières constituent les habitats principaux pour le développement larvaire des anophèles. La durée de vie et la productivité de ces gîtes dépendent fortement des conditions climatiques (Minakawa et al., 2001).

3.4.3. Comportement trophique et de repos

Anopheles coluzzii présente un comportement endophage et endophile marqué (Tandina et al., 2018), tandis qu'*An. arabiensis* adopte souvent des comportements exophages et exophiles (Asale et al., 2017). Ces comportements influencent la probabilité de contact avec l'homme et donc la transmission du paludisme.

3.4.4. Cycle gonotrophique

Le cycle gonotrophique comprend la recherche de l'hôte, la prise du repas sanguin, la digestion et la maturation ovarienne, suivi de la ponte. Sa durée est généralement de 2 à 3 jours en zone sahélienne, mais peut varier selon les conditions climatiques locales (Carnevale & Robert, 2009).

3.5. Dynamique des populations d'*An. gambiae s.l.* en zone sahélienne

3.5.1. Fluctuation saisonnière

Les populations d'*An. gambiae s.l.* connaissent quatre phases distinctes au cours de l'année : une faible densité en saison sèche, une augmentation progressive en début de saison pluvieuse, un pic d'abondance en pleine saison des pluies, puis une décroissance à la fin de l'hivernage (Sogoba et al., 2007).

3.5.2. Persistance en saison sèche

Estivation : Estivation est un phénomène écologique, qui correspond à un état de ralentissement physiologique et comportemental, qui permet aux insectes de survivre aux conditions environnementales défavorables.

Certaines populations, notamment *An. coluzzii*, survivent à la saison sèche grâce à l'estivation. Cette stratégie leur permet aux moustiques de résister aux conditions extrêmes et de recoloniser rapidement les gîtes larvaires dès le retour des pluies (Dao et al., 2014; Lehmann et al., 2010).

Migration : La migration correspond au déplacement intentionnel et directionnel d'une zone en prévision de conditions futures défavorables vers un environnement favorable, souvent situé à une distance considérable.

Les moustiques recolonisent les zones sahéliennes par dispersion passive et active dès l'apparition de nouveaux gîtes larvaires. Cette recolonisation rapide explique le pic de densité observé dès le début de la saison pluvieuse (Huestis et al., 2019; Samaké, 2016).

3.6. Influence des facteurs climatiques

La pluviométrie, la température et l'humidité relative ainsi que la direction du vent sont les principaux facteurs climatiques influençant la dynamique des populations d'*An. gambiae s.l.* (Samaké, 2016). Ils affectent la survie larvaire et adulte, le rythme de reproduction et, par conséquent, l'intensité de la transmission du paludisme (Mordecai et al., 2013).

3.7. Lutte antivectorielle

Les principales interventions comprennent l'utilisation massive de moustiquaires imprégnées d'insecticide à longue durée d'action et la pulvérisation intra-domiciliaire. Cependant, la résistance aux pyréthrinoides, souvent associée à la mutation *kdr*, modifie l'efficacité de ces stratégies (Ranson et al., 2011; Sovi et al., 2020).

3.8. Relation densité vectorielle et transmission

La densité vectorielle, la longévité des moustiques et le taux d'infection déterminent l'intensité de la transmission du paludisme (Mouchet & Carnevale, 1991). Une densité élevée pendant la saison des pluies est corrélée à une augmentation du risque de transmission dans la population humaine (Macdonald, 1956; Smith et al., 2012).

MATERIELS ET METHODES

4. MATERIELS ET METHODES

4.1. Site et période d'étude

Cette étude s'est déroulée sur neuf années de 2016 à 2024, dans le village de Thierola, situé dans la commune rurale de Kiban, cercle de Banamba, région de Koulikoro au Mali.

4.1.1. Description du site d'étude

Le village de Thierola est situé à 13,65° de latitude nord et 7,20° de longitude ouest (Lehmann et al., 2014). Il relève de la commune de Kiban, dans le cercle de Banamba, région de Koulikoro. Il est limité au nord par le village de Zanga (à 3 km), à l'est par le village de Dôdougou (à 6 km), au sud par M'Piabougou (à 8 km) et à l'ouest par le village de Bako (à 6 km).

La population du village est estimée à environ 500 habitants en 2021. Elle est majoritairement composée de Bambara (90 %) et de Peuhl (10 %). La population est musulmane.

Thierola a été fondé en 1942 par Boukari Yattabary, originaire de Djoni, un village de la commune de Toubacoura situé à environ 26 km au sud-ouest de Thierola). Le village était initialement considéré comme un hameau des ressortissants de Djoni, d'où son ancienne appellation « Djonibougou » (hameau de Djoni). Vers les années 1970, il a adopté son nom actuel de Thierola, qui signifie « village des Thiero » (Alpha Seydou Yaro, 2014).

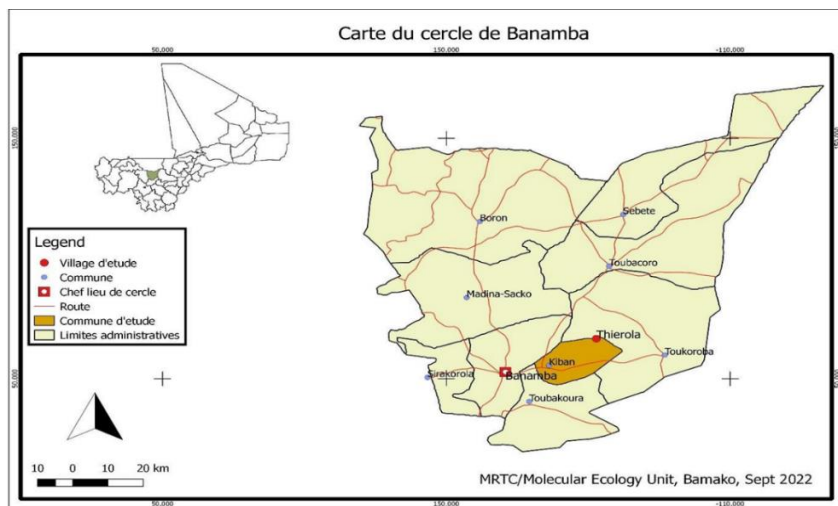


Figure 3 : Carte du cercle de Banamba montrant le site d'étude (Cissé, 2023)

4.1.2. Relief et Hydrographie du site d'étude

Le relief du site se caractérise par de vastes plaines dont les altitudes dépassent rarement 200 mètres. Les principaux points d'eau sont le *Miniyan Kô* situé à l'est et le *Dialla kô* situé au sud-ouest du village. Ces retenues d'eau temporaires se forment pendant la saison de pluie.

Par endroits, ces mares présentent des dépressions qui constituent de véritables gîtes larvaires favorables au développement des anophèles. Après le tarissement de ces points d'eau, généralement avant le mois de décembre, l'ensemble des besoins en eau de la population humaine et du cheptel repose sur quatre puits, dont deux à grand diamètre sont considérés comme intarissables.

4.1.3. Climat et végétation

Le climat de la zone d'étude est de type sahélien marqué par l'influence de deux vents dominants : harmattan et la mousson. Ces régimes déterminent l'alternance de deux grandes saisons : une saison des pluies et une saison sèche.

La saison des pluies s'étend généralement de juin à octobre, avec un cumul pluviométrique annuel allant jusqu'à 500 mm, souvent mal réparti dans le temps et l'espace (Lehmann et al., 2014). La saison sèche, qui dure 8 mois, comprend une période fraîche de décembre à février et une période chaude de mars à mai. Les températures extérieures descendent rarement en dessous de 15°C ou dépassent 40°C (Huestis & Lehmann, 2014 a).

Le couvert végétal est typiquement sahélien. Elle est composée d'arbres et d'arbustes parmi lesquels figurent notamment le Baobab (*Adansonia digitata*), *Saba senegalensis* (liane goïne), *Guera senegalensis* (guiera du Sénégal), *Kaya senegalensis* (Caïlcédrat), *Vitellaria paradoxa* (Karité), etc. La strate herbacée, particulièrement développée en saison des pluies, est dominée par de hautes herbes qui atténuent le relief, notamment *Andropogon pseudapricus*, *Andropogon gayanus* et *Hygrophila senegalensis*.

4.1.4. Faune

La faune est constituée de reptiles, de quelques petits mammifères (lièvres, écureuils, etc..) et beaucoup d'espèces d'oiseaux. A côté de ceci, on y trouve quelques espèces d'insectes d'importance médicale comme les culicidés (*Anopheles*, *Culex*, *Aedes*), les muscidées (*Musca domestica*), Phlebotomidae (*Phlebotomus*)...

4.1.5. Activités économiques

Elles sont essentiellement dominées par l'agriculture en saison des pluies. Les cultures portent essentiellement sur le mil, le sorgho, le maïs, le sésame, le haricot et l'arachide.

Les produits de cueillette comprennent notamment les fruits de baobab et les noix de karité. Ces dernières années, le maraîchage s'est développé dans le village grâce à l'appui de certaines organisations non gouvernementales.

Cette activité est menée principalement par les femmes, les produits de cette activité sont : tomate, aubergine, oignon, gombo, choux, concombre, piment.

L'élevage constitue une activité secondaire ; il concerne principalement les bovins, les caprins, les ovins et la volaille.

4.2. Échantillonnage

Un échantillonnage par convenance (non probabiliste) a été réalisé sur les moustiques collectés et destinés à l'identification des espèces du complexe *Anopheles gambiae* par la technique de l'amplification en chaîne par polymérisation (PCR).

4.2.1. Sélection des cases

Dans le village de Thierola, 40 cases ont été sélectionnées au hasard, couvrant l'ensemble du village. Ces cases ont été conservées durant toute la période d'étude. Chaque case était identifiée par un numéro unique. Cinq jeunes volontaires du village ont été formés par l'équipe de recherche aux techniques de collecte des moustiques et ont assuré régulièrement les opérations de collecte avec des intervalles de collecte établis selon le programme de l'étude : les prospections se faisaient généralement une fois par semaine pendant la saison des pluies et tous les dix jours pendant la saison sèche. Toutefois, pendant la période du pic de la saison sèche (Dao et al., 2014), la fréquence des captures était ramenée à tous les deux à trois jours.

4.2.2. Collecte des données

L'échantillonnage a porté sur la population de moustiques qui se reposait à l'intérieur des habitations (faune résiduelle endophile). La capture des moustiques a été faite à l'aide d'aspirateurs à bouche. Les collectes étaient effectuées dans les 40 cases sélectionnées, entre 08h et 11h du matin.

Le captureur muni d'une torche et d'un aspirateur inspectait minutieusement les coins et recoins de chaque case pendant au moins 5min par case. À titre de contrôle, un deuxième captureur repassait parfois dans les cases déjà visitées afin de s'assurer de l'exhaustivité de la prospection.

Les moustiques capturés étaient gardés dans des pots en carton recouverts de tulle moustiquaire. Ils étaient ensuite identifiés morphologiquement et conservés par case dans des tubes Eppendorf de 1,5 ml contenant du gel de silice déshydratant (Référence : #13767, Millipore Sigma, Burlington, MA). Sur chaque tube étaient marqués, la date de capture et le numéro d'identification de la case.

Le nombre d'anophèles capturés par case était noté sur des fiches de collecte ; les échantillons étaient acheminés au laboratoire et gardés à la température ambiante avant traitement.

Pour comprendre l'évolution de la population du complexe *Anopheles gambiae*, nous avons divisé l'année en deux saisons :

- Une saison sèche : de novembre à mai (absence de pluies) ;
- Une saison pluvieuse : de juin à octobre.

4.3. Traitement des échantillons : Identification des espèces d'*An. gambiae s.l.* par la technique moléculaire

La technique moléculaire de polymérisation en chaîne ou PCR a été utilisée pour différencier les espèces d'*An. gambiae s.l.* précisément *An. arabiensis*, *An. coluzzii* et *An. gambiae* (Wilkins et al., 2006).

4.4. Paramètres mesurés

➤ La densité

Elle correspond au rapport entre le nombre total d'une espèce capturées et le nombre total de cases prospectées.

$$D (\text{densité}) = (\text{nombre d'anophèles collectés}) / (\text{nombre de cases prospectées})$$

➤ La composition spécifique

Elle qualifie les différentes espèces qui caractérisent un groupement d'êtres vivants.

4.5. Analyse des données

Chaque spécimen collecté a reçu un numéro individuel d'identification. Les informations notées sur les fiches de collecte ont été enregistrées dans le logiciel Excel 2016.

Les figures ont été réalisées dans le logiciel Excel 2016 ainsi que les analyses préliminaires. L'analyse des séries temporelles a été réalisées à partir de R.

4.6. Étapes de l'analyse des séries temporelles

L'analyse des séries temporelles des populations d'*Anopheles gambiae s.l.* a été réalisée selon plusieurs étapes méthodologiques successives permettant de caractériser la dynamique saisonnière, la stabilité temporelle et la capacité prédictive des données entomologiques.

4.6.1. Préparation des données

Les données de captures mensuelles des moustiques ont d'abord été organisées sous forme de séries chronologiques couvrant la période de 2016 à 2024. Les valeurs manquantes ont été imputées par interpolation afin de conserver la régularité temporelle nécessaire aux analyses statistiques. Les données ont ensuite été converties en objets de séries temporelles avec une périodicité mensuelle.

4.6.2. Exploration descriptive des séries

Une analyse descriptive initiale a permis de visualiser :

- Les tendances générales ;
- Les fluctuations saisonnières ;
- Les pics d'abondance ;
- Les différences entre espèces.

Cette étape a également servi à détecter d'éventuelles anomalies ou irrégularités dans les données.

4.6.3. Décomposition saisonnière

Les séries ont été décomposées en trois composantes :

- Tendances ;
- Saisonnalité ;

- Résidus.

La méthode STL (*Seasonal and Trend decomposition using Loess*) a été utilisée afin d'identifier la structure saisonnière annuelle et d'évaluer la stabilité des variations saisonnières au cours du temps.

4.6.4. Tests de stationnarité

Les tests de stationnarité ont été utilisés pour déterminer si les caractéristiques d'une série temporelle (moyenne, variance, autocorrélation) restent constantes au cours du temps. Une série est dite stationnaire lorsque ses caractéristiques statistiques restent constantes au cours du temps. Autrement dit, son comportement ne dépend pas de la période d'observation.

Avant la modélisation, la stationnarité des séries a été évaluée à l'aide de :

- Du test de Dickey-Fuller Augmenté (ADF) : dont l'hypothèse nulle stipule la présence d'une racine unitaire (non-stationnarité) ;
- Du test KPSS : dont l'hypothèse nulle postule au contraire la stationnarité de la série.

Ces tests ont permis de déterminer si les propriétés statistiques des séries restaient constantes dans le temps ou si une différenciation était nécessaire avant modélisation. Les tests ADF et KPSS sont complémentaires. Le test ADF recherche la présence d'une racine unitaire, tandis que le test KPSS vérifie directement la stabilité de la série.

4.6.5. Modélisation ARIMA saisonnière

Les dynamiques temporelles ont ensuite été modélisées à l'aide de modèles ARIMA saisonniers (AutoRegressive Integrated Moving Average). La sélection du meilleur modèle a été effectuée automatiquement en minimisant le critère d'information d'Akaike (AIC) (Lennart Oelschläger, 2024).

Cette étape a permis :

- De quantifier les dépendances temporelles ;
- De mesurer la mémoire saisonnière ;
- De caractériser les tendances des populations.

4.6.6. Validation diagnostique des modèles

Le modèle ARIMA optimal avec constance a été retenu pour *An. coluzzii*. Les coefficients estimés étaient tous significatifs : le terme de moyenne mobile $ma1 = 0,386$ ($p < 0,001$) traduisait une inertie à court terme où un choc aléatoire se répercute à 38,6% le mois suivant. Les termes autorégressifs saisonniers $sar1 = 0,308$ ($p < 0,01$) et $sar2 = 0,247$ ($p < 0,05$) ont capturé la mémoire interannuelle de la série. La constante estimée à 35,86 spécimens correspondait à l'abondance moyenne de long terme.

La validation du modèle était excellente car le test de Ljung-Box sur les résidus n'a détecté aucune autocorrélation résiduelle significative ($Q^* = 20,13$; $p = 0,387$), confirmant que le modèle a extrait toute la structure temporelle. Le test de normalité de Jarque-Bera indiquait que les résidus suivaient une distribution normale (statistique = 0,071 ; $p = 0,965$), un résultat qui valide l'inférence statistique et les intervalles de confiance paramétriques.

Pour *Anopheles gambiae*, le modèle retenu était un ARIMA intégrant une différenciation d'ordre 1, cohérent avec la non-stationnarité détectée. Pour *Anopheles arabiensis*, le modèle ARIMA a pu capturer l'essentiel de la structure saisonnière malgré la faible abondance.

<i>An. coluzzii</i>	Beta	95% CI
ma1	0.39	0.21, 0.56
sar1	0.31	0.12, 0.49
sar2	0.25	0.04, 0.46
intercept	36	28, 44

Abbreviation: CI = Confidence Interval

<i>An. gambiae</i>	Beta	95% CI
ar1	0.56	0.30, 0.81
ma1	-0.92	-1.1, -0.77

Abbreviation : CI = Confidence Interval

<i>An. arabiensis</i>	Beta	95% CI
ma1	0.46	0.29, 0.63
sar1	0.08	-0.13, 0.29
sar2	0.24	0.02, 0.45
intercept	2.4	1.5, 3.3
Abbreviation : CI = Confidence Interval		

Ces diagnostics ont permis de confirmer que les modèles capturaient correctement la structure temporelle des séries.

4.6.7. Analyse des corrélations croisées

Une fonction de corrélation croisée (CCF) a été appliquée entre espèces afin d'identifier d'éventuels décalages temporels dans leurs dynamiques respectives et d'explorer les relations écologiques entre populations.

4.6.8. Analyse de la volatilité (GARCH)

Un modèle GARCH a été ajusté sur les résidus afin de tester l'existence d'une volatilité conditionnelle, c'est-à-dire des périodes de forte variabilité suivies d'autres périodes instables. Cette étape a permis d'évaluer la stabilité de la variance des populations au cours du temps.

4.7. Considérations éthiques

La présente étude fait partie des protocoles de recherche de la collaboration entre l'USTTB au Mali et les Instituts nationaux de la santé des États-Unis d'Amérique (NIH).

La permission de travailler dans le village a été accordée par la chefferie locale du village après une réunion d'information initiale au cours de laquelle la nature et les objectifs de l'étude ont été expliqués à tous les membres de la communauté dans la langue locale. Le consentement des captureurs (pour participer aux collectes de moustiques) et des chefs de famille a été demandé et obtenu à travers des échanges entre les investigateurs et les villageois avant la sélection de leur maison dans l'étude.

RESULTATS

5. RESULTATS

Au total 18271 individus d'*An. gambiae s.l.* (63% de femelles et 37% de mâles) ont été collectés dans 14438 habitations entre 2016 et 2024.

5.1. Variations temporelles des densités d'*An. gambiae s.l.* à Thierola de 2016 à 2024

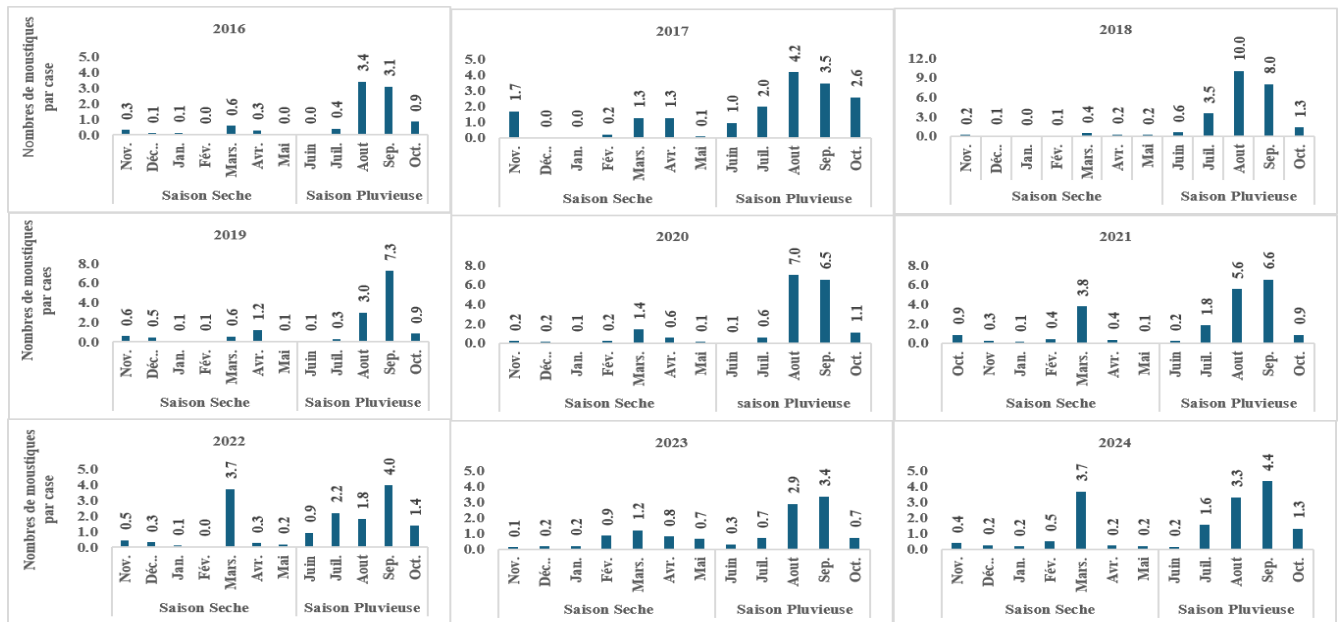


Figure 4 : Densité mensuelle moyenne par case d'*Anopheles gambiae s.l.* pendant les différentes années à Thierola de 2016 à 2024

De manière générale, les densités les plus faibles ont été observées pendant la saison sèche (novembre à mai), avec des valeurs généralement inférieures à 1 moustique par case, tandis que les densités les plus élevées ont été enregistrées en saison pluvieuse (juin à octobre) avec des pics généralement observés entre août et septembre atteignant jusqu'à 10 moustiques par case puis diminuaient progressivement à partir du mois d'octobre. Par ailleurs, on observait des pics secondaires en saison sèche généralement entre février et avril, pouvant atteindre 4 moustiques par case selon l'année.

5.2.Composition de la population d'*Anopheles gambiae s.l* à Thierola de 2016 à 2024

Parmi les 18271 moustiques collectés, un total de 3910 (tableau 1) *An. gambiae s.l.* ont été identifiés par moléculaire (PCR).

5.2.1. Composition mensuelle de la population d'*An. gambiae s.l* pendant les différentes saisons

Tableau 1 : Composition des espèces *An. gambiae s.l.* pendant les différentes saisons à Thierola de 2016 à 2024

Année		2016			2017			2018			2019			2020			2021			2022			2023			2024		
Saison	Mois	Ar	Ac	Ag	Ar	Ac	Ag	Ar	Ac	Ag	Ar	Ac	Ag	Ar	Ac	Ag	Ar	Ac	Ag	Ar	Ac	Ag	Ar	Ac	Ag	Ar	Ac	Ag
Sèche	Nov.	0	35	0	3	36	11	1	6	0	16	27	1	3	17	0	0	0	0	0	0	0	3	12	0	11	47	1
	Déc.	1	12	0	0	0	0	1	8	0	2	38	0	1	12	0	1	19	0	5	13	0	1	5	0	2	25	0
	Jan.	0	14	0	0	2	0	0	0	0	0	6	0	0	10	0	1	16	0	0	10	0	0	0	0	0	22	0
	Fév.	0	2	0	0	17	0	0	0	0	0	9	0	0	16	0	4	39	0	0	3	0	0	60	0	0	57	0
	Mars	0	39	0	1	59	0	1	25	0	5	49	0	0	51	0	0	60	0	0	60	0	0	60	0	0	70	0
	Avr.	1	27	0	0	50	0	0	23	0	0	56	0	0	30	0	0	29	0	1	17	0	0	70	0	0	20	0
	Mai	0	1	0	0	20	0	0	26	0	0	13	0	0	16	0	0	10	0	0	13	0	0	50	0	0	18	0
Total saison sèche		2	130	0	4	184	11	3	88	0	23	198	1	4	152	0	6	173	0	6	116	0	4	257	0	13	259	1
Pluvieuse	Juin	0	16	0	1	59	0	1	47	0	0	20	0	0	3	0	0	19	0	1	59	0	0	30	0	1	18	0
	Juil..	0	60	0	0	59	0	0	60	0	0	16	0	0	57	1	2	57	1	2	57	1	1	58	1	1	58	0
	Aout	0	58	2	1	56	3	0	44	3	1	55	2	1	59	0	1	54	4	2	52	6	1	59	0	1	58	1
	Sep.	1	47	11	0	50	10	0	58	2	2	64	6	1	58	3				7	63	2	4	53	3	1	58	4
	Oct.	1	42	3	3	37	20	4	46	6	9	54	2	6	52	2				13	32	4	6	50	2	18	58	4
Total saison pluvieuse		2	223	16	5	261	33	5	255	11	12	209	10	8	229	6	3	130	5	25	263	13	12	250	6	22	250	9

Ar: *An. arabiensis* Ac: *An. coluzzii* Ag: *An. gambiae*

Le tableau 1 met en évidence la composition des espèces d'*Anopheles gambiae s.l* pendant les différentes saisons.

Anopheles arabiensis était observé de manière sporadique tout au long de l'année. *Anopheles coluzzii* s'observait pendant toutes deux saisons, augmentait en nombres à l'approche de la saison des pluies. *Anopheles gambiae* n'apparaît qu'en saison pluvieuse a des très faibles nombres à l'accepter les années 2017, 2019 et 2024 ou on l'observait au mois de novembre en saison sèche.

5.2.2. Variation interannuelle de la composition du *Anopheles gambiae s.l* à Thierola de 2016 à 2024

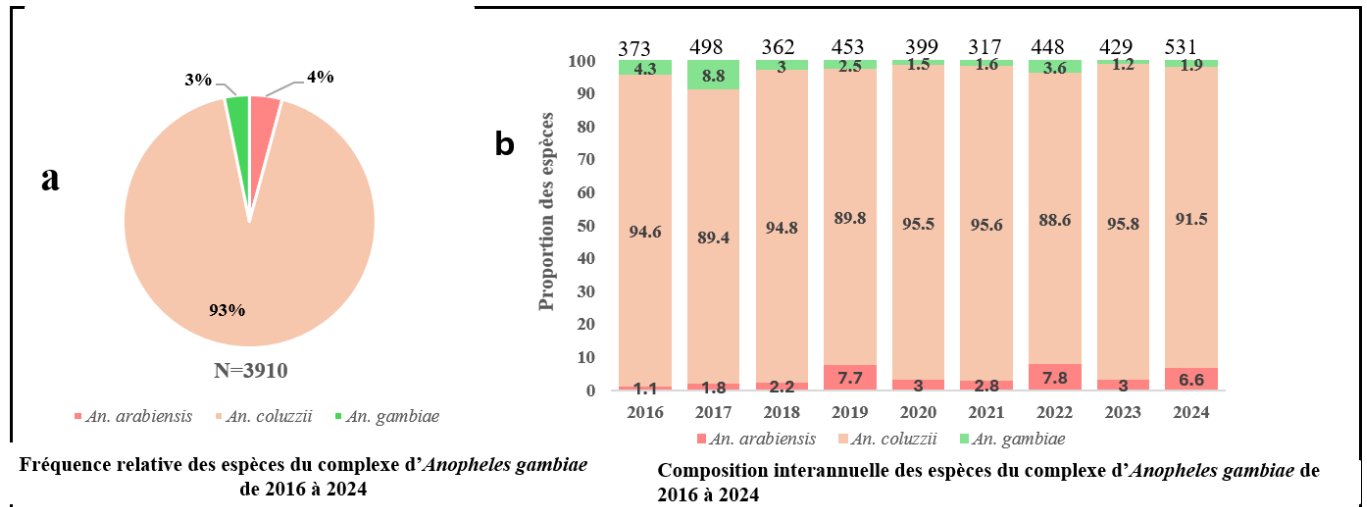


Figure 5: Composition d'*Anopheles gambiae s.l.* de 2016 à 2024

Anopheles coluzzii était l'espèce dominante pendant toute la période d'étude, soit 93% suivie de *An. arabiensis* (4%). *Anopheles gambiae* était l'espèce la moins représentée, soit 3%. La figure 5.b montre une dominance d'*Anopheles coluzzii* sur toute la période ($\approx 88,6\%$ à $95,8\%$). De 2016 à 2018, *Anopheles gambiae* était la deuxième espèce la plus abondante, alors qu'*Anopheles arabiensis* était faiblement représentée. À partir de 2019 et jusqu'en 2024, une inversion de dominance a été observée, avec *An. arabiensis* surpassant systématiquement *An. gambiae* en proportion.

5.2.3. Variation par analyse de séries temporelles de la fréquence des espèces du complexe *Anopheles gambiae* à Thierola entre 2016 et 2024

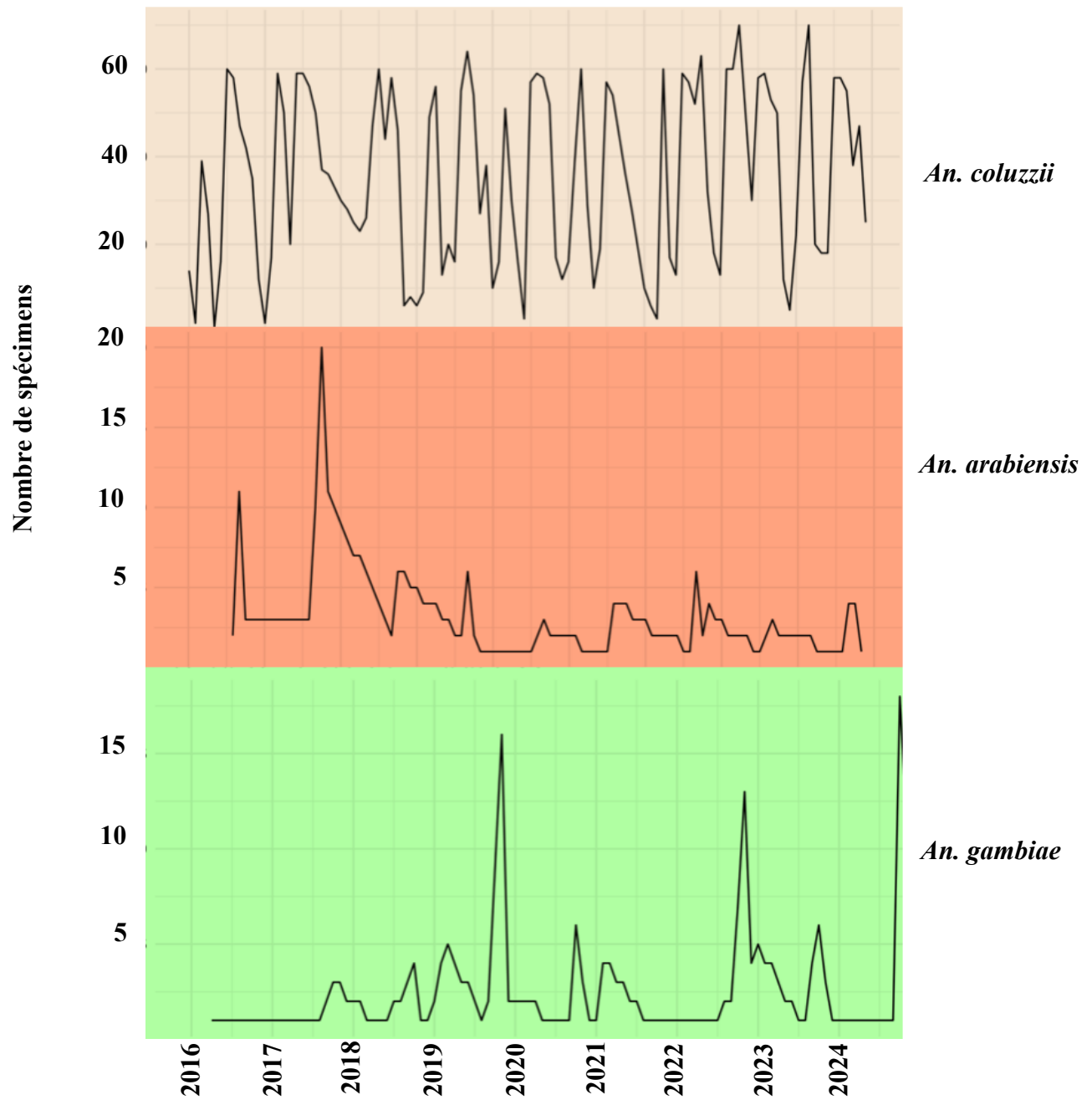


Figure 6 : Variation par analyse de séries temporelles de la fréquence des espèces du complexe *Anopheles gambiae* entre 2016 et 2024

L'analyse des séries temporelles des populations du complexe *Anopheles gambiae* entre 2016 et 2024 a permis de caractériser la dynamique écologique et saisonnière des différentes espèces vectrices du paludisme à Thierola (figure 6).

Les résultats montraient une forte saisonnalité annuelle commune aux populations du complexe *Anopheles gambiae* (*Anopheles coluzzii*, *Anopheles gambiae* et *Anopheles arabiensis*), avec des pics d'abondance entre juillet et octobre, correspondant à la période de forte pluviométrie.

Parmi les populations étudiées, *Anopheles coluzzii* représentait plus de 60 % des captures et présentait une dynamique particulièrement stable au cours du temps. Les tests ADF ($p=0,010$) et KPSS ($p = 0,100$) ont confirmé le caractère stationnaire ou stable de cette série temporelle, indiquant l'absence de dérive importante de la population sur la période étudiée. Cette stabilité a permis l'ajustement d'un modèle ARIMA saisonnier performant, validé par des résidus non autocorrélés et normalement distribués. Les composantes saisonnières observées traduisent une mémoire interannuelle marquée de la dynamique des populations surtout chez *An. coluzzii*.

À l'inverse, le test KPSS appliqué à *Anopheles gambiae* indiquait une dérive temporelle significative ($p = 0,018$) justifiant une différenciation dans le modèle ARIMA (Annexe 3). Le modèle ARIMA retenu avait détecté une non-stationnarité pour l'*Anopheles gambiae* tandis qu'*An. arabiensis* demeurait sporadique avec des abondances très faibles.

5.2.4. Analyse de corrélation croisée entre *An. coluzzii* et *An. gambiae*

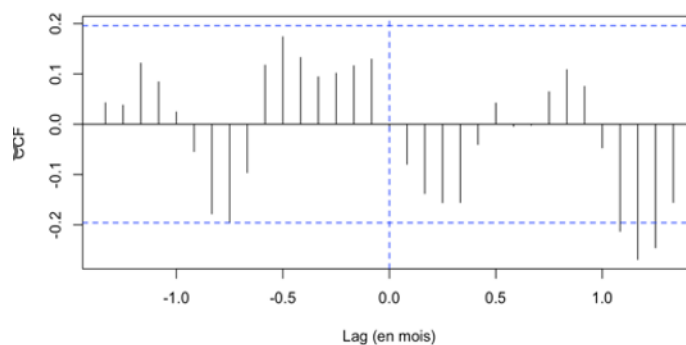


Figure 7 : Corrélation croisée entre *An. coluzzii* et *An. gambiae*

L'analyse de corrélation croisée a mis en évidence un décalage temporel entre *Anopheles coluzzii* et *Anopheles gambiae*. Les variations d'abondance d'*Anopheles coluzzii* précédaient celles de *Anopheles gambiae* d'environ un à deux mois.

5.2.5. Absence d'effet GARCH

Tableau 2 : Ajustement d'un modèle GARCH sur les résidus du modèle ARIMA d'*An. coluzzi*

<i>An. coluzzii</i>	Beta	95% CI	p
a0	225	-359, 809	0.5
a1	0.14	-0.12, 0.41	0.3
b1	0.00	-2.3, 2.3	>0.9

Abbreviation: CI = Confidence Interval

Les coefficients ARCH ($a_1 = 0,145$; $p = 0,293$) et GARCH ($b_1 \approx 0$; $p = 1,000$) étaient non significatifs. Les tests diagnostiques confirmaient l'homoscédasticité des résidus (Box-Ljung sur résidus carrés : $p = 0,549$). L'absence d'effet GARCH (Bollerslev, 1986) significatif pour *Anopheles coluzzii* indiquait que la variabilité des populations restait relativement constante dans le temps, sans épisodes majeurs d'instabilité ou d'explosion démographique imprévisible.

COMMENTAIRES ET DISCUSSION

6. COMMENTAIRES ET DISCUSSION

6.1. Variation mensuelle de la densité d'*Anopheles gambiae s.l.*

Durant ces neuf années d'étude nous avons observé de très faible densité du complexe *An. gambiae* pendant la saison sèche (novembre et mai), avec des valeurs généralement inférieures à 1 moustique par case. Nous avons observé une recrudescence de la densité d'*An gambiae s.l.* en saison pluvieuse (juin et octobre) avec des pics généralement observés entre août et septembre atteignant jusqu'à 10 moustiques par case. A partir du mois d'octobre, les densités ont commencé à chuter de nouveau après l'arrêt des pluies pour redevenir très faibles voire indétectables. Les variations de densité observées, avec des pics marqués entre août et septembre suivis d'une diminution à partir d'octobre, s'inscrivent dans les dynamiques classiques décrites en zone sahélienne, où les précipitations conditionnent fortement l'abondance des populations d'*Anopheles* (Dolo et al., 2004; Ndiath et al., 2012; Sogoba et al., 2007). L'augmentation des densités en saison pluvieuse reflète la prolifération des gîtes larvaires temporaires, favorisant le développement rapide et successif des populations vectorielles (Toure et al., 1996).

Par ailleurs, vers la fin de la saison sèche (entre février et avril), nous avons observé une brusque et légère augmentation de la densité du complexe *Anopheles gambiae* pouvant atteindre souvent en moyenne environ 4 moustiques par case. La persistance de faibles densités en saison sèche, ainsi que l'apparition de pics secondaires au milieu de la saison sèche, suggèrent une exploitation de gîtes permanents ou anthropisés, tels que les mares résiduelles, les périmètres irrigués ou les retenues d'eau. La même observation a été rapportée par Dao et al., 2014, Yaro (2014) ainsi que par Samaké (2016) dans plusieurs localités de la zone sahélienne. Samaké, en 2016, a attribué ces variations à des phénomènes de migration des populations de moustiques, favorisés par les vents d'harmattan, depuis les zones rizicoles de Niono, où la culture de contre-saison de culture de riz assurerait l'émergence d'*An. gambiae s.l.* vers les zones arides telles que celle de la présente étude.

Les variations de densité d'*An. gambiae s.l.* au Sahel témoignent d'une forte plasticité écologique, notamment à travers deux mécanismes de survie : l'estivation, permettant de persister durant les périodes sèches, et la migration, favorisant la recolonisation rapide des habitats favorables lors du retour de conditions propices (Alpha Seydou Yaro, 2014; Dao et al., 2014).

6.2. Variation de la composition du complexe *Anopheles gambiae*

Anopheles arabiensis présentait une occurrence sporadique tout au long de l'année, tandis qu'*An. coluzzii* était présent durant les deux saisons, avec une augmentation de son abondance à l'approche de la saison des pluies. *Anopheles gambiae* était essentiellement observé en saison pluvieuse, avec de faibles effectifs, à l'exception de quelques détections en novembre 2017, 2019 et 2024 en saison sèche. Ces résultats traduisent une forte différenciation saisonnière de la dynamique d'apparition des trois espèces. Ces résultats corroborent avec ceux de (Yossi 2019). Qui montrait qu'*An. coluzzii* prédominait, tandis qu'*An. gambiae* et *An. arabiensis* étaient respectivement associés aux saisons des pluies et sèche. Dans un contexte sahélien, cette complémentarité écologique pourrait contribuer au maintien de la transmission du paludisme malgré la forte saisonnalité des précipitations.

Au cours des neuf années de suivi, la composition spécifique du complexe *Anopheles gambiae* était largement dominée par *Anopheles coluzzii*. Cette constance traduit une forte adaptation de cette espèce aux conditions locales, lui conférant un avantage démographique sur les autres espèces du complexe *Anopheles gambiae*. Ce qui concorde avec plusieurs études indiquant qu'*Anopheles coluzzii* prédomine dans les zones sahéliennes et soudano-sahéliennes, où elle exploite efficacement des gîtes larvaires semi-permanents ou anthropiques (Mamai et al., 2016; Samaké, 2016; Zongo et al., 2025). *Anopheles arabiensis* occupait une position secondaire, tandis qu'*Anopheles gambiae* demeurait faiblement représentée.

Anopheles arabiensis était faiblement représenté entre 2016 et 2018, mais présentait une augmentation relative à partir de 2019, atteignant des proportions plus élevées en 2019 (7,7 %), 2022 (7,8 %) et 2024 (6,6 %). Cette progression suggère une meilleure adaptation de cette espèce aux conditions environnementales ou une modification des facteurs écologiques ou anthropiques favorisant sa présence. La progression relative d'*Anopheles arabiensis* à partir de 2019 est également cohérente avec des observations régionales montrant que cette espèce est mieux adaptée aux conditions plus arides, tend à augmenter en proportion lorsque les conditions pluviométriques ou environnementales changent (Huestis et al., 2017; Huestis & Lehmann, 2014). En revanche, *Anopheles gambiae* était très faiblement représenté à partir des trois premières années de l'étude.

Cela pourrait être expliqué par le fait qu'*An. gambiae* est davantage associé aux habitats plus humides (Tandina et al., 2018) et qu'*An. gambiae* semble recoloniser les zones sahéliennes après les premières pluies (Dao et al., 2014).

6.3. Variation temporelle de la fréquence des espèces du complexe *Anopheles gambiae*

L'analyse des séries temporelles des populations de moustiques entre 2016 et 2024 a révélé une dynamique fortement structurée du complexe *Anopheles gambiae*, dominée par une saisonnalité marquée avec un pic systématique entre juillet et octobre, en fin de saison des pluies, confirmant l'influence directe de la pluviométrie sur la dynamique vectorielle.

Anopheles coluzzii constituait l'espèce dominante et stable, dont la stationnarité était robuste, validant l'ajustement d'un modèle ARIMA (0,0,1) (2,0,0) [12] parcimonieux, prédictif et dépourvu d'hétéroscédasticité (absence d'effet GARCH). Ce qui traduit une dynamique saisonnière régulière et structurellement stable, suggérant une meilleure adaptation de cette espèce aux conditions climatiques locales. La série était également stationnaire pour l'*Anopheles arabiensis* ce qui explique sa capacité d'adaptation aux conditions arides du sahel. Ce résultat est similaire à celui obtenu par (Simard et al., 2001). Qui avait démontré qu'*Anopheles arabiensis* maintenait une population permanente, largement répartie dans l'espace.

En revanche, la non-stationnarité mise en évidence chez *Anopheles gambiae* indiquait une évolution temporelle significative de ses abondances.

Enfin, la succession temporelle entre *Anopheles coluzzii* (précoce et stable) et *Anopheles gambiae* (tardive et en expansion) suggère une partition temporelle des niches écologiques, reflétant une différenciation fonctionnelle des espèces au sein du complexe *Anopheles gambiae*. Ces résultats concordent avec les analyses temporelles réalisées dans le Sahel malien, montrant des cycles saisonniers stables et spécifiques à chaque espèce (Dao et al., 2014).

Les limites de l'étude : Toutes les collectes réalisées au cours de cette étude concernaient uniquement les populations de moustiques adulte reposant à l'intérieur des habitations. Cela pourrait sous-estimer les espèces exophiles comme *Anopheles arabiensis*. En plus, les variables climatiques n'ont pas été intégrées.

CONCLUSION ET RECOMMANDATION

7. CONCLUSION

Il ressort de cette étude que la dynamique du complexe *Anopheles gambiae* était fortement dominée par l'*Anopheles coluzzii* stable et prédictible, mais accompagnée de signaux d'évolution chez *Anopheles gambiae*. Elle met en évidence une succession temporelle entre *An. coluzzii* et *An. gambiae*. Ce qui pourrait avoir des implications importantes pour la transmission du paludisme et les stratégies de surveillance entomologique.

8. RECOMMANDATION

A la lumière des résultats de cette étude, nous recommandons de :

- Étudier plus précisément l'effet des facteurs climatiques (pluie, température, humidité) et environnementaux sur les variations saisonnières des espèces du complexe *Anopheles gambiae* en zone sahélienne.
- Déterminer si la succession temporelle observée entre l'*Anopheles gambiae* et l'*Anopheles coluzzii* modifie les périodes de forte transmission du paludisme.

9. REFERENCES

- Adamou, A., Dao, A., Timbine, S., Kassogué, Y., Yaro, A. S., Diallo, M., Traoré, S. F., Huestis, D. L., & Lehmann, T. (2011). The contribution of aestivating mosquitoes to the persistence of *Anopheles gambiae* in the Sahel. *Malaria Journal*, 10, 151.
<https://doi.org/10.1186/1475-2875-10-151>
- Alpha Seydou Yaro,. (2014). *Estivation d'An. Gambiae s.l en zone soudano-sahélienne du Mali*. Africa Vivre. https://www.laboutiqueafricavivre.com/livres-specialises/124177-estivation-d-an-gambiae-sl-en-zone-soudano-sahelienne-du-mali-9786138423171.html?utm_source=chatgpt.com
- Asale, A., Duchateau, L., Devleeschauwer, B., Huisman, G., & Yewhalaw, D. (2017). Zooprophylaxis as a control strategy for malaria caused by the vector *Anopheles arabiensis* (Diptera: Culicidae): a systematic review. *Infectious Diseases of Poverty*, 6(1), 160. <https://doi.org/10.1186/s40249-017-0366-3>
- Bollerslev, T. (1986). Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity. *Journal of Econometrics*, 31(3), 307–327.
- Carnevale, P., & Robert, V. (Eds.). (2009). *Les anophèles: Biologie, transmission du Plasmodium et lutte antivectorielle*. IRD  ditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.10374>
- Cissé, K. (2023). *Etude de la dispersion d'Anopheles gambiae sensu lato par Marquage-L cher-Recapture à l'aide de combinaisons de solution fluorescente et d'ADN dans un village sa lien au Mali* [Thesis, USTTB]. <https://www.bibliosante.ml/handle/123456789/12775>
- Coetzee, M., Hunt, R. H., Wilkerson, R., Della Torre, A., Coulibaly, M. B., & Besansky, N. J. (2013). *Anopheles coluzzii* and *Anopheles amharicus*, new members of the *Anopheles gambiae* complex. *Zootaxa*, 3619, 246–274.

- Dao, A., Yaro, A., Diallo, M., Timbiné, S., Huestis, D., Kassogué, Y., Traoré, A., Sanogo, Z., Samaké, D., & Lehmann, T. (2014). Signatures of aestivation and migration in Sahelian malaria mosquito populations. *Nature*, *516*(7531), 387–390.
<https://doi.org/10.1038/nature13987>
- Dolo, G., Briët, O. J. T., Dao, A., Traoré, S. F., Bouaré, M., Sogoba, N., Niaré, O., Bagayogo, M., Sangaré, D., Teuscher, T., & Touré, Y. T. (2004). Malaria transmission in relation to rice cultivation in the irrigated Sahel of Mali. *Acta Tropica, Malaria and Agriculture*, *89*(2), 147–159. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2003.10.014>
- Godfray, H. C. J. (2013). Mosquito ecology and control of malaria. *Journal of Animal Ecology*, *82*(1), 15–25. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12003>
- Harper, L. (2023). Mosquito life cycle—Illustrating the Anopholes mosquito. *Lizzie Harper*.
<https://lizzieharper.co.uk/2023/04/mosquito-life-cycle-illustrating-the-anopholes-mosquito/>
- Huestis, D. L., Artis, M. L., Armbruster, P. A., & Lehmann, T. (2017). Photoperiodic responses of Sahelian malaria mosquitoes *Anopheles coluzzii* and *An. Arabiensis*. *Parasites & Vectors*, *10*(1), 621. <https://doi.org/10.1186/s13071-017-2556-z>
- Huestis, D. L., Dao, A., Diallo, M., Sanogo, Z. L., Samake, D., Yaro, A. S., Ousman, Y., Linton, Y.-M., Krishna, A., Veru, L., Krajacich, B. J., Faiman, R., Florio, J., Chapman, J. W., Reynolds, D. R., Weetman, D., Mitchell, R., Donnelly, M. J., Talamas, E., ... Lehmann, T. (2019). Windborne long-distance migration of malaria mosquitoes in the Sahel. *Nature*, *574*(7778), 404–408. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1622-4>
- Huestis, D. L., & Lehmann, T. (2014). Ecophysiology of *Anopheles gambiae* s.l.: Persistence in the Sahel. *Infection, Genetics and Evolution : Journal of Molecular Epidemiology and*

- Evolutionary Genetics in Infectious Diseases*, 28, 648–661.
<https://doi.org/10.1016/j.meegid.2014.05.027>
- Lehmann, T., Dao, A., Yaro, A. S., Adamou, A., Kassogue, Y., Diallo, M., Sékou, T., & Coscaron-Arias, C. (2010). Aestivation of the African Malaria Mosquito, *Anopheles gambiae* in the Sahel. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 83(3), 601–606. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.2010.09-0779>
- Lehmann, T., Dao, A., Yaro, A. S., Diallo, M., Timbiné, S., Huestis, D. L., Adamou, A., Kassogué, Y., & Traoré, A. I. (2014). Seasonal variation in spatial distributions of *Anopheles gambiae* in a Sahelian village: Evidence for aestivation. *Journal of Medical Entomology*, 51(1), 27–38. <https://doi.org/10.1603/me13094>
- Lehmann, T., Weetman, D., Huestis, D. L., Yaro, A. S., Kassogue, Y., Diallo, M., Donnelly, M. J., & Dao, A. (2017). Tracing the origin of the early wet-season *Anopheles coluzzii* in the Sahel. *Evolutionary Applications*, 10(7), 704–717. <https://doi.org/10.1111/eva.12486>
- Lennart Oelschläger. (2024). *fHMM : Modèles de Markov cachés pour les séries temporelles financières dans R* | *Journal of Statistical Software*.
<https://www.jstatsoft.org/article/view/v109i09>
- Macdonald, G. (1956). Epidemiological basis of malaria control. *Bulletin of the World Health Organization*, 15(3–5), 613–626.
- Mamai, W., Simard, F., Couret, D., Ouedraogo, G. A., Renault, D., Dabiré, K. R., & Mouline, K. (2016). Monitoring Dry Season Persistence of *Anopheles gambiae* s.l. Populations in a Contained Semi-Field System in Southwestern Burkina Faso, West Africa. *Journal of Medical Entomology*, 53(1), 130–138. <https://doi.org/10.1093/jme/tjv174>

- Minakawa, N., Githure, J. I., Beier, J. C., & Yan, G. (2001). Anopheline Mosquito Survival Strategies During the Dry Period in Western Kenya. *Journal of Medical Entomology*, 38(3), 388–392. <https://doi.org/10.1603/0022-2585-38.3.388>
- Mordecai, E. A., Paaijmans, K. P., Johnson, L. R., Balzer, C., Ben-Horin, T., de Moor, E., McNally, A., Pawar, S., Ryan, S. J., Smith, T. C., & Lafferty, K. D. (2013). Optimal temperature for malaria transmission is dramatically lower than previously predicted. *Ecology Letters*, 16(1), 22–30. <https://doi.org/10.1111/ele.12015>
- Mouchet, J. (2004). *L'écologie du paludisme*.
- Mouchet, J., & Carnevale, P. (1991). *Les vecteurs et la transmission*.
- Ndiath, M. O., Sarr, J.-B., Gaayeb, L., Mazenot, C., Sougoufara, S., Konate, L., Remoue, F., Hermann, E., Trape, J., Riveau, G., & Sokhna, C. (2012). Low and seasonal malaria transmission in the middle Senegal River basin: Identification and characteristics of Anopheles vectors. *Parasites & Vectors*, 5, 21. <https://doi.org/10.1186/1756-3305-5-21>
- Nicholson, S. E. (2013). The West African Sahel: A Review of Recent Studies on the Rainfall Regime and Its Interannual Variability. *International Scholarly Research Notices*, 2013(1), 453521. <https://doi.org/10.1155/2013/453521>
- Ranson, H., N'Guessan, R., Lines, J., Moiroux, N., Nkuni, Z., & Corbel, V. (2011). Pyrethroid resistance in African anopheline mosquitoes: What are the implications for malaria control? *Trends in Parasitology*, 27(2), 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.pt.2010.08.004>
- Samaké, D. (2016). *Etudes de la dynamique des populations d'anopheles gambiae s.l suivant un transect allant d'une zone irriguée à une zone non irriguée en région sahélienne du Mali* [Thesis, Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako]. <https://www.bibliosante.ml/handle/123456789/14164>

- Simard, F., Lehmann, T., Jean-Jacques Lemasson, Diatta, M., & Fontenille, D. (2001).
*Persistence of Anopheles arabiensis during the severe dry season conditions in Senegal:
 An indirect approach using microsatellite loci.*
<https://resjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1365-2583.2000.00210.x>
- Smith, D. L., Battle, K. E., Hay, S. I., Barker, C. M., Scott, T. W., & McKenzie, F. E. (2012).
 Ross, Macdonald, and a Theory for the Dynamics and Control of Mosquito-Transmitted
 Pathogens. *PLOS Pathogens*, 8(4), e1002588.
<https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1002588>
- Sogoba, N., Doumbia, S., Vounatsou, P., Bagayoko, M. M., Dolo, G., Traoré, S. F., Maïga, H. M.,
 Touré, Y. T., & Smith, T. (2007). Malaria transmission dynamics in Niono, Mali: The
 effect of the irrigation systems. *Acta Tropica*, 101(3), 232–240.
<https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2007.02.005>
- Sovi, A., Keita, C., Sinaba, Y., Dicko, A., Traore, I., Cisse, M. B. M., Koita, O., Dengela, D.,
 Flatley, C., Bankineza, E., Mihigo, J., Belemvire, A., Carlson, J., Fornadel, C., &
 Oxborough, R. M. (2020). *Anopheles gambiae* (s.l.) exhibit high intensity pyrethroid
 resistance throughout Southern and Central Mali (2016–2018): PBO or next generation
 LLINs may provide greater control. *Parasites & Vectors*, 13, 239.
<https://doi.org/10.1186/s13071-020-04100-7>
- Tandina, F., Doumbo, O., Yaro, A. S., Traoré, S. F., Parola, P., & Robert, V. (2018). Mosquitoes
 (Diptera: Culicidae) and mosquito-borne diseases in Mali, West Africa. *Parasites &
 Vectors*, 11, 467. <https://doi.org/10.1186/s13071-018-3045-8>
- Toure, Y. T., Traore, S. F., Sankare, O., Sow, M. Y., Coulibaly, A., Esposito, F., & Petrarca, V.
 (1996). Perennial transmission of malaria by the *Anopheles gambiae* complex in a North

- Sudan Savanna area of Mali. *Medical and Veterinary Entomology*, 10(2), 197–199.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2915.1996.tb00731.x>
- Wilkins, E. E., Howell, P. I., & Benedict, M. Q. (2006). IMP PCR primers detect single nucleotide polymorphisms for *Anopheles gambiae* species identification, Mopti and Savanna rDNA types, and resistance to dieldrin in *Anopheles arabiensis*. *Malaria Journal*, 5, 125. <https://doi.org/10.1186/1475-2875-5-125>
- World malaria report 2022*. (n.d.). <https://iris.who.int/items/1e09ca65-ff35-4bf0-8d72-e5ce2cfb2506>
- World malaria report 2023*. (n.d.). <https://www.who.int/publications/i/item/9789240086173>
- World malaria report 2025*. (n.d.). <https://www.who.int/publications/i/item/9789240117822>
- Zongo, O. N. (2025). *Spatial Distribution and Biodiversity of Anopheles Mosquito Species Across Climatic Zone in Burkina Faso: Implications for Malaria Vector Control* (No. 2025110220). Preprints. <https://doi.org/10.20944/preprints202511.0220.v1>

10. ANNEXES

ANNEXE 1 :

Protocole d'extraction d'ADN (méthode HotSHOT)

1. Numérotez les échantillons et étiquetez un tube PCR par échantillon avec le numéro correspondant à l'aide d'un marqueur permanent fin.
 2. Versez 75 µL de solution de lyse alcaline dans un tube PCR de 0,2 mL par échantillon.
 3. Prélevez un sous-échantillon de 1 à 2 mm³ de tissu et transférez-le dans chaque tube, en veillant à ce qu'il soit immergé dans la solution de lyse alcaline. Un excès d'échantillon risque d'entraîner l'échec de l'extraction et/ou de la PCR.
 4. Placez les tubes dans un thermocycleur et incubez à 95 °C pendant 10 à 30 minutes (selon le type d'échantillon) en utilisant le programme « Bloc chauffant ».
 5. Ajoutez 75 µL de tampon de neutralisation dans chaque tube de 0,2 mL.
 6. Utilisez 1 à 4 µL d'extrait comme matrice d'ADN pour la réaction PCR. Les extraits de nombreux types de tissus (par exemple, végétaux, fongiques, d'invertébrés, de plumes, de sang) peuvent bénéficier d'une dilution de 10 à 100 fois afin de diluer les inhibiteurs de PCR avant leur utilisation comme matrice d'ADN.
 7. Conserver les tubes d'échantillon dans une boîte ou un petit sachet de 0,2 mL, clairement étiqueté pour éviter toute confusion.
- Réfrigérer pour une courte durée ou congeler à –20 °C pour une conservation plus longue.

ANNEXE 2 :

Identification des espèces par la méthode de Wilkins et al., 2006

Mode opératoire

Préparer le mélange mettre la PCR pour 96, 48 ou 1 25µl de réactions PCR. Ajouter les réactifs dans l'ordre présenté.

Dilution des réactifs

Réactifs	Volume unitaire (µl)
H2O	4,475
2x Green GoTaq PCR buffer	6,25
Mgcl2	0,15
IMP-UN	0,125
AR-3T	0,125
GA-3T	0,125
IMP-S1	0,125
IMP-M1	0,125
DNA	1
Volume total	12,5

Placer les tubes dans la machine PTC d'amplification et lancer le programme d'identification ;

- En plus du marqueur de taille moléculaire (à mettre dans le premier de chaque rangée de puits), il faut mettre :
 - Un amplifiât d'un témoin *An. gambiae* dans le deuxième puits ;
 - Un amplifiât d'un témoin *An. arabiensis* dans le troisième puits ;
 - Un amplifiât d'un témoin Forme M dans le quatrième puits ;
 - Un amplifiât d'un témoin Forme S dans le cinquième puits ;

NB : Les ADN témoins doivent être confirmés au préalable. Il est indispensable d'avoir ces témoins pour éviter toute confusion au moment de l'interprétation des résultats. Conditions du cycle PCR

95°C/5min x 1 cycle

(95°C/30sec, 58°C/30sec, 72°C/30sec) x 30 cycles

72°C/5min x 1 cycle

Maintien à 4°C

Les échantillons sont analysés sur un gel d'agarose à 1,5 % coloré avec le bromure d'éthidium.

La migration a été conduite dans un bac électrophorétique à l'aide d'un générateur (Electrophoresis power supply–EPS301) sous un courant de 150 volts pendant 1 heure.

Après migration, les bandes ont été visualisées sous une lampe UV et photographiées à l'aide d'une camera quik shooter (IBI, model QSP/Hood # 14, catalog N° 46420).

L'interprétation a consisté à identifier les espèces et leurs formes moléculaires par comparaison de leur taille en base paire (bp) à celle du marqueur moléculaire (100 bp DNA Ladder, Invitrogen Ready load).

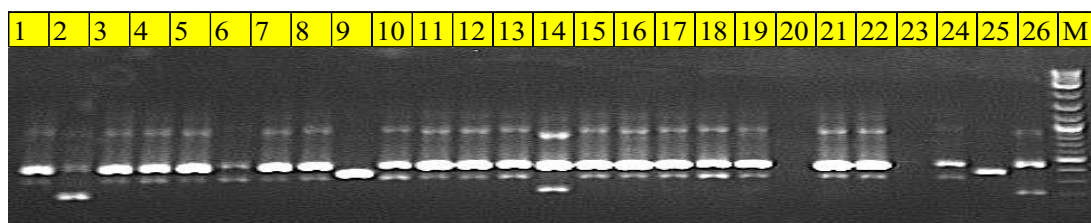


Figure 8 : Photo d'un gel après migration

Légende :

M : marqueur de taille

Contrôle négatif : 23

Contrôle positif M (*An. coluzzii*) : 24

Contrôle positif (*An. arabiensis*) : 25

Contrôle positif S (*An. gambiae*) : 26

Non identifié : 20

***An. coluzzii* :** 1; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 10; 11; 12; 13; 15; 16; 17; 18; 19; 21; 22.

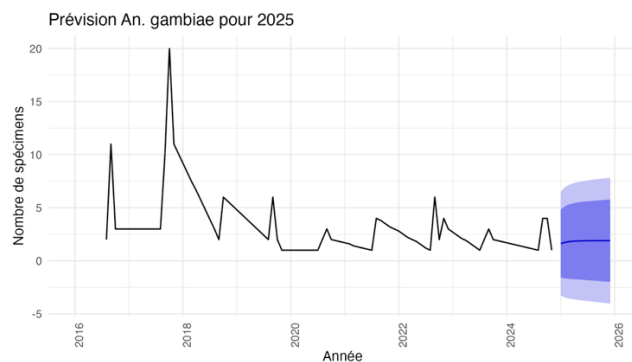
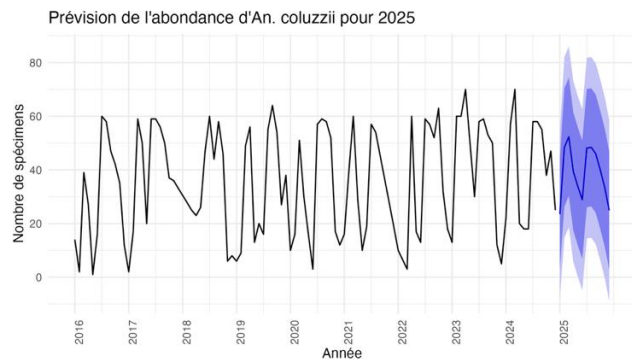
***An. arabiensis* :** 9

***An. gambiae* :** 2; 14.

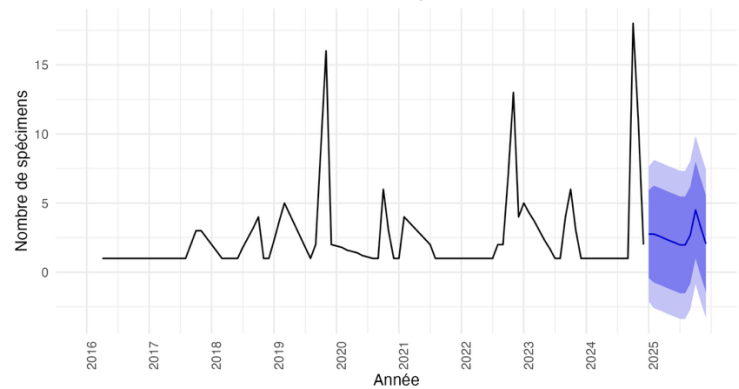
ANNEXE 3 :

A. Prévisions pour 2025

Les prévisions pour *Anopheles coluzzii* en 2025 indiquaient un pic attendu entre août et octobre atteignant 55 à 65 spécimens, et une période de faible abondance de janvier à mai (moins de 30 spécimens). Les intervalles de confiance à 95% étaient un peu larges, traduisant une incertitude maîtrisée grâce à la normalité et l'homoscédasticité des résidus. Pour *Anopheles gambiae*, les prévisions suggéraient une poursuite de la hausse avec des pics saisonniers plus élevés qu'en 2024, justifiant une surveillance renforcée.



Prévision de l'abondance d'An. arabiensis pour 2025



11. FICHE SIGNALITIQUE

Nom : KANE

Prénom : Oumar

Tel : (00223) 74428327/65684912

Email : oumar.kane7442@gmail.com

Titre : Dynamique de la population d'*Anopheles gambiae sensu lato* en zone sahélienne au Mali de 2016 à 2024

Année de soutenance : Année universitaire 2024-2025

Ville de soutenance : Bamako

Pays d'origine : Mali

Lieu de dépôt : Bibliothèque de la Faculté de Médecine et d'Odonto-Stomatologie et de la Faculté de Pharmacie

Secteur d'intérêt : Entomologie et Parasitologie

RESUME

Le complexe *Anopheles gambiae* constitue le principal vecteur du paludisme en zone sahélienne, où sa dynamique est fortement structurée par la saisonnalité climatique. Cette étude a évalué la dynamique temporelle des populations adultes au Mali de 2016 à 2024 à partir de captures longitudinales à Thierola et d'analyses de séries temporelles (STL, ARIMA).

Au total, 18 271 spécimens ont été collectés, dont 3 910 identifiés par PCR. Les populations présentaient une forte saisonnalité avec des pics systématiques entre juillet et octobre, et des pics secondaires en saison sèche suggérant des mécanismes de persistance ou de recolonisation. La structure spécifique était dominée par *Anopheles coluzzii* (93 %), suivie de *Anopheles arabiensis* (4 %) et de *Anopheles gambiae* (3 %). *Anopheles coluzzii* présentait une dynamique stationnaire et stable, tandis qu'*Anopheles gambiae* montrait une non-stationnarité traduisant une évolution temporelle. Une succession écologique entre *Anopheles coluzzii* et *Anopheles gambiae* suggère une partition temporelle des niches.

La dynamique du complexe *Anopheles gambiae* est dominée par la stabilité d'*Anopheles coluzzii*, contrastant avec la variabilité d'*Anopheles gambiae*, reflétant des différenciations écologiques au sein du système vectoriel sahélien.

Mots clés : *Anopheles gambiae s.l.* ; dynamique temporelle ; séries temporelles ; Sahel ; Mali

IDENTIFICATION

Last Name: KANE

First Name: Oumar

Tel: (00223) 74428327/65684912

Email: oumar.kane7442@gmail.com

Title: Dynamics of the Adult *Anopheles gambiae s.l.* Population in the Sahelian Zone from 2016 to 2024 in Mali

Year of defense: 2024-2025

City of defense: Bamako

Country of origin: Mali

Office of registration: The bookstore of Faculty of Medicine, Odonto-Stomatology and Faculty of Pharmacy

Field of interest: Entomology and Parasitology

Abstract

The *Anopheles gambiae* complex constitutes the principal malaria vector in the Sahelian region, where its population dynamics are strongly shaped by climatic seasonality. This study assessed or investigated the temporal dynamics of adult mosquito populations in Mali from 2016 to 2024, using longitudinal collections in Thierola and time-series analyses (STL, ARIMA).

A total of 18,271 specimens were collected. 3,910 were identified by PCR. The populations exhibited strong seasonality, with systematic peaks between July and October and secondary peaks during the dry season, suggesting mechanisms of persistence or recolonization. *Anopheles coluzzi*

(93%) was the dominant species followed by *An. arabiensis* (4%) and *An. gambiae* (3%) in decreasing abundance. *Anopheles coluzzii* exhibited stationary and stable dynamics; whereas *An. gambiae* showed non-stationarity, reflecting temporal changes in its population dynamics. An ecological succession between *An. coluzzii* and *An. gambiae* suggests temporal niche partitioning.

Although *An. gambiae* presented variability, The dynamics of the *Anopheles gambiae* complex were dominated by the stability of *Anopheles coluzzii*, indicating ecological differentiation within the Sahelian vector system.

Keywords: *Anopheles gambiae s.l.*; temporal dynamics; time-series analysis; Sahel; Mali.

12. SERMENT DE GALIEN

- Je jure en présence des maîtres de cette Faculté, des conseillers de l'ordre des Pharmaciens et de mes chers condisciples.
- D'honorer ceux qui m'ont instruit dans les préceptes de mon art et de leur témoigner ma reconnaissance en restant fidèle à leur enseignement ;
- D'exercer dans l'intérêt de la santé publique ma profession, avec conscience et de respecter non seulement la législation en vigueur mais aussi les règles de l'honneur, de la probité et du désintéressement
- De ne jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers le malade et sa dignité humaine. En aucun cas, je ne consentirai à utiliser mes connaissances et mon état pour corrompre les mœurs et favoriser les actes criminels.
- Respectueux et reconnaissant envers mes maîtres, je rendrai à leurs enfants l'instruction que j'ai reçue de leurs pères.
- Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses. Que je sois couvert d'opprobre et méprisé de mes confrères si j'y manque.

Je le jure !