

# UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DE LA VIE, DE LA SANTÉ ET DE  
L'ENVIRONNEMENT (ED-SEV)

FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Année : 2016



N° d'ordre : 237

## THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Parasitologie

Présentée par

Georges DIATTA

### Épidémiologie de la borréliose à tiques en Afrique de l'Ouest et du Nord

Soutenue le 28 Juillet 2016 devant le jury d'examen composé de :

Président : Bhen Sikina TOGUEBAYE, Professeur Titulaire, FST/UCAD

Rapporteurs : Ousmane FAYE, Professeur Titulaire, FST/UCAD

Anta TAL-DIA, Professeur Titulaire, FMPO/UCAD

Amy GASSAMA SOW, Maître de conférences Agrégé, ESP/UCAD

Examineurs : Oumar GAYE, Professeur Titulaire, FMPO/UCAD

Ngor FAYE, Maître de conférences, FST/UCAD

Cheikh SOKHNA, Chercheur, IRD/Dakar

Directeur de thèse : Mady NDIAYE, Professeur Titulaire, FST/UCAD

# DÉDICACES

## DÉDICACES

A Dieu Tout-Puissant, notre Seigneur, Dieu d'Abraham, d'Isaac et de Jacob, pour m'avoir tiré miraculeusement par trois fois de suite de l'infirmité et de la mort au cours de mes missions borréliose à travers l'Afrique de l'Ouest et du Nord. Pour toutes ces Grâces et les Merveilles reçues de Toi Éternel, merci éternellement.

A MA MÈRE, qui vient d'être rappelée à Dieu dans son bel âge, en témoignage de ma gratitude infinie, de ma grande affection et grand Amour. Puisse Dieu de miséricorde vous accueillir et accorder le repos éternel dans la cité céleste. Amen (*in memorium*).

A MON PÈRE, que Dieu nous a repris dans son bel âge peu de temps après que notre maman soit endormie éternellement, en témoignage de ma déférente gratitude, de mon attachement passionnel et profond respect. Puisse Dieu de miséricorde vous accueillir et accorder le repos éternel dans la cité céleste. Amen (*in memorium*).

A ma grande sœur Agnès, très vite arrachée à notre tendre affection (*in memorium*).

A mes chers et regrettés amis Pascal DIÉDHIOU, Joachim dit Diokine MENDY, Adamou NOMAO et Doukary ABDOULAYE, mon grand frère Éloi DIÉMÉ et ma tante Constance DIATTA (*in memorium*).

A mes grands-parents et beaux-parents (*in memorium*).

A MON ÉPOUSE, Gnagna Marie-Madeleine SENGHOR, pour le sens élevé de considération que j'attache à notre famille, ma grande affection et le profond Amour que je porte pour toi. Que ce travail puisse me permettre de te rendre plus heureuse et de pouvoir te donner enfin ce dont je rêve encore pour toi. Puisse Dieu consolider notre Union, guider et protéger notre famille au quotidien.

A MA FILLE Aguéne B. Marcelline et MON FILS Siboukouyane Jean-Rodrigue F., pour ma grande affection et l'attachement passionnel que je porte pour vous. Que ce travail soit pour vous une source de motivation et de dépassement, ainsi qu'un modèle de courage et d'abnégation personnelle à vivre au quotidien.

A MON BEAU-FILS Pierre-Edouard MANGA, pour le lien sacré du don de soi qui nous unit, je t'associe affectueusement au même attachement passionnel que je porte à ma Fille ton ÉPOUSE.

A MES FRÈRES ET SŒURS, Faustin, Pierre-Marie, Constance, Adeline, Léontine, Marie-Augustine, pour mon affection fraternelle et mon dévouement indéfectible pour notre famille. Ce travail est l'expression de l'éducation rigoureuse que nous avons reçue de nos chers parents. Puisse Dieu nous protéger et nous unir davantage.

A MES NEVEUX ET NIÈCES, Guy Camille Massalou, Fortuné Habib, Dieudonné Bassirou, Gustave, Aimé, Arnaud Badiate, Maurice, Pierre-André, Clémence, Fatou Kaïssa, Inès et Marthe Fama, pour mon affection.

A TOUS MES COUSINS ET COUSINES, en témoignage de votre soutien moral et de mon affection.

A MON ONCLE Pierre-Marie SAMBOU, en témoignage de ma gratitude et de mon attachement pour la qualité de ses conseils fort utiles dès mes premières années universitaires.

A MON FRÈRE ET AMI, Dr Paul Thérance SENGHOR, en témoignage de ma gratitude pour son soutien et ses conseils qui ont toujours été d'une grande utilité.

A MES BELLES-SŒURS ET BEAUX-FRÈRES, pour le lien sacré qui nous unit et en témoignage de notre attachement mutuel.

A TOUS MES AMIS d'enfance et actuels, et CAMARADES de promotion, Abbé Jean-Bernard MANGA, Monseigneur Paul Abel MAMBA (Évêque de Ziguinchor) qui m'accueillait à mon retour du Mali quand il était en service à Tambacounda, Dr Jackson-Edouard SAMBOU, Dr Basile DIÉDHIOU, Abbés Nicolas BIAGUI, Achille DJIOUNOUC, Damase-Marie COLY, Benoît BASSÈNE, Gérard TENDENG et Nestor SADIO, Pères Pierre DIATTA et Louis DIÉDHIOU, Professeur Alassane DIATTA, Dr Jean-Pierre SENGHOR, Dr Youssouph MANÉ, Michel MANGA, Léopold SAMBOU, Léandre DIÉDHIOU, Omer DIÉDHIOU, Kidmo, Patcha TAKUDA et Missoou pour les beaux moments passés ensemble au village, au Séminaire de Nyassia et Ziguinchor ou à l'Université Cheikh Anta Diop (UCAD) de Dakar.



# **REMERCIEMENTS**

## REMERCIEMENTS

Le présent travail a été financé par le Programme Gestion et Impact du Changement Climatique (GICC) du Ministère français de l'Écologie et du Développement Durable (MEDD), l'Agence Nationale française de la Recherche (ANR) et l'Action Thématique Inter-départementale Évolution Climatique et Santé de l'IRD. Il a été réalisé à l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, ex-ORSTOM) de Dakar avec la collaboration du Centre de Biologie et Gestion des Populations (CBGP, ex-UBGP) de l'IRD à Dakar et Bamako, l'Unité des Maladies Émergentes et Systèmes d'Information de l'IRD à Montpellier, l'Unité Mixte de Recherche (UMR) 5290, des Maladies Infectieuses et Vecteurs : Écologie, Génétique, Évolution et Contrôle (MIVEGEC, ex-GEMI) IRD/CNRS/UM et du CNRS Hydrosociétés de l'IRD à Montpellier, du Département de Biologie Animale de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop (UCAD) de Dakar, du Centre National de Recherches Médicales (CNRM, ex-CNHR) de Nouakchott, l'Institut Pasteur du Maroc, à Casablanca, la Faculté des Sciences de Kénitra de l'Université Ibn Tofail, l'Institut Pasteur d'Algérie, l'Institut Pasteur de Tunis, du Centre Régional Aghrymet de Niamey, l'Institut Pasteur de Kindia, en Guinée, du Centre National de Lutte Contre le Paludisme de Ouagadougou, du Programme de Contrôle du Paludisme à Monrovia et du Département des Maladies Parasitaires de l'Université de Bamako.

Nos remerciements s'adressent particulièrement :

Au Docteur Jean-François TRAPE, Directeur de Recherche Émérite à l'IRD, par un vibrant hommage, lui qui a guidé mes premiers pas dans la recherche au sein de son Laboratoire en m'inculquant la rigueur, la passion du questionnement scientifique et le sens élevé du travail bien fait, pour me confier, en définitive, la conduite des investigations épidémiologiques sur la borréliose à tiques à travers l'Afrique Occidentale, Centrale et Maghrébine. Je vous exprime vivement ma déférente gratitude et mon profond respect. Vos immenses qualités scientifiques et humaines, votre disponibilité, votre sens de l'innovation des thématiques de recherche, vos compétences intellectuelles et votre modestie ont toujours forcé l'admiration de tous, et font de votre notoriété un monument de la Science et une référence consultée de votre génération. Les résultats de ce travail qui est vôtre sont le fruit de votre esprit de méthode, rigueur, grande expérience et de votre savoir-faire. Vous avez grandement contribué à la formation de l'*intelligencia* africaine voire universelle en participant à la formation de plus d'une vingtaine de jeunes universitaires africains.

Vos conseils et vos suggestions pertinentes ont toujours été d'une grande utilité. Quoiqu'il soit advenu autrement, sachez que je vous considère toujours comme un Père spirituel avec qui j'ai beaucoup appris et forgé davantage mon caractère. Je continuerai de vous porter du fond de mon cœur. Merci infiniment.

Monsieur Laurent VIDAL, Représentant de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) au Sénégal, Cap-Vert, en Gambie, Guinée-Bissao et en Mauritanie pour la confiance que l'institution a placé en moi et les moyens financiers importants qui ont été mis à ma disposition pour réaliser ce travail.

Madame Cécile GIORGI-MESQUIDA, administrateur de l'IRD au Sénégal, ses prédécesseurs Benoît SOYER, Laurence CORVELLEC, et l'ensemble du personnel administratif de l'IRD Hann pour leur collaboration.

Au Professeur Mady NDIAYE, Professeur titulaire au Département de Biologie Animale de la Faculté des Sciences et Techniques à l'UCAD. Vous avez spontanément accepté de diriger ma thèse et promptement réagi avec une marque d'estime. Je vous suis fort reconnaissant et merci du fond du cœur. Votre pertinence et vos qualités intellectuelles, scientifiques et humaines, votre disponibilité et votre ouverture à mon égard ont suscité en moi une grande considération pour vous et un profond respect. Votre humilité, vos conseils et suggestions m'ont profondément marqué et ont été pour moi d'une importance capitale, et ce travail est aussi le vôtre.

Au Professeur Bhen Sikina TOGUEBAYE, Professeur titulaire au Département de Biologie Animale de la Faculté des Sciences et Techniques, et Directeur de la Recherche et Coopération à l'UCAD. J'ai fort apprécié la clarté et concision de votre enseignement. Vos excellentes qualités intellectuelles, scientifiques et humaines, votre modestie, et votre disponibilité et sens de compréhension m'ont toujours séduit. En acceptant de présider le jury de ma thèse vous me faites un honneur immense, et vous me donnez l'occasion de vous exprimer vivement ma gratitude et profonde déférence.

Au Professeur Ousmane FAYE, Professeur titulaire au Département de Biologie Animale de la Faculté des Sciences et Techniques à l'UCAD. Malgré vos multiples sollicitations et occupations professionnelles, vous avez accepté d'être un des rapporteurs de ma thèse et vous me donnez l'occasion de vous approcher davantage, aussi de vous témoigner ma sincère gratitude et mon profond respect.

Sachez que votre disponibilité, votre grande expérience, vos qualités intellectuelles, scientifiques et humaines, et votre esprit de concision et de méthode forcent l'admiration de tous. Votre jugement pour ce travail est pour moi un grand honneur.

Au Professeur Anta TAL-DIA, Professeur titulaire de Médecine en Santé Publique, Chef du Service Médecine Préventive et Santé Publique de la Faculté de Médecine, de Pharmacie et d'Odonto-Stomatologie à l'UCAD et Directrice de l'Institut de Santé et Développement (ISED) du Sénégal. En acceptant de participer au jury de ma thèse et d'être un des rapporteurs malgré vos multiples responsabilités professionnelles, vous me donnez l'occasion de vous approcher et de découvrir vos qualités intellectuelles, scientifiques et humaines, votre grande expérience dans le domaine de la Médecine préventive et Santé publique. Votre jugement pour ce travail est pour moi un grand honneur.

Au Professeur Amy GASSAMA SOW, Maître de Conférences au Département de Génie Chimique et Biologie Appliquée de l'École Supérieure Polytechnique (ESP) à l'UCAD, Chef de l'Unité de Bactériologie Expérimentale (UBE) à l'Institut Pasteur de Dakar. C'est pour moi un grand plaisir que vous ayez accepté, en dépit de vos multiples activités professionnelles, d'être un des rapporteurs de ma thèse et de vous compter parmi les membres du jury. Votre disponibilité, votre ouverture à mon égard et votre grande expérience dans le domaine de la bactériologie, virologie et biologie médicale ont suscité ma grande estime pour vous. Vous me faites un honneur immense en jugeant ce travail et vous me donnez l'occasion de découvrir vos qualités intellectuelles, scientifiques et humaines avec respect.

Au Professeur Omar GAYE, Professeur titulaire de Parasitologie, Chef du Service Parasitologie-Mycologie Médicale de la Faculté de Médecine, de Pharmacie et d'Odonto-Stomatologie à l'UCAD. Vous avez accepté de participer au jury de ma thèse et d'examiner mon mémoire, me donnant ainsi l'occasion de vous approcher davantage aussi de découvrir vos qualités intellectuelles, scientifiques et humaines, et votre grande expérience dans le domaine de la parasitologie et de la Médecine préventive. Votre jugement pour ce travail est pour moi un grand honneur.

Au Professeur Ngor FAYE, Maître de Conférences au Département de Biologie Animale de la Faculté des Sciences et Techniques à l'UCAD. Vous avez accepté avec disponibilité, ouverture d'esprit d'être membre du jury de ma thèse et d'examiner mon mémoire, me donnant ainsi l'opportunité d'apprécier davantage vos qualités intellectuelles,

scientifiques et humaines. En jugeant ce travail, vous me faites un grand honneur et je saisis l'occasion de vous témoigner mon profond respect.

Au Docteur Cheikh S. SOKHNA, Chercheur à l'IRD, Responsable de l'Unité de Recherche sur les Maladies Infectieuses et Tropicales Émergentes (URMITE) au Sénégal. Vos qualités intellectuelles, scientifiques et humaines, votre simplicité et disponibilité forcent le respect de tous. Soyez assuré que vous pouvez compter sur ma vive contribution pour la réussite des responsabilités qui vous ont été confiées et le bon fonctionnement de notre Laboratoire. En acceptant de participer au jury de ma thèse et d'examiner mon mémoire, vous me donnez l'occasion de vous réitérer mon sincère dévouement. Votre jugement pour ce travail est pour moi un grand honneur.

Au Professeur Didier RAOULT, Professeur titulaire à la Faculté de Médecine, Aix-Marseille Université en France, Directeur de l'Unité Mixte de Recherche (UMR) 198 IRD, et de l'Unité de Recherche sur les Maladies Infectieuses et Tropicales Émergentes (URMITE). J'ai eu la chance de vous côtoyer au cours d'une mission effectuée en Éthiopie, et ai été fasciné par votre grande érudition, vos qualités scientifiques, intellectuelles et humaines. Votre notoriété, de rang mondial, dans le domaine des maladies infectieuses force l'admiration de tous. Vous m'avez appris et permis d'acquérir rapidement l'autonomie de l'écriture scientifique et je vous suis infiniment reconnaissant. Merci du fond du cœur.

Au Docteur Laurent GRANJON, Directeur de Recherche à L'IRD. Il m'est difficile de trouver les mots et expressions pour vous exprimer ma gratitude. Votre disponibilité et esprit de précision et de méthode, vos qualités humaines, intellectuelles et scientifiques m'ont vivement impressionné. Vous avez participé activement aux enquêtes de captures de petits mammifères, et vous me donnez l'opportunité de vous témoigner mon respect et ma sincère gratitude.

Au Docteur Jean-Marc DUPLANTIER, Chargé de recherche à l'IRD. Votre disponibilité constante, votre courtoisie, vos qualités humaines, scientifiques et intellectuelles m'ont fortement marqué. Vos conseils ont été pour moi d'un apport important. En participant activement aux enquêtes de captures de petits mammifères vous m'offrez l'occasion de vous manifester mon respect et ma vive reconnaissance.

Au Docteur François RENAUD, Directeur de recherche à l'IRD et CNRS, UMR 5290, des Maladies Infectieuses et Vecteurs : Écologie, Génétique, Évolution et Contrôle (MIVEGEC, ex-GEMI). Nous avons développé un partenariat riche et fécond, ce qui m'a permis de réaliser au sein de votre Laboratoire Génétique et Évolution des Maladies Infectieuses (GEMI) les analyses de biologie moléculaire sur les populations de tiques *Ornithodoros* collectées en Afrique. Ce travail qui est vôtre, et les résultats obtenus au sein de votre équipe traduisent manifestement la valeur de vos qualités intellectuelles, scientifiques et de votre esprit de méthode et de rigueur. Recevez ma déférente gratitude et mes vifs remerciements pour votre accueil chaleureux.

Au Docteur Patrick DURAND, Chargé de recherche à l'IRD, pour votre disponibilité, votre jovialité, votre assistance constante et le soutien moral que vous m'avez manifesté au sein de votre Laboratoire GEMI, je vous suis fort reconnaissant. Vos qualités humaines, intellectuelles et scientifiques et votre simplicité m'ont profondément marqué et rendu agréable mon séjour au sein de votre équipe. J'ai été sensible à votre marque d'estime et suis heureux de vous témoigner ma gratitude avec un grand respect.

A Madame Céline ARNATHAU, pour m'avoir formé aux techniques de biologie moléculaire avec un grand dévouement et une disponibilité constante, je vous dis merci du fond du cœur. Votre dynamisme physique et d'esprit, vos qualités humaines et intellectuelles m'ont donné un réel plaisir de travailler avec vous et je suis heureux de vous témoigner ma sincère reconnaissance.

Au Docteur M'hammed SARIH, Responsable du Laboratoire des Maladies Vectorielles à l'Institut Pasteur de Casablanca, au Maroc, pour votre accueil chaleureux, votre simplicité et votre disponibilité. Vous avez mis à ma disposition, en partie, des moyens logistiques et humains de votre institution pour me permettre d'effectuer les enquêtes borréliose dans votre pays, et avez également trouvé du temps pour m'accompagner sur le terrain. Je suis heureux de vous témoigner ici ma profonde gratitude.

Au Professeur Driss BELGHYTI à la Faculté des Sciences de l'Université Ibn Tofaïl de Kénitra au Maroc pour votre accueil chaleureux, votre ouverture à mon égard, votre spontanéité et votre disponibilité. Vous avez manifesté un grand intérêt à l'étude de la borréliose à tiques dans votre pays, notamment dans votre région de Kénitra en

m'accompagnant avec vos étudiants sur le terrain malgré vos multiples occupations. Je suis heureux de vous témoigner ma reconnaissance et mon profond respect.

Au Professeur Idir BITAM, Maître de Conférences, Responsable du Laboratoire d'Écologie des Systèmes Vectoriels, à l'Institut Pasteur d'Algérie, pour votre accueil chaleureux, votre jovialité et votre disponibilité. Vous avez mis à ma disposition des moyens logistiques et humains de votre institution pour me permettre d'effectuer les enquêtes borréliose dans votre pays, et avez également trouvé le temps nécessaire pour m'accompagner sur le terrain. Je suis heureux de vous témoigner ma profonde gratitude avec respect.

Au Docteur Ali BOUATTOR, Responsable du Service d'Entomologie Médicale à l'Institut Pasteur de Tunis, en Tunisie, pour votre accueil chaleureux, votre simplicité et votre disponibilité. Vous avez mis à ma disposition des moyens logistiques et humains de votre institution pour me permettre d'effectuer les enquêtes borréliose dans votre pays, et avez également pu vous détacher de vos occupations pour m'accompagner sur le terrain. Je suis heureux de vous témoigner ma sincère gratitude et de vous dire un grand merci.

Au Directeur du Centre National de Recherche Médicale (CNRM, ex-CNH) de Nouakchott, en Mauritanie, et à son prédécesseur le Professeur Baïdy LO pour leur soutien permanent et leur collaboration. Vous avez mis à notre disposition des moyens humains pour me permettre d'effectuer les enquêtes borréliose dans votre pays, et je suis heureux de vous dire un grand merci.

Aux Docteurs Francis KAHN et Gilles FÉDIÈRE, Représentants respectifs de l'IRD au Niger et au Mali pour leur collaboration.

Au Professeur Abdoulaye DABO au Département des Maladies Parasitaires de l'Université de Bamako au Mali, pour votre disponibilité, votre collaboration, vos qualités humaines, intellectuelles et scientifiques. J'ai été heureux de vous voir m'accompagner sur le terrain et je vous suis très reconnaissant.

Au Docteur Jean-Louis CAMICAS, Directeur de Recherche Émérite à l'IRD. Votre disponibilité, vos qualités scientifiques, humaines et intellectuelles et votre grande expérience dans le domaine de l'Acarologie où les spécialistes sont rares continuent de me séduire. Veuillez trouver en ces mots ma gratitude et mon profond respect.

Au Professeur Agrégé Christophe ROGIER, Autorité de Coordination Sciences et Techniques de la Santé, en souvenirs de notre longue traversée de l'Afrique sub-saharienne dans le cadre des enquêtes borréliose. Vos qualités humaines, intellectuelles et scientifiques, votre disponibilité et votre dynamisme sont exemplaires. Votre gaieté de cœur m'est inoubliable et je vous suis fort reconnaissant.

A Madame Martine JAMAR, épouse TRAPE, en souvenirs de notre longue traversée de l'Afrique sub-saharienne et de votre présence en d'autres circonstances relatives aux enquêtes borréliose. Votre disponibilité, votre amabilité, votre générosité, votre vif esprit de mère attentive et vos qualités humaines m'ont profondément marqué. Vos délicieuses préparations de repas ont largement contribué au renforcement de mes efforts soutenus, et je suis heureux de vous témoigner ma sincère gratitude et de vous dire merci du fond du cœur.

Au Docteur Laurence VIAL, en souvenirs de votre dynamisme, votre bel esprit d'équipe, vos qualités humaines et intellectuelles et des moments passés ensemble au cours des enquêtes borréliose. Je suis heureux de vous témoigner mon attachement indéfectible.

Au Docteur Mamadou Cellou BALDE, Responsable du Laboratoire d'Entomologie Médicale et de Vénimologie à l'Institut Pasteur de Kindia, en Guinée, pour votre collaboration. Votre disponibilité, vos qualités humaines et intellectuelles ont vivement contribué au rayonnement exceptionnel de cette collaboration, et je vous suis fort reconnaissant.

Au Professeur Émérite Philippe BRASSEUR, en accueil à URMITE, UMR 198 IRD Dakar, pour votre disponibilité, vos qualités humaines, intellectuelles et éminentes qualités scientifiques et votre simplicité qui m'ont tant fasciné. Veuillez trouver en ces mots mon profond respect.

A Monsieur Gilles CHAUVANCY, Assistant Ingénieur à URMITE, UMR 198 IRD Dakar, pour votre disponibilité, vos qualités humaines et intellectuelles, votre grande maîtrise de l'outil informatique. Je vous remercie du fond du cœur de m'avoir aidé à confectionner les cartes de répartition qui ont servi à l'illustration des résultats de mon mémoire de thèse. C'est l'occasion pour moi de vous témoigner ma sincère gratitude et merci infiniment.

Ce travail est aussi le fruit des efforts de plusieurs personnes impliquées dans les enquêtes de terrain et l'étude au Maroc, en Algérie, Tunisie, au sud de l'Espagne, en



Mauritanie, au Sénégal, en Gambie, Guinée-Bissao, Guinée Conakry, au Mali, Burkina Faso, Niger, Togo, Libéria et en Côte d'Ivoire. Il s'agit de Youssouph MANE, Yassine SOUIDI, Ilias Ag ABOUMAHAMAD, Doukary ABDOULAYE (*in memoriam*), Moulid ERRAHLI, Jaouad MOSTAFI, AOULMI, Solimane Ag ATTEYNINE, Hampaté BA, Sid'Ahmed OULD MOHAMED, Sid'Ahmed Ouled El GHASSEM, Abd SALAM, Adamou NOMAO (*in memoriam*), Khalilou BA, Karine MOULINE, Oumar NIANG, Charles BOUGANALI, Benoît ZOUNGRANA, Henry S. LANGFORD, Mohamed GBENGA et Mamadou DOUMIA, que je remercie très sincèrement.

A tous les Chefs de village et les populations des sites étudiés pour leur hospitalité légendaire, leur affection et leur collaboration inestimables, en particulier ceux et celles des villages de Dielmo et Ndiop et des autres villages environnants. Soyez assurés de ma déférence et sincère gratitude.

A tout le personnel de l'URMITE à Dakar pour leur disponibilité, leur sympathie et le bel esprit d'équipe qui prévaut au sein de notre Laboratoire, en témoignage de notre unité agissante. Je remercie spécialement du fond du cœur tous les microscopistes qui ont effectué la recherche si fastidieuse des *Borrelia* sur gouttes épaisses de sang.

A tout le personnel médical, sanitaire, technique chargé du suivi quotidien parasitologique et épidémiologique, en service dans les deux Stations de recherche à Dielmo et Ndiop, pour leur soutien constant. Recevez ma reconnaissance infinie pour le travail bien accompli.

A toutes les personnes dont le concours m'a été utile pour la réalisation de ce travail, en témoignage de ma grande affection. J'adresse un hommage mérité et appuyé au jeune S.T qui, après avoir développé 7 épisodes fébriles consécutifs pendant plus de trois mois, a été à l'origine, dès 1989, de l'émergence de l'intérêt de l'étude épidémiologique sur la borreliose à tiques à *Borrelia crocidurae*.

A toute personne qui par la grâce de Dieu, dans un avenir immédiat ou lointain, aura à m'apporter son aide, donner des conseils enrichissants, tout l'honneur est pour moi d'exprimer à chacun dès maintenant du fond du cœur ma déférence et gratitude infinie.

## **LISTE DES FIGURES**

## LISTE DES FIGURES

**Figure 1 :** (→) *Borrelia crocidurae* observées au microscope photonique sur goutte épaisse de sang d'une souris blanche trois jours (J3) après inoculation intra-péritonéale du sang d'un *Mastomys erythroleucus*, petit rongeur sauvage (x2000), page 10.

**Figure 2 :** *Ornithodoros sonrai* femelle, vue d'ensemble détaillée de l'idiosome en faces dorsale et ventrale, M = Mammillae, ZP = Zones plates correspondant aux insertions des muscles dorso-ventraux, G = Gonopore femelle (fente génitale), C = Coxae, O = Orifice anal, SM = Sillon médian postanal, ST = Sillon transverse postanal, BC = Basis capituli, PD = Partie distale du capitulum, EL = Expansions latérales (joues), CM = Camérostome (x50 ; x30), page 13.

**Figure 3 :** *Arvicanthus niloticus*, au pied d'un *Euphorbia balsamifera*, J.M. DUPLANTIER, page 35.

**Figure 4 :** *Mastomys erythroleucus*, sur un tapis vert de graminées, J.J. LEMASSON, page 35

**Figure 5 :** *Mastomys huberti*, sur un tapis vert de graminées, J.M. DUPLANTIER, page 36.

**Figure 6 :** *Praomys daltoni*, sur un support de bois, J.M. DUPLANTIER, page 36.

**Figure 7 :** *Crocidura olivieri*, sur un tapis humide et vert de graminées, G. DIATTA, page 37.

**Figure 8 :** *Gerbilliscus gambianus*, sur un tapis sec, J.M. DUPLANTIER, page 37.

**Figure 9 :** *Taterillus* spp., plus probablement, **A** : *Taterillus gracilis*, Y. PAPILLON ; ou **B** : *Taterillus pygargus*, sur un tapis sec, J.M. DUPLANTIER, page 38.

**Figure 10 :** *Mastomys natalensis*, Y. PAPILLON, page 39.

**Figure 11 :** *Mus musculus*, L. GRANJON, page 39.

**Figure 12 :** *Cricetomys gambianus*, L. GRANJON, page 40.

**Figure 13 :** *Rattus rattus*, J.M. DUPLANTIER, page 40.

**Figure 14 :** *Gerbillus tarabuli*, sur un tapis sec, J.J. LEMASSON, page 41.

**Figure 15 :** *Gerbillus gerbillus*, PH. ORSINI, page 41.

**Figure 16 :** *Gerbillus occiduus*, sur un tapis semi-désertique, L. GRANJON, page 42.

**Figure 17 :** *Meriones shawi grandis*, sur un tapis sec de blocs rocheux, E. GRIMMBERGE, page 42.

**Figure 18 :** *Gerbillus (Dipodillus) campestris*, sur un tapis sec, L. GRANJON, page 43.

**Figure 19** : *Gerbillus hoogstraali*, sur un tapis sec de blocs rocheux, E. GRIMMBERGE, page 43.

**Figure 20** : *Atelerix algirus*, hérisson d'Algérie, sur un tapis vert de graminées, L. GRANJON, page 44.

**Figure 21** : *Xerus erythropus*, sur un tapis sec, L. GRANJON, page 44.

**Figure 22** : *Dasymys rufulus*, sur un tapis vert de graminées, J.J. LEMASSON, page 45.

**Figure 23** : *Desmodilliscus braueri*, sur un tapis sec, J.M. DUPLANTIER, page 45.

**Figure 24** : Cycle épidémiologique de la borréliose à tiques d'Afrique de l'Ouest, décrit entre 1917-1950, page 47.

**Figure 25** : Indices annuels d'anomalies pluviométriques dans le sahel de 1905 à 2005 : Source 4<sup>ème</sup> Conférence Internationale sur l'Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine (AMMA), Toulouse, France, 2-6 Juillet 2012, page 55.

**Figure 26** : Isohyètes moyens (pluviométrie moyenne) en Afrique de l'Ouest (50 mm, 250 mm, 500 mm, 1000 mm, 1500 mm) entre les périodes 1951-1969 et 1970-1999 (MAHE *et al.*, 1999), page 55.

**Figure 27** : **A** : Isohyètes moyens de la période 1947-1969 ; **B** : Isohyètes moyens de la période 1970-1990 (TRAPE *et al.*, 1996a), page 56.

**Figure 28** : Plan d'échantillonnage des tiques *Ornithodoros* en transects Ouest-Est, Nord-Sud, Sud-Nord et Sud-Ouest/Nord-Est, et isohyètes moyens (moyennes pluviométriques) pour la période 1970-1999 en Afrique de l'Ouest et du Nord (MAHE *et al.*, 1999), page 63.

**Figure 29** : **A** : Échantillonnage d'un terrier en milieu naturel ; **B** : Retrait du tamis et versement de la litière du terrier dans deux grands plateaux blancs inoxydables, page 66.

**Figure 30** : Sites d'échantillonnage des rongeurs et insectivores capturés en Afrique de l'Ouest sub-saharienne et au Sahara occidental à Dakhla au Maroc, page 68.

**Figure 31** : Présentation des villages de Dielmo (**A**) et Ndiop (**B**) en vues aériennes (C. ROGIER), page 75.

**Figure 32** : Terriers examinés et collecte de tiques *O. sonrai* à Ndiop et Dielmo villages, Janvier 2012, page 77.

**Figure 33** : Distribution spatiale et localisation des sites positifs ou négatifs pour la présence de tiques *O. sonrai* dans des terriers de petits mammifères au Sénégal, en Gambie et dans les pays environnants, page 90.

**Figure 34** : Distribution spatiale et localisation des sites positifs ou négatifs pour la présence de tiques *O. sonrai* dans des terriers de petits mammifères au Mali et dans les pays environnants, page 104.

**Figure 35** : Distribution spatiale et localisation des sites positifs ou négatifs pour la présence de tiques *O. sonrai* dans des terriers de petits mammifères en Mauritanie et dans les pays limitrophes, page 112.

**Figure 36** : Sites d'échantillonnage des tiques *O. sonrai* dans des terriers de petits mammifères au Togo et dans les pays limitrophes, page 115.

**Figure 37** : Distribution spatiale et localisation des sites positifs ou négatifs pour la présence de tiques *Ornithodoros* dans des terriers de petits mammifères au Maroc et sud de l'Espagne, page 123.

**Figure 38** : Distribution spatiale et localisation des sites positifs ou négatifs pour la présence de tiques *Ornithodoros* dans des terriers de petits mammifères en Algérie et Tunisie, page 136.

**Figure 39** : Distribution spatiale des tiques *O. sonai* trouvées dans des terriers de petits mammifères (A) et de *B. crocidurae* (B) au Sénégal et en Gambie, page 141.

**Figure 40** : Distribution spatiale des tiques *O. sonrai* trouvées dans des terriers de petits mammifères (A) et de *B. crocidurae* (B) au Mali, page 141.

**Figure 41** : Distribution spatiale des tiques *O. sonrai* trouvées dans des terriers de petits mammifères (A) et de *B. crocidurae* (B) en Mauritanie, page 142.

**Figure 42** : Distribution spatiale des espèces de tiques *Ornithodoros* trouvées dans des terriers de petits mammifères (A) et des espèces de *Borrelia* mises en évidence chez des tiques et/ou rongeurs (B) au Maroc et sud de l'Espagne, page 142.

**Figure 43** : Distribution spatiale des espèces de tiques *Ornithodoros* trouvées dans des terriers de petits mammifères (A) et des espèces de *Borrelia* mises en évidence (B) en Algérie et Tunisie, page 143.

**Figure 44** : Groupes phylogénétiques, et arbre des relations phylétiques mettant en évidence la souche de *B. crocidurae* 1225445 isolée des tiques *O. sonrai* collectées à Ndiop, des souches de *B. crocidurae* isolées de patients fébriles 03-02 à Ndiop et 19/31 à Dielmo au Sénégal, et des amplicons de tiques *O. sonrai* de Dielmo et Ndiop (en violet) par rapport aux autres souches de *B. crocidurae* de tiques (Mauritanie, Mali et Maroc). Les séquences du gène IGS ont été alignées à partir de CLUSTALW et les déductions phylogénétiques ont été obtenues en utilisant l'analyse phylogénétique bayésienne appliquée au logiciel TOPALi 2,5 (Biomathématiques et Statistiques Ecosse, Edimbourg, Royaume-Uni) avec l'application de MrBayes intégrée au modèle de substitution GTR +  $\Gamma$ .

Les numéros de GenBank sont mentionnés à la fin. Les numéros indiqués aux noeuds sont des valeurs de bootstrap obtenues en répétant l'analyse 100 fois pour générer un arbre de consensus majoritaire. Il y a un total de 545 positions dans l'ensemble des données finales. La barre d'échelle indique une divergence des séquences nucléotidiques de 2%, page 145.

**Figure 45** : Relations phylogénétiques entre espèces de tiques *Ornithodoros* mises en évidence en utilisant les séquences du gène 16S ARNr. Les triangles en couleur indiquent la diversité génétique des séquences détectées pour chaque espèce de tique *Ornithodoros*. Les ronds colorés correspondent aux espèces de *Borrelia* détectées dans chacune des espèces de tiques. Le phylogramme a été construit en utilisant une méthode de maximum de vraisemblance à partir des données de séquences partielles du gène 16S. Les valeurs de bootstrap > 90 sont présentées avec une barre d'échelle de 0,05 substitutions par site, page 146.

**Figure 46** : Relations phylogénétiques entre les espèces de *Borrelia* mises en évidence en utilisant la combinaison des séquences d'une partie du gène 18S de l'espace inter-génique 16S-23S (IGS) et du gène de la flagelline B (FLA). Le triangle en couleur a estimé la diversité des espèces de *Borrelia*, et nous y avons inclus le clade *B. merionesi*, une *Borrelia* détectée chez un rongeur capturé à El Argoub au Maroc. Les carrés en couleur correspondent aux espèces de tiques déterminées dans cette étude par l'analyse phylogénétique des séquences du gène 16S. Le phylogramme a été construit en utilisant une méthode de maximum de vraisemblance à partir de la combinaison des données de séquences (séquences comprenant des séquences GenBank de références). Les valeurs de bootstrap > 70 sont présentées avec une barre d'échelle de 0,01 substitutions par site, page 147.

**Figure 47** : Texture du sol des terriers de rongeurs positifs pour les tiques *Ornithodoros* (%), page 154.

**Figure 48** : Texture du sol des terriers de rongeurs négatifs pour les tiques *Ornithodoros* (%), page 154.

**Figure 49** : Pluviométrie annuelle moyenne (isohyètes moyens) en Afrique de l'Ouest et du Nord pour la période 1940-1969 (MAHE *et al.*, 1999), page 157.

**Figure 50** : Répartition géographique des tiques *Ornithodoros* en Afrique de l'Ouest et du Nord en relation avec les isohyètes moyens (moyennes pluviométriques) pour la période 1970-1999. En rouge, les localités où les tiques *Ornithodoros* ont été trouvées (cercle fin : enquêtes de l'IRD, cercle épais : données de la littérature), en gris les localités où la recherche des vecteurs a été négative, page 158.

**Figure 51** : Répartition géographique des espèces de tiques *Ornithodoros* en Afrique de l'Ouest et du Nord en relation avec les moyennes pluviométriques (isohyètes moyens) pour la période 1970-1999 (MAHE *et al.*, 1999), page 159.

**Figure 52 :** Répartition géographique des espèces de *Borrelia* en Afrique de l'Ouest et du Nord en relation avec les moyennes pluviométriques (isohyètes moyens) pour la période 1970-1999 (MAHE *et al.*, 1999), page 160.

**Figure 53 :** Distribution annuelle des cas de borréliose diagnostiqués chez des consultants fébriles à l'Hôpital Provincial de Kénitra, Maroc, page 164.

**Figure 54 :** Distribution mensuelle des cas de borréliose diagnostiqués chez des consultants fébriles à l'Hôpital Provincial de Kénitra, Maroc, page 164.

**Figure 55 :** *Graphique 1 bleu* : Évolution de la densité d'incidence de la borréliose à tiques à Dielmo, de 1990 à 2012, et impact de la lutte préventive de la borréliose de 2013 à 2014 ; *Graphique 2 rouge* : Évolution de la densité d'incidence du paludisme à Dielmo, de 1990 à 2013, page 167.

**Figure 56 :** Distribution spatiale et localisation des tiques *O. sonrai* à Dielmo et Ndiop, et dans les autres villages environnants, Sine-Saloum, Sénégal, page 168.

# **LISTE DES TABLEAUX**



## LISTE DES TABLEAUX

**Tableau I** : Type de prélèvements et d'analyses réalisés sur les petits mammifères capturés, page 69.

**Tableau II** : Effectifs et lieu de recherche des tiques *O. sonrai* au Sénégal, en Gambie, Guinée Bissao, Guinée Conakry et au Libéria, en 2006, 2007, 2008, 2009 et 2011, page 89.

**Tableau III** : Effectifs et lieu de recherche des tiques *O. sonrai* au Mali, en 2006, 2007, 2008, au Niger en 2008, Burkina Faso et en Côte d'Ivoire en 2012, page 105.

**Tableau IV** : Effectifs et lieu de recherche des tiques *O. sonrai* en Mauritanie en 2006, 2007, page 111.

**Tableau V** : Effectifs et lieu de recherche des tiques *O. sonrai* au Togo, Janvier 2008, page 114.

**Tableau VI** : Effectifs et lieu de recherche des tiques *Ornithodoros* au Maroc et sud de l'Espagne, en 2006, 2009 et 2010, page 124.

**Tableau VII** : Effectifs et lieu de recherche des tiques *Ornithodoros* en Algérie, 2009-2011, page 132.

**Tableau VIII** : Effectifs et lieu de recherche des tiques *Ornithodoros* en Tunisie, 2010, page 135.

**Tableau IX** : Nombre de sites et terriers investigués, et nombre et proportion de positifs pour les tiques *Ornithodoros* en Afrique de l'Ouest et du Nord, 2006 à 2014, page 138.

**Tableau X** : Valeurs de l'écart-type déterminées dans les pays de distribution des tiques *Ornithodoros* indiquant des différences de dispersion homogène et/ou irrégulière de ces tiques entre les pays endémiques de borréliose, page 138.

**Tableau XI** : Prévalence des infections à *Borrelia* chez les petits mammifères capturés au Maroc, Novembre 2008, page 155.

**Tableau XII** : Échantillonnage de tiques *O. sonrai* en limite sud d'extension de la borréliose dans les villages environnants au Nord et Sud de Dielmo-Ndiop, Sine-Saloum, Sénégal, 2002-2003, page 169.

**Tableau XIII** : Échantillonnage de tiques *O. sonrai* en limite sud d'extension de la borréliose dans les villages environnants au Nord/Nord-est et Sud/Sud-est de Dielmo-Ndiop, Sine-Saloum, Sénégal, 2013-2014, page 170.

# **SIGLES ET ACRONYMES**

## SIGLES ET ACRONYMES

|        |                                                                           |
|--------|---------------------------------------------------------------------------|
| ADNr   | Acide Désoxyribonucléique ribosomal                                       |
| AMMA   | Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine                        |
| ANR    | Agence Nationale française de la Recherche                                |
| ARNr   | Acide Ribonucléique ribosomal                                             |
| ASTMH  | Société Américaine de Médecine Tropicale et d'Hygiène                     |
| AT     | Adénine-thymine                                                           |
| CAMES  | Conseil Africain et Malgache pour l'Enseignement Supérieur                |
| CBGP   | Centre de Biologie et Gestion des Populations                             |
| °C     | Dégré Celcius                                                             |
| CI     | Intervalle de confiance                                                   |
| CG     | Cytosine-guanine                                                          |
| CNH    | Centre National d'Hygiène                                                 |
| CNRM   | Centre National de Recherche Médicale                                     |
| CNRS   | Centre National de la Recherche Scientifique                              |
| CTA    | Combinaison thérapeutique à base d'Artémisinine                           |
| E      | Méridien Est ou longitude Est                                             |
| EBAD   | École des Bibliothécaires, Archivistes et Documentalistes                 |
| ED-SEV | École Doctorale des Sciences de la Vie, de la Santé et de l'Environnement |
| FAM    | 6-Fluorescein amidite (6-FAM) = Probes ou Fluorescence                    |
| F CFA  | Franc de la Communauté d'Afrique francophone                              |
| FLA    | Flagelline A (gène)                                                       |
| G      | Gramme                                                                    |
| GC     | Guanine-cytosine                                                          |
| GE     | Goutte épaisse de sang                                                    |
| GEMI   | Génétique et Évolution des Maladies Infectieuses                          |
| GICC   | Gestion et Impact du Changement Climatique                                |
| glpQ   | Glycérophosphodiester phosphodiesterase (gène)                            |
| GPS    | Global Positioning System (Position géograpgique)                         |
| IGS    | Espace Inter-génique (16S-23S) mitochondrial (gène)                       |
| IRD    | Institut de Recherche pour le Développement, ex-ORSTOM                    |
| ISED   | Institut de Santé et Développement                                        |

|             |                                                                                |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| ISO 9000    | International Standard Organisation 9000                                       |
| J3, J6, J14 | Jour 3, 6, 14 de contrôle des souris blanches inoculées                        |
| Khi-2       | Test du $\chi^2$ ou khi carré                                                  |
| MEDD        | Ministère français de l'Écologie et du Développement Durable                   |
| MKM         | Milieu de Kelly Modifié                                                        |
| Mg/Kg       | Milligrammes par kilogramme                                                    |
| MILDA       | Moustiquaire Imprégnée à Longue durée d'Action                                 |
| MIVEGEC     | Maladies Infectieuses et Vecteurs : Écologie, Génétique, Évolution et Contrôle |
| MTN (NTD)   | Maladie Tropicale Négligée (Neglected Tropical Disease)                        |
| N           | Parallèle Nord ou latitude Nord                                                |
| NFa         | Nombre Fondamental de chromosomes autosomiques                                 |
| OMS         | Organisation Mondiale de la Santé                                              |
| ORSTOM      | Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer                   |
| P           | Facteur de significativité statistique                                         |
| Pb          | Paires de bases                                                                |
| PCR         | Polymerase Chain Reaction                                                      |
| POC         | Point of Care                                                                  |
| PVC         | Polychlorure de Vinyle                                                         |
| QBC         | Quantitative Buffy Coat                                                        |
| qPCR        | Quantitative Polymerase Chain Reaction                                         |
| RR          | Risque relatif                                                                 |
| RRDL        | Risque relatif à Dielmo                                                        |
| RRNDP       | Risque relatif à Ndiop                                                         |
| RT-PCR      | Real time Polymerase Chain Reaction                                            |
| SB26        | Souris blanche No. 26                                                          |
| SB27        | Souris blanche No. 27                                                          |
| TA          | Thymine-adénine                                                                |
| TAMRA       | Tetramethylrhodamine = Quencher ou Sonde                                       |
| TBRF        | Tick-borne relapsing fever                                                     |
| TDR         | Test de diagnostic rapide                                                      |
| UBE         | Unité de bactériologie expérimentale                                           |
| UBGP        | Unité de Biologie et Gestion des Populations                                   |
| UCAD        | Université Cheih Anta Diop                                                     |

|                |                                                          |
|----------------|----------------------------------------------------------|
| UM             | Unité Mixte                                              |
| UMR            | Unité Mixte de Recherche                                 |
|                | Émergentes                                               |
| W              | Méridien Ouest ou longitude Ouest                        |
| WHO TASK GROUP | Groupe de Travail de l'Organisation Mondiale de la Santé |

# TABLE DES MATIÈRES

|                                                                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</b>                                                                                                | <b>1</b>  |
| <b>PREMIÈRE PARTIE : REVUE DES CONNAISSANCES ÉPIDÉMIOLOGIQUES SUR LA FIÈVRE RÉCURRENTE A TIQUES OU BORRÉLIOSE A TIQUES .....</b> | <b>8</b>  |
| <b>Chapitre I : Les agents pathogènes et les ornithodores vecteurs de la borréliose à tiques 9</b>                               |           |
| 1. Les agents pathogènes.....                                                                                                    | 9         |
| 1-1. Caractéristiques des <i>Borrelia</i> .....                                                                                  | 9         |
| 1-2. Biologie des <i>Borrelia</i> .....                                                                                          | 9         |
| 2. Les ornithodores vecteurs de la borréliose à tiques .....                                                                     | 11        |
| 2-1. Révision du complexe <i>Ornithodoros erraticus</i> et épidémiologie génétique des tiques <i>Ornithodoros</i> .....          | 11        |
| 2-2. Caractéristiques et bio-écologie des ornithodores.....                                                                      | 12        |
| 2-3. Modalités de la contamination dans la nature et implications épidémiologiques.....                                          | 14        |
| <b>Chapitre II : Le réservoir animal de la borréliose à tiques.....</b>                                                          | <b>15</b> |
| 1. Répartition biogéographique des espèces de micro-mammifères étudiées .....                                                    | 15        |
| 1-1. Espèces à affinité saharienne.....                                                                                          | 18        |
| 1-2. Espèces à affinité sahélo-saharienne.....                                                                                   | 21        |
| 1-3. Espèces à affinité sahélienne .....                                                                                         | 25        |
| 1-4. Espèces à affinité sahélo-soudanienne .....                                                                                 | 26        |
| 1-5. Espèces à affinité soudanienne .....                                                                                        | 29        |
| 1-6. Espèces à affinité soudano-guinéenne.....                                                                                   | 32        |
| 1-7. Espèces à affinité guinéenne.....                                                                                           | 33        |
| 1-8. Espèces introduites .....                                                                                                   | 33        |
| 2. Rôle épidémiologique .....                                                                                                    | 34        |
| <b>Chapitre III : La borréliose à tiques chez l'homme .....</b>                                                                  | <b>46</b> |
| 1. Introduction .....                                                                                                            | 46        |
| 2. Aspects épidémiologiques .....                                                                                                | 46        |
| 3. Présentation du cycle de la maladie .....                                                                                     | 47        |
| 4. Physiologie et immunité.....                                                                                                  | 48        |
| 5. Aspects cliniques .....                                                                                                       | 49        |
| 6. Méthodes de diagnostic biologique.....                                                                                        | 51        |
| 6-1. Diagnostic direct.....                                                                                                      | 51        |
| 6-2. Diagnostic différentiel.....                                                                                                | 51        |
| 6-3. Autres méthodes de diagnostic possibles .....                                                                               | 52        |
| 7. Données de l'incidence connue dans deux régions du Sénégal .....                                                              | 53        |
| 8. Traitement et prévention .....                                                                                                | 53        |
| 9. Climat et borréliose à tiques .....                                                                                           | 54        |
| 9-1. Répartition géographique des ornithodores vecteurs.....                                                                     | 54        |

|                                                                                                                                                                                                                                                |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 9-2. Impact des modifications climatiques .....                                                                                                                                                                                                | 54        |
| 9-3. Extension récente de la borréliose à tiques.....                                                                                                                                                                                          | 56        |
| 10. Environnement et borréliose à tiques .....                                                                                                                                                                                                 | 57        |
| <b>DEUXIÈME PARTIE : INVESTIGATIONS ÉPIDÉMIOLOGIQUES .....</b>                                                                                                                                                                                 | <b>58</b> |
| <b>Chapitre I : Contexte de l'étude .....</b>                                                                                                                                                                                                  | <b>59</b> |
| 1. Justificatifs.....                                                                                                                                                                                                                          | 59        |
| 2. Objectifs .....                                                                                                                                                                                                                             | 59        |
| <b>Chapitre II : Matériel et approche méthodologique de recherche.....</b>                                                                                                                                                                     | <b>62</b> |
| 1. Plan d'étude des investigations longitudinales .....                                                                                                                                                                                        | 62        |
| 1-1. Échantillonnage de tiques ornithodores et des petits mammifères.....                                                                                                                                                                      | 62        |
| 1-1-1. Compréhension épidémiologique de la distribution géographique de la borréliose à tiques en Afrique de l'Ouest et du Nord .....                                                                                                          | 62        |
| 1-1-1-1. Détermination de la limite est de répartition géographique des tiques <i>O. sonrai</i> et délimitation des foyers associés au bassin du Niger .....                                                                                   | 63        |
| 1-1-1-2. Détermination de la limite sud de répartition des tiques <i>O. sonrai</i> .....                                                                                                                                                       | 64        |
| 1-1-1-3. Recherche de l'existence d'une distribution continue des tiques <i>O. sonrai</i> entre le Sénégal et le Maroc, et des tiques <i>Ornithodoros</i> entre le Maroc et la Tunisie.....                                                    | 64        |
| 1-1-1-4. Méthodes d'échantillonnage des tiques ornithodores.....                                                                                                                                                                               | 65        |
| 1-1-1-5. Méthodes d'échantillonnage des petits mammifères réservoirs.....                                                                                                                                                                      | 67        |
| 1-1-2. Analyses des échantillons biologiques collectés .....                                                                                                                                                                                   | 70        |
| 1-1-2-1. Analyses des tiques ornithodores.....                                                                                                                                                                                                 | 70        |
| 1-1-2-2. Analyse des données pédologiques collectées.....                                                                                                                                                                                      | 70        |
| 1-1-2-3. Analyse des échantillons de rongeurs et d'insectivores capturés .....                                                                                                                                                                 | 70        |
| 1-1-3. Analyse des relations climat/borréliose/environnement .....                                                                                                                                                                             | 71        |
| 1-2. Analyse des données descriptives et analytiques .....                                                                                                                                                                                     | 72        |
| 1-2-1. Analyse des données descriptives.....                                                                                                                                                                                                   | 72        |
| 1-2-2. Analyse des données analytiques.....                                                                                                                                                                                                    | 72        |
| 1-3. Étude des cas cliniques à l'Hôpital Provincial de Kénitra au Maroc, et étude fonctionnelle de la borréliose à Dielmo-Ndiop et dans les villages environnants, au Sine-Saloum, Sénégal et stratégie de lutte préventive de la maladie..... | 73        |
| 1-3-1. Cas de borréliose diagnostiqués chez des consultants fébriles à l'Hôpital Provincial de Kénitra, au Maroc.....                                                                                                                          | 73        |
| 1-3-2. Étude fonctionnelle de la borréliose à tiques à Dielmo-Ndiop et dans les villages environnants au Sine-Saloum, Sénégal et stratégie de lutte préventive de la maladie .....                                                             | 73        |
| 1-3-2-1. Comment distinguer les malades fébriles atteints de paludisme à ceux de la borréliose? .....                                                                                                                                          | 73        |
| 1-3-2-2. Échantillonnage de tiques ornithodores dans les villages environnants et caractérisation de la limite sud d'extension.....                                                                                                            | 74        |
| 1-3-2-3. Sites de l'étude.....                                                                                                                                                                                                                 | 75        |
| 1-3-2-4. Population suivie.....                                                                                                                                                                                                                | 75        |
| 1-3-2-5. Définition des cas de borréliose .....                                                                                                                                                                                                | 76        |
| 1-3-2-6. Échantillonnage de tiques ornithodores dans les terriers de rongeurs à Dielmo et Ndiop.....                                                                                                                                           | 76        |
| 1-3-2-7. Stratégie de lutte préventive de la borréliose à Dielmo-Ndiop et mesures d'accompagnement mises en oeuvre .....                                                                                                                       | 77        |

|                                                                                                                                         |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1-3-2-7-1. Évaluation des coûts de la stratégie mise en oeuvre .....                                                                    | 78        |
| 1-3-2-7-2. Méthodes d'analyse statistique .....                                                                                         | 78        |
| <b>Chapitre III : Résultats .....</b>                                                                                                   | <b>80</b> |
| <b>1. Compréhension épidémiologique de la répartition géographique de la borréliose à tiques en Afrique de l'Ouest et du Nord .....</b> | <b>80</b> |
| 1-1. Présentation de l'étude .....                                                                                                      | 80        |
| 1-2. Échantillonnage de tiques ornithodores mené au Sénégal, en Gambie, Guinée Bissau, Guinée conakry et au Libéria.....                | 81        |
| 1-2-1. Échantillonnage mené au Sénégal .....                                                                                            | 81        |
| 1-2-1-1. Enquête en transect Ouest-Est le long du 14 <sup>ème</sup> Parallèle Nord.....                                                 | 81        |
| 1-2-1-2. Enquêtes en limite sud de progression des ornithodores vecteurs.....                                                           | 82        |
| 1-2-1-3. Enquêtes complémentaires .....                                                                                                 | 84        |
| 1-2-2. Enquêtes menées en Gambie.....                                                                                                   | 86        |
| 1-2-3. Enquête menée en Guinée Bissau.....                                                                                              | 86        |
| 1-2-4. Enquêtes menées en Guinée Conakry.....                                                                                           | 87        |
| 1-2-5. Enquêtes menées au Libéria.....                                                                                                  | 88        |
| 1-3. Échantillonnage de tiques ornithodores mené au Mali, Burkina Faso, Niger et en Côte d'Ivoire .....                                 | 91        |
| 1-3-1. Échantillonnage de tiques au Mali.....                                                                                           | 91        |
| 1-3-1-1. Enquêtes en transect Ouest-Est.....                                                                                            | 91        |
| 1-3-1-2. Enquêtes complémentaires .....                                                                                                 | 92        |
| 1-3-2. Échantillonnage de tiques ornithodores mené au Burkina Faso, Niger et en Côte d'Ivoire.....                                      | 102       |
| 1-3-2-1. Échantillonnage mené au Burkina Faso et Niger.....                                                                             | 102       |
| 1-3-2-2. Échantillonnage mené en Côte d'Ivoire .....                                                                                    | 103       |
| 1-4. Échantillonnage de tiques ornithodores mené en Mauritanie .....                                                                    | 106       |
| 1-4-1. Échantillonnage en transect Nord-Sud .....                                                                                       | 106       |
| 1-4-2. Enquêtes complémentaires .....                                                                                                   | 107       |
| 1-5. Échantillonnage de tiques ornithodores mené auTogo.....                                                                            | 113       |
| ➤ Échantillonnage en transect Nord-Sud .....                                                                                            | 113       |
| 1-6. Échantillonnage de tiques ornithodores mené auMaroc.....                                                                           | 115       |
| 1-6-1. Enquêtes en transects Sud-Nord, Sud Ouest-Nord Est.....                                                                          | 115       |
| 1-6-2. Enquêtes complémentaires .....                                                                                                   | 118       |
| 1-6-3. Enquêtes menées en Espagne .....                                                                                                 | 118       |
| 1-7. Échantillonnage de tiques ornithodores mené en Algérie et Tunisie.....                                                             | 125       |
| 1-7-1. Échantillonnage mené en Algérie.....                                                                                             | 125       |
| 1-7-1-1. Échantillonnage sur les 37 <sup>ème</sup> , 36 <sup>ème</sup> et 35 <sup>ème</sup> parallèles Nord.....                        | 125       |
| 1-7-1-2. Échantillonnage le long du méridien 00°W/E .....                                                                               | 128       |
| 1-7-1-3. Échantillonnage le long du 6 <sup>ème</sup> méridien Est.....                                                                  | 129       |
| 1-7-1-4. Échantillonnage complémentaire.....                                                                                            | 130       |
| 1-7-2. Échantillonnage mené en Tunisie .....                                                                                            | 133       |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| ➤ Échantillonnage entre le 08 <sup>ème</sup> méridien Est et le 11 <sup>ème</sup> .....                                                                                                                                                                                                                                                 | 133        |
| 1-8. Principaux résultats.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 136        |
| 1-9. Conclusion.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 139        |
| <b>2. Caractérisation génétique des populations de tiques <i>Ornithodoros</i> et des <i>Borrelia</i>, et comparaison du fonctionnement génétique du système <i>Borrelia</i>/hôte/vecteur en zones sahélo-soudanienne et saharo-méditerranéenne en relation avec les modifications climatiques liées au déficit pluviométrique .....</b> | <b>140</b> |
| 2-1. Présentation de l'étude.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 140        |
| 2-2. Analyses moléculaires et phylogénétiques des tiques <i>Ornithodoros</i> et des infections à <i>Borrelia</i> au Sénégal et en Gambie .....                                                                                                                                                                                          | 141        |
| 2-3. Analyses moléculaires et phylogénétiques des tiques <i>Ornithodoros</i> et des infections à <i>Borrelia</i> au Mali ..                                                                                                                                                                                                             | 141        |
| 2-4. Analyses moléculaires et phylogénétiques des tiques <i>Ornithodoros</i> et des infections à <i>Borrelia</i> en Mauritanie .....                                                                                                                                                                                                    | 142        |
| 2-5. Analyses moléculaires et phylogénétiques des tiques <i>Ornithodoros</i> et des infections à <i>Borrelia</i> au Maroc et sud de l'Espagne.....                                                                                                                                                                                      | 142        |
| 2-6. Analyses moléculaires et phylogénétiques des tiques <i>Ornithodoros</i> et des infections à <i>Borrelia</i> en Algérie et Tunisie .....                                                                                                                                                                                            | 143        |
| 2-7. Comparaison du fonctionnement génétique du système <i>Borrelia</i> /hôte/vecteur en zones sahélo-soudanienne et saharo-méditerranéenne en relation avec les modifications climatiques liées au déficit pluviométrique                                                                                                              | 143        |
| 2-7-1. Impact du déficit pluviométrique sur le fonctionnement génétique du système <i>Borrelia</i> /hôte/vecteur en zone sahélo-soudanienne .....                                                                                                                                                                                       | 145        |
| 2-7-2. Impact du déficit pluviométrique sur le fonctionnement génétique du système <i>Borrelia</i> /hôte/vecteur en zone saharo-méditerranéenne.....                                                                                                                                                                                    | 146        |
| 2-8. Principaux résultats.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 147        |
| 2-9. Conclusion.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 151        |
| <b>3. Facteurs déterminant la répartition géographique et la fréquence de l'agent pathogène chez l'homme, la tique vectrice et les micro-mammifères réservoirs de la borréliose .....</b>                                                                                                                                               | <b>152</b> |
| 3-1. Présentation de l'étude.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 152        |
| 3-2. Analyse des paramètres pédologiques.....                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 153        |
| 3-3. Présence de petits mammifères infectés par <i>Borrelia</i> au Maroc .....                                                                                                                                                                                                                                                          | 155        |
| 3-4. Relations climat/environnement/borréliose .....                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 156        |
| 3-5. Principaux résultats.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 160        |
| 3-6. Conclusion.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 162        |
| <b>4. Étude des cas cliniques à l'Hôpital Provincial de Kénitra au Maroc, et étude fonctionnelle de la borréliose à Dielmo et Ndiop, et dans les villages environnants au Sine-Saloum, Sénégal et stratégie de lutte préventive de la maladie .....</b>                                                                                 | <b>163</b> |
| 4-1. Étude des cas cliniques à l'Hôpital Provincial de Kénitra au Maroc.....                                                                                                                                                                                                                                                            | 163        |
| 4-1-1. Présentation de l'étude.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 163        |
| 4-1-2. Cas de borréliose diagnostiqués chez des consultants fébriles à l'Hôpital Provincial de Kénitra, au Maroc .....                                                                                                                                                                                                                  | 163        |
| 4-2. Étude fonctionnelle de la borréliose à Dielmo et Ndiop, et dans les villages environnants au Sine-Saloum, Sénégal et stratégie de lutte préventive de la maladie .....                                                                                                                                                             | 165        |
| 4-2-1. Présentation de l'étude.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 165        |
| 4-2-2. Relation borréliose à tiques/Paludisme à Dielmo .....                                                                                                                                                                                                                                                                            | 166        |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 4-2-3. Distribution des tiques <i>Ornithodoros sonrai</i> à Dielmo-Ndiop et dans les villages environnants et caractérisation de la limite sud de progression des ornithodores .....                                                                                                                                               | 167                            |
| 4-3. Principaux résultats.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 171                            |
| 4-4. Conclusion.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 172                            |
| <b>Chapitre IV : Discussion générale .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <b>173</b>                     |
| 1. Compréhension épidémiologique de la répartition géographique de la borréliose à tiques en Afrique de l'Ouest et du Nord .....                                                                                                                                                                                                   | 174                            |
| 2. Caractérisation génétique des populations de tiques <i>Ornithodoros</i> et des <i>Borrelia</i> , et comparaison du fonctionnement génétique du système <i>Borrelia</i> /hôte/vecteur en zones sahélo-soudanienne et saharo-méditerranéenne en relation avec les modifications climatiques liées au déficit pluviométrique ..... | 177                            |
| 3. Facteurs déterminant la répartition géographique et la fréquence de l'agent pathogène chez l'homme, la tique vectrice et les mirco-mammifères réservoirs de la borréliose .....                                                                                                                                                 | 183                            |
| 4. Étude des cas cliniques à l'Hôpital Provincial de Kénitra au Maroc, et étude fonctionnelle de la borréliose à Dielmo et Ndiop, et dans les villages environnants au Sine-Saloum, Sénégal et stratégie de lutte préventive de la maladie .....                                                                                   | 188                            |
| <b>CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>192</b>                     |
| <b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <b>197</b>                     |
| <b>ANNEXE .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <b>207</b>                     |
| <b>Article 1 .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>208</b>                     |
| <b>Article 2 .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>209</b>                     |
| <b>Article 3 .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>210</b>                     |
| <b>Article 4 .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>211</b>                     |
| <b>Résumé :</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 4 <sup>ème</sup> de couverture |

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

En Afrique, la fièvre récurrente à tiques ou borréliose à tiques causée par des infections à *Borrelia* est transmise à l'homme par la piqûre de tiques argasidés du genre *Ornithodoros*. La borréliose à tiques est une cause majeure de maladie dans plusieurs régions d'Afrique (TRAPE *et al.*, 1991; TRAPE *et al.*, 1996a; CUTLER *et al.*, 2009). La maladie persiste par des foyers endémiques à travers le monde, où chaque espèce de *Borrelia* responsable de fièvre récurrente apparaît être spécifique de sa tique vectrice (GOLVAN, 1983). La borréliose à tiques est endémique en Afrique sub-saharienne. Dans plusieurs pays d'Afrique, la borréliose à tiques reste un sérieux problème de santé publique. En Afrique de l'Est et du Sud, la maladie est causée principalement par *Borrelia duttonii* et transmise par les tiques vectrices *Ornithodoros moubata* et *Ornithodoros porcinus* (WALTON, 1962). En Tanzanie, par exemple, la maladie est souvent listée parmi les principales causes de mortalité chez les enfants de moins de cinq ans en causant un taux alarmant de mortalité périnatale de 463‰ dans les régions endémiques (BARCLAY *et al.*, 1990; MCCONNELL, 2003). En Afrique de l'Ouest, la maladie est causée essentiellement par *Borrelia crocidurae* et transmise par les tiques *Ornithodoros sonrai* (TRAPE *et al.*, 2013). Des données classiques disponibles mentionnaient déjà la présence de la tique *O. sonrai* au Mali, en Mauritanie, dans le sud du Maroc, au Niger, Tchad, en Égypte et au Kenya (MOREL, 1965). Les petits mammifères servent de réservoirs de l'infection à *Borrelia* (TRAPE *et al.*, 1996a), mais les tiques *Ornithodoros* sont aussi des réservoirs potentiels des souches de *Borrelia* à cause de leur longévité (PAVLOVSKY *et al.*, 1952; LECOMPTE *et al.*, 2003), de l'existence d'une transmission transovarienne et transtasiale des *Borrelia* chez les tiques vectrices (GABER *et al.*, 1984; RODHAIN *et al.*, 1985; LECOMPTE *et al.*, 2003) et de la longue durée de vie des *Borrelia* dans l'organisme des tiques infectées sans perdre leur pouvoir pathogène (PAROLA *et al.*, 2001).

Le spirochète *B. crocidurae* (LEGER, 1917), agent responsable de la fièvre récurrente à tiques d'Afrique de l'Ouest est également rencontré en Afrique du Nord et au Proche-Orient où il provoque chez l'homme une maladie fébrile aigüe (RODHAIN, 1976). Les malades non traités présentent pendant plusieurs mois des épisodes de fièvre espacés d'une dizaine de jours chacun, d'où le nom de fièvre récurrente donné à la maladie.

Les complications, parfois fatales, peuvent survenir à tout moment de l'évolution de la maladie : complications méningo-encéphalitiques graves, atteintes oculaires et avortement spontané chez les femmes enceintes (GONNET, 1942; CHARMOT *et al.*, 1986). Cette affection, lorsqu'elle est diagnostiquée, est curable par les tétracyclines. Le diagnostic repose sur l'observation du spirochète lors de l'examen d'une goutte épaisse de sang colorée au Giemsa, technique identique à celle utilisée pour la mise en évidence des hématozoaires du paludisme. Cette technique présente une bonne sensibilité entre les mains d'un microscopiste averti lorsqu'elle est effectuée lors du premier épisode fébrile. Elle est souvent insuffisante lors des récurrences (50% de faux négatifs lors d'un examen standard de 0,5µl de sang sur goutte épaisse) en période d'apyrexie (TRAPE *et al.*, 1991; DIATTA, 1992). La méthode diagnostique de référence consiste en l'inoculation intra-péritonéale à la souris blanche du sang et/ou d'organes suspects de borréliose. La souris développe une forte infection borrélienne facilement mise en évidence 3 à 5 jours plus tard par l'examen d'une goutte épaisse de sang prélevée à l'extrémité de la queue de la souris puis préparée selon la méthode de la goutte épaisse. La positivité est généralement confirmée 2 jours après l'inoculation selon la richesse de l'inoculum. Le diagnostic sérologique reste également possible, cependant cette méthode est exposée à de nombreuses réactions croisées et n'est plus utilisée actuellement. Par contre, l'utilisation de la méthode PCR relève du domaine de la biologie moléculaire et devrait être dans un avenir immédiat mise à la disposition des structures hospitalières régionales afin de relever le plateau diagnostique pour une prise en charge rapide des causes de fièvre palustres et non palustres.

Dans la plupart des cas, la borréliose maladie- peu connue ou oubliée -n'est pas diagnostiquée, et les patients seront régulièrement considérés comme des cas de paludisme «à goutte épaisse négative» et «résistants aux antipaludiques», ou des rickettsioses ou «viroses» et/ou «arboviroses» indéterminées. Pour ces raisons, l'incidence réelle de la borréliose est mal connue et seules les rares études spécifiquement consacrées à cette maladie permettent d'en appréhender la fréquence. Au Sénégal, le spirochète *B. crocidurae* a été décrit pour la première fois dans le sang d'une musaraigne capturée à Dakar (LEGER, 1917), et a été plus tard identifiée comme responsable de la fièvre récurrente à tiques (TRAPE *et al.*, 1991; TRAPE *et al.*, 1996b). Des données épidémiologiques ont rapporté que 12 cas de borréliose étaient détectés en 1962 à travers le Sénégal (REYNAUD *et al.*, 1965), et 23 autres cas étaient diagnostiqués à Dakar entre 1979 et 1982 (AUBRY *et al.*, 1983).

La maladie a ensuite émergé et constitue une cause courante de fièvre dans la plupart des régions rurales du Sénégal (TRAPE *et al.*, 1991; VIAL *et al.*, 2006). Dans la région de Dakar, la borréliose représente près de 5% des motifs de consultations en dispensaire pour syndrome fébrile (TRAPE *et al.*, 1991) en milieu rural. Le suivi étroit pendant 15 ans d'une population villageoise (Dielmo, Sine-Saloum, Sénégal) a montré qu'en moyenne chaque année 11% de la population développait la maladie, l'incidence de la borréliose fluctuant de 4% à 26% selon les années (BA, 2001; VIAL *et al.*, 2006). Cette dernière étude a également montré qu'il n'existait pas d'immunité solide puisque certaines personnes ont développé cinq infections distinctes à plus d'un an d'intervalle sur une période de 15 ans. La mortalité attribuable à la borréliose à tiques à *B. crocidurae* est mal connue. Elle semble nettement inférieure à celle attribuable, en Afrique de l'Est, du Sud et Centre, à *Borrelia duttonii* (NOVY *et al.*, 1906) et transmise par les tiques *Ornithodoros* du groupe *moubata* : *O. moubata* (WALTON, 1962) et *O. porcinus domesticus* (WALTON, 1962), qui présente une mortalité comprise entre 2% et 5% (GOUBAU, 1984). L'incidence annuelle de la maladie peut atteindre jusqu'à 384‰ chez les enfants de moins de 1 an et 163‰ chez les enfants de moins de 5 ans en Tanzanie (BARCLAY and COULTER, 1990), et un taux de létalité de 16% chez les femmes enceintes souffrant de la maladie a été signalé au Rwanda (GOUBAU and MUNYANGEYO, 183).

En Afrique du Nord, des travaux anciens réalisés au Maroc mentionnaient déjà la présence de deux types de borréliose à tiques : celle due à *B. crocidurae* transmise par les tiques *O. sonrai* d'une part, et celle causée par *Borrelia hispanica* transmise par les tiques *Ornithodoros erraticus* d'autre part (CHABAUD, 1954; RODHAIN, 1976). Mais, la fréquence de la maladie chez l'homme de ces borrélioses est très mal connue (COLAS-BELCOUR, 1930; BALTHAZARD, 1937; CHABAUD, 1954; TOUIMI, 1985). En Algérie et Tunisie, il est plus difficile de mettre en évidence la maladie (NICOLLE *et al.*, 1931; SERGENT *et al.*, 1933). Des tiques ornithodores identiques à *O. erraticus* étaient décrites en Algérie par LUCAS (1849), mais ont été plus fréquemment récoltées et mieux étudiées en Tunisie (CHABAUD, 1954). Une étude récente sur l'épidémiologie, la répartition géographique des principaux foyers de transmission de la borréliose à tiques avec une révision des tiques du complexe *O. erraticus* (TRAPE *et al.*, 2013) a permis de préciser l'existence de trois types de borréliose à tiques en Afrique du Nord. Dans les parties les plus arides d'Afrique du Nord, la maladie est causée par *B. crocidurae* et transmis par les tiques *O. sonrai*.

Par contre, dans les régions côtières d'Afrique du Nord notamment le littoral méditerranéen et atlantique, la borréliose à tiques est due à *B. hispanica* et *Borrelia merionesi*, transmises respectivement par les tiques *Ornithodoros* du groupe *maroccanus* et les tiques *Ornithodoros merionesi* et *Ornithodoros costalis* (TRAPE *et al.*, 2013). La maladie est rarement diagnostiquée en Afrique du Nord et dans les pays du pourtour de la mer Méditerranéenne (WYPLOSZ *et al.*, 2005; ASSOUS *et al.*, 2006; CUTLER *et al.*, 2009).

Les petits mammifères sauvages servent de réservoir à *B. crocidurae*. En Afrique de l'Ouest, dix-sept espèces de rongeurs et 04 d'insectivores ont été trouvées naturellement infectées et la prévalence de l'infection peut localement atteindre 30% chez plusieurs espèces (MATHIS, 1928; BOIRON, 1949; TRAPE *et al.*, 1991; GODELUCK *et al.*, 1994; TRAPE *et al.*, 1996a), alors que dans toute l'Afrique de l'Ouest et du Nord 21 espèces de rongeurs et 06 d'insectivores ont été identifiées comme réservoirs potentiels de la maladie (DIATTA *et al.*, 2015). L'homme est contaminé à l'occasion de la piqûre de la tique *O. sonrai* (*Alectorobius sonrai*) (SAUTET and WITKOWSKI, 1944) (Acarida, Ixodida), le seul vecteur connu, qui vit dans le fond des terriers des rongeurs hôtes mais peut piquer occasionnellement à l'extérieur, notamment quand les terriers s'ouvrent à l'intérieur des habitations, ce qui est fréquent pour plusieurs espèces abondantes de rongeurs et insectivores péri-domestiques, tels que *Mus musculus*, *Mastomys erythroleucus*, *Rattus rattus*, *Arvicanthis niloticus* et *Crocidura olivieri* (MATHIS, 1948; DIATTA *et al.*, 1994; DIATTA, 2005). Cette tique molle de petite taille (habituellement 3 à 4 mm) est un ectoparasite temporaire et obligatoire de petits rongeurs et insectivores. Sa piqûre est indolore et elle reste fixée à l'hôte uniquement pour son repas de sang (au maximum une dizaine de minutes pour les nymphes, les adultes mâles et femelles), ce qui explique que peu de malades remarquent le moment de leur contamination. En Afrique du Nord, par contre, notamment au Maroc, 12 espèces de rongeurs et une d'insectivore étaient infectées par *Borrelia* spp. avec une prévalence globale de 9,2%, mais cette prévalence a varié de 3,4% à 42,8% selon les espèces (DIATTA *et al.*, 2012) et en fonction du site de capture.

Jusqu'à récemment, on considérait que la répartition géographique de la borréliose en Afrique de l'Ouest se limitait aux régions sahariennes et à la zone sahélienne, depuis la côte atlantique de la Mauritanie et le nord du Sénégal jusqu'aux alentours du lac Tchad (MOREL, 1965; RODHAIN, 1976; TRAPE *et al.*, 1991; TRAPE *et al.*, 1996b).

L'ensemble des données recueillies depuis les premières études épidémiologiques dans les années 1930 indiquaient la présence de la tique *O. sonrai* uniquement au nord du 14<sup>ème</sup> parallèle (localité la plus au sud : 14°28'N/16°59'W) dans des régions où la pluviométrie moyenne était habituellement inférieure à 500 mm. Aucune localité de collecte n'atteignait l'isohyète 750 mm qui était considéré comme la limite maximum d'extension du vecteur (MOREL, 1965). De même, bien que beaucoup d'espèces de petits mammifères réservoirs aient une distribution géographique plus large (DUPLANTIER *et al.*, 1992), tous les animaux trouvés positifs dans la nature provenaient des localités situées dans l'aire de répartition des ornithodores vecteurs. Chez l'homme, la survenue d'une épidémie de borréliose à *Borrelia recurrentis* après la deuxième guerre mondiale, a longtemps été une source de confusion dans la délimitation de l'aire de répartition de la maladie. Mais aucun cas de contamination humaine par *B. crociduræ* dont l'origine précise était connue n'a été rapporté en dehors de l'aire de répartition des tiques *O. sonrai*.

Dès juin 1989, une série d'enquêtes épidémiologiques de recherche systématique de *B. crociduræ* -chez l'homme et les petits mammifères- ainsi que des tiques *O. sonrai* a été réalisée au Sénégal, à la suite du diagnostic d'un cas de fièvre récurrente observé trois mois auparavant chez un enfant ayant voyagé dans une région du Sénégal où la borréliose était inconnue (TRAPE *et al.*, 1991; DIATTA, 1992; DIATTA *et al.*, 1994; GODELUCK *et al.*, 1994; TRAPE *et al.*, 1996a; TRAPE *et al.*, 1996b; TRAPE, 1999; LECOMPTE *et al.*, 2003). L'étude prospective d'une population rurale vivant en zone de savane soudanienne -dans une localité située sur l'ancienne isohyète 1000 mm de la période 1947-1969- a montré une transmission élevée de la maladie (5% par an) selon des modalités épidémiologiques similaires à celles décrites en zone saharienne. Les résultats de ces études ont montré une extension considérable de l'aire de répartition connue des tiques *O. sonrai* et de *B. crociduræ* en zone soudanienne -la nouvelle localité la plus au sud a atteint la latitude 13°32'N (TRAPE *et al.*, 2013), soit plus d'un degré de latitude. Cette nouvelle aire de répartition des tiques *O. sonrai* au Sénégal, comparée à la carte nationale de pluviométrie établie à partir de 66 stations météorologiques sur la période 1970-1992, a révélé que l'extension de la borréliose à tiques a correspondu très exactement au déplacement vers le sud de l'isohyète 750 mm pendant la même période et suggère que la persistance de la sécheresse qui a permis aux tiques *O. sonrai* de coloniser de nouveaux espaces en zone de savane soudanienne, était responsable de l'extension de cette endémie en Afrique de l'Ouest (TRAPE *et al.*, 1996a; TRAPE *et al.*, 2013).



L'agent pathogène de la borréliose à tiques à *B. crocidurae* et son vecteur avaient été signalés en Afrique du Nord, au Proche-Orient et dans plusieurs pays sahéliens, mais aucune étude récente ne permet d'en connaître les limites précises ni l'incidence réelle de la maladie (BERGERET *et al.*, 1948; RODHAIN, 1976; GOUBAU, 1984; DIATTA, 1992; BA, 2001).

L'objectif principal de notre mémoire de thèse vise à mieux comprendre la distribution géographique de la boprréliose à tiques en Afrique occidentale sub-saharienne et en Afrique du Nord. Cela nous a amené à cartographier pour la première fois et à vaste échelle la répartition, les données des analyses génétiques des populations de tiques collectées, la situation épidémiologique des sites étudiés et les relations avec l'environnement d'une maladie jusqu'à présent méconnue dont nous voulons montrer et confirmer qu'elle constitue un problème majeur de santé publique pour de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest et du Nord.

Ce travail s'est articulé autour d'objectifs spécifiques visant à :

☞ Matérialiser sur le terrain les limites sud et est de distribution des tiques *O. sonrai* en Afrique de l'Ouest et de préciser les contours de la zone de transition qui est associée au delta central et au bassin du fleuve Niger au Mali,

☞ Établir s'il existe une continuité territoriale de distribution géographique des tiques *O.sonrai* et de *B. crocidurae* entre la Mauritanie, le Sénégal et le Maroc où la tique *O. sonrai* a déjà été signalée, des tiques *Ornithodoros* entre l'est du Maroc et l'Algérie ainsi qu'entre l'est de l'Algérie et la Tunisie,

☞ Caractériser génétiquement les différentes populations de tiques *Ornithodoros* et des *Borrelia* dans l'ensemble de l'aire de répartition des ornithodores vecteurs et de leurs agents pathogènes,

☞ Comparer le fonctionnement génétique du système *Borrelia*/hôte/vecteur en zones sahélo-soudanienne et saharo-méditerranéenne en relation avec les modifications climatiques liées au déficit pluviométrique,

☞ Préciser les facteurs qui déterminent la répartition géographique et la fréquence de l'agent pathogène chez l'homme, la tique vectrice et les micro-mammifères réservoirs de la maladie,

☞ Déterminer les cas de borréliose dans une structure hospitalière à Kénitra au Maroc,

☞ Étudier le fonctionnement de la maladie en milieu rural à Dielmo et Ndiop, Sine-Saloum, Sénégal, et dans les villages environnants pour proposer, en définitive, une stratégie de lutte préventive.

Ce mémoire de thèse de Doctorat comporte deux parties : la première traite de la revue des connaissances épidémiologiques sur l'agent pathogène et les tiques ornithodores vecteurs, le réservoir animal et la maladie chez l'homme ; la seconde présente les investigations de terrain de nos travaux de thèse à l'échelle macro-géographique notamment en Afrique de l'Ouest sub-saharienne et en Afrique du Nord, puis micro-géographique particulièrement dans la région de Kénitra au Maroc et la zone de Dielmo et Ndiop, au Sine-Saloum, Sénégal. Tous les articles publiés et issus des résultats de nos travaux de thèse sont imprimés sur des pages vertes. La conclusion générale permet, à partir des résultats obtenus, de montrer l'intérêt et l'importance épidémiologique de la borréliose à tiques en santé publique et de définir des perspectives pour un meilleur contrôle de la maladie au moyen d'une stratégie de lutte préventive peu coûteuse, facilement transférable en milieu rural dans plus de 87% des villages ouest africains situés au nord de l'isohyète 750 mm de pluie où l'habitat traditionnel est prépondérant et la présence des ornithodores vecteurs a été mise en évidence.

# **PREMIÈRE PARTIE : REVUE DES CONNAISSANCES ÉPIDÉMIOLOGIQUES SUR LA FIÈVRE RÉCURRENTE A TIQUES OU BORRÉLIOSE A TIQUES**

# **CHAPITRE I : LES AGENTS PATHOGÈNES ET LES ORNITHODORES VECTEURS DE LA BORRÉLIOSE A TIQUES**

# Chapitre I : Les agents pathogènes et les ornithodores vecteurs de la borréliose à tiques

## 1. Les agents pathogènes

*Borrelia crocidurae* (LEGER, 1917), l'agent pathogène responsable de la fièvre récurrente à tiques d'Afrique de l'Ouest est également rencontré au Maroc, en Algérie et Tunisie (BOUATTOUR *et al.*, 2010; DIATTA *et al.*, 2012; TRAPE *et al.*, 2013; SOUIDI *et al.*, 2014) dans les régions semi-désertiques, *B. hispanica* a été mis en évidence au Maroc et en Tunisie (SARIH *et al.*, 2009; BOUATTOUR *et al.*, 2010; DIATTA *et al.*, 2012; TRAPE *et al.*, 2013) et *B. merionesi* est présent exclusivement au Maroc (BLANC *et al.*, 1948; TRAPE *et al.*, 2013).

### 1-1. Caractéristiques des *Borrelia*

Les bactéries du genre *Borrelia* sont des spirochètes (germes spiralés) qui mesurent 10 à 20 µm de long sur 0,2 à 0,6 µm de diamètre (GOUBAU, 1984). Elles possèdent un corps grêle et des extrémités effilées (Figure 1). Elles n'ont pas de flagelles, ni de noyau différencié mais une chromatine diffuse est disséminée dans le cytoplasme (RODHAIN, 1976). Une hélice flexible leur permet d'être mobile (STEPAN *et al.*, 1981). Ce sont des organismes de morphologie toute identique, plus ondulés que spiralés. On les colore habituellement par le Giemsa qui leur donne une teinte mauve ou bleu-violet. La détection de ces spirochètes dans les tissus s'effectue après imprégnation argentique.

### 1-2. Biologie des *Borrelia*

Au cours de leur vie parasitaire, toutes les *Borrelia* ont le même cycle évolutif. Outre leur division transversale normale ou homotypique, elles possèdent une division anormale ou hétérotypique, caractérisée par la formation de granules spirochètigiènes filtrables capables, dans certaines conditions, de régénérer la spirale "forme métacyclique" (BRUMPT, 1949). Elles sont extra-cellulaires et vivent en milieu liquide (plasma, hémolymphe de l'arthropode vecteur) ou dans les espaces intercellulaires des tissus.

La bactérie spirochète *B. crocidurae* peut être cultivée *in vitro* sur milieu de Kelly modifié (MKM), (VAN DAM *et al.*, 1999).

Elle reste cultivable sur les cultures de cellules de membrane chorio-allantoïde d'œuf de poule ou dans le sang de l'embryon de poule. Cependant, les méthodes classiques utilisées pour cultiver des germes pathogènes ne permettent pas la culture de *B. crocidurae* *in vitro*. Elle peut être entretenue, comme toutes les autres *Borrelia*, par passage sur un animal sensible et conservée par congélation en azote liquide. La souris blanche, le rat blanc, le lapin jeune et les cobayes jeunes et nouveau-nés peuvent être infectés par *B. crocidurae*. L'infection est mortelle pour les lapins, les rats et souris nouveau-nés. Le cobaye et le lapin adultes sont réfractaires (sauf pour la souche Mauritanienne) (RODHAIN, 1976).

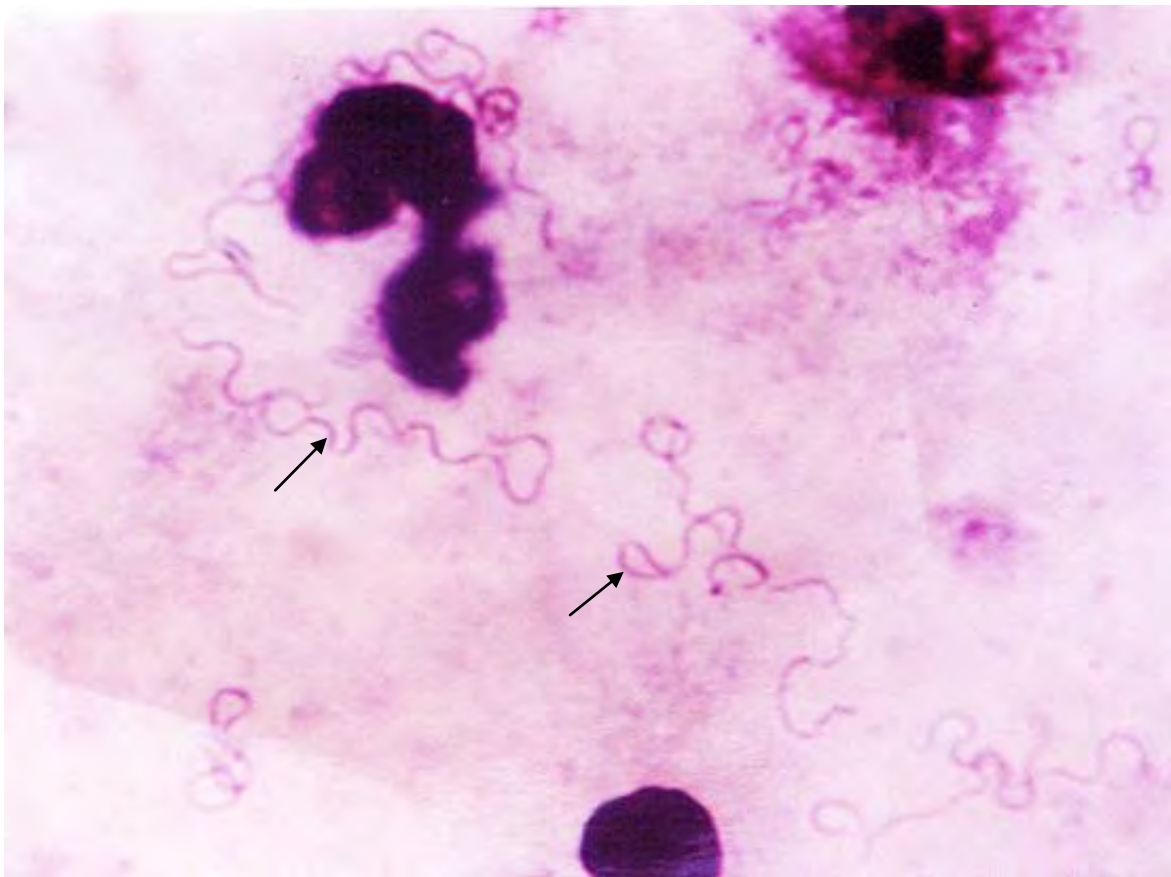


Figure 1 : (→) *Borrelia crocidurae* observées au microscope photonique sur goutte épaisse de sang d'une souris blanche trois jours (J3) après inoculation intra-péritonéale du sang d'un *Mastomys erythroleucus*, petit rongeur sauvage (x2000)

## 2. Les ornithodores vecteurs de la borréliose à tiques

La fièvre récurrente à tiques ou borréliose à tiques causée par *B. crocidurae*, *B. hispanica* et *B. merionesi* est transmise par des tiques ornithodores, arthropodes hématophages classées parmi les tiques argasidés (tiques molles). Une seule espèce de tiques ornithodores est vectrice de la borréliose à *B. crocidurae* en Afrique de l'Ouest : *Ornithodoros sonrai*, initialement appelé *Alectorobius (Theriodoros) sonrai* (SAUTET *et al.*, 1944; RODHAIN *et al.*, 1985). Cet ornithodore vecteur qui assure la transmission de l'infection d'animal à animal et de l'animal à l'homme (REYNES, 1955) a été aussi retrouvé au Maroc, en Algérie et Tunisie dans les terriers examinés en milieu naturel des régions semi-désertiques. Par contre, les ornithodores du groupe *Ornithodoros maroccanus* (TRAPE *et al.*, 2013) constitués des tiques *O. maroccanus*, *O. occidentalis*, *O. rupestris* et *O. kairouanensis* transmettent *B. hispanica* au Maroc et en Tunisie, et *O. merionesi* et *O. costalis* l'infection à *B. merionsei* au Maroc. *Ornithodoros erraticus* et *O. normandi* trouvés dans le nord-est et nord-ouest de l'Algérie et Tunisie respectivement (TRAPE *et al.*, 2013) seraient susceptibles de transmettre *B. hispanica*, cependant aucune infection naturelle n'a été mise en évidence.

### 2-1. Révision du complexe *Ornithodoros erraticus* et épidémiologie génétique des tiques *Ornithodoros*

Dans la littérature classique le complexe *O. erraticus* sensu lato (LUCAS, 1849) comprenait la tique *O. erraticus* appelée "grande forme ou grande variété", la tique *O. erraticus*, variété *sonrai* (SAUTET and WITKOWSKI, 1944) également appelée "petite forme ou petite variété" et la tique *O. maroccanus* (VELU, 1919) qui était attribuée à une espèce synonyme juniore de la tique *O. erraticus*. Des travaux récents (TRAPE *et al.*, 2013), basés sur des techniques de biologie moléculaire ont permis de différencier génétiquement ces trois espèces, notamment *O. erraticus* sensu stricto, *O. maroccanus* et *O. sonrai*. De plus, il a été également possible, au moyen de ces analyses, d'établir la distinction génétique entre les tiques *O. merionesi* et *O. costalis*, deux espèces initialement confondues à la tique *O. sonrai* dans le sud marocain, et de déterminer aussi en Afrique de l'Ouest l'existence de la sous-espèce de la tique *O. sonrai* (TRAPE *et al.*, 2013).

Le portage d'une infection à *Borrelia* mis en évidence par des analyses PCR chez des tiques *Ornithodoros* étudiées a permis de préciser que chaque agent pathogène est spécifiquement transmis par sa tique vectrice et/ou son système de vecteurs compétents (TRAPE *et al.*, 2013).

## 2-2. Caractéristiques et bio-écologie des ornithodores

Les tiques *Ornithodoros* sont des argasidés ou tiques molles. Le corps épais, non segmenté de forme ovale, est formé de deux régions : l'idiosome et le capitulum situé en position ventrale (Figure 2). La caractéristique fondamentale des formes adultes et nymphales est la position ventrale du capitulum. Chez les larves le capitulum est séparé de l'idiosome et en position terminale (RODHAIN *et al.*, 1985). Le capitulum (Figure 2, face ventrale) est situé dans une cavité de l'idiosome, le camérostome. Il porte les organes des sens (palpes) et les pièces buccales (hypostome et chélicères). Le camérostome possède des expansions latérales appelées joues. Les yeux sont absents. Le tégument de l'idiosome est pourvu de petits tubercules : les mammillae. Sur la face dorsale (Figure 2) la cuticule présente des zones plates où les mammillae sont effacées et qui correspondent aux insertions des muscles dorso-ventraux. L'idiosome porte ventralement l'insertion des pattes, les orifices génital et anal. Les pattes (4 paires chez les adultes et les nymphes, 3 paires chez les larves) s'insèrent directement sur le tégument par une pièce fixe ou coxa.

L'orifice génital s'ouvre à la base des coxae de la première paire de pattes. Chez le mâle le gonopore est en forme de demi-lune dirigé vers l'avant, tandis que chez la femelle (Figure 2, face ventrale) le gonopore est une fente génitale. L'adulte mâle mesure environ 2,6 mm et la femelle environ 3,5 mm. La taille du mâle est toujours inférieure à celle de la femelle, mais il n'y a pas de dimorphisme sexuel net. L'orifice anal est postérieur. La respiration se fait par des stigmates trachéens situés entre la 3<sup>ème</sup> et la 4<sup>ème</sup> paire de pattes. Les glandes coxales s'ouvrent entre la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> paire de pattes.

Dans les conditions naturelles, les tiques *Ornithodoros* habitent dans les terriers des rongeurs myomorphes et sciurormorphes. Ce sont des ectoparasites temporaires et obligatoires dont le cycle de développement comporte une phase parasitaire sur le rongeur-hôte et une phase libre au sol. Les repas sont courts et nombreux chez les tiques *O. sonrai*, et les adultes mâles et femelles effectuent un repas sanguin avant chaque accouplement (RODHAIN, 1976).



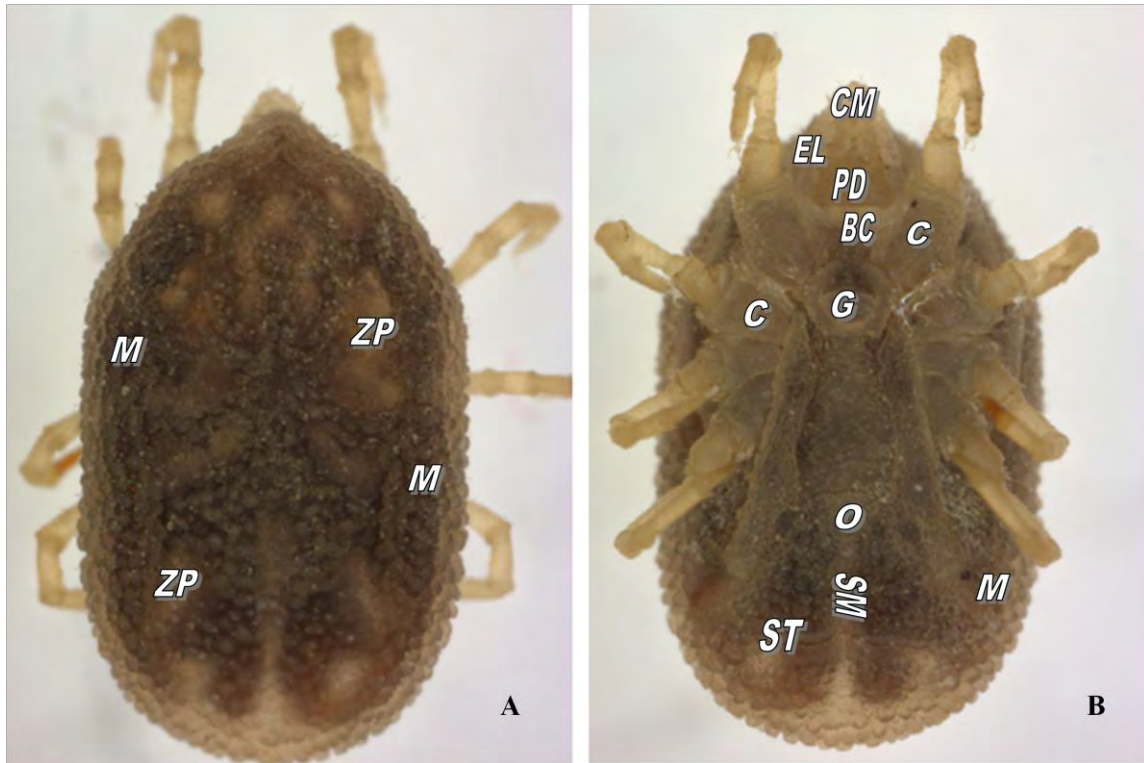


Figure 2 : *Ornithodoros sonrai* femelle, vue d'ensemble détaillée de l'idiosome en faces dorsale (A) et ventrale (B), M = Mammillae, ZP = Zones plates correspondant aux insertions des muscles dorso-ventraux, G = Gonopore femelle (fente génitale), C = Coxae, O = Orifice anal, SM = Sillon médian postanal, ST = Sillon transverse postanal, BC = Basis capituli, PD = Partie distale du capitulum, EL = Expansions latérales (joues), CM = Camérostome (x50 ; x30)

L'hôte est abandonné après le repas et la femelle pond les œufs au sol dans le terrier. On distingue trois stases (larvaire, nymphale et adulte), qui comportent chacune des stades différents du cycle de développement (RODHAIN *et al.*, 1985). En zone tropicale, la reproduction se déroule toute l'année. La durée de vie de ces ornithodores est longue et ceci explique leur présence dans les terriers abandonnés par les rongeurs (RODHAIN *et al.*, 1985). Ils se caractérisent également par une sédentarité qui aboutit à une succession de plusieurs générations de vecteurs dans le même microhabitat.

Les ornithodores piquent la nuit et émettent, pendant le repas, un liquide coxal (REYNES, 1955). Ce sont des ectoparasites endophiles qui vivent dans le fond des terriers au contact des rongeurs-hôtes (RODHAIN *et al.*, 1985). L'endophilie des ornithodores leur procure des conditions favorables de microclimat et stabilise l'endémicité des foyers constitués naturellement.

L'habitat de la tique *O. sonrai* semble être lié à des climats de type relativement sec, semi-arides ou sahéliens (TRAPE *et al.*, 1991). Cet habitat se situe au sud du Sahara, dans les steppes boisées xérophytiques sahéliennes et dans les savanes boisées tropicales nord-soudaniennes. L'existence de cet ornithodore était connu en Afrique Tropicale depuis la côte atlantique de la Mauritanie et du Sénégal jusqu'au Tchad (MOREL, 1965; RODHAIN *et al.*, 1991; TRAPE *et al.*, 1996a).

## **2-3. Modalités de la contamination dans la nature et implications épidémiologiques**

Les tiques *Ornithodoros* s'infectent dans la nature sur un rongeur bactériémique. Les *Borrelia* ingérées se multiplient et envahissent les glandes salivaires et coxales. La tique devient infectante par les sécrétions de ces glandes coxales et salivaires produites lors des repas de sang. La longévité des ornithodores en fait un réservoir potentiel, puisque des travaux ont montré que la tique *O. (Theriodoros) tholozani* est capable de transmettre des *Borrelia* (spirochètes) après 11 ans (PAVLOVSKY *et al.*, 1952). Les *Borrelia* peuvent ainsi donc se maintenir plusieurs années à l'intérieur de la tique sans perdre leur pouvoir pathogène (PAROLA *et al.*, 2001).

La transmission transovarienne de *B. crocidurae*, démontrée chez les tiques *O. sonrai* (RODHAIN and PEREZ, 1985) est également un facteur important de pérennité de ces germes. Cependant, une diminution du nombre d'agents infectieux est observée au cours du temps et lors des transmissions trans-stadiale et transovarienne (GABER *et al.*, 1984). Le passage à un hôte vertébré est donc nécessaire pour amplifier la propagation des *Borrelia*. La transmission trans-stasiale n'a toutefois pas été élucidée et devrait faire l'objet d'une étude ultérieure.

La transmission au vertébré se fait au cours d'un repas sanguin par l'intermédiaire des sécrétions salivaires et des sécrétions coxales de la tique infectée (CALIA *et al.*, 2000). La contamination de l'homme s'effectue dans la nature ou dans les habitations fréquentées par les rongeurs.

## **CHAPITRE II : LE RÉSERVOIR ANIMAL DE LA BORRÉLIOSE A TIQUES**

## Chapitre II : Le réservoir animal de la borréliose à tiques

Les petits rongeurs sauvages présentent un intérêt épidémiologique majeur. Ils sont capables, au même titre que les musaraignes, *Crocidura* spp. (LEGER, 1917), d'héberger des *Borrelia* durant un temps relativement long et de constituer le point de départ de la contamination.

### 1. Répartition biogéographique des espèces de micro-mammifères étudiées

Dans une même localité, il est possible d'y trouver des espèces de rongeurs ayant des exigences écologiques différentes se partager le milieu et utiliser toutes les disponibilités alimentaires et possibilités micro-climatologiques du milieu (exposition variée de la végétation et du couvert végétal, changement de texture du sol). Les peuplements de rongeurs sont attachés au couvert végétal où ils se déplacent et se nourrissent, et à la nature du sol où la plupart des espèces creusent leurs terriers pour y habiter.

Les captures de rongeurs réalisées dans la nature par la méthode de piégeage en ligne, ont permis d'estimer la dynamique et l'abondance de ces peuplements de rongeurs. Certains petits rongeurs commensaux fréquentent de façon permanente les habitations humaines et y creusent leurs terriers.

La variabilité de la durée de la saison sèche dans le sahel associée à la persistance de la sécheresse liée au déficit pluviométrique observé depuis 1970 a entraîné des modifications remarquables du couvert végétal. L'action anthropique y est aussi ajoutée. Les différentes espèces de rongeurs et d'insectivores s'adaptent à ces variations annuelles importantes en développant les mêmes mécanismes adaptatifs que lors d'une simple saison sèche habituelle. Ces mécanismes d'adaption biologique sont plus développés chez les espèces de petits mammifères vivant des régions sahariennes où la pluviométrie annuelle reste encore plus variable et plus faible.

Les espèces connues dans notre zone d'étude, suffisamment abondantes pour avoir été capturées lors de nos enquêtes et représentant ainsi un réservoir majeur des *Borrelia* sont les suivantes :

## RONGEURS

- GERBILLINAE (GRAY, 1825)
  - *Desmodilliscus braueri* (WETTSTEIN, 1916)
  - *Gerbillus henleyi* (DE WINTON, 1903)
  - *Gerbillus gerbillus* (OLIVIER, 1801)
  - *Gerbillus hoogstraali* (GRAY, 1975)
  - *Gerbillus occiduus* (LAY, 1975)
  - *Gerbillus pyramidum* (E. GEOFFROY, 1803)
  - *Gerbillus tarabuli* (THOMAS, 1902)
  - *Gerbillus nigeriae* (THOMAS & HINTON, 1920)
  - *Gerbillus nanus* (BLANFORD, 1875)
  - *Gerbillus campestris* (LOCHE, 1867)
  - *Taterillus congicus* (THOMAS, 1915)
  - *Taterillus lacustris* (THOMAS & WROUGHTON, 1907)
  - *Taterillus gracilis* (THOMAS, 1892)
  - *Taterillus petteri* (GAUTUN, TRANIER & SICARD, 1985)
  - *Taterillus pygargus* (F. CUVIER, 1838)
  - *Gerbilliscus (Tatera) gambianus* (THOMAS, 1910)
  - *Gerbilliscus (Tatera) robustus* (CRETZSCHMAR, 1826)
  - *Gerbilliscus (Tatera) kempfi* (WROUGHTON, 1906)
  - *Meriones shawi* (DUVERNOY, 1842)
  - *Meriones lybicus* (LICHTENSTEIN, 1823)
- DIPODIDAE (WATERHOUSE, 1842)
  - *Jaculus jaculus* (LINNAEUS, 1758)
- SCIURIDAE (GRAY, 1821)
  - *Heliosciurus gambianus* (OGILBY, 1835)
  - *Xerus erythropus* (E. GEOFFROY, 1803)
  - *Atlantoxerus getulus* (LINNAEUS, 1758)
- CRICETOMYIDAE (PETTER, 1964)
  - *Cricetomys gambianus* (WATERHOUSE, 1840)
- CTENODACTYLIDAE (ZITTEL, 1893)
  - *Felovia vae* (LATASTE, 1886)

➤ MURINAE (ILLIGER, 1811)

- *Mastomys erythroleucus* (TEMMINCK, 1853)
- *Mastomys natalensis* (SMITH, 1834)
- *Mastomys huberti* (WROUGHTON, 1908)
- *Mastomys kollmannspergeri* (PETTER, 1957)
- *Mus musculus* (LINNAEUS, 1758)
- *Rattus rattus* (LINNAEUS, 1758)
- *Rattus norvegicus* (BERKENHOUT, 1769)
- *Arvicanthis niloticus* (E. GEOFFROY, 1803)
- *Arvicanthis ansorgei* (THOMAS, 1910)
- *Arvicanthis rufinus* (TEMMINCK, 1853)
- *Dasymys rufulus* (MILLER, 1900)
- *Lemniscomys zebra* (HEUGLIN, 1864)
- *Lemniscomys bellieri* (VAN DER STRAETEN, 1975)
- *Lemniscomys striatus* (LINNAEUS, 1758)
- *Lemniscomys barbarus* (LINNAEUS, 1766)
- *Praomys daltoni* (THOMAS, 1892)
- *Uranomys ruddi* (DOLLMAN, 1909))
- *Praomys derooi* (VAN DER STRAETEN & VERHEYEN, 1978)
- *Acomys airensis* (THOMAS & HINTON, 1921)

## INSECTIVORES

➤ SORICIDAE (GRAY, 1821)

- *Crocidura olivieri* (I. GEOFFROY ST HILAIRE, 1827)
- *Crocidura* sp. (WAGLER, 1832)

➤ ERINACEIDAE (BONAPARTE, 1838)

- *Atelerix albiventris* (WAGNER, 1841)
- *Hemiechinus aethiopicus* (HEMPRICH & EHRENBERG, 1833)
- *Atelerix algirus* (DUVERNOY & LEREBOULLET, 1842)

Ces espèces peuvent être classées en fonction de leurs affinités à des domaines phytogéographiques (ADAM *et al.*, 1979; LE BERRE, 1990; DUPLANTIER *et al.*, 1997; KINGDON *et al.*, 2013a; KINGDON *et al.*, 2013b) :

- Le domaine méditerranéen où les précipitations annuelles sont comprises entre 200 à 500 mm.
- Le domaine saharien correspond aux zones où les précipitations annuelles sont inférieures à 200 mm.
- Le domaine sahélo-saharien situé entre les isohyètes 200 à 300 mm de précipitations annuelles est limité par la région saharienne au nord et sahélienne au sud.
- Le domaine sahélien situé entre les isohyètes 300 à 500 mm.
- Le domaine sahélo-soudanien fait la transition avec la région soudanienne et correspond aux zones comprises entre 500 et 700 mm de précipitations annuelles.
- Le domaine soudano-sahélien correspond aux zones comprises entre 700 et 900 mm de précipitations annuelles.
- Le domaine soudanien est situé entre les isohyètes 900 et 1200 mm de précipitations.
- Le domaine soudano-guinéen marque la transition et correspond aux zones situées entre les isohyètes 1200 et 1500 mm de précipitations annuelles.
- Le domaine guinéo-soudanien assure la transition et occupe les zones comprises entre 1500 et 1800 mm de précipitations par an.
- Le domaine guinéen correspond à un niveau de précipitations annuelles supérieures à 1800 mm.

## 1-1. Espèces à affinité saharienne

### *Atelerix algirus*

C'est le hérisson d'Algérie de taille relativement grande, à petites oreilles arrondies non proéminentes. Sa forme est plutôt massive, la tête est peu séparée du corps. Les piquants sont séparés en deux par une raie médiane nue sur le front. Ils sont annelés de gris clair. Le museau et la face sont beige clair avec des marques peu contrastés. La face inférieure est blanche avec sur les côtés des marques brun foncé.

Ce hérisson fréquente des zones ayant un minimum de végétation (broussailles, lits d'oueds, jardins, cultures). Il est actif la nuit et passe le jour dans un terrier qu'il ne creuse pas, ou sous des amas de pierres. Il se nourrit d'insectes et de mollusques. Il peut avoir chaque année deux portées, avec 2 à 4 jeunes par portée (exceptionnellement jusqu'à 7).

### *Atlantoxerus getulus*

*A. getulus* est l'écureuil de Barbarie (écureuil gétule), terrestre, de taille moyenne, à petites oreilles et fortes griffes. Le pelage assez rude est coloré en gris brun et présente sur le dos et les flancs 3 bandes grises longitudinales claires et 4 bandes brunes plus sombres. La queue touffue avec de longs poils disposés dans le plan horizontal présente des anneaux alternativement clairs et sombres.

Cet écureuil vit dans des zones rocheuses où il se déplace au sol. On peut le rencontrer également en montagne. Il ne fréquente pas les arbres, mais creuse parmi les pierres et éboulis un terrier qui abrite son nid. Il est diurne, et se nourrit de fruits et graines de *Pistacia* et d'*Argania*.

### *Gerbillus occiduus*

C'est la gerbille occidentale, proche de *Gerbillus pyramidum*, mais elle est plus petite et ses oreilles sont un peu plus courtes. Les soles palmaires et plantaires sont velues. La queue est nettement plus longue que le corps. Le pelage dorsal est fauve-chamois rappelant celui de *G. pyramidum*. Les flancs et la partie ventrale sont blancs. L'extrémité des oreilles présente une pigmentation foncée chamois.

Cette gerbille ne semble pas avoir été beaucoup étudiée. Elle a été capturée dans des dunes à faible végétation (sud marocain).

### *Meriones lybicus*

*M. lybicus*, mérion de Lybie, est une gerbille de grande taille, à coloration d'ensemble assez sombre. Les soles sont partiellement recouvertes de poils. La queue, de même longueur que le corps, est nettement plus longue que chez *Meriones shawi* et elle est terminée par un pinceau noir. Le pelage dorsal est fauve, tiqueté de gris. Les flancs sont parfois soulignés par une étroite ligne orangée. La face inférieure et les pieds sont blancs. La tête porte une tache blanche post-auriculaire et des taches grises près des yeux et des oreilles. La queue n'est pas bicolore et sa base est rougeâtre. Les oreilles ne sont pas pigmentées mais sont recouvertes de poils qui leur donnent un aspect pâle.

Cette gerbille fréquente différents biotopes de végétation (zones sableuses, rocheuses, rives d'oueds et plateaux).



Ce mérion, partiellement diurne, vit en solitaire ou famille dans des terriers à plusieurs orifices dont les galeries sont creusées parmi les racines d'un buisson et se nourrit de végétaux (graines, fruits de *Citrullus*, *Colocynthis* entre autres). Il y a 2 à 7 jeunes par portée.

*Meriones shawi*

Le mérion de Shaw, est la plus grande des gerbilles dans sa zone considérée. La queue bicolore à base grise, aussi longue que le corps, se termine par une touffe de poils noirs ou bruns. Le pelage dorsal est gris ou fauve et le ventre blanc avec parfois des marques jaunes. Les oreilles proéminentes de profil sont pigmentées et leur bordure est sombre. Les soles palmaires sont nues et plantaires en partie velues.

C'est surtout en hiver que cette grosse gerbille a une activité partiellement diurne. Elle fréquente des milieux variés à sol essentiellement argileux ou sableux, souvent dans les cultures. Le terrier, occupé par plusieurs individus et creusé sous une éminence de buisson est formé de galeries avec de nombreux orifices. Les individus se nourrissent de végétaux (fruits, graines, feuilles, tiges). Il semble qu'il n'y a pas plus de 4 portées par an (BERNARD, 1969) et les portées sont en moyenne de 5 (1 à 7) jeunes.

*Lemniscomys barbarus*

C'est une grande souris à pelage rayé. La queue est aussi longue que le corps. Le pelage dorsal brun jaunâtre porte des bandes longitudinales et la bande inférieure est discontinue.

Cette souris, active pendant le jour est rencontrée dans les zones arides et semi-arides où elle fréquente des biotopes relativement humides et riches en végétation, mais elle est aussi rencontrée en région tropicale sahélienne. Elle se nourrit de graines, herbes, fruits et d'insectes. Son terrier est simple. Il y a en moyenne 4 portées de 3 à 11 jeunes.

*Gerbillus hoogstraali*

C'est la petite gerbille du Souss au pelage dorsal brun sable, poils dorsaux gris moyens avec sable brun à la pointe avec parfois des anneaux de borne noire. Les flancs plus pâles que le pelage dorsal tendent vers l'orange. Le pelage ventral blanc pur, est clairement délimité sur les flancs. Les oreilles sont pâles avec une bande brunâtre sur la marge extérieure. Il y a une légère couronne de cheveux noirs autour de l'œil, une petite tache post-orbitale, blanche rétro-auriculaire chez certains individus. La base inférieure des joues, le menton, la gorge et la poitrine sont blancs. Les poils des pieds sont courts blancs et denses à l'avant et aux arrières.

Les soles sont poilues. La queue est longue, bicolore avec de courts poils denses, brun sable, crème ou blanc plus longs et plus denses vers l'extrémité formant un petit pinceau.

Cette gerbille est terrestre et nocturne, et semble être typiquement adaptée au milieu aride. Elle creuse un terrier à plusieurs entrées situées à la base des arbustes de *Zyziphus*, sur un sol d'argile sableuse battue et de sable rouge fin, alternant avec des dunes de sable.

## 1-2. Espèces à affinité sahélo-saharienne

### *Gerbillus henleyi*

C'est la gerbille de Henley, la plus petite de toutes les gerbilles, à soles palmaires et palmaires nues. Sa queue est longue, terminée par une touffe réduite de poils épars. Les oreilles sont petites, non pigmentées et ne débordent pas du profil de la tête. La face supérieure est brune, les flancs sont plus clairs. Des taches blanches sont visibles sur la croupe et derrière les oreilles. Le ventre, les pattes postérieures, les pieds et la partie ventrale de la queue sont blancs. La queue est bicolore.

C'est une espèce nocturne qui fréquente des zones caillouteuses, des lits d'oueds, des cultures, des endroits où il y a une végétation éparse. Elle se nourrit de graines et de végétaux verts. Elle peut subsister longtemps sans boire. Elle creuse un terrier simple, de 1 à 2 cm de diamètre, peu profond, dont l'entrée est rebouchée de l'intérieur. Les portées sont de 4 à 6 jeunes.

### *Gerbillus gerbillus*

C'est la petite gerbille à soles palmaires et palmaires velues. La queue est longue et se termine par une touffe de poils, souvent bien développés sur 1/3 de sa longueur. Elle se distingue de *G. pyramidum* par la taille plus petite, le pied postérieur inférieur à 32 mm avec les griffes, le doigt médian supérieur au 1/3 de la longueur du pied. La face supérieure est colorée en jaune, orange ou assez pâle. Le ventre, les membres antérieurs, les pieds et la moitié ventrale de la queue sont blancs. La touffe terminale de la queue est grise et brune. Les soles palmaires et palmaires ne sont pas pigmentées, les oreilles non plus mais elles sont bordées de poils sombres.

Elle est nocturne et fréquente les régions désertiques sableuses (dunes). Elle construit son terrier dans une éminence de sable, mais rarement sous un buisson.

Il y a 1 à 4 sorties qui sont parfois obturées. Le nid est établi entre 40 et 80 cm de profondeur et bénéficie d'un microclimat humide. Cette gerbille se nourrit de graines, tiges et feuilles, ainsi que d'insectes. Elle peut se passer d'eau pendant plusieurs semaines. Il y a 3 à 6 jeunes par portée.

### *Gerbillus pyramidum*

*G. pyramidum* est une gerbille de grande taille à soles palmaires et plantaires velues. Elle se distingue de *G. gerbillus* par la longueur du pied postérieur généralement supérieur à 32 mm et par son doigt médian plus court que le 1/3 de la longueur du pied postérieur. La touffe apicale de la queue est souvent réduite. Les mâles sont généralement plus grands que les femelles. La coloration dorsale assez pâle varie d'orange à brun et fauve avec une bande médiane plus foncée. Il y a une tache blanche sur la croupe. Le ventre et les pieds sont blancs. Les oreilles sont pigmentées. La queue est bicolore, longue, ventralement blanche et terminée par une touffe brune.

Cette gerbille fréquente des zones de steppe et de désert aux sols meubles et sableux. Elle est nocturne et quitte son terrier dès la tombée de la nuit. Elle se nourrit de graines, fruits (dattes), feuilles, tiges et d'insectes. Elle peut causer des dégâts aux cultures. Elle établit son terrier sous une touffe de végétaux. Les terriers sont creusés à plus d'un mètre de profondeur. Il peut y avoir 4 portées successives de 4 jeunes. La maturité sexuelle est atteinte vers 75-80 jours.

### *Gerbillus tarabuli*

Cette gerbille est proche de *G. pyramidum*, mais un peu plus petite. Les soles palmaires et plantaires sont velues. La queue, nettement plus longue que le corps, est terminée par un pinceau de poils. La coloration dorsale du pelage, plus claire que celle de *G. pyramidum*, est nettement séparée de la partie blanche ventrale. Les joues et le menton sont blancs. Les trois séries de taches céphaliques blanches sont visibles. Les membres antérieurs sont blancs depuis le coude. La queue est bicolore, l'extrémité du pinceau apical est brune.

Elle fréquente des biotopes sableux près des rivages des régions semi-désertiques.

### *Gerbillus nanus*

C'est la petite gerbille naine à soles palmaires et plantaires nues. La queue très longue est terminée par une forte touffe de poils. Les oreilles dépassent du profil et sont pigmentées. Le pelage dorsal varie du jaune au brun foncé. Les poils sont longs et doux. Seules les taches supra-oculaires et post-auriculaires existent. Les flancs sont plus pâles, le ventre et les pieds sont blancs.

Cette espèce est nocturne et fréquente des milieux à végétation herbacée ou buissonnante (lits d'oueds, steppes). Elle creuse un abri qui est une logette dans un terrier obturé et se nourrit de graines et de végétaux verts. La durée de reproduction est fonction du climat. Il y a 3 à 7 jeunes par portée.

### *Gerbillus nigeriae*

Cette gerbille du Nigéria est de petite taille. Les pieds sont courts et leurs soles velues. La coloration dorsale du pelage, moins vive que celle de *G. pyramidum*, est nettement séparée de la partie blanche ventrale. Les joues et le menton sont blancs. Les trois séries de taches céphaliques blanches sont visibles. Les membres antérieurs sont blancs depuis le coude. La queue est blanche, à l'exception de la partie supra-proximale et du pinceau apical à poils bruns.

### *Gerbillus campestris*

C'est la gerbille champêtre de taille moyenne, à soles palmaires et plantaires nues. La queue est longue et se termine par une touffe de poils d'importance variable. Les oreilles débordent nettement du profil et sont pigmentées. La face dorsale est recouverte d'un pelage long et doux dont la couleur varie d'isabelle à brun chocolat. Les marques blanches post-auriculaires, supra-orbitales et celles de la croupe sont plus ou moins visibles. Les flancs et les pattes antérieures sont de la couleur du dos. Le ventre et les pieds sont blancs. La queue est nettement bicolore.

Cette espèce nocturne fréquente des biotopes très variés (rocaillies, éboulis), plus souvent associée à des zones de pâturage que de cultures. Elle peut localement être un commensal de l'homme dont elle utilise les réserves de céréales. Elle se nourrit de graines et feuillage et aussi d'une proportion importante d'insectes. Elle creuse dans les sols meubles un terrier dans un talus ou sous un buisson.

En zone rocheuse, elle se contente d'anfractuosités dans les rochers. Les portées sont de 3 à 8 jeunes (5 en moyenne). La maturité sexuelle est atteinte à 90 jours.

#### *Jaculus jaculus*

C'est la petite gerboise d'Égypte, de petite taille, à oreilles modérément longues et à trois orteils. Ses coussinets plantaires et digitaux sont petits et masqués par des poils touffus. Les soles palmaires sont nues. La face supérieure est colorée en brun, gris ou orange. Les flancs sont grisâtres. La queue est terminée par un pinceau noir à extrémité blanche.

Le ventre et les membres antérieurs sont blancs. Les individus des zones sableuses sont plus clairs que ceux des zones rocheuses. Les pattes postérieures sont puissantes (adaptation au saut en milieux sableux). Les yeux sont globuleux exorbités.

Cette espèce strictement nocturne fréquente des milieux variés (steppes, erg, montagnes, zones rocheuses) éloignés de la présence humaine. Les individus sont généralement solitaires et dispersés sur de grandes surfaces. Ils se déplacent par bonds et peuvent effectuer de longs trajets nocturnes. La nourriture, à base de graines, feuilles et pousses diverses, est complétée par des insectes, voire de la charogne. La prise de boisson ne semble pas nécessaire si les aliments absorbés sont riches en eau. Elle se réfugie le jour dans un terrier à galerie simple d'environ un mètre dont l'orifice est refermé derrière l'animal. Les portées sont en moyenne de 4-5 jeunes (2 à 10) nidicoles. *J. jaculus* est avec *G. henleyi* un marqueur de l'aridification actuelle de la zone soudano-sahélienne.

#### *Acomys airensis*

C'est la souris épineuse de l'Aïr, un rongeur à allure de souris dont le pelage dorsal brun à gris, y compris les flancs, est constitué de soies raides épineuses. La queue est un peu plus courte que le corps. L'extrémité des épines est généralement foncée. Le ventre est blanc pur. Les membres sont gris. Les soles palmaires et plantaires sont blanches. Des taches blanches au-dessus des yeux, à la base des oreilles et à la lèvre supérieure sont visibles. La queue est plus claire dessous. Les jeunes sont toujours grisâtres.

Cette espèce est inféodée aux biotopes rocheux, mais présente de bonnes performances arboricoles.

### *Felovia vae*

*F. vae* est le Goundi de Félou, à pelage très doux plus court que celui des *Ctenodactylus*. Les oreilles sont plus courtes que celles de *Ctenodactylus gundi*. La queue est plus longue, plus touffue et débord du pelage dorsal. Un léger sillon longitudinal marque la face antérieure des incisives supérieures. La face dorsale est fauve foncée, et la face ventrale est roussâtre. On note une touffe de poils blancs à la base des oreilles. Les individus provenant de l'Adrar des Iforas présentent une coloration brun-noir.

C'est un animal actif le jour, et qui fréquente uniquement les zones rocheuses comme les autres Cténodactylidés. Il est herbivore.

## **1-3. Espèces à affinité sahélienne**

### *Desmodilliscus braueri*

C'est la gerbille naine de Buchanan, très petite, à museau légèrement renflé. La queue est plus courte que le corps. Ses grandes oreilles débordent du profil. Sa grosse tête fait 1/3 du corps. Le pelage dorsal brun foncé s'étend du museau à la croupe avec une extension au niveau de chaque membre. Une marge plus claire constitue une transition nette avec le pelage blanc de la face inférieure et des membres.

Elle est nocturne et granivore. On la rencontre aussi en zone de transition sahélo-soudanienne.

### *Hemiechinus aethiopicus*

C'est le hérisson du désert, de taille moyenne ou petite, à grandes oreilles proéminentes (plus longues que les épines voisines). La couverture épineuse est partagée en deux sur le front par une raie médiane nue. Les poils abdominaux sont fins et denses. L'extrémité des piquants est sombre, déterminant la couleur d'ensemble de l'animal. Le ventre est blanc avec une bande transversale brune au niveau de la poitrine. Le museau, la gorge, la face et le front sont brun foncé, le menton et le cou sont blancs. Les extrémités (oreilles, pattes) sont brunâtres.

Ce hérisson est une espèce solitaire qui s'abrite le jour dans un terrier abandonné ou dans une cavité naturelle.

Il est actif dès le crépuscule et fréquente des milieux à végétation (jardin, lits d'oueds, steppes). Il se nourrit surtout d'insectes, de grenouilles mais aussi de charognes. Les portées comprennent 1 à 6 jeunes déposés à l'abri d'un terrier.

#### **1-4. Espèces à affinité sahélo-soudanienne**

##### *Arvicanthis niloticus*

*A. niloticus* est le rat roussard du Nil, de taille moyenne, au pelage grossier et tiqueté, à la queue fine plus courte que le corps, et dont le 5<sup>ème</sup> doigt de la main est atrophié. La queue fine est bicolore et ses annulations sont peu visibles. Les soles sont nues et les oreilles rondes brun-orange sont assez grandes. La coloration dorsale est fauve gris avec des mouchetures noires et jaunes. Une ligne médio-dorsale sombre s'étend de la tête à la queue. Les pieds sont orangés ou noirâtres, le ventre est blanchâtre ou blanc. L'espèce du nord est claire, tandis que celle du sud est sombre.

Ce rongeur fréquente des biotopes souvent humides (zones basses inondables) proches des zones de cultures. Il est également rencontré au voisinage des habitations. Il est actif aussi bien le jour que la nuit, même aux heures les plus chaudes. Il se nourrit de végétaux (légumes, céréales vertes, graminées diverses, de graines et de fruits (polyphage). Il construit des terriers peu profonds, longs et à plusieurs issues dans lesquels ces rongeurs établissent un nid rembourré de paille d'herbes. Des terriers abandonnés de *Mastomys* peuvent être éventuellement occupés par *A. niloticus*. La maturité sexuelle est atteinte à 4 mois. Il y a 4 portées par an de 5 à 6 jeunes (2 à 10). C'est une espèce nuisible pour les cultures de décrues et irriguées.

##### *Taterillus congicus*

##### *Taterillus petteri*

##### *Taterillus lacustris*

Ces gerbilles de taille intermédiaire sont caractérisées par un corps fin et élancé (gracile). Elles sont nocturnes, terrioles et affectionnent tous les milieux à composante sableuse. Elles constituent un complexe d'espèces jumelles difficiles à distinguer morphologiquement, mais semblent distinguables par le caryotype de leurs protéines sériques (TRANIER *et al.*, 1973; TRANIER, 1974). Elles sont très abondantes, capables de pullulation et provoquent des nuisances à l'agriculture.

*Taterillus pygargus*

*Taterillus gracilis*

Deux gerbilles de taille moyenne, difficiles à reconnaître morphologiquement. Elles se distinguent par le caryotype et l'électrophorèse de leurs protéines sanguines (TRANIER *et al.*, 1973; BARON *et al.*, 1974). *T. pygargus* qui serait plus sahélien et *T. gracilis* plus soudanien (HUBERT *et al.*, 1973) sont deux espèces nocturnes et terricoles.

*Xerus erythropus*

C'est l'écureuil fouisseur (rat palmiste), gros rongeur terrestre à oreilles courtes et à griffes fortes. La face supérieure est couverte de poils longs et rudes. La queue plus courte que le corps est très touffue, couverte de longs poils disposés dans le plan horizontal. Le pelage est uniformément coloré en brun roux avec une mince ligne blanche longitudinale sur les flancs. Le ventre est gris ou blanchâtre.

Cet écureuil terrestre fréquente des milieux variés (large répartition). Il creuse un terrier à deux entrées au moins, le plus souvent sous les racines d'un buisson. Il est diurne, se nourrit de graines (mil, arachides) et de feuillages, tubercules (manioc) mais aussi d'insectes et même de petits lézards. C'est un grand ravageur de cultures. La maturité sexuelle est atteinte à six mois. Il y a 2 à 6 jeunes par portée (4 en moyenne). Sa morsure est douloureuse et dangereuse (réservoir de streptocoques dans les glandes salivaires).

*Atelerix albiventris*

C'est le hérisson à ventre blanc, de petite taille dont les oreilles sont petites et arrondies. Sa forme est plutôt massive, la tête étant peu séparée du corps. Les piquants sont annelés de gris clairs. Ils ne sont pas séparés en deux par une raie médiane au niveau du front. Le museau et la face sont beige foncé et contrastent avec le front et la face inférieure blancs.

Ce hérisson fréquente des zones de savane broussailleuses, les lits d'oueds secs, les jardins et cultures. Il est actif la nuit et passe le jour dans un abri ou sous un buisson, se nourrit d'insectes, de vers et de mollusques, de végétaux et petits vertébrés. Il peut estiver pendant la saison la plus chaude. Il y a 2 à 5 jeunes par portée (exceptionnellement 10).

*Mastomys huberti*

C'est un des rats à mamelles multiples dont le caryotype est encore variable  $2n (=32)$  et  $NFa (=44-46)$  (DUPLANTIER *et al.*, 1990a; BRITTON-DAVIDIAN *et al.*, 1995).



Les analyses par électrophorèse (DUPLANTIER *et al.*, 1990b) et les analyses biométriques (DUPLANTIER, 1988) n'ont pas permis de trouver un caractère de diagnostic clair pour distinguer *M. huberti* de ses congénères sympatriques (*M. erythroleucus* et *M. natalensis*).

Chez *M. huberti* comme chez *M. natalensis*, il n'existe pas de limite nette entre le pelage dorsal et ventral, contrairement à *M. erythroleucus*. Le pelage dorsal est gris noir. La longueur de la queue est équivalente à celle de la tête et du corps. Il est strictement limité aux zones humides, cultivées ou naturelles. Il est terricole, nocturne, omnivore et prolifique (24 jeunes par portée). Il est donc capable de pulluler et de provoquer des dégâts sur les cultures et les stocks.

#### *Mastomys kollmannspergeri*

*M. kollmannspergeri* est l'un des rats à mamelles multiples, connu seulement du Niger, du Tchad, du Cameroun, et du Nigéria près de la savane qui entoure la partie sud du lac Tchad (ROBBINS *et al.*, 1989). Il a le même nombre de chromosomes diploïdes que *Mastomys erythroleucus* :  $2n (=32)$ , mais avec un nombre fondamental d'autosomes différents :  $NFa =40$ . Ce rongeur est nocturne et terricole.

#### *Mastomys erythroleucus*

Cette espèce, au caryotype  $2n (=32)$  et  $NFa (=50-54)$ , est un des rats à mamelles multiples plus fréquent dans les zones sahéliennes. Il occupe les habitations, les greniers ou les zones sauvages en savanes soudaniennes. Il creuse des terriers assez simples plus ou moins profonds à une ou deux sorties. Il se nourrit de fruits et de graines. Le pelage est doux, tout gris chez les jeunes devenant roux avec l'âge. Le pelage ventral gris clair s'oppose aux flancs et au dos gris roux. La longueur de la queue est équivalente à celle de la tête et du corps. La femelle porte 10 à 12 paires de mamelles (au lieu de 4 à 6 chez les autres espèces de murinés).

Il est nocturne, terrestre mais capable de grimper sur les tiges et les branches. Il est prolifique (24 jeunes par portée) et donc nuisible pour les cultures.

### *Dasymys rufulus*

C'est le rat hirsute ou rat des marais, robuste, de taille moyenne avec des poils doux, hérissés et denses. Son pelage dorsal brun à gris-brun, de teint roux sur le dos, particulièrement sur le croupion, est gris foncé avec une extrémité de poils roux. Les flancs marron, avec une pointe de poils à l'extrémité. Le pelage ventral est plus clair, à poils gris avec un blanc terne ou une extrémité blanchâtre. Il n'y a pas de délimitation nette sur les flancs entre la couleur du pelage dorsal et ventral. La couleur de la tête identique à celle du pelage dorsal; de teint roux s'étend jusqu'à la pointe du museau. Les yeux sombres sont relativement petits. Les oreilles sont petites, arrondies, densément couvertes de poils courts brun roux. Les oreilles et les yeux sont souvent cachés par les poils. Les membres sont courts. La queue longue, entourée de petites écailles, avec des poils noirs clairsemés très courts.

Ce rongeur est nocturne (DUPLANTIER *et al.*, 1990), très bon nageur (DUPLANTIER *et al.*, 2001), et occupe des terriers peu profonds au pied des touffes d'herbes (COE, 1975). C'est un herbivore, qui se nourrit principalement d'herbes et de feuilles (COE, 1975). Il est piégé sur sols spongieux, gorgés d'eau, notamment les zones marécageuses, les bords de rivières, plaines inondables et rizières.

## **1-5. Espèces à affinité soudanienne**

### *Gerbilliscus gambianus*

### *Gerbilliscus robustus*

### *Gerbilliscus kempi*

*G. gambianus* initialement appelé *Tatera gambiana* est le plus gros des Gerbillidés. Son allure trapue est caractéristique. *G. (Tatera) robustus* et *G. (Tatera) kempi* sont deux espèces jumelles difficiles à distinguer morphologiquement, et s'apparentent à *G. gambianus*.

Elles occupent toutes les zones au sud de l'isohyète 700 mm (HUBERT *et al.*, 1973), le centre et sud soudano-sahélien. Elles sont nocturnes, terricoles et aiment les sols argilo-sableux. Elles creusent des terriers profonds compliqués. Ces espèces, mêmes en faible densité, peuvent provoquer des dégâts importants aux cultures.

Le pelage est doux, brun fauve, contrastant avec le ventre blanc.

### *Lemniscomys zebra*

C'est le rat rayé de Barbarie, la grande souris à pelage rayé et à queue aussi longue que le corps. Le pelage dorsal brun jaunâtre porte des bandes longitudinales brun foncé. La bande inférieure est discontinue.

Cette souris est active pendant le jour. Elle se rencontre dans les zones arides et semi-arides où elle fréquente des biotopes relativement humides (soudano-sahélien) et riches en végétation. Elle se nourrit de graines, herbes, fruits et quelques insectes. Elle s'abrite dans un terrier simple. Les portées sont de 3 à 11 jeunes (moyenne 4).

### *Lemniscomys bellieri*

### *Lemniscomys striatus*

Le pelage rayé de ces espèces est caractéristique, et c'est le nombre de bandes qui permet de reconnaître les différentes espèces entre elles. *L. bellieri* et *L. striatus* sont deux espèces jumelles difficiles à distinguer morphologiquement, et qui s'apparentent à *L. zebra*. Ces grandes souris rayées ont une queue aussi longue que le corps.

Le pelage dorsal brun jaunâtre porte des bandes longitudinales brun foncé. Ces espèces sont actives pendant le jour, se rencontrent dans les zones arides et semi-arides où elles fréquentent des biotopes relativement humides (soudano-sahélien) et riches en végétation. Elles se nourrissent de graines, herbes, fruits et quelques insectes. Elles s'abritent dans un terrier simple. Les portées sont de 3 à 11 jeunes (moyenne 4).

### *Crocidura olivieri*

C'est la grande musaraigne à crâne plat. Les oreilles sont grandes et glabres, avec un pli ventral prononcé. La queue est unicolore et épaisse à la base, légèrement plus sombre que le dos, et se rétrécit régulièrement sans présenter de renflement basal. La partie supérieure est colorée de brun foncé à gris beige clair selon les individus et les milieux qu'ils fréquentent. Le ventre est gris plus ou moins foncé. Le crâne est plus grand chez les mâles que chez les femelles.

Cette musaraigne, essentiellement nocturne est terricole, se rencontre dans les zones de cultures irriguées et cours d'eau (zones humides). Elle est fréquemment anthropophile. Elle se nourrit d'insectes, de myriapodes, de mollusques et parfois de petits rongeurs et d'oiseaux.

Une forte activité glandulaire confère à cette espèce une odeur désagréable. Il y a généralement 4 jeunes par portée.

*Crocidura* spp.

Les musaraignes du genre *Crocidura* sont des insectivores qu'on rencontre en zone humide et dans les habitations. Elles sont terricoles, habitent des nids tapissés de feuilles logés dans une galerie souterraine ou dans une anfractuosité de souche.

Elles sont nocturnes, mais restent actives durant le jour dans les zones obscures (GRASSE, 1955) et se nourrissent d'insectes, d'araignées, petits rongeurs et d'oiseaux.

*Arvicanthis ansorgei*

*Arvicanthis rufinus*

*A. ansorgei* et *A. rufinus* sont deux espèces jumelles difficiles à distinguer morphologiquement. Elles s'apparentent (morphologiquement) à *A. niloticus* le rat roussard du Nil, de taille moyenne, au pelage grossier et tiqueté, à la queue fine plus courte que le corps, et dont le 5<sup>ème</sup> doigt de la main est atrophié. Elles s'en distinguent par leur caryotype et leur répartition. La queue fine est bicolore et ses annulations sont peu visibles. Les soles sont nues et les oreilles rondes brun orange sont assez grandes. La coloration dorsale est fauve gris avec des mouchetures noires et jaunes. Une ligne médio-dorsale sombre s'étend de la tête à la queue. Les pieds sont orangés ou noirâtres, le ventre est blanchâtre ou blanc. L'espèce du sud est sombre, tandis que celle du nord est claire.

Ces rongeurs fréquentent des biotopes souvent humides proches des zones de cultures. Ils sont également rencontrés au voisinage des habitations. Ils sont actifs aussi bien le jour (diurne) que la nuit, même aux heures les plus chaudes. Ils se nourrissent de végétaux (légumes, céréales vertes, graminées diverses), de graines et de fruits (polyphage). Ils construisent des terriers peu profonds, longs et à plusieurs issues dans lesquels ces rongeurs établissent un nid rembourré de paille d'herbes. Ils peuvent éventuellement occuper des terriers abandonnés de *Mastomys*. La maturité sexuelle est atteinte à 4 mois. Il y a 4 portées par an de 5 à 6 jeunes (2 à 10). C'est le nuisible des cultures de décrues et irriguées.

### *Praomys daltoni*

Ce rongeur occupe les savanes boisées des zones soudaniennes et soudano-guinéennes. Son ventre est blanc sans poils gris et la limite avec les flancs ne tranche pas toujours nettement. Son pelage doux et roux, contraste avec le ventre blanc. Il est nocturne, terricole, parfois arboricole. Il fait son nid dans un petit trou d'arbre, une branche creuse ou sous l'écorce (HUBERT *et al.*, 1973).

Il se nourrit d'insectes, de racines et feuilles. Il fréquente les zones de cultures et les habitations. Il y a 3 à 10 jeunes par portée (ANADU, 1979a). La longueur de la queue est supérieure à celle de la tête et du corps.

### *Cricetomys gambianus*

C'est le rat de Gambie, géant, "rat toto" ou rat voleur. Son pelage dorsal dur et gris est uniforme. Le ventre est beige. Le tiers terminal de la queue est blanc.

Il est nocturne, terrestre et creuse d'importants terriers dans lesquels il emmagasine des réserves alimentaires, ainsi que des objets divers qu'il ramasse volontiers. Il est anthropophile, vit aussi bien en ville qu'au voisinage des villages. Sa répartition est large (du sahélien au guinéen) et provoque des dégâts en milieux habités et périphériques.

### *Heliosciurus gambianus*

C'est l'héliosciure de Gambie ou écureuil. Cet animal occupe aussi bien les zones sahélo-soudaniennes et soudano-guinéennes. Il est cependant moins abondant que l'écureuil terrestre *X. erythropus*.

Son pelage est uniforme, finement tiqueté de noir, brun, roux et blanc. Il est diurne et arboricole. Sa densité est en corrélation avec l'importance de la strate arboricole. Il est nuisible.

## **1-6. Espèces à affinité soudano-guinéenne**

### *Uranomys ruddi*

Ce rongeur peu abondant occupe les savanes du sud soudano-sahélien. Son pelage dorsal brun à texture cassante (proche du sub-épineux) est caractéristique. Le pelage du ventre est blanc. La longueur de la queue est inférieure à celle de la tête et du corps. Il est nocturne, terricole et insectivore. Il peut habiter à deux un terrier peu profond.

### *Praomys derooi*

Chez *Praomys derooi*, la coloration des parties supérieures est noir gris nuançant du brun au jaune gris, et les parties inférieures sont blanches ou grises. La tête est étroite et allongée, les yeux sont assez larges et arrondis, et la queue est substantiellement plus longue que la tête et le corps. La femelle porte 10 mamelles.

Il fréquente des habitats variés, allant des régions boisées arides aux savanes et forêts luxuriantes. Il est spécialement commun des zones rocailleuses, et parfois rencontré dans les champs cultivés et les habitations humaines. Il est nocturne et terricole, et se nourrit régulièrement d'insectes. Il y a 2 à 5 jeunes par portée (VAN DER STREATEN *et al.*, 1978b).

## **1-7. Espèces à affinité guinéenne**

### *Mastomys natalensis*

C'est un des rats à mamelles multiples dont le caryotype est  $2n (=32)$  et  $NFa (=52-54)$  (DUPLANTIER *et al.*, 1990a). Chez *M. natalensis* la couleur du pelage est gris noir. La longueur de la queue est équivalente à celle de la tête et du corps. Il est nocturne, terricole, omnivore, et prolifique (24 petits par portée). Il est largement réparti, et fréquente également les zones sahéenne et soudanienne à l'intérieur des habitations exclusivement. Il est capable de pulluler et nuisible pour l'agriculture.

## **1-8. Espèces introduites**

### *Mus musculus*

C'est la souris domestique, petit rongeur svelte, à museau effilé et à pelage doux. La queue, de coloration grise uniforme est aussi longue que le corps et finement écailleuse.

Ce petit rongeur, surtout nocturne, est un commensal strict de l'homme qui a beaucoup contribué à sa dispersion. Il est terricole, creuse un terrier peu profond. Il prélève une part importante de son alimentation dans les greniers. Les individus vivent en groupes sociaux plus ou moins nombreux dans les milieux sahéens, occupant une position beaucoup plus septentrionale que *Rattus rattus*. Il y a 3 à 8 jeunes par portée (6 en moyenne).

### *Rattus rattus*

C'est le rat noir importé d'Europe à partir du XV<sup>ème</sup> siècle, de forte taille, à museau allongé et à grandes oreilles. La queue unicolore est longue, écailleuse et glabre. Les mâles sont plus grands que les femelles. Le pelage dorsal est coloré en gris ou brun plus ou moins foncé.

Il pénètre à l'intérieur du territoire où il est anthropophile, mais on le retrouve parfois en zones humides. Il est nocturne, arboricole et peut vivre dans le toit des habitations humaines. Il se nourrit de fruits et de graines. C'est un animal social qui fréquente les milieux sahéliens, mais peut occuper la zone soudanienne. Il y a 2 à 5 portées par an de 1 à 20 jeunes (moyenne 6).

### *Rattus norvegicus*

Le surmulot ou rat d'égout, trapu, est le plus gros des *Murinae* présents en Afrique à museau court et arrondi. La queue bicolore, fortement écailleuse et glabre, est brun dessus, blanchâtre dessous et plus courte que celle de *R. rattus*. Les oreilles sont petites. Le pelage dorsal est gris ou brun, le ventre blanc sale sans délimitation entre le pelage dorsal et ventral.

C'est une espèce introduite en Afrique et vit en colonies dans les égouts, les rives des canaux, les ports et est actif au crépuscule et à l'aube. *R. norvegicus*, bon nageur, ne peut se passer de boire (même de l'eau salée), ce qui réduit son expansion aux habitats humains dans les zones arides. C'est un commensal étroit de l'homme des milieux sahéliens. Il est terrestre et souterrain, creuse des terriers peu profonds à plusieurs entrées. Il est omnivore, se nourrit de végétaux (herbes, plantes cultivées, feuilles, graines) et d'arthropodes (GLASS *et al.*, 1989). Il y a 8 jeunes, en moyenne, par portée

## **2. Rôle épidémiologique**

La diversité spécifique des micro-mammifères augmente du nord au sud, c'est à dire des milieux sahélo-sahariens vers les milieux guinéens plus riches et plus diversifiés en strates arbustives et arborées continues (HUBERT *et al.*, 1973).

Tous les petits mammifères que nous venons de citer dans cette étude sont susceptibles d'héberger des germes pathogènes pour l'homme, en particulier *B. crocidurae*, *B. merionesi* et *B. hispanica*.

La répartition géographique des rongeurs et insectivores hébergeant des *Borrelia* est probablement liée à la limite de distribution des tiques *Ornithodoros*. Les principales espèces de petits rongeurs et insectivores trouvées naturellement infectées par des *Borrelia* (TRAPE *et al.*, 1991; TRAPE *et al.*, 1996a; TRAPE *et al.*, 1996b; DIATTA *et al.*, 2012; TRAPE *et al.*, 2013; DIATTA *et al.*, 2015) sont présentées par des illustrations photographiques ci-après :



Figure 3 : *Arvicanthis niloticus*, au pied d'un *Euphorbia balsamifera*, J.M. DUPLANTIER



Figure 4 : *Mastomys erythroleucus*, sur un tapis vert de graminées, J.J. LEMASSON





Figure 5 : *Mastomys huberti*, sur un tapis vert de graminées, J.M. DUPLANTIER



Figure 6 : *Praomys daltoni*, sur un support de bois, J.M. DUPLANTIER





Figure 7 : *Crocidura olivieri*, sur un tapis humide dénudé et vert de graminées, G. DIATTA



Figure 8 : *Gerbilliscus gambianus*, sur un tapis sec, J.M. DUPLANTIER



Figure 9 : *Taterillus* sp., plus probablement ; **A** : *T.aterillus gracilis*, Y. PAPILLON



ou **B** : *Taterillus pygargus*, sur un tapis sec, J.M. DUPLANTIER





Figure 10 : *Mastomys natalensis*, Y. PAPILLON



Figure 11 : *Mus musculus*, E. GRIMMBERGER



Figure 12 : *Cricetomys gambianus*, L. GRANJON



Figure 13 : *Rattus rattus*, J.M. DUPLANTIER



Figure 14 : *Gerbillus tarabuli*, sur un tapis sec, J.J. LEMASSON



Figure 15 : *Gerbillus gerbillus*, PH. ORSINI





Figure 16 : *Gerbillus occiduus*, sur un tapis semi-désertique, L. GRANJON



Figure 17 : *Meriones shawi grandis*, sur un tapis sec de blocs rocheux, E. GRIMMBERGE





Figure 18 : *Gerbillus (Dipodillus) campestris*, sur un tapis sec, L. GRANJON



Figure 19 : *Gerbillus hoogstraali*, sur un tapis sec de blocs rocheux, E. GRIMMBERGE





Figure 20 : *Atelerix algirus*, hérisson d'Algérie, sur un tapis vert de graminées, L. GRANJON



Figure 21 : *Xerus erythropus*, sur un tapis sec, L. GRANJON





Figure 22 : *Dasymys rufulus*, sur un tapis vert de graminées, J.J. LEMASSON



Figure 23 : *Desmodilliscus braueri*, sur un tapis sec, J.M. DUPLANTIER

## **CHAPITRE III : LA BORRÉLIOSE A TIQUES CHEZ L'HOMME**

# Chapitre III : La borréliose à tiques chez l'homme

## 1. Introduction

La borréliose à tiques ou fièvre récurrente à tiques est une zoonose qui atteint l'homme de façon accidentelle lors de la piqûre d'une tique ornithodore vecteur. Elle est caractérisée par une succession périodique d'épisodes fébriles à début et terminaison brusques séparés par des intervalles d'apyrexie : c'est le syndrome de fièvre à rechutes de LARREY (REYNES, 1955) ou fièvre récurrente.

La récurrence thermique correspond à une récurrence bactérienne, et les *Borrelia* ne sont visibles dans le sang périphérique que durant les périodes de fièvre. Elles disparaissent ou sont très rares pendant les périodes apyrétiques.

## 2. Aspects épidémiologiques

L'épidémiologie de la borréliose dépend de la tique vectrice et de son taux d'infection, de l'hôte naturel (réservoir animal) et de la possibilité de contact entre l'homme et le vecteur. La tique *O. sonrai* vit dans les terriers de rongeurs, mais peut piquer à l'extérieur. Lorsque des terriers existent ou débouchent dans les habitations au sol en terre battue, cet ornithodore vecteur a l'occasion de piquer l'homme dans les maisons. Après un repas de sang de la tique contaminée sur un rongeur infecté, les *Borrelia* ingérées se multiplient et envahissent les glandes salivaires et coxales et la tique devient infectante par les sécrétions coxales et salivaires produites au moment du repas sanguin.

Les *Borrelia* pénètrent habituellement par la lésion de piqûre. Les sujets exposés aux piqûres de tiques sont ceux qui vivent en zone rurale, dormant sur une natte à même le sol ou dans un lit métallique, soit en sommier de bois et/ou en bois avec matelas paille ou mousse, ou qui sont amenés à y séjourner (autochtones et touristes). La piqûre de tique *Ornithodoros* est indolore et cela explique que la contamination passe généralement inaperçue. La persistance de foyers d'infection (endémie) s'explique par la sédentarité et la longue durée de vie des ornithodores. Du fait du mode de vie du vecteur, la borréliose est une maladie régionale, qui survient essentiellement dans les zones rurales (BERCHE *et al.*, 1988).

### 3. Présentation du cycle de la maladie

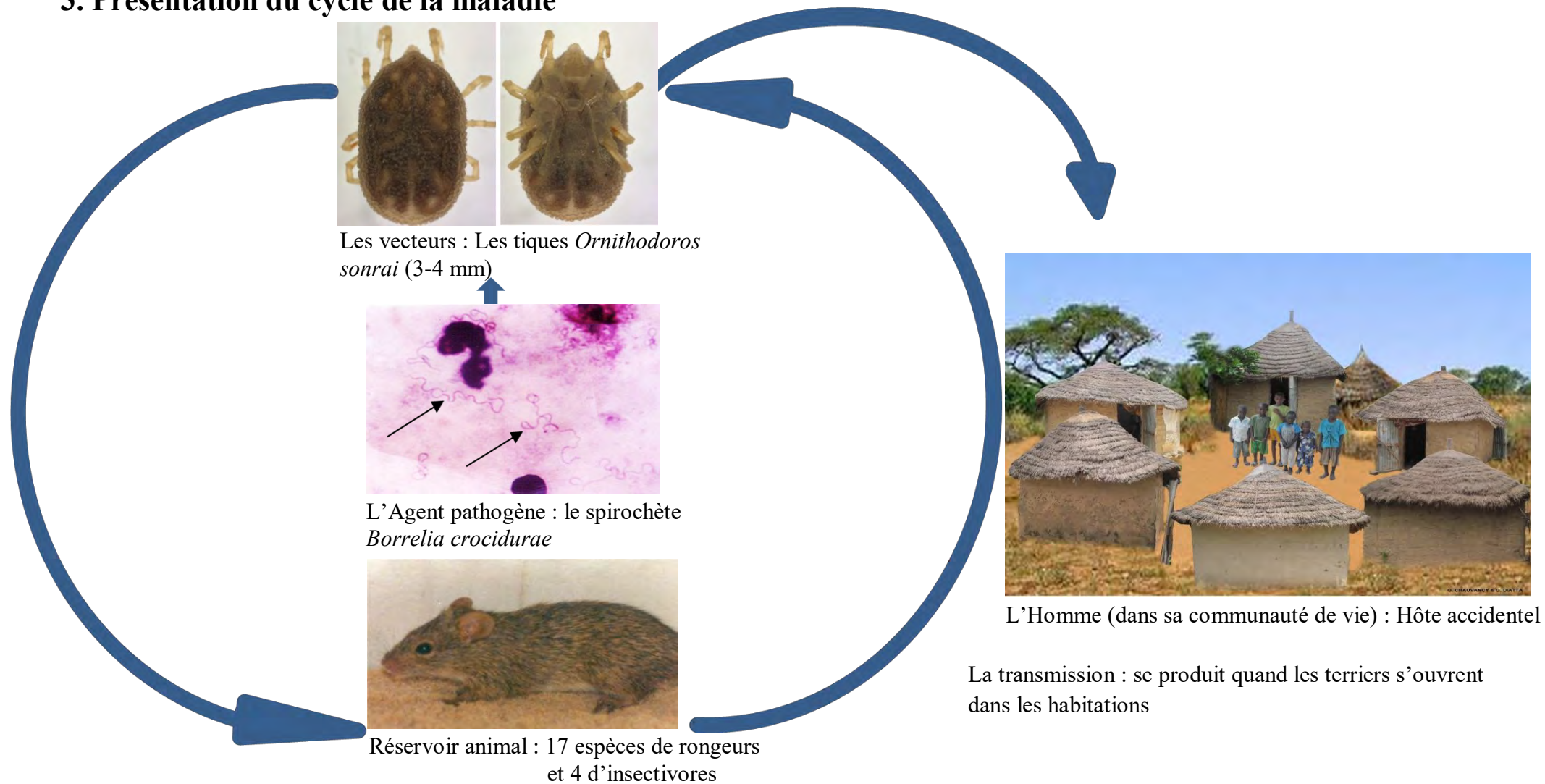


Figure 24 : Cycle épidémiologique de la borréliose à tiques d'Afrique de l'Ouest, décrit entre 1917-1950

## 4. Physiologie et immunité

Dans l'organisme, les *Borrelia* se multiplient activement dans le compartiment vasculaire. Le tropisme des *Borrelia* pour l'endothélium vasculaire, dont les raisons sont encore obscures, explique l'atteinte préférentielle du système nerveux central et d'autres organes profonds comme le foie, la rate et la moelle osseuse (BERCHE *et al.*, 1988). L'importance de l'irrigation nerveuse et de la fonction de l'hématopoïèse expliqueraient l'atteinte préférentielle du système nerveux central et des autres organes profonds.

Chez la souris blanche, *B. crocidurae* peut subsister dans le cerveau jusqu'à sept mois après l'inoculation alors que dans le sang la borréliémie ne se prolonge jamais au delà de deux à trois mois (DIATTA *et al.*, 1994). Le tissu cérébral semble donc constituer un réservoir bactérien protégé de la réponse immunitaire à partir duquel les *Borrelia* seraient susceptibles de réinfecter le sang (SHAMAEI-TOUSI *et al.*, 2001).

Comme *B. duttonii*, *B. hispanica* et *B. crocidurae* présentent la faculté de se lier avec les érythrocytes de l'hôte pour former des agrégats appelés «rosettes érythrocytaires». Cette aggrégation empêche l'interaction des cellules de l'immunité avec les bactéries et retarde ainsi la réponse immunitaire. Elle provoque également des micro-embolies qui sont à l'origine de dommages tissulaires (BURMAN *et al.*, 1998; SHAMAEI-TOUSI *et al.*, 2001). En outre, *B. crocidurae* a en commun avec les *Borrelia* du complexe *Borrelia burgdorferi* la capacité d'activer les cellules de l'endothélium vasculaire et de favoriser la migration trans-endothéliale des polynucléaires neutrophiles (SHAMAEI-TOUSI *et al.*, 2001). Ces événements entraînent des lésions vasculaires et des réactions inflammatoires qui représentent, avec la formation des micro-embolies, la base de la physiopathologie de la fièvre récurrente à *B. crocidurae*.

Comme il a été démontré pour *Borrelia hemersi* (BARBOUR *et al.*, 1982), les *Borrelia* peuvent exprimer séquentiellement des protéines d'enveloppes immunologiquement distinctes. Aussi, elles sont capables de modifier leur structure antigénique de surface et d'échapper pour un temps au système immunitaire (BERCHE *et al.*, 1988). Les anticorps spécifiques qui apparaissent lors du premier épisode septicémique permettent la destruction de la quasi-totalité des *Borrelia* présentes dans le sang, directement par la lyse due au complément ou indirectement par l'opsonisation des germes (NEWMAN *et al.*, 1981).

Ces anticorps qui se développent ne seraient actifs que pour une seule récurrence (BERCHE *et al.*, 1988). Il existe quelques *Borrelia* qui produisent une nouvelle protéine d'enveloppe et ne sont plus reconnues efficacement contre la première vague d'anticorps. Ces variants peuvent librement se multiplier et envahir l'organisme jusqu'à l'apparition d'anticorps dirigés contre cette nouvelle protéine de surface (BERCHE *et al.*, 1988). Ce phénomène d'échappement immunitaire est à l'origine des récurrences bactériennes.

La guérison est habituelle même sans traitement. Elle est due probablement à l'existence d'un stock limité de protéines variables chez les *Borrelia* ou à la constitution progressive d'une réaction immunitaire efficace dirigée contre des structures antigéniques constantes. Après la guérison, la maladie laisse une immunité faible, de courte durée et spécifique (RODHAIN, 1976; BERCHE *et al.*, 1988). L'acquisition d'une immunité durable n'a pas été démontrée (BARBOUR, 1999; PAROLA *et al.*, 2001).

## 5. Aspects cliniques

Les formes cliniques de la borréliose sont variées, à cause de l'atteinte plus ou moins prononcée de tous les systèmes organiques. Les descriptions classiques du tableau clinique concernent pour la plupart la borréliose à tiques à *B. duttonii*, beaucoup mieux connue que celle à *B. crocidurae*.

La forme habituelle de l'évolution de la borréliose à *B. crocidurae* est cyclique. Elle est précédée par une période d'incubation silencieuse de quatre à sept jours (extrêmes 2 à 18 jours) et se caractérise par un accès fébrile brutal pouvant atteindre 39 à 40°C (extrêmes 41°C), (LECOMPTE *et al.*, 2003), accompagné de frissons, de douleurs diffuses et d'une tachycardie (GOLVAN, 1983). La durée de l'incubation dépend de la richesse de l'inoculum (BRYCESON *et al.*, 1970). Les accès fébriles, d'une durée moyenne de trois à quatre jours, alternent avec des phases d'apyrexie de 2 à 10 jours. Une à six récurrences sont le plus souvent dénombrées (LECOMPTE *et al.*, 2003), mais elles dépendent de la précocité du diagnostic, de l'efficacité du traitement et de l'immunité du malade (AUBRY *et al.*, 1983). L'asthénie est un des signes les plus constants et le plus rebelle de la borréliose à tiques. La céphalée est violente et les courbatures sont marquées.

Des troubles digestifs comme l'anorexie, les vomissements sont également associés.

Un ictère visible au niveau des téguments et des conjonctives est souvent observé vers le 4<sup>ème</sup> jour (GOLVAN, 1983). L'amaigrissement peut être rapide et important. L'hépatomégalie est fréquente (particulièrement son lobe gauche), et le foie est alors mou, douloureux à la palpation. La splénomégalie est rapidement constituée et la rate devient molle, sensible à la palpation (GOLVAN, 1983). Ce tableau clinique se maintient généralement pendant six à sept jours. La température chute ensuite brutalement en dessous de la normale, le pouls cardiaque se ralentit et le patient présente une sudation abondante (GOLVAN, 1983).

La période d'apyrexie dure une semaine environ, le foie et la rate reprennent leur volume normal (GOLVAN, 1983). La récurrence fébrile survient ensuite sans atteindre le niveau de primo-invasion et tous les symptômes réapparaissent, mais avec une moindre intensité (GAUD *et al.*, 1947; GOLVAN, 1983). Ce second épisode fébrile dure 3 à 5 jours et se termine par une nouvelle crise sudorale moins franche que la première.

Les formes cliniques sont nombreuses, mais il en existe quelques-unes qui méritent d'être retenues en raison de leur gravité :

- les formes avec atteinte hépatique, particulièrement fréquentes en Égypte, sont sévères. Leur pronostic est sombre chez les individus souffrant d'une dénutrition chronique ou d'une déficience hépatique antérieure, quelle qu'en soit l'étiologie. L'ictère apparaît vers le cinquième jour, mais comme tous les ictères graves, il reste discret et le tableau clinique va devenir celui d'une hépatonéphrite pouvant aboutir à la mort (GOLVAN, 1983).
- les formes frustes ou inapparentes sont l'apanage de l'enfant. Un syndrome d'irritation méningée ou des poussées fébriles d'allure grippale peuvent être observés chez l'enfant et qu'il est difficile de rattacher à une borréliose à tiques. C'est également chez l'enfant que les complications oculaires sont les plus fréquents (NEEL *et al.*, 1949; GOLVAN, 1983).
- l'avortement spontané est fréquent chez la femme enceinte et ceci est valable pour toutes les fièvres récurrentes (GOLVAN, 1983).

Dans le cas du Sénégal, un seul cas mortel a été rapporté par GONNET (1942).



## 6. Méthodes de diagnostic biologique

### 6-1. Diagnostic direct

Une affection d'un tableau clinique aussi polymorphe présente un diagnostic clinique difficile. Quand les examens de laboratoire font défaut, les malades sont régulièrement confondus avec des paludéens. La notion de fièvre ou de récurrence est un élément important qui doit orienter le diagnostic. Dans la pratique courante, le diagnostic d'une fièvre récurrente à tiques nécessite la mise en évidence des *Borrelia* dans le sang du malade. La certitude du diagnostic repose :

- sur l'observation directe de l'agent pathogène (*Borrelia* spp. sur goutte épaisse de sang),
- ou l'inoculation de sang à la souris blanche (MATHIS, 1928) et/ou d'organes suspects (cerveau, foie, rate).

La borréliémie étant souvent faible et furtive, la méthode de goutte épaisse directe est de loin plus indiquée que le frottis sanguin pour rechercher des *Borrelia* dans le sang. Sa sensibilité diagnostique a été de 61% (31/51) lorsqu'elle est pratiquée au cours de tout accès fébrile (DIATTA G. & TRAPE J.F., données non publiées). En revanche, l'inoculation de sang par voie intra-péritonéale à la souris blanche, qui doit être la règle pour tous les cas de fièvre répétée ou inexpliquée à goutte épaisse négative, est la technique de référence (même si elle est peu pratiquée en routine) qui permet d'accroître d'environ 27 à 30% la sensibilité du diagnostic (DIATTA, 1992; DIATTA *et al.*, 1994) ; DIATTA G. & TRAPE J.F., données non publiées).

Entre les récurrences, l'agent pathogène présente un tropisme pour les organes profonds.

### 6-2. Diagnostic différentiel

Du fait de l'absence de signe clinique spécifique, le diagnostic différentiel de la borréliose à tiques est vaste. Il prend en compte avant tout le paludisme fréquent en Afrique subsaharienne (COLEBUNDERS *et al.*, 1993; LA RAJA *et al.*, 1998), mais également les septicémies, les arboviroses (fièvre jaune, dengue) et d'autres infections virales, les rickettsioses, la leptospirose et la fièvre typhoïde (VAN DAM *et al.*, 1999).

L'infection à *Borrelia* peut être masquée par une co-infection due au paludisme. D'une façon générale, la notion de séjour en zone endémique doit être un élément déterminant dans le diagnostic de la fièvre récurrente à tiques.

### 6-3. Autres méthodes de diagnostic possibles

La culture de *B. crocidurae* *in vitro*, mise au point par VAN DAM et collègues (1999) constitue une alternative à l'inoculation à la souris blanche mais elle reste très délicate. Elle est effectuée sur milieu de Kelly modifié (MKM). Après cinq à sept jours d'incubation en micro-aérobiose à 33°C, les *Borrelia* peuvent être observées au microscope.

La méthode *quantitative buffy coat* (QBC<sup>®</sup>) test (QBC<sup>®</sup> - Beckton Dickinson), utilisée déjà pour le diagnostic des filarioses sanguines, de la trypanosomiase, de la babésiose et de la leptospirose, a montré récemment son intérêt dans le diagnostic de la borréliose à *B. crocidurae*. C'est également une technique de détection du paludisme qui associe la coloration par l'acridine orange à la centrifugation. Après centrifugation, les *Borrelia* sont immédiatement situées à la limite de la zone leuco-plaquettaire et du plasma vers lequel elles migrent rapidement (CHATEL *et al.*, 1999). Le QBC<sup>®</sup> permet l'examen rapide d'un volume de sang plus important que la goutte épaisse avec un gain de sensibilité diagnostique. Le seuil de détection de la technique est estimé à 103 *Borrelia*/mL pour un examen de dix minutes (VAN DAM *et al.*, 1999).

Le diagnostic de la borréliose par la PCR en temps réel (qPCR) doit être réalisé actuellement dans les structures hospitalières en Afrique tropicale et notamment au Sénégal, si l'État accompagne les autorités sanitaires qui s'inspireraient des deux laboratoires point-of-care (POC) installés en milieu rural à Dielmo (SOKHNA *et al.*, 2013) et à Niakhar par URMITE, pour relever le plateau technique et détecter rapidement les infection à *Borrelia* et d'autres bactéries responsables de fièvre afin de permettre une meilleure prise en charge des malades fébriles (coût unitaire peu cher (104 080 697 FCFA) avec une volonté politique).

## 7. Données de l'incidence connue dans deux régions du Sénégal

Dans la littérature, peu de données épidémiologiques récentes relatives aux infections humaines à *B. crocidurae* sont disponibles. Au Sénégal, deux études ont été menées. La première a été réalisée pendant un an (1989-1990) et a porté sur 1340 enfants de moins de 15 ans (2 à 14 ans) fréquentant le dispensaire de Keur Moussa, situé à 50 kilomètres environ à l'est de Dakar et 20 kilomètre à l'ouest de Thiès. *B. crocidurae* a été retrouvée chez 0,9% (12/1340) des malades examinés. La prévalence la plus élevée (4,2%) a été observée chez les grands enfants de la tranche d'âge de 10 à 14 ans (TRAPE *et al.*, 1991).

La seconde étude a été conduite de 1990 à 1992 sur la population du village de Dielmo (13°43'N-16°24'W), région de Fatick, ensuite au dispensaire de Keur Moussa et à l'hôpital Saint Jean de Dieu (16°55'N-14°48'W), situé à 500 mètres environ à l'Ouest du centre de la ville de Thiès, respectivement de Mars à Mai 1991 et de Mai 1991 à Mai 1992. A Dielmo village, le dépistage systématique de *B. crocidurae* a été effectué chez les malades présentant un accès fébrile au cours des deux années de suivi clinique et parasitologique, de Juin 1990 à Mai 1992. Sur 230 personnes incluses dans l'étude, 24 cas de fièvre récurrente à tiques ont été diagnostiqués, soit un taux d'incidence annuel moyen de 5,2% (DIATTA, 1992; TRAPE *et al.*, 1996a). Des travaux récents ont également indiqué qu'à Dielmo 11% (VIAL *et al.*, 2006) et 9,7% (MEDIANNIKOV *et al.*, 2014) de la population a développé chaque année la borréliose. La prévalence de l'infection à *Borrelia* chez des patients fébriles examinés, puis diagnostiqués positifs en borréliose (33/173), entre Juin 2010 - Octobre 2011, dans quatre structures sanitaires de la zone de Niakhar (Toucar, Diohine, Ngayokhème et Niakhar) était de 19,1% (MEDIANNIKOV *et al.*, 2014). Dans la région de Thiès la présence de *B. crocidurae* a été mise en évidence chez 25 malades sur 583 consultants fébriles examinés au dispensaire de Keur Moussa et à l'hôpital Saint Jean de Dieu, soit une prévalence de 4,3% (DIATTA, 1992). Dans chacune de ces études, la maladie a été observée quelle que soit la saison.

## 8. Traitement et prévention

Le traitement de la borréliose à tiques est basé sur l'administration d'antibiotiques de la famille des Cyclines. La tétracycline (AUBRY *et al.*, 1983; VAN DAM *et al.*, 1999) et la doxycycline (AUBRY *et al.*, 1983; COLEBUNDERS *et al.*, 1993) sont les deux antibiotiques de choix pour le traitement de la borréliose à tiques.

La posologie est de 2 g/jour par voie orale, soit 500 mg toutes les six heures (12,5 mg/Kg chez l'enfant de plus de huit ans) pour la tétracycline et de 200 mg/jour *per os*, soit 100 mg deux fois par jour (4 mg/Kg en une seule prise chez l'enfant) pour la doxycycline. La durée du traitement est longue et varie de 7 à 10 jours du fait du tropisme des *Borrelia* pour le système nerveux central. En effet, dans le cerveau les *Borrelia* sont protégées de l'action des tétracyclines par la barrière hématoencéphalique et pourraient par la suite réapparaître dans le sang. Une administration prolongée est donc nécessaire pour conduire une antibiothérapie efficace (CADAVID *et al.*, 1998).

Dans le cas de contre-indications (grossesse et enfant de moins de huit ans), l'érythromycine, 500 mg ou 12,5 mg/Kg *per os* toutes les six heures) est une alternative aux tétracyclines (AUBRY *et al.*, 1983; BARBOUR, 1999). Des échecs thérapeutiques ont cependant été observés avec cette molécule (COLEBUNDERS *et al.*, 1993). Comme les tétracyclines, l'érythromycine a également une mauvaise diffusion dans le tissu cérébral.

Lors des atteintes neurologiques, il faut envisager une antibiothérapie parentérale par pénicilline G (12 à 30 millions d'UI par jour (CHARMOT *et al.*, 1986; CADAVID *et al.*, 1998) ou par Ceftriaxone, 2 g/jour pendant 10 à 14 jours. Les *Borrelia* sont résistantes à la rifampicine, au métronidazole et aux sulfamides. Aucune résistance acquise aux antibiotiques n'a été actuellement mise en évidence chez les *Borrelia* (BARBOUR, 1999).

## **9. Climat et borréliose à tiques**

### **9-1. Répartition géographique des ornithodores vecteurs**

Elle est classiquement saharienne et sahélienne. La plupart des localités de collecte des tiques *O. sonrai* sont situées dans les régions où la pluviométrie est inférieure à 500 mm et aucune ne dépasse 750 mm qui est la limite extrême de la répartition (MOREL, 1965).

### **9-2. Impact des modifications climatiques**

Depuis 1970, début de la sécheresse actuelle en Afrique subsaharienne, la presque totalité des années présente une pluviométrie déficitaire par rapport à la moyenne des soixante cinq années précédentes (Figure 25).

Ce déficit pluviométrique a atteint plus de 32%, en moyenne, ces quarante dernières années.

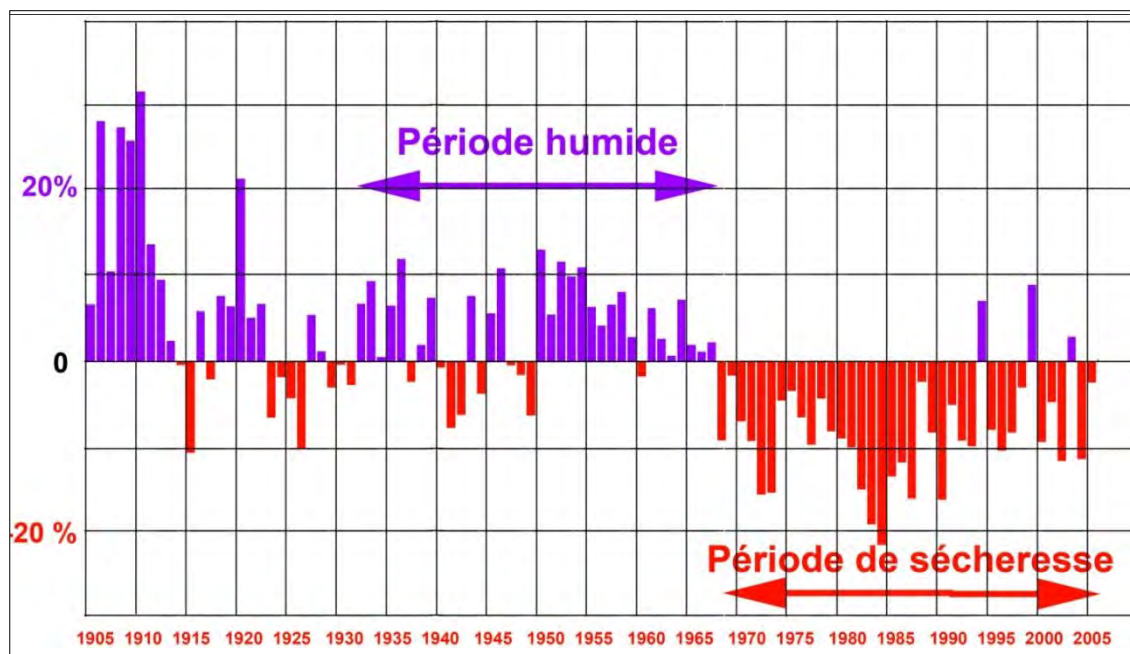


Figure 25 : Indices annuels d'anomalies pluviométriques dans le sahel de 1905 à 2005 :  
Source 4<sup>ème</sup> Conférence Internationale sur l'Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine (AMMA), Toulouse, France, 2-6 Juillet 2012

Au Sénégal et dans l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, on note une descente vers le sud des isohyètes moyens d'au moins un degré de latitude depuis 1970 (Figure 26).

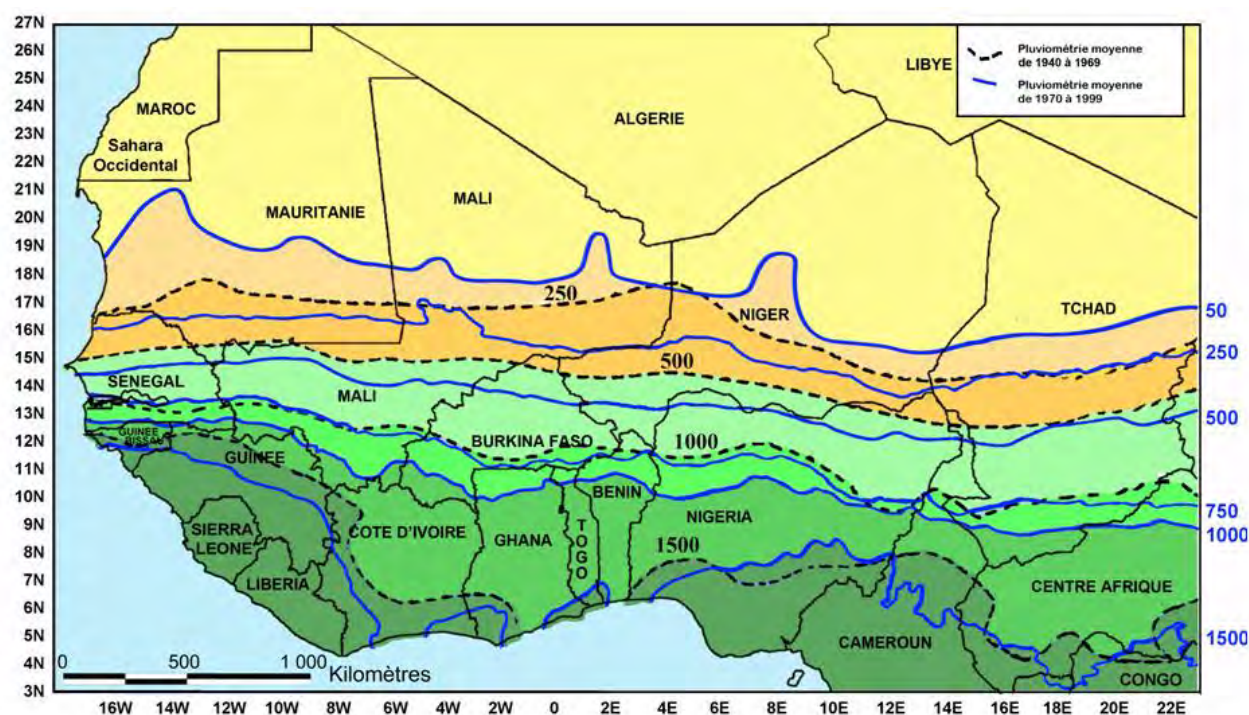


Figure 26 : Isohyètes moyens (pluviométrie moyenne) en Afrique de l'Ouest (50 mm, 250 mm, 500 mm, 750 mm, 1000 mm, 1500 mm) entre les périodes 1940-1969 et 1970-1999 (MAHE *et al.*, 1999)

### 9-3. Extension récente de la borréliose à tiques

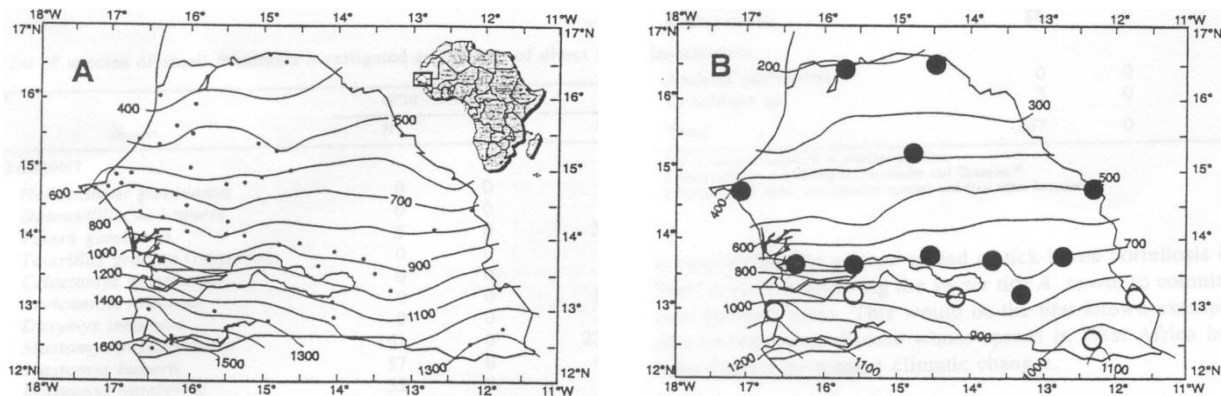


Figure 27 : **A** : Isohyètes moyens de la période 1947-1969 ; **B** : Isohyètes moyens de la période 1970-1990. Les cercles noirs montrent où la tique *O. sonrai* a été collectée entre 1990-1992, les cercles blancs montrent où la recherche de ce vecteur a été négative (TRAPE *et al.*, 1996a)

Des cas de borréliose sont survenus au Sénégal, depuis les années 1980, en dehors de l'aire de répartition connue de la maladie (TRAPE *et al.*, 1991). C'est d'ailleurs au Sénégal, où le plus grand nombre de données historiques sur la borréliose à tiques était disponible. Des travaux de TRAPE et collègues (1996a), ont montré une progression vers le sud de l'aire d'endémie de la maladie, ce qui a correspondu très étroitement au déplacement de l'isohyète 750 mm depuis 1970, date du début de la période actuelle de sécheresse (ou de variabilité pluviométrique) en Afrique de l'Ouest (Figure 27).

Avant 1965, la localité la plus au sud connue de la tique *O. sonrai* était située à l'intersection 14°28'N/16°59'W. Au Sénégal oriental, la limite la plus au sud où des tiques *O. sonrai* ont été collectées était localisée à la latitude 13°15'N (TRAPE *et al.*, 1996a). Actuellement, l'extrême limite sud orientale de distribution des tiques ornithodores a atteint la latitude 13°32'N (TRAPE *et al.*, 2013), soit une extension en valeur absolue de 00°17'N, ce qui correspondrait à une progression de plus de 30 kilomètres vers le sud. Dans le Sine-Saloum, notamment dans la zone de Dielmo-Ndiop, entre 2003 et 2012, la localité la plus au sud de la limite méridionale de progression des tiques *O. sonrai* a évolué de la latitude 13°41',26.7''N à la latitude 13°41',6.6''N, soit une extension d'environ 00°00'0,5''N en valeur absolue, ce qui correspond approximativement à 900 mètres de surface théorique récemment colonisée vers le sud par les tiques *O. sonrai* (DIATTA *et al.*, données non publiées).

## 10. Environnement et borréliose à tiques

D'après MOREL (1965), les tiques *Ornithodoros* sont absentes des terriers de sable pur de dunes, des ergs et aussi dans les sols salés des zones de sebkha. Elles sont présentes par contre dans les sols sableux mélangés à de l'argile ou du limon. Ces observations ont été, d'ailleurs, confirmées par les résultats de l'analyse des constituants pédologiques examinés dans différents sites étudiés en Afrique subsaharienne pour rechercher la présence des tiques ornithores rapportés par des travaux récents (DIATTA, 2005; DIATTA *et al.*, 2005a). En effet, il a été noté que dans l'agglomération et les environs de la ville de Nouakchott, la remontée de la langue salée à la surface ainsi que la présence de cordons dunaires étaient à l'origine de l'absence de la tique *O. sonrai*. Aussi, l'analyse des paramètres pédologiques a permis de montrer que l'installation des tiques *Ornithodoros* dans la nature est beaucoup plus favorable dans les sols à sable fin associé à de l'argile à limon gros que dans les sols à sable gros associé à de l'argile à limon gros. Dans le contexte actuel de la variabilité et de déficit de la pluviométrie liée à la persistance de la sécheresse subsaharienne depuis les années 1970, les sols à sable fin associé à de l'argile à limons gros préserveraient plus longtemps l'humidité du sol et participent ainsi au maintien des foyers de borréliose dans la nature. En revanche, nous avons observé que les sols à sable gros associé à de l'argile à limon gros fréquemment rencontrés dans la partie orientale de la Mauritanie, dans le Niger, Tchad, Cameroun et Bénin joueraient un rôle défavorable, et c'est ce qui explique que la présence des tiques *O. sonrai* n'a pas été confirmée notamment à Ayoûn El Atrous et à Néma en Mauritanie, à Niamey au Niger et à Ndjaména au Tchad où MOREL (1965) les avait déjà signalées.

## **DEUXIÈME PARTIE : INVESTIGATIONS ÉPIDÉMIOLOGIQUES**



# **CHAPITRE I : CONTEXTE DE L'ÉTUDE**

# Chapitre I : Contexte de l'étude

## 1. Justificatifs

En 2003, après la mise en place d'un réseau de recherche associant des équipes françaises et des équipes de huit pays africains, nous avons conduit des investigations épidémiologiques sur la borréliose à tiques en Afrique occidentale et centrale (Sénégal, Mauritanie, Mali, Burkina Faso, Bénin, Niger, Cameroun et Tchad), puis avons débuté une série d'études à vaste échelle sur cette maladie (DIATTA *et al.*, 2004; DIATTA *et al.*, 2005a; DIATTA *et al.*, 2005b; DIATTA *et al.*, 2005c; VIAL *et al.*, 2006). Les premiers résultats de cette étude (DIATTA, 2005), ont indiqué que le vecteur et l'agent pathogène sont abondamment présents au nord de l'isohyète 750 mm dans toute la moitié ouest de l'Afrique occidentale (Sénégal, Mauritanie, Mali), ce qui correspond approximativement à la latitude 13°30'N, confirmant ainsi l'idée d'une distribution de la maladie en relation avec la pluviométrie et l'hypothèse d'une extension généralisée de la borréliose à tiques en zone soudanienne sous l'influence de la persistance de la sécheresse sub-saharienne depuis 1970 (TRAPE *et al.*, 1996a).

Les limites sud et est de la borréliose à tiques initialement établies avec précision dans l'ouest et l'est du Sénégal ont été à nouveau investiguées et semblent avoir évolué, mais elles n'ont pas encore été déterminées ailleurs. Vers l'est, il semble exister au niveau du bassin du Niger une zone de transition où le vecteur se maintient au nord de l'isohyète 750 mm uniquement à proximité du lit majeur du fleuve Niger et de ses principaux affluents. En zone saharienne, le vecteur et l'agent pathogène remontent dans les zones désertiques du nord de la Mauritanie (DIATTA, 2005), et il pourrait exister une continuité territoriale avec les stations du sud marocain où la présence de la tique *O. sonrai* a été rapportée (BALTHAZARD *et al.*, 1950).

## 2. Objectifs

Au regard des considérations évoquées ci-dessus, il apparaît, dès lors, intéressant de chercher à mieux comprendre l'épidémiologie de la borréliose à tiques en Afrique de l'Ouest et du Nord, pour indiquer l'importance de la prévalence de l'infection, puis cartographier pour la première fois et à vaste échelle la répartition géographique, les données des analyses génétiques des populations de tiques ornithodores collectées, étudier la situation

épidémiologique des sites prospectés et les relations avec l'environnement d'une maladie jusqu'à présent méconnue, dont nous voulons montrer et confirmer qu'elle constitue un problème majeur de santé publique pour de nombreux pays d'Afrique. Les travaux de notre mémoire de thèse s'inscrivent dans cette optique à travers des objectifs spécifiques consistant à :

☞ Matérialiser sur le terrain les limites sud et est de distribution des tiques *O. sonrai* en Afrique de l'Ouest et de préciser les contours de la zone de transition qui est associée au delta central et au bassin du fleuve Niger,

☞ Établir s'il existe une continuité territoriale de distribution géographique des tiques *O. sonrai* et de *B. crocidurae* entre la Mauritanie, le Sénégal et le Maroc où la tique *O. sonrai* a déjà été signalée, puis des tiques *Ornithodoros* entre l'est du Maroc et l'Algérie ainsi qu'entre l'est de l'Algérie et la Tunisie,

☞ Caractériser génétiquement les différentes populations de tiques *Ornithodoros* et des *Borrelia* dans l'ensemble de l'aire de répartition des ornithodores vecteurs et de leurs agents pathogènes,

☞ Comparer le fonctionnement génétique du système *Borrelia*/hôte/vecteur en zones sahélo-soudanienne et saharo-méditerranéenne en relation avec les modifications climatiques liées au déficit pluviométrique,

☞ Préciser les facteurs qui déterminent la répartition géographique et la fréquence de l'agent pathogène chez l'homme, la tique vectrice et les micro-mammifères réservoirs de la maladie,

☞ Déterminer les cas cliniques de borréliose dans une structure hospitalière à Kénitra au Maroc,

☞ Étudier le fonctionnement de la maladie en milieu rural à Dielmo et Ndiop, et dans les villages environnants pour proposer, en définitive, une stratégie de lutte préventive,

Les résultats de notre étude, obtenus à travers la réalisation de ces objectifs, interpellent et intéressent les cliniciens, les autorités sanitaires et publiques (décideurs), la communauté scientifique ainsi que les organisations non gouvernementales, et doivent encourager les décideurs des principaux pays à foyers de transmission de la borréliose à tiques, notamment ceux du Sénégal où elle a été plus étudiée, à prendre des mesures pour saisir l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) afin que cette maladie soit véritablement mentionnée sur la liste des maladies tropicales négligées (MTN ou NTD).

## **CHAPITRE II : MATÉRIEL ET APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE DE RECHERCHE**

## Chapitre II : Matériel et approche méthodologique de recherche

### 1. Plan d'étude des investigations longitudinales

#### 1-1. Échantillonnage de tiques ornithodores et des petits mammifères

##### 1-1-1. Compréhension épidémiologique de la distribution géographique de la borréliose à tiques

La première étude à vaste échelle sur la compréhension de la distribution géographique de la borréliose à tiques a été réalisée en Afrique de l'Ouest de 2003 à 2005 et les cercles bleus montrent les sites d'étude (Figure 28) ; puis elle a été approfondie de 2006 à 2014 dans différents sites (cercles oranges) étudiés dans des localités variées (Figure 28) en Afrique occidentale et maghrébine pour enfin répondre clairement à la question de savoir **Qui (Vecteur) transmet Quoi (Pathogène) Où et Quand ?**

Pour mieux comprendre la répartition géographique de la borréliose à tiques en Afrique occidentale sub-saharienne, des études en transect ont été réalisées selon les modalités suivantes (Figure 28) :

➤ Un transect Ouest-Est a été effectué au Sénégal et Mali le long du 14<sup>ème</sup> parallèle, en échantillonnant les terriers de rongeurs aux intersections des longitudes 15°30'W, 15°W, 14°30'W, 13°30'W, 12°30'W, 11°W, 9°30'W, 9°W, 7°W, 6°30'W, 5°30'W, 5°W, 4°30'W.

Chaque fois que la tique vectrice est présente à l'extrémité est de ce transect, cet échantillonnage a été poursuivi afin de déterminer la limite est de la répartition des tiques *O. sonrai*.

➤ Des études complémentaires ont également été effectuées au Mali pour mieux préciser la répartition géographique des tiques *O. sonrai*. Ces études ont été réalisées: (a) le long du fleuve Niger, aux latitudes 15°N, 15°30'N, 16°15'N, 16°30'N, 16°N et 17°N, (b) à l'intersection 15°N et 11°W au nord-ouest de Kayes.

### 1-1-1-1. Détermination de la limite est de répartition géographique des tiques *O. sonrai* et délimitation des foyers associés au bassin du Niger

Pour déterminer la limite est de répartition des tiques *O. sonrai* en Afrique de l'Ouest et délimiter les contours de la zone de transition qui est associée au delta central et au bassin du Niger, des études en transects ont été réalisées selon les modalités ci-après (Figure 28) :

- Trois transects Ouest-Est effectués le long des 15<sup>ème</sup>, 16<sup>ème</sup> et 17<sup>ème</sup> parallèles de la Mauritanie au Mali, en échantillonnant les terriers de rongeurs aux intersections des longitudes 10°W, 9°W, 8°30'W, 8°W, 7°30'W, 7°W, 6°30'W, 6°W, 05°30'W, 4°W et aux latitudes 15°30'N et 14°30'N au Mali.

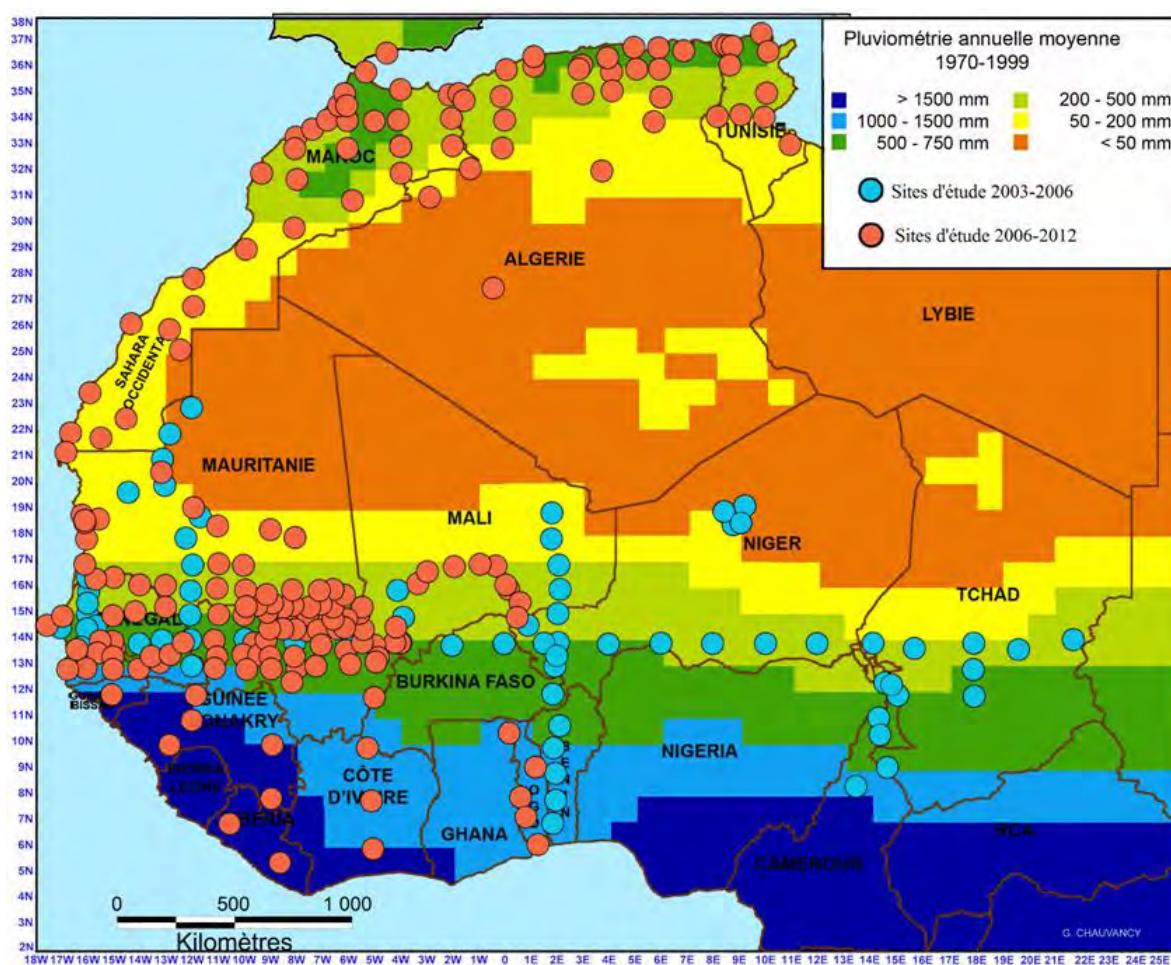


Figure 28 : Plan d'échantillonnage de tiques *Ornithodoros* en transects Ouest-Est, Nord-Sud, Sud-Nord et Sud-Ouest/Nord-Est, et isohyètes moyens (moyennes pluviométriques) en Afrique de l'Ouest et du Nord (MAHE *et al.*, 1999)

### 1-1-1-2. Détermination de la limite sud de répartition des tiques *O. sonrai*

Pour préciser la limite sud de répartition géographique des tiques *O. sonrai* en Afrique de l'Ouest, une étude en transect a été proposée comme suit (Figure 28) :

- Un transect Ouest-Est réalisé le long du 13<sup>ème</sup> parallèle et de la latitude 13°30'N au Sénégal, en Gambie et au Mali, et à la latitude 12°N au Burkina Faso, en échantillonnant les terriers de rongeurs aux intersections des longitudes 16°30'W, 16°W, 15°30'W, 15°W, 14°30'W, 14°W, 13°30'W, 13°15'W, 13°W, 12°30'W, 12°W, 11°W, 10°W, 9°30'W, 9°W, 8°W, 7°W, 6°W, 5°W et 4°30'W.
- Afin de prendre en compte la possibilité d'une distribution discontinue du vecteur en Guinée Bissau, Guinée Conakry, Côte d'Ivoire et au Libéria avec la présence d'un foyer relique dans le Fouta-Djalon et ailleurs, les sites 12°N et 15°W en Guinée Bissau, 12°N et 12°W, 11°N et 12°W, 10°N et 13°W, 10°N et 09°W, 08°N et 09°W, 10°N et 11°W, 11°N et 14°W en Guinée Conakry, 06°N et 05°W, 08°N et 05°W, 10°N et 05°W en Côte d'Ivoire, 07°N et 10°30'W, 05°30'N et 08°30'W au Libéria, ont été étudiés.
- Au Togo, il a été proposé de rechercher la présence de tiques *O. sonrai* aux intersections 10°30'N et 00°E, 09°15'N et 01°E, 08°N et 00°30'E, 07°15'N et 01°E, 06°15'N et 01°15'E, depuis la région nord des savanes (Dapaong), jusqu'aux environs de Lomé pour confirmer ou infirmer la présence de ces ornithodores et de l'agent pathogène *B. crocidurae* identifié chez des malades fébriles examinés dans des structures sanitaires de ce pays (NORDSTRAND *et al.*, 2007).

### 1-1-1-3. Recherche de l'existence d'une distribution continue des tiques *O. sonrai* entre le Sénégal et le Maroc, et des tiques *Ornithodoros* entre le Maroc et la Tunisie

- En Mauritanie, il a été proposé d'effectuer une étude en transect Sud-Nord le long du 16<sup>ème</sup> méridien ouest (Figure 28), en échantillonnant les terriers de rongeurs à chaque degré de latitude entre 17°N et 19°N, et aux intersections 21°N et 17°W, 19°N et 12°W, 18°45'N et 15°30'W, 18°30'N et 11°W, 18°30'N et 09°W puis 18°N et 08°W.



➤ Au Maroc, l'étude de la répartition géographique de la borréliose à tiques a été réalisée selon les modalités suivantes (Figure 28) :

❖ Un transect Sud-Nord et Sud-Ouest/Nord-Est en échantillonnant les terriers de rongeurs, entre 23°N et 35°N, aux intersections des longitudes 1°30'W, 2°W, 4°W, 6°W, 8°W, 10°W, 12°W et 13°W.

❖ Des enquêtes complémentaires dans le centre nord du pays, la partie nord-ouest et nord du littoral atlantique et méditerranéen aux intersections 23°30'N et 16°W, 26°15'N et 14°30'W, 31°45'N et 08°W, 32°N et 9°30'W, 33°30'N et 8°W, 34°15'N et 6°30'W, 34°30'N et 6°W, 34°30'N et 6°30'W, 35°N et 4°W, 36°N et 5°30'W, 33°N et 04°W, 33°N et 06°W, 33°N et 08°W, 33°30'N et 07°30'W, 34°N et 06°45'W, 34°N et 06°W, 34°N et 05°W, 34°N et 04°W, 35°N et 06°W.

➤ En Algérie, l'étude de la répartition géographique de la borréliose à tiques a été effectuée en échantillonnant les terriers des rongeurs le long du 6<sup>ème</sup> méridien Est au niveau des latitudes 36°45'N, 36°N, 35°N, 34°N, 33°N, sur les 37<sup>ème</sup>, 36<sup>ème</sup>, 35<sup>ème</sup>, 34<sup>ème</sup> et 33<sup>ème</sup> parallèles Nord à l'intersection des longitudes 08°30'E, 07°E, 05°E, 04°E, 03°E, 01°E, 00°E, 00°W, 01°30'W, 02°W, puis en échantillonnage complémentaire aux intersections 36°30'N et 04°E, 36°30'N et 01°E, 32°N et 03°45'E, 27°30'N et 00°30'W, 31°N et 02°45'W (Figure 28).

➤ En Tunisie, il a été prévu d'échantillonner les terriers de rongeurs entre le 08<sup>ème</sup> méridien Est et le 11<sup>ème</sup>, de 37°N à 33°N à l'intersection des longitudes 08°10'E, 08°40'E, 08°30'E, 09°E, 09°45'E, 10°E et 11°E (Figure 28).

#### **1-1-1-4. Méthodes d'échantillonnage des tiques ornithodores**

La collecte de tiques ornithodores a été réalisée à l'aide d'un aspirateur à feuilles modifié (type Ryobi) qui est relié à un tuyau souple d'un mètre et demi de longueur dont on introduit l'extrémité dans les terriers de rongeurs et insectivores sur une distance d'au moins 30 cm à 1,5 mètre de profondeur en milieu naturel et/ou d'au moins 20 cm à l'intérieur des habitations- pour y recueillir la litière. Le tuyau souple est fixé à un tamis en fer-filtre de 33 cm de long et 6,5 cm de diamètre construit avec un double filet de fer correctement soudé et

emboîté dans une modification en PVC pour permettre au filtre de garder et trier les grosses particules et les tiques.

Après l'examen d'un terrier, le contenu du tamis en fer-filtre et de l'extension en PVC est versé dans deux grands plateaux blancs inoxydables exposés au soleil pour que les tiques *Ornithodoros* soient en mouvement et puissent quitter le sable (Figure 29), puisque les tiques *Ornithodoros* sont photophobes et ne supportent pas les températures élevées. Le tamis en fer-filtre et l'extension en PVC sont fortement secoués dans un grand plateau blanc vide inoxydable pour s'assurer qu'aucune tique *Ornithodoros* reste encore attachée au tamis pour être transportée d'un terrier examiné à un autre. Cette pratique a été inspectée et validée comme fiable par l'équipe de gestion qualité de l'IRD certifiée à la norme ISO 9001 version 2008. Les tiques ainsi collectées ont été conservées en alcool à 95° pour leur caractérisation génétique et la recherche de borrélioses (*Borrelia*).

Un minimum de 30 terriers a été exploré dans chacun des sites d'échantillonnage sélectionnés avec si possible plusieurs types d'habitats prospectés. Dans le contexte spécial lié à l'Algérie et à la Tunisie, 5 à 15 terriers ont été le plus souvent examinés dans la plupart des sites où la présence de tiques ornithodores a été mise en évidence. Au Maroc, des sondages d'au moins une dizaine de terriers ont été réalisés dans les sites complémentaires étudiés. L'exploration d'au moins 30 terriers est obligatoire dans chaque site déclaré négatif au terme d'un échantillonnage prospectif.



Figure 29 : **A** : Échantillonnage d'un terrier en milieu naturel ; **B** : Retrait du tamis et versement de la litière du terrier dans deux grands plateaux blancs inoxydables

### 1-1-1-5. Méthodes d'échantillonnage des petits mammifères réservoirs

Des captures de rongeurs et insectivores ont été organisées (Figure 30), si possible, par piégeage en milieu naturel et/ou à l'intérieur des habitations ou par captures manuelles nocturnes respectivement en 2006, 2007, 2008, 2013 notamment :

- En Mauritanie, (a) le long du 20<sup>ème</sup> parallèle, entre le 13°30'W et le 13°W, (b) le long du 16<sup>ème</sup> méridien ouest, de 18°30'N à 16°30'N en transect Nord-Sud, (c) à l'intersection 19°30'N et 14°30'W puis 18°30'N et 15°30'W.
- Au Mali, (a) le long du 15<sup>ème</sup> parallèle, à l'intersection des longitudes 11°W, 10°30'W, 10°W et 09°30'W, (b) le long du 08<sup>ème</sup> méridien ouest, de 15°N à 14°N, (c) à l'intersection 14°30'N et 11°30'W.
- A Maroc dans les sites suivants : 24°N et 15°48'W, 28°N et 12°48'W, 28°30'N et 11°15'W, 29°N et 11°W, 29°N et 10°30'W, 30°N et 09°40'W, 30°30'N et 09°W, 31°30'N et 09°45'W, 32°N et 08°W.
- Au Sénégal, le long du 16<sup>ème</sup> méridien ouest à l'intersection des latitudes 13°43'N et 13°41'N.

Les données des petits mammifères antérieures à 2005 ont été prises en compte dans cette étude pour réaliser l'analyse exhaustive des facteurs qui déterminent la répartition géographique et la fréquence de l'agent pathogène chez l'homme, la tique vectrice et les micro-mammifères réservoirs de la borréliose à tiques (Figure 30). Il s'agit des collectes de petits mammifères effectuées entre 1990-1993 et en 2002 au Sénégal, et celles de 2003 et 2004 en provenance respective du Cameroun, Tchad, de la Mauritanie, du Mali, Niger et Bénin (Tableau I). Tous les animaux capturés ont été identifiés, pesés et mesurés (longueurs tête + corps, queue, oreille et patte postérieure). Leur état reproductif a été noté. Les prélèvements et analyses effectués ont été mentionnés (Tableau I).

Dans chaque site, les piégeages ont été effectués à l'aide de pièges en grillage métallique type BTS appâtés à la pâte d'arachide et à l'oignon. La méthode adoptée a été celle du piégeage en lignes (5 lignes de 20 pièges disposés pendant 1 à 3 nuits avec une distance inter-piège de 10 mètres).

Chaque fois que cela a été possible, des pièges Sherman permettant la capture de petits rongeurs tels que *Mus musculus* ont été également placés à l'intérieur des habitations. Dans les sites rocheux, des pièges Tomahawk de plus grande taille ont été utilisés pour tenter de capturer des gondis (*Felovia vae*). Les rongeurs étant principalement nocturnes, les piégeages ont été effectués de nuit. Cependant, les pièges ont été installés suffisamment tôt dans la soirée pour permettre la capture des espèces diurnes, notamment *A. niloticus*.

Des parcours nocturnes en voiture et à pied ont aussi été effectués pour capturer manuellement des espèces non piégeables telles que *J. jaculus*, *D. braueri*, *Nanomys* spp., et certaines gerbilles.

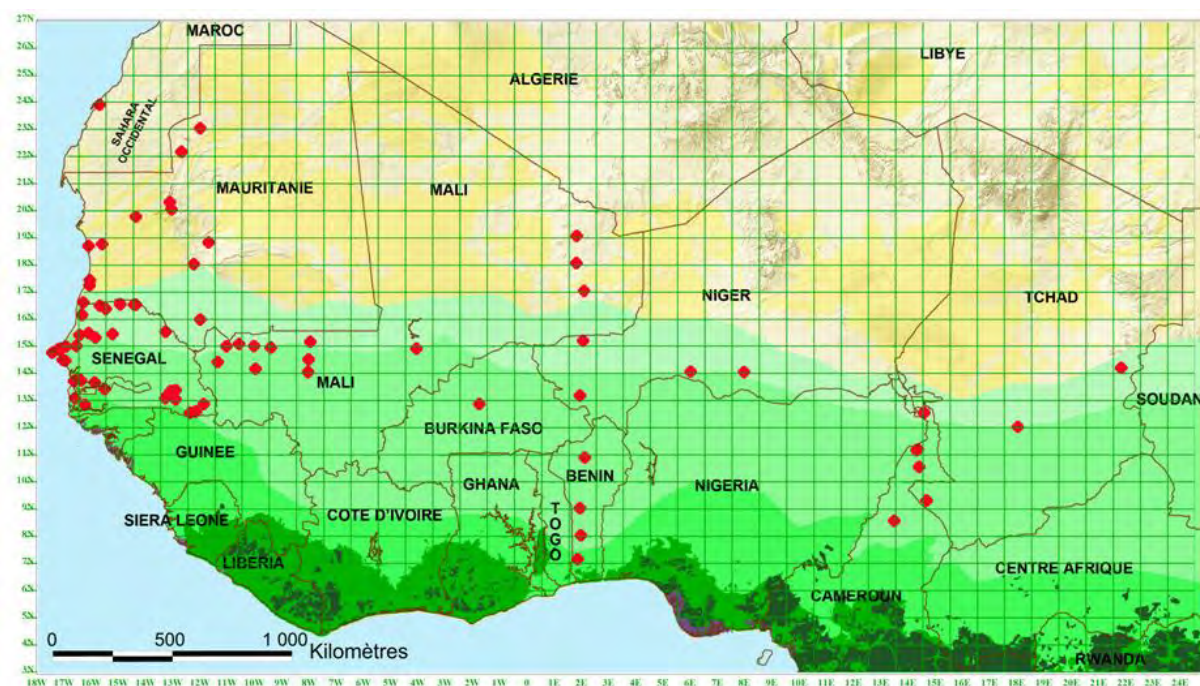


Figure 30 : Sites d'échantillonnage des rongeurs et insectivores en Afrique de l'Ouest subsaharienne et au Sahara occidental à Dakhla au MARoc

Tableau I : Type de prélèvements et d'analyses réalisés sur les petits mammifères capturés

| Pays de collecte | Année de collecte        | Type d'échantillon                                       | Méthode d'analyse des <i>Borrelia</i> |                          |                   |
|------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-------------------|
|                  |                          |                                                          | Goutte épaisse de sang (GE)           | Inoculation souris       | Amplification PCR |
| Maroc            | Novembre - Décembre 2008 | Sang ; Cerveau conservé en alcool 95°                    | GE                                    | -                        | PCR               |
| Mauritanie       | Octobre 2003             | Sang et cerveau conservés en azote liquide/ puis à -80°C | GE                                    | Inocula. sang et cerveau | -                 |
|                  | Octobre - Novembre 2006  | Sang; Cerveau conservé en alcool 95°                     | GE                                    | -                        | -                 |
| Sénégal          | 1990 - 1993              | Sang                                                     | GE                                    | -                        | -                 |
|                  | Mars 2002                | Sang et cerveau frais                                    | GE                                    | Inocula. sang et cerveau | -                 |
|                  | Février 2013             | Cerveau frais                                            | -                                     | -                        | PCR               |
| Mali             | Janvier - Février 2004   | Sang et cerveau conservés en azote liquide/ puis à -80°C | GE                                    | Inoculation cerveau      | -                 |
|                  | Octobre - Novembre 2007  | Sang ; Cerveau conservé en alcool 95°                    | GE                                    | -                        | -                 |
| Niger            | Janvier - Février 2004   | Sang et cerveau conservés en azote liquide/ puis à -80°C | GE                                    | Inoculation cerveau      | -                 |
| Benin            | Janvier - Février 2004   | Sang et cerveau conservés en azote liquide/ puis à -80°C | GE                                    | Inoculation cerveau      | -                 |
| Tchad            | Janvier - Février 2003   | Sang et cerveau conservés en azote liquide/ puis à -80°C | GE                                    | Inoculation cerveau      | -                 |
| Cameroun         | Janvier - Février 2003   | Sang et cerveau conservés en azote liquide/ puis à -80°C | GE                                    | Inoculation cerveau      | -                 |

## **1-1-2. Analyses des échantillons biologiques collectés**

### **1-1-2-1. Analyses des tiques ornithodores**

Au laboratoire, chaque tique collectée conservée en alcool 95° a été examinée à la loupe binoculaire pour sa détermination spécifique à Dakar, puis à Montpellier par le Docteur Jean Louis CAMICAS. Les tiques attribuables morphologiquement à la tique *O. sonrai* et/ou à *O. erraticus* ont été traitées et ont servi aux études de recherche d'une infection due à *Borrelia* et au génotypage des populations de vecteurs. Une étude génétique micro- et macro-géographique des populations naturelles de tiques *Ornithodoros* a ainsi été effectuée à l'aide de marqueurs microsatellites. Après extraction de l'ADN des tiques selon le protocole du kit DNA easy tissue (Quiagen), le génotypage a été réalisé par amplification de loci microsatellites sur séquenceur automatique monopillaire (Applied Biosystems) et l'analyse des données a été faite à l'aide de logiciels génétiques appropriés (Fstat, Genopop, HierFstat). La recherche d'une infection par *B. crocidurae*, *B. hispanica* et/ou *B. merionesi* a été effectuée par PCR nichée avec le gène de la flagelline de tiques des échantillons de toutes les stations positives pour les tiques *Ornithodoros*. La variabilité génétique des individus de tiques a été estimée par le séquençage du gène 16S rDNA, et des borrelies (*Borrelia*) par le séquençage d'un fragment du gène 16S-23S de l'espace inter-génique (IGS) et/ou de la compilation des gènes flagelline + IGS.

### **1-1-2-2. Analyse des données pédologiques collectées**

Des échantillons de sol prélevés dans chaque site et station étudiés ont été analysés pour connaître les caractéristiques pédologiques du milieu (DIATTA, 2005), facteurs pouvant influencer sur l'installation des ornithodores vecteurs dans la nature.

### **1-1-2-3. Analyse des échantillons de rongeurs et d'insectivores capturés**

Des gouttes épaisses de sang confectionnées au moment de l'autopsie des rongeurs ont été colorées au Giemsa et 200 champs microscopiques étaient systématiquement examinés (soit 0,5µl de sang) pour rechercher des *Borrelia*. Des prélèvements de sang sur séro-buvards et/ou d'organes suspects (cerveau, foie ou rate) conservés à l'éthanol ont été réalisés afin de détecter des borrelies (*Borrelia*) par PCR.

Toutefois, seuls les cerveaux de tous les animaux capturés au Maroc en 2008 et au Sénégal en 2013, ont été testés pour *Borrelia* par amplification PCR.

La détermination spécifique des petits rongeurs capturés a été confirmée si nécessaire par l'étude du crâne, l'analyse moléculaire des échantillons de tissus préservés dans l'alcool et l'étude chromosomique des spécimens conservés vivants.

### **1-1-3. Analyse des relations climat/borréliose/environnement**

La base des données environnementales sur l'Afrique de l'Ouest et du Nord disponible à l'IRD a permis l'analyse intégrée des relations borréliose/environnement à partir du relevé de paramètres climatiques (pluviométrie, température et hygrométrie). Les données environnementales recueillies dans chaque station étudiées ont été analysées (pédologie, hydrographie, végétation, géomorphologie). Les différents types d'écosystèmes (semi-désertique saharien, saharo-méditerranéen, saharo-sahélien et sahélien, sahélo-soudanien et soudanien, du littoral atlantique et méditerranéen) et leurs biotopes explorés ont été appréhendés en vue de montrer leur impact sur la diversité phylogénétique des populations de tiques ornithodores et le polymorphisme génétique identifié au sein de l'espèce *B. crocidurae*.

L'exécution du plan d'échantillonnage nous a permis d'établir avec précision (au demi-degré carré) les limites est et sud de répartition géographique de la borréliose à tiques en Afrique de l'Ouest. Il a ainsi été possible d'approfondir l'analyse des paramètres climatiques et environnementaux favorables associés à la distribution observée, et d'examiner en particulier que l'isohyète 750 mm dont le déplacement vers le sud- avait été associé au Sénégal à l'extension de l'aire de distribution de la tique *O. sonrai* entre 1970 et 1990- constitue toujours actuellement la limite sud du vecteur dans l'est du Sénégal et que cette même limite a été observée au Mali malgré des différences pédologiques et géomorphologiques importantes à latitude égale entre ces deux pays.

Pour ce qui concerne la limite est de répartition de la tique *O. sonrai* et la zone de transition qui semble exister dans la partie centrale de l'Afrique de l'Ouest, il a été possible de tester l'hypothèse que la plus grande hygrométrie de saison sèche et la plus grande fréquence des pluies de contre-saison qui sont observées au Sénégal, en Mauritanie et dans l'ouest du Mali pourraient être à l'origine des différences de répartition de cette tique *O. sonrai* au nord de l'isohyète 750 mm en Afrique occidentale et centrale, et que l'humidité de saison sèche associée aux grands réseaux hydrographiques du bassin du Niger ainsi que les paramètres

pédologiques favorables pourraient en outre permettre le maintien localisé du vecteur dans la partie centrale et orientale de l'Afrique de l'Ouest au nord de l'isohyète 750 mm.

## **1-2. Analyse des données descriptives et analytiques**

### **1-2-1. Analyse des données descriptives**

Dans chaque site étudié le rapport du nombre de terriers infestés de tiques *Ornithodoros* sur le nombre total de terriers examinés permet de déterminer la proportion de l'infestation. L'ensemble des terriers infestés de tiques ornithodores dans un pays divisé par la totalité des terriers explorés donne la proportion globale de l'infestation des terriers. Pour chaque pays, le rapport de la somme de tous les terriers positifs pour les tiques ornithodores sur le nombre total des sites étudiés détermine la moyenne de terriers infestés. A partir de la moyenne de terriers infestés déterminée par pays, nous avons calculé l'écart-type correspondant afin de comparer le niveau de dispersion des tiques *Ornithodoros* dans les différents pays où leur présence a été démontrée.

### **1-2-2. Analyse des données analytiques**

Toutes les analyses ont utilisé OpenEpi.com, version 3.01 mise à jour le 06 Avril 2013 et consultée le 25 Juin 2016 (DEAN *et al.*, 2013). En utilisant la distribution de Wilson, un intervalle de confiance (IC) à 95%, pour chaque espèce de petits mammifères étudiée, a été calculé et sert à définir l'infection par un taux probable ou négatif. Les variations de la prévalence de l'infestation des terriers par pays ont été estimées en utilisant un test du Khi-2 (sur tableaux de contingence) et des mesures d'association. Aussi, les variations de la prévalence de l'infection à *Borrelia* chez les petits mammifères ont été évaluées entre les espèces et en fonction de la moyenne annuelle de pluviométrie à partir des données des classes pluviométriques ci-après pour la période 1970-1999 (MAHE *et al.*, 1999) : > 50 mm, entre 50-250 mm, 250-500 mm et 500-750 mm. Pour la comparaison des variations de l'infestation des terriers par les tiques *Ornithodoros* entre les pays et des variations de la prévalence des infections à *Borrelia* chez les petits mammifères, un test du Khi-2 corrigé de Yates, Fisher exact ont été utilisés, et le test est significatif si  $p < 0,05$ .



### **1-3. Étude des cas cliniques à l'Hôpital Provincial de Kénitra au Maroc et étude fonctionnelle de la borréliose à Dielmo-Ndiop et dans les villages environnants au Sine-Saloum, Sénégal et stratégie de lutte préventive de la maladie**

#### **1-3-1. Cas de borréliose diagnostiqués chez des consultants fébriles à l'Hôpital Provincial de Kénitra, au Maroc**

La plaine du Gharb constituait jusqu'à récemment un important foyer de paludisme, au Maroc. Pour cette raison une surveillance de cette maladie continue à être effectuée au Laboratoire de Diagnostic du Paludisme de l'Hôpital Provincial de Kénitra. Des gouttes épaisses provenant de malades fébriles de l'ensemble de la région de Kénitra sont régulièrement adressées à ce laboratoire. Outre la présence de *Plasmodium*, la présence de *Borrelia* a été recherchée et le résultat mentionné sur les registres de laboratoire durant la période 2000-2005. Nous avons analysé ces registres qui ont permis de préciser la fréquence de la maladie chez l'homme (DIATTA *et al.*, 2012) dans cette région du Maroc.

#### **1-3-2. Étude fonctionnelle de la borréliose à tiques à Dielmo-Ndiop et dans les villages environnants au Sine-Saloum, Sénégal et stratégie de lutte préventive de la maladie**

##### **1-3-2-1. Comment distinguer les malades fébriles atteints de paludisme à ceux de la borréliose?**

L'infection à *Borrelia* détectée chez des malades fébriles sur une goutte épaisse (GE) de sang colorée au Giemsa a souvent été associée aux parasites du paludisme depuis le début du Projet Dielmo-Ndiop (TRAPE *et al.*, 1996a; VIAL *et al.*, 2006).

Le suivi de cette association parasitaire *Plasmodium/Borrelia* chez les patients fébriles a été quotidiennement effectué à Dielmo de 1990 à 2013. Dans la prise en charge des patients fébriles, une approche diagnostique doit être connue du clinicien afin de pouvoir distinguer les cas de fièvre liés au paludisme à ceux de la borréliose à tiques. Il est très difficile de distinguer les deux maladies par une approche clinique en raison de leurs signes et symptômes similaires, et les cas de borréliose sont régulièrement confondus avec le paludisme.

Tout patient ayant une forte fièvre de plus de deux jours chez les adultes ou ayant développé des épisodes de fièvre répétés chez tous les groupes d'âge doit être systématiquement suspect pour la borréliose à tiques. Ensuite, le diagnostic de laboratoire devra être réalisé si possible en utilisant, i) la technique de la goutte épaisse (GE) de sang, également utilisée pour rechercher les hématozoaires du paludisme, mais la densité des *Borrelia* est très faible dans le sang (0-10 par 200 champs d'huile à immersion) pour la borréliose à tiques d'Afrique de l'Ouest due à *B. crocidurae*, en général 10 fois plus élevées pour celle d'Afrique de l'Est due à *B. duttonii*, ii) l'inoculation intra-péritonéale de 0,5cc de sang du patient suspect à deux souris blanches qui une méthode très sensible (DIATTA *et al.*, 1994) ou éventuellement par la méthode PCR lorsque cet outil est disponible.

### **1-3-2-2-. Échantillonnage de tiques ornithodores dans les villages environnants et caractérisation de la limite sud d'extension**

En Février 2014 et Mars 2013, des tiques ornithodores ont été échantillonnées dans des terriers de rongeurs entre 13°50'N et 13°40'N de 16°28'W à 16°15'W à chaque degré de latitude et de longitude pour compléter l'échantillonnage effectué en 2002 et 2003 comme mentionné précédemment (TRAPE *et al.*, 2013), et de fournir une meilleure compréhension de la distribution des tiques *O. sonrai* dans la zone. Pour chaque village échantillonné, 30 à 50 terriers de petits rongeurs ont été étudiés (30 terriers et 20 autres supplémentaire au cours des études de 2002 et 2003 dans les localités comprises entre 13°46'N et 13°41'N de 16°28'W à 16°23'W, puis dans des enquêtes supplémentaires en limite sud de progression des ornithodores le long de la latitude 13°37'N à l'intersection des longitudes 16° 25'W, 16°23'W, 16°21'W, 16°17'W, 16°15'W et 16°14'W ; 30 terriers de rongeurs ont également été échantillonnés quand un ou plusieurs étaient positifs pour déterminer la distribution nord des tiques ornithodores à l'intersection 13°46'N et 16°28'W à Toubacouta, puis long de la latitude 13°46'N de 16°22'W à 16°15'W ; de plus seulement 30 terriers de rongeurs échantillonnés entre 13°45'N et 13°40'N de 16°22'W à 16°20'W et à 16°27'W dans les villages proches des bassins du Diaban et Djikoye pour spécifier la limite sud des tiques ornithodores. C'est seulement dans certaines localités positives, comprises entre 13°45'N et 13°42'N, où 1 à 15 terriers de rongeurs ont été examinés rapidement. Tous les spécimens collectés ont été conservés dans l'éthanol absolu (un tube par terrier positif) jusqu'à la détermination morphologique et l'analyse de laboratoire, excepté deux terriers positifs où les individus de tiques ont été gardés en vie pour l'élevage.

### 1-3-2-3. Sites de l'étude

Des enquêtes démographiques récentes de l'Institut Pasteur de Dakar (JF, données non publiées), indiquent que les villages de Ndiop ( $13^{\circ}41'N-16^{\circ}23'W$ ) et de Dielmo ( $13^{\circ}43'N-16^{\circ}24'W$ ), au Sine-Saloum, comptent respectivement 510 et 481 habitants (Figure 31 A et B). Le village de Ndiop se trouve au sud de Dielmo qui est situé à 280 km au sud-est de Dakar. La végétation et le climat associés à ces deux villages correspondent à la zone de savane soudanienne. Les précipitations se produisent sur une période de quatre mois, à partir de fin Juin à mi-Octobre. Ndiop village est peuplé par les Wolof, alors que Dielmo est peuplé par les Sérères. Les maisons sont généralement construites en briques de banco consolidées avec ou sans enduit de ciment, et le sol en terre battue est non cimenté dans la plupart des foyers. Dans les deux villages, l'élevage est une activité familiale. L'agriculture est la principale activité au cours de la saison des pluies et s'étend à travers la saison sèche par le maraîchage qui est devenu plus fréquent.

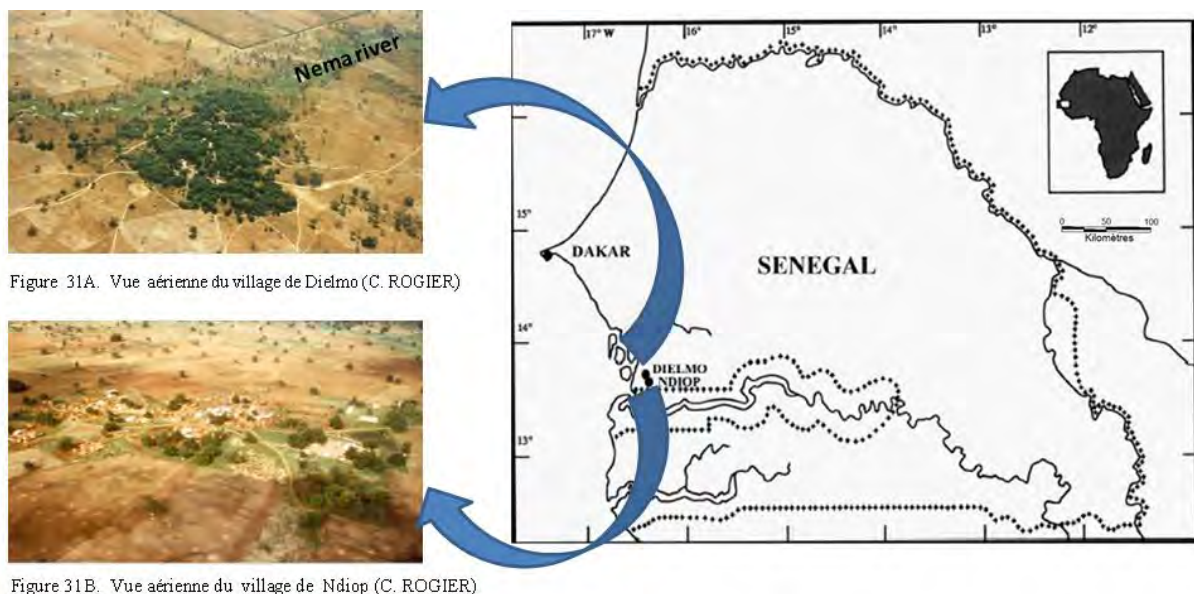


Figure 31 : Présentation des villages de Dielmo (A) et Ndiop (B) en vues aériennes (C. ROGIER)

### 1-3-2-4. Population suivie

Un suivi médical quotidien et épidémiologique de la population de Dielmo et Ndiop (Sine-Saloum, Sénégal) a été réalisé respectivement depuis 1990 et 1993, et un dispensaire a été mis en place dans chaque village.

Deux infirmiers et deux techniciens qui changent tous les 15 jours, puis quatre enquêteurs permanents sont présents tous les jours (7 jours/7 jours). Tous les patients fébriles avec une température axillaire  $> 37,5^{\circ}\text{C}$  sont consultés par l'infirmier de chaque village. Toutes les maisons de concession de chaque village sont visitées quotidiennement par les enquêteurs de terrain. De 1990 à 2010, la technique de la goutte épaisse a été utilisée pour détecter principalement le paludisme et les *Borrelia* chez tous les cas de fièvre suivis médicalement dans les deux villages. Cependant, depuis 2011, cette technique de goutte épaisse a été en outre renforcée par un point-of-care (POC), qui est un laboratoire de diagnostic moléculaire installé à Dielmo (destiné aux deux villages) pour rechercher les infections à *Borrelia*, *Plasmodium falciparum*, rickettsies ou d'autres agents pathogènes responsables de fièvre par la PCR en temps réel (qPCR), afin de permettre une prise en charge rapide des malades (SOKHNA *et al.*, 2013).

#### **1-3-2-5. Définition des cas de borréliose**

Nous avons considéré comme cas de borréliose tout patient ayant développé, i) une fièvre avec une température axillaire  $> 37,5^{\circ}\text{C}$ , associée ou non par d'autres signes cliniques, et ii) qui porte une infection à *Borrelia* identifiée dans le sang soit au microscope ou par des analyses de biologie moléculaire. Les critères d'identification moléculaire comprenaient deux méthodes positives qPCR (*Borrelia*-spécifique et *B. crocidurae*-spécifique).

#### **1-3-2-6. Échantillonnage de tiques ornithodores dans les terriers de rongeurs à Dielmo et Ndiop**

Des tiques *Ornithodoros* ont été collectées, en Janvier 2012, dans des terriers à l'intérieur des habitations de Ndiop et puis de Dielmo (Figure 32) comme il a été rapporté ultérieurement (TRAPE *et al.*, 2013), pour évaluer le niveau des infestations de tiques. A Ndiop, l'échantillonnage a été effectué tout d'abord dans les maisons des patients qui ont développé une infection à *Borrelia* en 2011, puis dans les autres habitations afin de déterminer le risque d'exposition (MATHIS, 1948; DIATTA *et al.*, 2016). Les tiques ont été collectées selon le procédé décrit précédemment. Tous les spécimens de tiques ont été conservés vivants à la température ambiante dans des pots de 125 ml à bouchons perforés. Après la collecte, les tiques vivantes ont été stockées dans un dessiccateur contenant une solution d'hydroxyde de potassium à une humidité relative de 68-70%.

Les tiques *Ornithodoros* collectées ont été identifiées selon des critères morphologiques de base (SAUTET *et al.*, 1944) et attribuées à la tique *O. sonrai*. Après que des garanties de sécurité aient été fournies au transporteur par le Centre collaborateur de l'OMS de Marseille, tous les échantillons de tiques vivantes ont été envoyés à l'URMITE à Marseille, en France, pour des analyses de biologie moléculaire. Les tiques provenant de quatre terriers d'une concession du village de Ndiop et deux autres terriers de deux concessions de Dielmo ont été utilisées pour gorger des souris blanches afin de démontrer la transmission de *Borrelia* à Ndiop.



Figure 32 : Terriers examinés et collecte de tiques *O. sonrai* à Ndiop et Dielmo villages, Janvier 2012

#### **1-3-2-7. Stratégie de lutte préventive de la borréliose à Dielmo-Ndiop et mesures d'accompagnement mises en oeuvre**

La stratégie de lutte préventive de la borréliose a été initiée en Mars 2013, pour améliorer les conditions d'habitat intra-domiciliaire par le cimentage de toutes les chambres et dépendances à fréquentation humaine élevée ou des terriers de rongeurs dans les habitations où le sol était déjà cimenté, afin d'éviter le risque et la fréquence des contacts humains avec des tiques. Avant de cimenter, les facteurs de risque ont été identifiés et comptés dans les chambres prioritaires de toutes les habitations de chaque ménage pour comprendre le risque d'exposition humaine aux tiques *O. sonrai*. Les facteurs de risque comprenaient la présence de terriers et d'anfractuosités intra-domiciliaires pouvant abriter les tiques ornithodores. Le ciment a été acheté chez un concessionnaire local, ainsi que le raticide granulé. Le cimentage et le suivi des actions prises ont été réalisés par les maçons recrutés dans chaque village, et chargés également de traquer la réapparition de terriers et anfractuosités afin d'éviter l'émergence des facteurs de risque.

Des réunions ont été organisées dans chaque village pour demander à chaque chef de ménage d'être impliqué lors de l'intervention en fournissant suffisamment de sable, de gravier et de l'eau, tandis que le ciment a été fourni par le laboratoire URMITE de l'IRD Dakar. Des mesures d'accompagnement consistaient à i) capturer les rongeurs et insectivores à l'intérieur des maisons avec une colle liquide non toxique, ii) placer un raticide granulé à l'intérieur des terriers ouverts, iii) traiter occasionnellement des termitières détruites pendant l'intervention avec un insecticide en poudre, iv) suivre systématiquement l'état du sol cimenté et les terriers de rongeurs réapparus pour les remblayer avec du ciment, et v) organiser des réunions de sensibilisation et de formation des femmes des deux villages sur les mesures d'hygiène visant à éradiquer la promiscuité liée à la borréliose et de les incitant à s'approprier la stratégie d'intervention mise en oeuvre.

#### **1-3-2-7-1. Évaluation des coûts de la stratégie mise en oeuvre**

Les coûts ont été évalués sur la période complète de l'intervention de mise en place, c'est à dire, de Mars 2013 au 30 Septembre 2015. L'évaluation des coûts a pris en compte les perspectives de prévention sanitaire du gouvernement. Les coûts suivants ont été considérés : les coûts de ciment, le salaire des maçons, les frais de la colle liquide non toxique pour capturer les petits mammifères et le coût du raticide granulé, ainsi que les coûts pour le suivi et la supervision de terrain, y compris le salaire du superviseur, le transport et les coûts des appels téléphoniques. Ensuite, nous avons calculé le coût total comme la somme de toutes les ressources individuelles de soins de santé utilisés par les participants multiplié par le coût unitaire de ces ressources ainsi que le coût par infection évitée.

#### **1-3-2-7-2. Méthodes d'analyse statistique**

Le suivi quotidien des habitants de Dielmo sur la survenue des épisodes fébriles depuis 1990 a montré que les cas de borréliose ont été détectés dès le début du Projet, alors qu'à Ndiop les cas autochtones semblaient apparaître en Octobre 2010. L'unité statistique utilisée dans l'enquête était la personne-année. L'incidence (exprimée en personne-temps) a été calculée chaque année en utilisant le nombre de cas de borréliose diagnostiqués multiplié par le nombre de jours-année (365,25) divisé par le nombre de jours-personnes de la surveillance.

Les cas de borréliose diagnostiqués ont été identifiés avant le cimentage, et l'incidence annuelle moyenne correspondante calculée dans chaque village (sachant qu'à Ndiop, seulement l'année 2009, où aucun cas de borréliose n'était détecté, doit être considérée comme une année d'exposition pour la population à développer la maladie). La moyenne des cas de borréliose avant et pendant l'intervention a également été calculée. Pour la comparaison entre l'incidence moyenne observée avant et en cours de la période d'intervention, un test du Khi-2 (sur tableaux de contingence) adapté aux données exprimées en personnes -temps a été utilisé. Le risque relatif (RR) de développer la borréliose a été estimé dans chaque village, selon les données de personnes-temps calculées, et l'intervalle de confiance à 95% correspondant (IC) a été déterminé. La fraction préventive du risque dans chaque village a ensuite été évaluée à partir de la valeur du risque relatif estimé.

## **CHAPITRE III : RÉSULTATS**



## Chapitre III : Résultats

### 1. Compréhension épidémiologique de la répartition géographique de la borréliose à tiques en Afrique de l'Ouest et du Nord

#### 1-1. Présentation de l'étude

L'étude longitudinale, 2003-2005, sur la répartition géographique de la borréliose à tiques en Afrique occidentale et centrale présentée par les travaux de DIATTA (2005), a été poursuivie puis approfondie de 2006 à 2014 par des investigations et d'autres enquêtes complémentaires de terrain afin de mieux comprendre l'épidémiologie de cette maladie zoonotique et de répondre clairement à la question de savoir **Qui (Vecteur) transmet Quoi (Pathogène) Où et Quand**. L'échantillonnage de tiques ornithodores a été réalisé, soit à l'intérieur des habitations humaines ou en milieu naturel et/ou zone de cultures, selon les modalités prévues dans onze pays d'Afrique de l'Ouest (Sénégal, Gambie, Mauritanie, Mali, Guinée Bissao, Burkina Faso, Niger, Togo, Guinée Conakry, Libéria, Côte d'Ivoire), trois d'Afrique du Nord (Maroc, Algérie, Tunisie) et dans le sud de l'Espagne (à Torremolinos) non loin de Gibraltar où les premières études sur la fièvre récurrente à tiques en Europe ont été conduites par DE BUEN (1926). Les résultats globaux de cette étude longitudinale, compilés à ceux de nos travaux antérieurs (DIATTA, 2005), qui ont permis de mettre en évidence la présence ou l'absence de tiques ornithodores dans les sites étudiés ont fait l'objet d'une publication (TRAPE *et al.*, 2013) parue dans la revue PLoS ONE (Article 1). Nous présentons ci-dessous les résultats de cette étude, puis décrivons de façon détaillée, par pays, les principaux foyers de distribution spatiale et transmission possible de la borréliose à tiques en apportant des précisions sur les limites sud et est de répartition des ornithodores vecteurs.



→ 20 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Koulor (13°58'N-13°24'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 14°N et 13°W**

**Environs de Bala, Sénégal**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés dans les habitations du village de Kouthia (14°04'N-13°08'W). 12 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 40%.

❖ **Intersection 14°N et 12°30'W**

**Environs de Koussane, Sénégal**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Didé (13°58'N-12°20'W). 22 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 73,3%.

**1-2-1-2. Enquêtes en limite sud de progression des ornithodores vecteurs**

❖ **Intersection 13°30'N et 16°W**

**Environs de Nioro du Rip, Sénégal**

→ 17 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Saboya (13°37'N-16°04'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°N et 16°W**

**Environs de Bignona, Sénégal**

→ 30 terriers de rongeurs (milieu naturel =23, zone de cultures =7) ont été examinés dans les environs de Djiro Mantoro (13°02'N-16°02'W) et (13°01'N-16°02'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 13 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Mandéra (13°37'N-16°03'W). Aucun terrier ne présentait *O. Sonrai*.

❖ **Intersection 13°N et 16°30'W**

**Environs de Diouloulou, Sénégal**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel dans les environs d'Abéné (12°59'N-16°44'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°N et 15°W**

**Environs de Kolda, Sénégal**

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Saré Rawnadjidéré (13°01'N-15°00'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

→ 20 terriers de rongeurs (milieu naturel =2, zone de cultures =18) ont été examinés dans les environs de Saré Rawnadjidéré (13°01'N-15°00'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°30'N et 15°W**

**Environs de Pata, Sénégal**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Sinthiou Djidé (13°28'N-15°00'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°30'N et 15°30'W**

**Environs de Nioro du Rip, Sénégal**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel à végétation de *Combretum* sp et *Guiera senegalensis* dans les environs de Keur Ayip (13°35'N-15°37'W). 12 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 80%.

❖ **Intersection 13°N et 14°W**

**Environs de Kounkané, Sénégal**

→ 5 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations des villages de Mballocounda Woudou (13°00'N-14°01'W) et Teyeul Farig (13°01'N-14°02'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

→ 25 terriers de rongeurs (milieu naturel =8, zone de cultures =17) ont été examinés dans les environs de Mballocounda Woudou (13°00'N-14°01'W, 13°00'N-14°02'W) et Teyeul Farig (13°01'N-14°02'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°30'N et 14°W**

**Environs de Koussanar, Sénégal**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur de toutes les habitations et en péri-domiciliaire du village de Douta Passi (13°37'N-14°01'W). Aucun terrier ne présentait *O. Sonrai*.

❖ **Intersection 13°30'N et 14°30'W**

**Environs de Koumpentoum, Sénégal**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur de toutes les habitations et en péri-domiciliaire du village de Silamé (13°38'N-14°27'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°15'N et 13°W**

**Environs de Tambacounda, Sénégal**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Dar Salam (13°15'N-13°12'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°30'N et 13°W**

**Environs de Bala, Sénégal**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Diana (13°32'N-12°51'W). 25 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 83,3%.

❖ **Intersection 13°30'N et 13°30'W**

**Environs de Tambacounda, Sénégal**

→ 19 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Missira (13°31'N-13°30'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 11 terriers de rongeurs (milieu naturel = 7, zone de cultures = 4) ont été examinés dans les environs de Missira (13°31'N-13°31'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°30'N et 12°W**

**Environs de Koussane, Sénégal**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Sadatou (13°38'N-12°14'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°30'N et 12°30'W**

**Environs de Koussane, Sénégal**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Bokolako (13°36'N-12°32'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

**1-2-1-3. Enquêtes complémentaires**

❖ **Intersection 16°30'N et 15°W**

**Environs de Dagana, Sénégal**

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Tiolé (16°29'N-15°00'W). 5 étaient infestés par *O. sonrai* ssp., soit un taux d'infestation de 50%.

❖ **Intersection 16°N et 14°W**

**Environs de Podor, Sénégal**

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel dans les environs de Mbouba (16°11'N-14°00'W). Tous étaient infestés par *O. sonrai* ssp., soit un taux d'infestation de 100%.

❖ **Intersection 15°30'N et 13°W**

**Environs de Matam, Sénégal**

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel dans les environs d'Amadi Ounaré (15°21'N-13°01'W). 4 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 40%.

❖ **Intersection 15°N et 17°W**

**Environs de Thiès, Sénégal**

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel dans les environs de Noto (15°00'N-17°01'W). 3 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 30%.

❖ **Intersection 15°N et 15°W**

**Environs de Linguère, Sénégal**

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel dans les environs de Tiel (15°00'N-15°01'W). 8 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 80%.

❖ **Intersection 15°N et 14°W**

**Environs de Matam, Sénégal**

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel dans les environs de Ranérou (15°09'N-14°10'W). 5 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 50%.

❖ **Intersection 14°45'N et 17°30'W**

**Environs de Dakar, Sénégal**

→ 12 terriers de rongeurs ont été examinés dans le domaine du Centre IRD de Hann (14°43'N-17°25'W). 10 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 83,3%.

→ 18 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel et dans le site touristique du Parc zoologique et forestier de Hann (14°43'N-17°25'W). 13 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 72,2%.

Sur 30 terriers de rongeurs échantillonnés dans la zone de Hann, 23 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation globale de 76,6%.

❖ **Intersection 13°41'N et 16°22'W**

**Environs de Toubacouta, Sénégal**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Ndiop (13°41'N-16°22'W). 9 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 30%.

❖ **Intersection 13°43'N et 16°24'W**

**Environs de Toubacouta, Sénégal**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Dielmo (13°43'N-16°24'W). 10 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 33,3%.

**1-2-2. Enquêtes menées en Gambie**

❖ **Intersection 13°30'N et 15°30'W**

**Environs de Farafenni, Gambie**

→ 24 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire et en milieu naturel du village de Lansar (13°35'N-15°37'W). 14 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 58,3%.

❖ **Intersection 13°46'N et 14°58'W**

**Environs de Kuntaur, Gambie**

→ 6 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Diobène «Joben» (13°46'N-14°58'W). Un seul terrier était infesté par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 16,6%.

**1-2-3. Enquête menée en Guinée Bissau**

❖ **Sur le 15<sup>ème</sup> parallèle**

**Environs de Bafata, Guinée Bissau**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel dans les environs du village d'Erkunda non loin de la ville de Bambadinca (12°01'N-14°57'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

#### 1-2-4. Enquêtes menées en Guinée Conakry

##### ❖ Sur le 12<sup>ème</sup> parallèle      **Environs de Madina Salambandé, Guinée Conakry**

→ 27 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Dima ou Pont Gambie (12°00'N-11°49'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

→ 13 terriers de rongeurs (milieu naturel = 10, zone de cultures = 3) ont été examinés dans les environs de Dima ou pont Gambie (12°00'N-11°49'W) et (12°01'N-11°49'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 12 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Karakara (12°02'N-11°49'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

→ 8 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Diraoudé (11°57'N-11°50'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

##### ❖ Sur le 11<sup>ème</sup> parallèle      **Environs de Kankalabé, Guinée Conakry**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de N'Dantaba (11°02'N-11°56'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Siréya (11°02'N-11°58'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

##### ❖ Sur le 11<sup>ème</sup> parallèle      **Environs de Koundara, Guinée Conakry**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Kunda (10°50'N-13°48'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

##### ❖ Sur le 10<sup>ème</sup> parallèle      **Environs de Kindia, Guinée Conakry**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel dans le domaine privé de l'Institut Pasteur de Guinée «Pastoria», Kindia (10°05'N-12°50'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.



❖ **Sur le 10<sup>ème</sup> parallèle** **Environs de Kankan, Guinée Conakry**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Kalankalan (10°06'N-08°53'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Sur le 10<sup>ème</sup> parallèle** **Environs de Faranah, Guinée Conakry**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Yatia (10°01'N-10°58'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

❖ **Sur le 08<sup>ème</sup> parallèle** **Environs de N'Zérékoré, Guinée Conakry**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Oueyé (08°02'N-08°56'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

#### **1-2-5. Enquêtes menées au Libéria**

❖ **Intersection 07°N et 10°30'W** **Environs de Monrovia, Libéria**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Bopolu et en péri-domiciliaire des environs Nord de Monrovia (07°04'N-10°29'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 05°30'N et 08°30'W** **Environs de Zwedru, Libéria**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village au Km 48 «Mile 48» (05°35'N-08°32'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

Tableau II : Effectifs et lieu de recherche des tiques *O. sonrai* au Sénégal, en Gambie, Guinée Bissao, Guinée Conakry et au Libéria, en 2006, 2007, 2008, 2009 et 2011

| Localisation        | Pays           | Date          | Localité proche      | Terriers<br>examinés | Terriers<br>infestés | Taux<br>infestation (%) |
|---------------------|----------------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| Complément enquêtes | Sénégal        | 0/11/2007     | Dagana               | 10                   | 5                    | 50%                     |
| 16°30'N/15°W        |                | 10/11/2007    | Podor                | 10                   | 10                   | 100%                    |
| 16°N/14°W           |                | 11/11/2007    | Matam                | 10                   | 4                    | 40%                     |
| 15°30'N/13°W        |                | 28-29/08/2008 | Kaffrine             | 30                   | 2                    | 6,6%                    |
| 14°N/15°30'W        |                | 30-31/08/2008 | Koungheul            | 24                   | 5                    | 21%                     |
| 14°N/15°W           |                | 01/09/2008    | Koungheul            | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 14°N/14°30'W        |                | 05-06/09/2008 | Koumpentoum          | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 14°N/13°30'W        |                | 06-07/09/2008 | Koussane             | 30                   | 22                   | 73,3%                   |
| 14°N/12°30'W        |                | 12/11/2007    | Tambacounda          | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 13°15'N/13°W        |                | 14/09/2008    | Nioro du Rip         | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 13°30'N/16°W        |                | 02-03/09/2008 | Koumpentoum          | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 13°30'N/14°30'W     |                | 04/09/2008    | Koussanar            | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 13°30'N/15°30'W     |                | 01/03/2008    | Nioro du Rip         | 15                   | 12                   | 80%                     |
| 13°30'N/13°W        |                | 09-10/09/2008 | Bala                 | 30                   | 25                   | 83,3%                   |
| 13°30'N/15°W        |                | 03/03/2008    | Pata                 | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 13°N/15°W           |                | 04/03/2008    | Kolda                | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 13°N/14°W           |                | 05/03/2008    | Kounkané             | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 13°30'N/13°30'W     |                | 06/03/2008    | Tambacounda          | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 13°30'N/12°30'W     |                | 10-11/09/2008 | Koussane             | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 13°30'N/12°W        |                | 10-11/09/2008 | Koussane             | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 13°N/16°W           |                | 08-09/03/2008 | Bignona              | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 13°N/16°30'W        |                | 10-11/03/2008 | Diouloulou           | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 15°N/15°W           |                | 13/03/2008    | Linguère             | 10                   | 8                    | 80%                     |
| 15°N/14°W           |                | 13/03/2008    | Ranérou (Matam)      | 10                   | 5                    | 50%                     |
| 15°N/17°W           |                | 14/03/2008    | Thiès                | 10                   | 3                    | 30%                     |
| 14°45'N/17°30'W     |                | 17/10/2007    | Centre IRD Hann      | 12                   | 10                   | 83,3%                   |
| 14°45'N/17°30'W     |                | 17/10/2007    | Parc Zoologique Hann | 18                   | 13                   | 72,2%                   |
| 13°43'N/16°24'W     |                | 23/01/2012    | Dielmo village       | 30                   | 10                   | 33,3%                   |
| 13°41'N/16°22'W     |                | 22/01/2012    | Ndiop village        | 30                   | 9                    | 30%                     |
|                     |                |               | Total                | 699                  | 143                  | 20,4%                   |
| Enquêtes            | Gambie         | 02/03/2008    | Farafenni            | 24                   | 14                   | 58,3%                   |
| 13°30'N/15°30'W     |                | 31/08/2008    | Kuntaur              | 6                    | 1                    | 16,6%                   |
| 13°46'N/14°58'W     |                |               | Total                | 30                   | 15                   | 50%                     |
| 12°01'N/14°57'W     | Guinée Bissau  | 08/02/2011    | Bafata               | 30                   | 0                    | 0%                      |
| Enquêtes            | Guinée Conakry | 14-16/02/2006 | Madina Salambandé    | 60                   | 0                    | 0%                      |
| 12°N/12°W           |                | 01/11/2012    | Koundara             | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 11°N/13°W           |                | 07/02/2006    | Kankalabé            | 60                   | 0                    | 0%                      |
| 11°N/12°W           |                | 28/10/2012    | Faranah              | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 10°N/11°W           |                | 26/04/2008    | Kindia               | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 10°N/13°W           |                | 18/04/2008    | Kankan               | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 10°N/09°W           |                | 20/04/2008    | N'Zérékoré           | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 08°N/09°W           |                |               | Total                | 270                  | 0                    | 0%                      |
| Enquêtes            | Libéria        | 25/03/2009    | Monrovia             | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 07°N/10°30'W        |                | 28/03/2009    | Zwedru               | 30                   | 0                    | 0%                      |
| 05°30'N/08°30'W     |                |               | Total                | 60                   | 0                    | 0%                      |
|                     |                |               | Total                | 1089                 | 158                  | 14,5%                   |

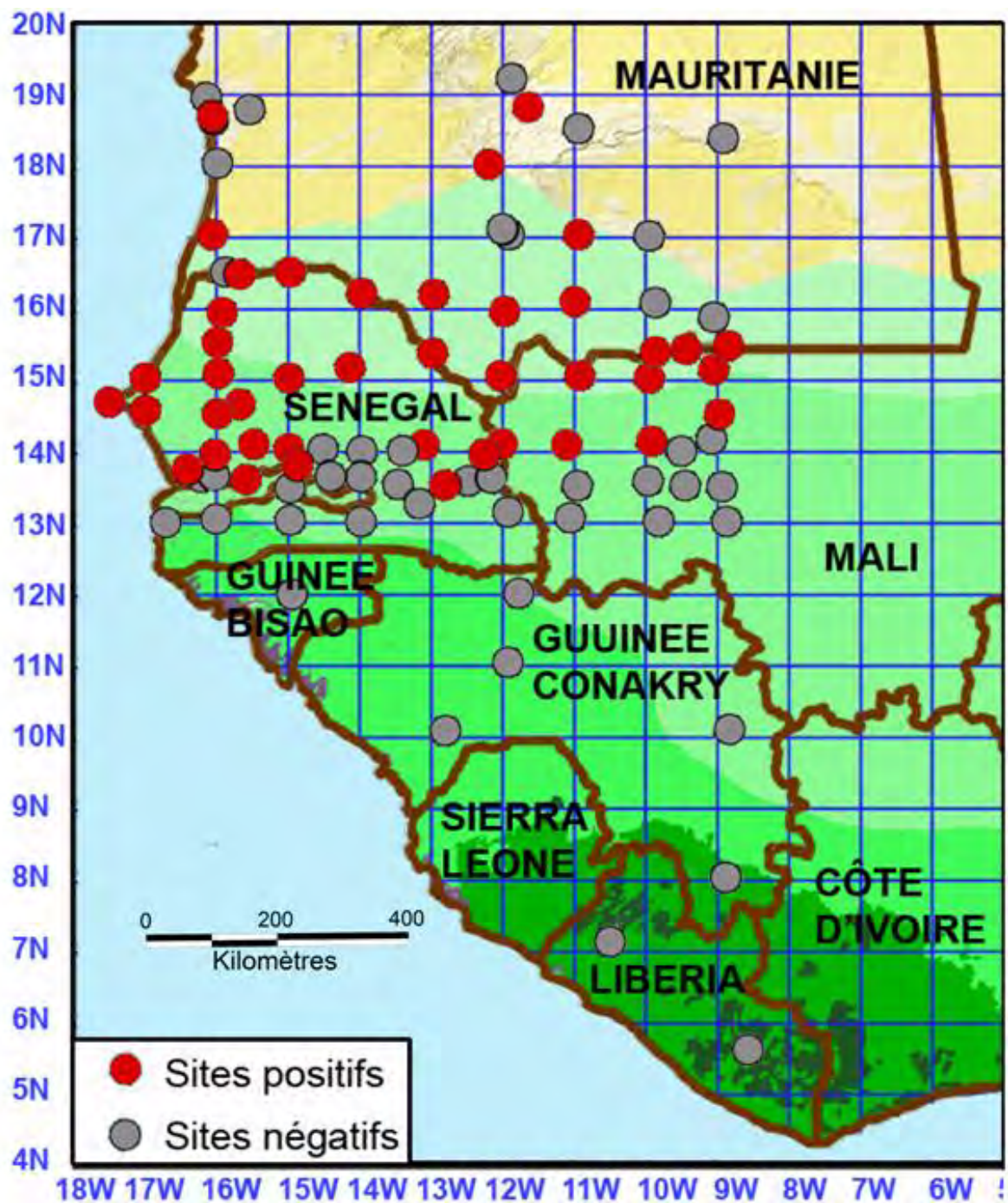


Figure 33 : Distribution spatiale et localisation des sites positifs ou négatifs pour la présence de tiques *O. sonrai* dans des terriers de petits mammifères au Sénégal, en Gambie et dans les pays environnants

### **1-3. Échantillonnage de tiques ornithodores mené au Mali, Burkina Faso, Niger et en Côte d'Ivoire**

#### **1-3-1. Échantillonnage de tiques au Mali**

##### **1-3-1-1. Enquêtes en transect Ouest-Est**

###### **❖ Intersection 14°N et 9°30'W                      Environs de Kita, Mali**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés dans les habitations et en péri-domiciliaire du village de Guétala (13°59'N-09°33'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Gassidian (13°59'N-09°35'W), un hameau de Guétala. Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

→ 3 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Guétala (13°56'N-09°32'W). Aucun terrier ne contenait *O. sonrai*.

###### **❖ Intersection 14°N et 9°W                      Environs de Diéma, Mali**

→ 20 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Kourougé et de Mina (14°09'N-09°08'W, 14°10'N-09°08'W, 14°11'N-09°08'W, 14°10'N-09°11'W). Aucun terrier ne contenait la tique *O. sonrai*.

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Kourougé (14°11'N-09°09'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

###### **❖ Intersection 14°N et 07°W                      Environs de Banamba, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés dans les habitations du village de Sikoro (14°00'N-07°01'W).. Aucun terrier ne contenait la tique *O. sonrai*.

❖ **Intersection 14°N et 05°30'W**

**Environs de Ké-Macina, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Sogoli (13°58'N-05°28'W). 28 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 93,3%.

❖ **Intersection 14°N et 05°W**

**Environs de San, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Soumana (13°54'N-04°58'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

**1-3-1-2. Enquêtes complémentaires**

❖ **Intersection 14°30'N et 09°W**

**Environs de Diéma, Mali**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Dianguirdé (14°30'N-09°01'W). Un seul terrier était infesté par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 6,6%.

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Dianguirdé (14°29'N-09°00'W). 14 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 93,3%.

❖ **Intersection 14°30'N et 08°30'W**

**Environs de Dioumara, Mali**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Tonkasimi «Batoubougou» (14°30'N-08°31'W). 5 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 33, 3%.

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Tonkasimi (14°29'N-08°32'W). 11 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 73,3%.

❖ **Intersection 14°30'N et 08°W**

**Environs de Doubala, Mali**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Kolomina (14°29'N-08°01'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés dans les habitations et en péri-domiciliaire du village de Kolomina (14°28'N-08°01'W). Tous étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 100%.

❖ **Intersection 14°30'N et 07°30'W**

**Environs de Mourdiah, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Seymana «Soumana» (14°30'N-07°31'W). Aucun terrier ne contenait la tique *O. sonrai*.

❖ **Intersection 14°30'N et 07°W**

**Environs de Mourdiah, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Naouléna (14°29'N-07°08'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 14°30'N et 06°30'W**

**Environs de Sokolo, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Nyoko (14°34'N-06°25'W). Aucun terrier ne présentait la tique *O. sonrai*.

❖ **Intersection 14°30'N et 06°W**

**Environs de Sokolo, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Kandyourou (14°36'N-06°08'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 14°30'N et 05°30'W**

**Environs de Niono, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Malémana (14°33'N-05°25'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

❖ **Intersection 14°30'N et 04°W**

**Environs de Mopti, Mali**

→ 12 terriers de rongeurs ont été examinés en bordure du fleuve Niger des environs de Piétaga (14°34'N-04°10'W) et Mopti (14°31'N-04°11'W). 2 étaient infestés par *O. sonrai* (14°34'N-04°10'W), soit un taux d'infestation de 16,6%.

❖ **Intersection 15°N et 11°W**

**Environs sud de Tambakara, Mali**

→ 10 terriers de rongeurs (milieu naturel = 8, zone de cultures = 2) ont été examinés dans les environs de Dogoféré au sud de Tambakara (15°01'N-10°55'W). 2 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 20%.

→ 20 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Soukounala (15°02'N-10°58'W). 11 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 55%.

❖ **Intersection 15°N et 10°W**

**Environs de Nioro du Sahel, Mali**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Monsombougou (15°00'N-10°00'W). 7 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 46,6%.

→ 15 terriers de rongeurs (habitations = 7, péri-domiciliaire = 8) ont été examinés du village de Monsombougou (14°58'N-10°01'W). Tous étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 100%.

❖ **Intersection 15°N et 08°W**

**Environs de Dily, Mali**

→ 25 terriers de rongeurs (milieu naturel = 21, zone de cultures = 4) ont été examinés dans les environs de Bama (15°08'N-08°01'W) et (15°07'N-08°00'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 5 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Dally (15°06'N-07°59'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Bama (15°07'N-08°01'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Dabayé (15°05'N-07°57'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 15°N et 07°30'W**

**Environs de Nara, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés dans les habitations du village de Demba Sala (14°59'N-07°31'W). 27 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 90%.

❖ **Intersection 15°N et 07°W**

**Environs de Nara, Mali**

→ 25 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs d'Akor (15°03'N-07°08'W) et (14°52'N-06°59'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 16 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire Village d'Akor (14°52'N-06°58'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

→ 7 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Thikéré (14°55'N-07°02'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 12 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Thikéré (14°54'N-07°01'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 15°N et 06°30'W**

**Environs de Sokolo, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs (péri-domiciliaire = 11, zone de cultures = 19) ont été examinés en péri-domiciliaire et en zone de cultures du village de Driss (14°56'N-06°33'W) et (14°55'N-06°31'W). Aucun terrier ne présentait la tique *O. sonrai*.

❖ **Intersection 15°N et 06°W**

**Environs de Sokolo, Mali**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Kourmangoubé (14°54'N-06°03'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

→ 15 terriers de rongeurs (habitations = 9, péri-domiciliaire = 6) ont été examinés dans le village de Kourmangoubé (14°54'N-06°03'W). Aucun terrier ne présentait la tique *O. sonrai*.

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Farabougou (14°53'N-06°07'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.



❖ **Intersection 15°N et 05°30'W**

**Environs de Nampala, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Toulé (15°08'N-05°34'W). Aucun terrier ne présentait la tique *O. sonrai*.

❖ **Intersection 15°30'N et 10°W**

**Environs de Nioro du Sahel, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs (habitations = 17, péri-domiciliaire = 11, milieu naturel = 2) ont été examinés dans les villages de Brélingui (15°21'N-09°58'W), Koriga (15°22'N-09°55'W) et Belel Siko son hameau (15°23'N-09°54'W). 5 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 16,6%.

❖ **Intersection 15°30'N et 09°30'W**

**Environs de Nioro du Sahel, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Kouroukéré «Chkata» (15°24'N-09°29'W). 22 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 73,3%.

❖ **Intersection 15°30'N et 09°W**

**Environs de Ballé, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Binéou-Niakaté (15°27'N-08°54'W). 12 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 40%.

❖ **Intersection 15°30'N et 08°30'W**

**Environs de Ballé, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Mounta (15°20'N-08°30'W). 12 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 40%.

❖ **Intersection 15°30'N et 08°W**

**Environs de Ballé, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs (Birou-Nyakaté = 15, Tarhoutala = 15) ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire des villages de Birou-Niakaté (15°27'N-08°04'W) et Tarhoutala (15°25'N-08°06'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

❖ **Intersection 15°30'N et 07°30'W** **Environs de Nara, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Mantyonga (15°20'N-07°27'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 15°30'N et 07°W** **Environs de Ségé, Mali**

→ 12 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village d'Arhor (15°24'N-06°55'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

❖ **Intersection 15°30'N et 06°30'W** **Environs de Ségé, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs (péri-domiciliaire = 28, milieu naturel = 2) ont été examinés dans les villages de Dar Es Salam (15°23'N-06°33'W), (15°22'N-06°33'W) et Samakou (15°24'N-06°32'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 15°30'N et 05°30'W** **Environs de Nampala, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs (habitations et péri-domiciliaire = 20, milieu naturel = 10) ont été examinés dans le village de Bourgou-Siratigui (15°23'N-05°28'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

❖ **Intersection 16°15'N et 03°30'W** **Bord du fleuve Niger à Diré, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés en bordure du fleuve Niger dans les environs de Yona (16°16'N-03°19'W) et Diré (16°16'N-03°20'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 16°N et 04°W** **Bord du fleuve Niger à Niafounké, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés en bordure du fleuve Niger près du village de Niafounké (15°56'N-03°58'W) et ses environs (15°52'N-04°00'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

❖ **Intersection 17°N et 00°30'W** **Bord du fleuve Niger à Bourem, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs (habitations et péri-domiciliaire = 4, milieu naturel = 26) ont été examinés en bordure du fleuve Niger dans les environs de Douagui (16°54'N-00°20'W), Koundouga (16°54'N-00°19'W) et Aboukoïra (16°53'N-00°19'W). 1 seul terrier était infesté par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 3%.

❖ **Intersection 17°N et 01°W**

**Bord du fleuve Niger à Téméra, Mali**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en bordure du fleuve Niger près du village de Téméra (16°59'N-00°57'W). 6 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 40%.

❖ **Intersection 17°N et 02°W**

**Bord du fleuve Niger à Gourma-Rharous, Mali**

→ 4 terriers de rongeurs ont été examinés sur sol sablonneux à végétation de *Prosopis chilensis*, *Balanites aegyptiaca*, *Acacia albida*, *Eucalyptus* sp. et *Azadirachta indica* en bordure de la rive droite du fleuve Niger Village de Gourma-Rharous (16°53'N-01°55'W). 1 terrier était infesté par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 25%.

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés le long de la rive gauche du fleuve Niger dans les environs de Gourma-Rharous (16°53'N-01°56'W). 2 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 20%.

❖ **Intersection 16°30'N et 03°W**

**Bord du fleuve Niger à Tombouctou, Mali**

→ 12 terriers de rongeurs ont été examinés en bordure du fleuve Niger dans les environs de Wondoboumo (16°40'N-02°58'W). 3 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 25%.

❖ **Intersection 15°30'N et 0°30'E, bord du Niger**

**Environs d'Ansongo, Mali**

→ 25 terriers de rongeurs ont été examinés en zone de cultures sur la rive gauche du fleuve Niger dans les environs d'Ansongo près du village de Kounssoum (15°30'N-00°34'E) et de l'île Barbon (15°30'N-00°33'E). 17 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 68%.

→ 5 terriers de rongeurs ont été examinés en zone de cultures, en bordure de la rive gauche du fleuve Niger près du village de Seyna, proche d'Ansongo (15°37'N-00°30'E). 4 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 80%.

❖ **Intersection 15°N et 0°40'E, bord du Niger** **Environs de Labbézanga, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés en zone de cultures le long d'une haie à *Euphorbia balsamifera*, en bordure de la rive gauche du fleuve Niger dans les environs de Labbézanga (15°00'N-0°30'E) et (14°59'N-0°39'E). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 12 terriers de rongeurs ont été examinés en zone de cultures le long de la rive gauche du fleuve Niger près du village de Diémel, un hameau d'Ouatagouna (15°09'N-0°41'E). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°30'N et 11°W** **Environs de Mahina, Mali**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Djimékourou (13°30'N-11°00'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 15 terriers de rongeurs (habitations = 9, péri-domiciliaire = 6) ont été examinés dans le village de Djimékourou (13°30'N-11°00'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Dagabangou (13°32'N-11°01'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 15 terriers de rongeurs (habitations = 11, péri-domiciliaire = 4) ont été examinés dans le village de Dagabangou (13°32'N-11°01'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°30'N et 10°W** **Environs de Kita, Mali**

→ 5 terriers de rongeurs (habitations = 2, péri-domiciliaire = 3) ont été examinés dans le village de Billy (13°34'N-10°01'W), un hameau du village de Fangala. Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 25 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel en bordure des deux rives droite et gauche du Bakoye (un affluent du fleuve Sénégal) dans les environs de Billy (13°34'N-10°02'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°30'N et 09°30'W**

**Environs de Kita, Mali**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de la forêt de Badinko (13°30'N-09°30'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 15 terriers de rongeurs (habitations et en péri-domiciliaire = 10, milieu naturel = 5) ont été examinés dans le village de Talikola (13°28'N-09°30'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°30'N et 09°W**

**Environs de Kita, Mali**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Kolé (13°29'N-08°59'W). Aucun terrier ne contenait *O. sonrai*.

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Kolé (13°28'N-08°59'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°30'N et 08°W**

**Environs de Kolokani, Mali**

→ 23 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Gouakoulou (13°30'N-08°03'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 37 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Gouakoulou (13°30'N-08°03'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°30'N et 06°W**

**Bord du fleuve Niger près de Markala, Mali**

→ 8 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel le long de la rive gauche du fleuve Niger dans les environs de Markala (13°42'N-06°04'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°30'N et 05°W**

**Environs de San, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Wesso (13°27'N-04°49'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°N et 11°W**

**Environs de Kéniéba, Mali**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Kassama (13°03'N-11°06'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Kassama (13°03'N-11°07'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

→ 11 terriers de rongeurs (milieu naturel = 6, zone de cultures = 5) ont été examinés dans les environs de Batama (13°03'N-11°09'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 19 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Batama (13°03'N-11°10'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°N et 10°W**

**Environs de Kita, Mali**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Djinagué (12°59'N-09°52'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Djinagué (12°59'N-09°52'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Daniabatacoda, un hameau de Djinagué (13°00'N-09°52'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Daniabatacoda (13°00'N-09°52'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°N et 09°W**

**Environs Nord de Sébékoré, Mali**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Yacoubabougou, un hameau de Kodialan (13°00'N-08°55'W) et (13°00'N-08°54'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 15 terriers de rongeurs (habitations = 13, péri-domiciliaire = 2) ont été examinés dans le village de Yacoubabougou (13°00'N-08°55'W) et (13°00'N-08°54'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Kodialan (13°01'N-08°53'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°N et 08°W**

**Environs de Nossombougou, Mali**

→ 15 terriers de rongeurs (milieu naturel = 12, zone de cultures = 3) ont été examinés dans les environs de Kodian «Koro» (13°03'N-07°56'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Kodian «Koro» (13°04'N-07°57'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Kodian «Koura» (Bougoukoura), un hameau de Kodian «Koro» (13°02'N-07°57'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

→ 15 terriers de rongeurs (milieu naturel = 13, zone de cultures = 2) ont été examinés dans le village de Kodian «Koura» (13°03'N-07°57'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

❖ **Intersection 13°N et 06°W**

**Environs de Cinzana, Mali**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés en bordure du Bani, un affluent du fleuve Niger dans les environs de Dona (13°12'N-05°54'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

**1-3-2. Échantillonnage de tiques ornithodores mené au Burkina Faso, Niger et en Côte d'Ivoire**

**1-3-2-1. Échantillonnage mené au Burkina Faso et Niger**

❖ **Intersection 12°N et 05°W**

**Environs de Faramana, Burkina Faso**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Noumoukina (11°50'N-04°52'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 14°30'N et 01°E**

**Environs d'Ayorou, Niger**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés le long d'une haie de végétation à *P. chilensis*, *E. balsamifera* et à palmiers doum en bordure du fleuve Niger dans les environs d'Ayorou (14°42'N-00°55'E). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

**1-3-2-2. Échantillonnage mené en Côte d'Ivoire**

❖ **Intersection 10°N et 05°W**

**Environs de Niélé, Côte d'Ivoire**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Détékaha (09°55'N-05°10'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 08°N et 05°W**

**Environs de Katiola, Côte d'Ivoire**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations du village de Allakro (07°56'N-05°03'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 06°N et 05°W**

**Environs d'Oumé, Côte d'Ivoire**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Pakobo (06°07'N-04°55'W), (06°05'N-04°55'W) et (06°12'N-04°57'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.



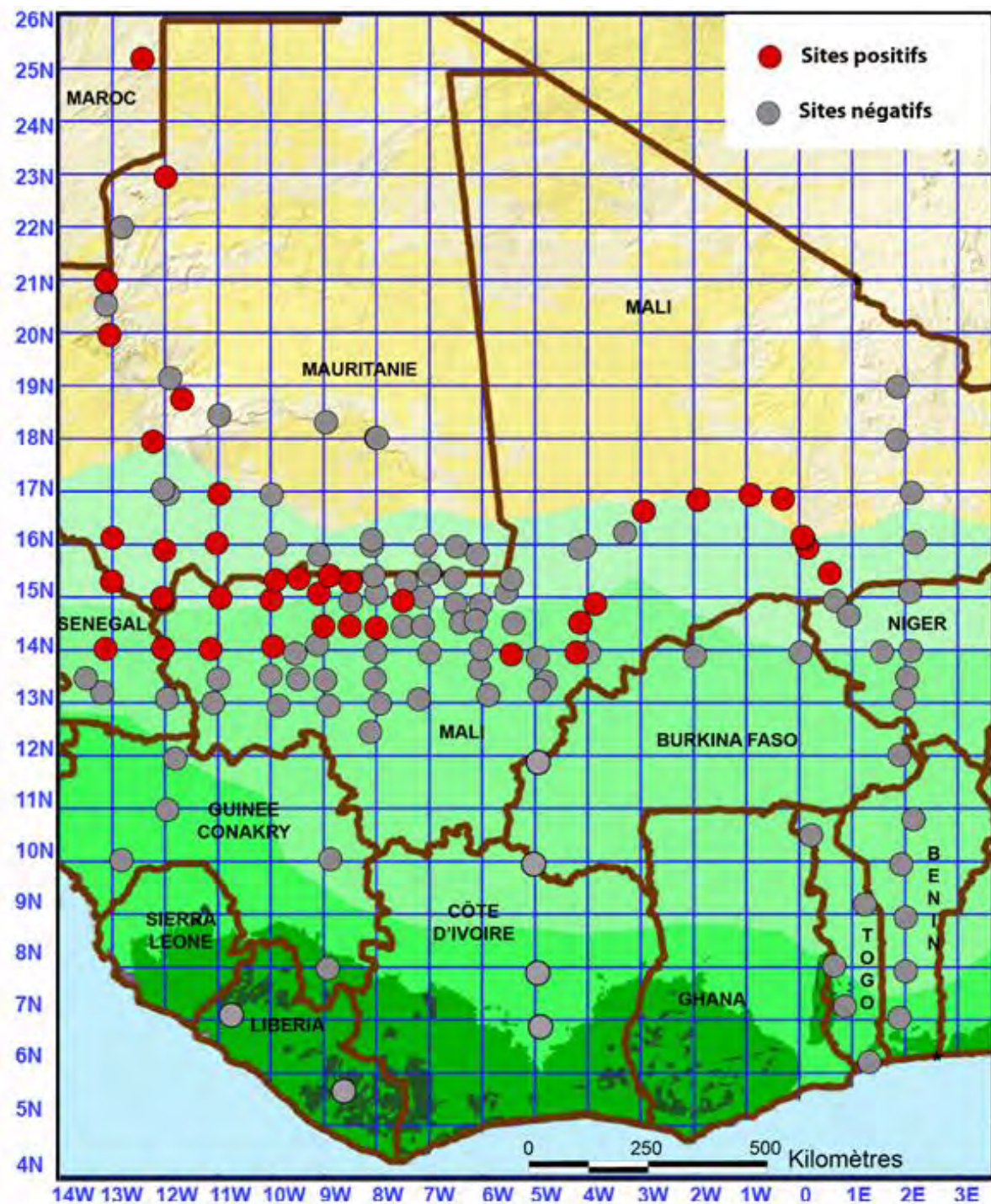


Figure 34 : Distribution spatiale et localisation des sites positifs ou négatifs pour la présence de tiques *O. sonrai* dans des terriers de petits mammifères au Mali et dans les pays environnants

Tableau III : Effectifs et lieu de recherche des tiques *O. sonrai* au Mali, en 2006, 2007, 2008, au Niger en 2008, Burkina Faso et en Côte d'Ivoire en 2012

|                                             | Localisation        | Date               | Pays          | Localité proche | Terriers étudiés | Terriers infestés | Taux infestation (%) |
|---------------------------------------------|---------------------|--------------------|---------------|-----------------|------------------|-------------------|----------------------|
| Transect Ouest-Est<br>(Complément enquêtes) | 14°N/11°W           | 29/10/2005         | Mali          | Diamou          | 15               | 4                 | 26,6%                |
|                                             | 14°N/09°30'W        | 08/02/2007         | Mali          | Kita            | 33               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 14°N/09°W           | 30-31/12/2006      | Mali          | Diéma           | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 14°N/07°W           | 24-25/02/2007      | Mali          | Banamba         | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 14°N/05°30'W        | 16-17/10/2007      | Mali          | Ké-Macina       | 30               | 28                | 93,3%                |
|                                             | 14°N/05°W           | 18/10/2007         | Mali          | San             | 30               | 0                 | 0%                   |
| Études complémentaires                      | 17°N/00°30'W        | 25/01/2008         | Mali          | Bourem          | 30               | 1                 | 3,3%                 |
|                                             | 17°N/01°W           | 27/01/2008         | Mali          | Téméra          | 15               | 6                 | 40%                  |
|                                             | 17°N/02°W           | 07/10/2005         | Mali          | Gourma-Rharous  | 14               | 3                 | 21,4%                |
|                                             | 16°30'N/03°W        | 28/01/2008         | Mali          | Tombouctou      | 12               | 3                 | 25%                  |
|                                             | 16°15'N/03°30'W     | 29-30/01/2008      | Mali          | Diré            | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 16°N/04°W           | 31/01/2008         | Mali          | Niafouké        | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 15°30'N/10°W        | 27-29/09/2007      | Mali          | Nioro du Sahel  | 30               | 5                 | 16,6%                |
|                                             | 15°30'N/09°30'W     | 29-30/09/2007      | Mali          | Nioro du Sahel  | 30               | 22                | 73,3%                |
|                                             | 15°30'N/09°W        | 01/10/2007         | Mali          | Ballé           | 30               | 12                | 40%                  |
|                                             | 15°30'N/08°30'W     | 02/10/2007         | Mali          | Ballé           | 30               | 12                | 40%                  |
|                                             | 15°30'N/08°W        | 03/10/2007         | Mali          | Ballé           | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 15°30'N/07°30'W     | 04/10/2007         | Mali          | Nara            | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 15°30'N/07°W        | 05-06/10/2007      | Mali          | Ségé            | 12               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 15°30'N/06°30'W     | 07/10/2007         | Mali          | Ségé            | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 15°30'N/05°30'W     | 15/10/2007         | Mali          | Nampala         | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 15°30'N/0°30'E      | 22-23/06/2005      | Mali          | Ansongo         | 30               | 21                | 70%                  |
|                                             | 15°N/0°40'E         | 24-26/06/2005      | Mali          | Labbézanga      | 42               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 14°30'N/01°E        | 23/01/2008         | Niger         | Ayorou          | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 15°N/11°W           | 18-19/05/2006      | Mali          | Sud Tambakara   | 30               | 13                | 43,3%                |
|                                             | 15°N/10°W           | 21/01/2006         | Mali          | Nioro du Sahel  | 30               | 22                | 73,3%                |
|                                             | 15°N/09°W           | 23/01/2006         | Mali          | Ballé           | 30               | 19                | 63,3%                |
|                                             | 15°N/08°30'W        | 16/02/2007         | Mali          | Dily            | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 15°N/08°W           | 25-26/01/2006      | Mali          | Dily            | 60               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 15°N/07°30'W        | 20/02/2007         | Mali          | Nara            | 30               | 27                | 90%                  |
|                                             | 15°N/07°W           | 27-29/01/2006      | Mali          | Nara            | 60               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 15°N/06°30'W        | 08-09/10/2007      | Mali          | Sokolo          | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 15°N/06°W           | 30-31/01/2006      | Mali          | Sokolo          | 60               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 15°N/05°30'W        | 13-14/10/2007      | Mali          | Nampala         | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 14°30'N/09°W        | 06-07/02/2007      | Mali          | Diéma           | 30               | 15                | 50%                  |
|                                             | 14°30'N/08°30'W     | 14-15/02/2007      | Mali          | Dioumara        | 30               | 16                | 53,3%                |
|                                             | 14°30'N/08°W        | 17-18/02/2007      | Mali          | Doubala         | 30               | 15                | 50%                  |
|                                             | 14°30'N/07°30'W     | 19/02/2007         | Mali          | Mourdiah        | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 14°30'N/07°W        | 23-24/02/2007      | Mali          | Mourdiah        | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 14°30'N/06°30'W     | 09-10/10/2007      | Mali          | Sokolo          | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 14°30'N/06°W        | 11/10/2007         | Mali          | Sokolo          | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 14°30'N/05°30'W     | 12-13/10/2007      | Mali          | Niono           | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 14°30'N/04°W        | 02/02/2008         | Mali          | Mopti           | 12               | 2                 | 16,6%                |
|                                             | 13°30'N/11°W        | 06-07/05/2006      | Mali          | Mahina          | 60               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 13°N/11°W           | 03-05/05/2006      | Mali          | Kéniéba         | 60               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 13°30'N/10°W        | 09-10/02/2007      | Mali          | Kita            | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 13°30'N/09°30'W     | 11-12/02/2007      | Mali          | Kita            | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 13°30'N/09°W        | 13/02/2007         | Mali          | Kita            | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 13°N/10°W           | 09-10/05/2006      | Mali          | Kita            | 60               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 13°N/09°W           | 11-13/05/2006      | Mali          | Sébékoro        | 60               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 13°30'N/08°W        | 16-17/05/2006      | Mali          | Kolokani        | 60               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 13°N/08°W           | 14-15/05/2006      | Mali          | Nossombougou    | 60               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 13°30'N/06°W        | 01&25/02/2006-2007 | Mali          | Markala         | 8                | 0                 | 0%                   |
|                                             | 13°N/06°W           | 04/02/2008         | Mali          | Cinzana         | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 13°30'N/05°W        | 20/10/2007         | Mali          | San             | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | Total               |                    | Mali          | Mali            | 1813             | 246               | 13,5%                |
|                                             | 12°N/05°W           | 21/10/2012         | Burkina Faso  | Faramana        | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 10°N/05°W           | 20/10/2012         | Côte d'Ivoire | Niéle           | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 08°N/05°W           | 19/10/2012         | Côte d'Ivoire | Katiola         | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                             | 06°N/05°W           | 18/10/2012         | Côte d'Ivoire | Oumé            | 30               | 0                 | 0%                   |
| Total                                       | 59 sites prospectés |                    |               |                 | 1933             | 246               | 12,7%                |

## 1-4. Échantillonnage de tiques ornithodores mené en Mauritanie

### 1-4-1. Échantillonnage en transect Nord-Sud

❖ **Sur le 21<sup>ème</sup> parallèle**                      **Environs de Nouadhibou (Wilaya de Nouadhibou)**

→ 6 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel au pied d'une butte de sable arborée de tamaris des environs de Nouadhibou (21°16'N-16°50'W). 2 étaient infestés par *O. sonrai* ssp., soit un taux d'infestation de 33,3%.

❖ **Sur le 20<sup>ème</sup> parallèle**                      **Environs d'Atar (Wilaya de l'Adrar)**

→ 6 terriers de rongeurs ont été examinés en bordure de l'oued Oum Lemhar à végétation d'*Acacia tortilis*, *Zizyphus mauritiana* et de palmiers à dattes sur sable de dune des environs d'Azougui (20°34'N-13°07'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Sur le 19<sup>ème</sup> parallèle**                      **Environs de Rachid (Wilaya du Tagant)**

→ 26 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel de la vallée d'un oued sablonneux à importante végétation de *Calotropis procera*, *Boscia senegalensis*, *A. tortilis*, *Acacia niloticus*, *Balanites aegyptiaca*, *Maerua crassifolia*, et *Leptadenia pyrotechnica* dans les environs de Rachid (19°11'N-11°55'W) et (18°55'N-11°48'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

❖ **Sur le 19<sup>ème</sup> parallèle**                      **Environs de Tiwilit (Wilaya de Nouakchott)**

→ 9 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel autour et à proximité des buttes en terre à végétation de tamaris des environs de Tiwilit (18°55'N-16°10'W) et (18°52'N-16°09'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Sur le 18<sup>ème</sup> parallèle**                      **Environs de Nouakchott (Wilaya de Nouakchott)**

→ 30 terriers de rongeurs (zone littorale à végétation herbacée de *Sesuvium portulacastrum* = 15, oued saharien à affleurement de sebkha = 7, milieu naturel à végétation de *P. chilensis* et *E. balsamifera* = 8) ont été examinés dans les environs de Nouakchott (18°00'N-16°01'W), (18°08'N-16°00'W), (18°07'N-15°57'W) et (18°02'N-16°01'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

❖ **Sur le 17<sup>ème</sup> parallèle** **Environs Nord de Rosso Mauritanie (Wilaya du Trarza)**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés au bord d'un oued à végétation importante d'*A. tortilis*, de quelques *B. aegyptiaca* et *P. chilensis* des environs d'Ibibi Oglat (17°00'N-16°05'W). 8 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 26,6%.

**1-4-2. Enquêtes complémentaires**

❖ **Intersection 18°45'N et 15°30'W** **Environs Nord-est de Nouakchott (Wilaya de Nouakchott)**

→ 8 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel à végétation de *C. procera*, tamaris et *M. crassifolia* des environs nord-est de Nouakchott (18°45'N-15°34'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

❖ **Intersection 18°30'N et 16°W** **Environs Nord de Nouakchott (Wilaya de Nouakchott)**

→ 21 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel à végétation de tamaris sur sable de dune à affleurement de la langue salée marquée par des zones de sabkha des environs du littoral nord de Nouakchott (18°36'N-16°04'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 18°30'N et 11°W** **Environs de Ganeb (Wilaya du Hodh El Gharbi)**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel à végétation de *B. senegalensis*, *M. crassifolia*, *E. balsamifera*, *C. procera* et à tapis de touffes de graminées annuelles d'un oued des environs de Ganeb (18°29'N-10°59'W) et (18°27'N-10°50'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 18°30'N et 09°W** **Environs d'Aratane (Wilaya du Hodh El Chargui)**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel d'une vallée des environs d'Aratane à végétation d'*A. tortilis*, *M. crassifolia* et à tapis de touffes de graminées (18°21'N-08°58'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

❖ **Intersection 18°N et 08°W**      **Environs d'Aratane (Wilaya du Hodh El Chargui)**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel d'une vallée d'un oued asséché des environs d'Aratane (18°03'N-08°01'W) et (17°59'N-08°01'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 17°N et 11°W**      **Environs Nord de Kiffa (Wilaya de l'Assaba)**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs d'Amridjiet (17°00'N-10°59'W) près de l'oued Oum El Khez. 15 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 50%.

❖ **Intersection 17°N et 10°W**      **Environs Nord-ouest d'Ayoûn El Atrouâs (Wilaya du Hodh El Gharbi)**

→ 28 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel d'un oued à végétation de *C. procera*, *B. aegyptiaca*, *Z. mauritiana* et *A. tortilis* des environs d'El Beyyed (16°53'N-09°59'W) et (16°53'N-10°00'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 2 terriers de rongeurs ont été examinés dans les habitations et en péri-domiciliaire du village d'El Beyyed (16°59'N-10°00'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 16°N et 13°W**      **Environs de Leqceiba (Wilaya de Gorgol)**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés au bord d'un oued à végétation d'*A. tortilis*, *C. procera*, *Z. mauritiana* et *B. aegyptiaca* des environs d'Agerkaya-2 (16°10'N-13°00'W). 11 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 36,6%.

❖ **Intersection 16°N et 11°W**      **Environs de Kankossa (Wilaya de l'Assaba)**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Sallem (16°05'N-11°00'W), (16°04'N-11°00'W) et (16°04'N-11°02'W). Un terrier était infesté par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 3,3%.

❖ **Intersection 16°N et 10°W**      **Environs Sud-ouest d'Ayoûn El Atrouïs (Wilaya du Hodh El Gharbi)**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés dans un oued à végétation d'*A. tortilis*, *Acacia flava*, *Acacia senegal*, *Z. mauritiana* et *B. aegyptiaca* des environs de Te-Nguembou (16°03'N-09°55'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

❖ **Intersection 16°N et 09°W**      **Environs de Kobéni (Wilaya du Hodh El Gharbi)**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés dans un oued à végétation d'*A. tortilis*, *B. aegyptiac*, *A. flava*, *Z. mauritiana* et *C. procera* des environs de Banète (15°51'N-09°06'W) et (15°50'N-09°06'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 16°N et 08°W**      **Environs de Timbedgha (Wilaya du Hodh El Chargui)**

→ 25 terriers de petits rongeurs ont été examinés en péri-domiciliaire du village d'Aïn-Biré (16°08'N-08°06'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 5 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs d'Aïn-Biré (16°09'N-08°06'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 16°N et 07°W**      **Environs d'Amourj (Wilaya du Hodh El Chargui)**

→ 5 terriers de petits rongeurs ont été examinés à l'intérieur des tentes et en péri-domiciliaire du village de Chgueig (16°01'N-07°06'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 17 terriers de rongeurs (milieu naturel = 7, bord d'un oued à végétation de *C. procera*, *B. aegyptiaca*, *A. senegal* et *A. tortilis* = 10) ont été examinés dans les environs de Chgueig (16°01'N-07°05'W), (16°02'N-07°05'W) et (16°02'N-07°06'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

→ 8 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village d'Oumm-En-Naûr (16°04'N-07°07'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

❖ **Intersection 16°N et 06°30'W**      **Environs de Bassikounou (Wilaya du Hodh El Chargui)**

→ 25 terriers de rongeurs ont été examinés au bord d'un oued à végétation de *C. procera*, *B. senegalensis*, *A. senegal*, *A. nilotica*, *A. tortilis* et *Z. mauritiana* des environs d'Emmat Lakarich (15°59'N-06°30'W) et (15°59'N-06°29'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

→ 5 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village d'Emmat Lakarich (16°00'N-06°30'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

❖ **Intersection 16°N et 06°W**      **Environs de Bassikounou (Wilaya du Hodh El Chargui)**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés au bord d'un oued à végétation de *C. procera*, *B. senegalensis*, *Acacia* sp, *A. flava*, *A. tortilis*, *B. aegyptiaca* et *Z. mauritiana* des environs de Lambasite (15°51'N-06°07'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 15°30'N et 07°W**      **Environs d'Abdel Bagrou (Wilaya du Hodh El Chargui)**

→ 18 terriers de rongeurs ont été examinés dans un oued à végétation de *B. aegyptiaca*, *C. procera*, *A. senegal*, *A. nilotica*, *A. tortilis* et *Z. mauritiana* des environs de Lekrysse (15°30'N-07°01'W) et (15°30'N-07°00'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 12 terriers de rongeurs ont été examinés dans les habitations et en péri-domiciliaire du village de Lekrysse (15°30'N-07°01'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

❖ **Intersection 16°N et 07°30'W**      **Environs d'Amourj (Wilaya du Hodh El Chargui)**

→ 20 terriers de rongeurs (bord d'un oued = 16, zone de cultures = 4) ont été examinés dans les environs d'Archane (16°00'N-07°28'W) et (16°00'N-07°29'W). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés dans les habitations et en péri-domiciliaire du village d'Archane (16°00'N-07°27'W). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

Tableau IV : Effectifs et lieu de recherche des tiques *O. sonrai* en Mauritanie en 2006, 2007

| Localisation        | Localité proche        | Date          | Terriers examinés | Terriers infestés | Taux infestation (%) |
|---------------------|------------------------|---------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| Complément enquêtes |                        |               |                   |                   |                      |
| 21°N/17°W           | Nouadhibou             | 25/11/2005    | 6                 | 2                 | 33,3%                |
| 20°30'N/13°W        | Atar                   | 03/12/2007    | 6                 | 0                 | 0%                   |
| 19°N/12°W           | Rachid                 | 05/12/2007    | 26                | 0                 | 0%                   |
| 19°N/16°W           | Tiwilit                | 26/11/2007    | 9                 | 0                 | 0%                   |
| 18°30'N/16°W        | Nord de Nouakchott     | 26/11/2007    | 21                | 0                 | 0%                   |
| 18°45'N/15°30'W     | Nord-Est de Nouakchott | 27/11/2007    | 8                 | 0                 | 0%                   |
| 18°N/16°W           | Nouakchott             | 20-21/11/2007 | 30                | 0                 | 0%                   |
| 18°30'N/11°W        | Ganeb                  | 07/12/2007    | 30                | 0                 | 0%                   |
| 18°30'N/09°W        | Aratane                | 09/12/2007    | 30                | 0                 | 0%                   |
| 18°N/08°W           | Aratane                | 10/12/2007    | 30                | 0                 | 0%                   |
| 17°N/16°W           | Nord de Rosso          | 19-20/04/2007 | 30                | 8                 | 26,6%                |
| 17°N/11°W           | Nord de Kiffa          | 03-04/12/2006 | 30                | 15                | 50%                  |
| 16°N/13°W           | Leqceiba               | 16/12/2006    | 30                | 11                | 36,6%                |
| 16°N/11°W           | Kankossa               | 06/12/2006    | 30                | 1                 | 3,3%                 |
| 17°N/10°W           | Ayoûn El Atroûs        | 14-15/03/2007 | 30                | 0                 | 0%                   |
| 16°N/10°W           | Ayoûn El Atroûs        | 16/03/2007    | 30                | 0                 | 0%                   |
| 16°N/09°W           | Kobéni                 | 17-18/03/2007 | 30                | 0                 | 0%                   |
| 16°N/08°W           | Timbedgha              | 19-20/03/2007 | 30                | 0                 | 0%                   |
| 16°N/07°30'W        | Amourj                 | 29-30/03/2007 | 30                | 0                 | 0%                   |
| 16°N/07°W           | Amourj                 | 21-22/03/2007 | 30                | 0                 | 0%                   |
| 16°N/06°30'W        | Bassikounou            | 23-24/03/2007 | 30                | 0                 | 0%                   |
| 16°N/06°W           | Bassikounou            | 25-26/03/2007 | 30                | 0                 | 0%                   |
| 15°30'N/07°W        | Abdel Bagrou           | 27-28/03/2007 | 30                | 0                 | 0%                   |
| Total               |                        |               | 586               | 37                | 6,3%                 |



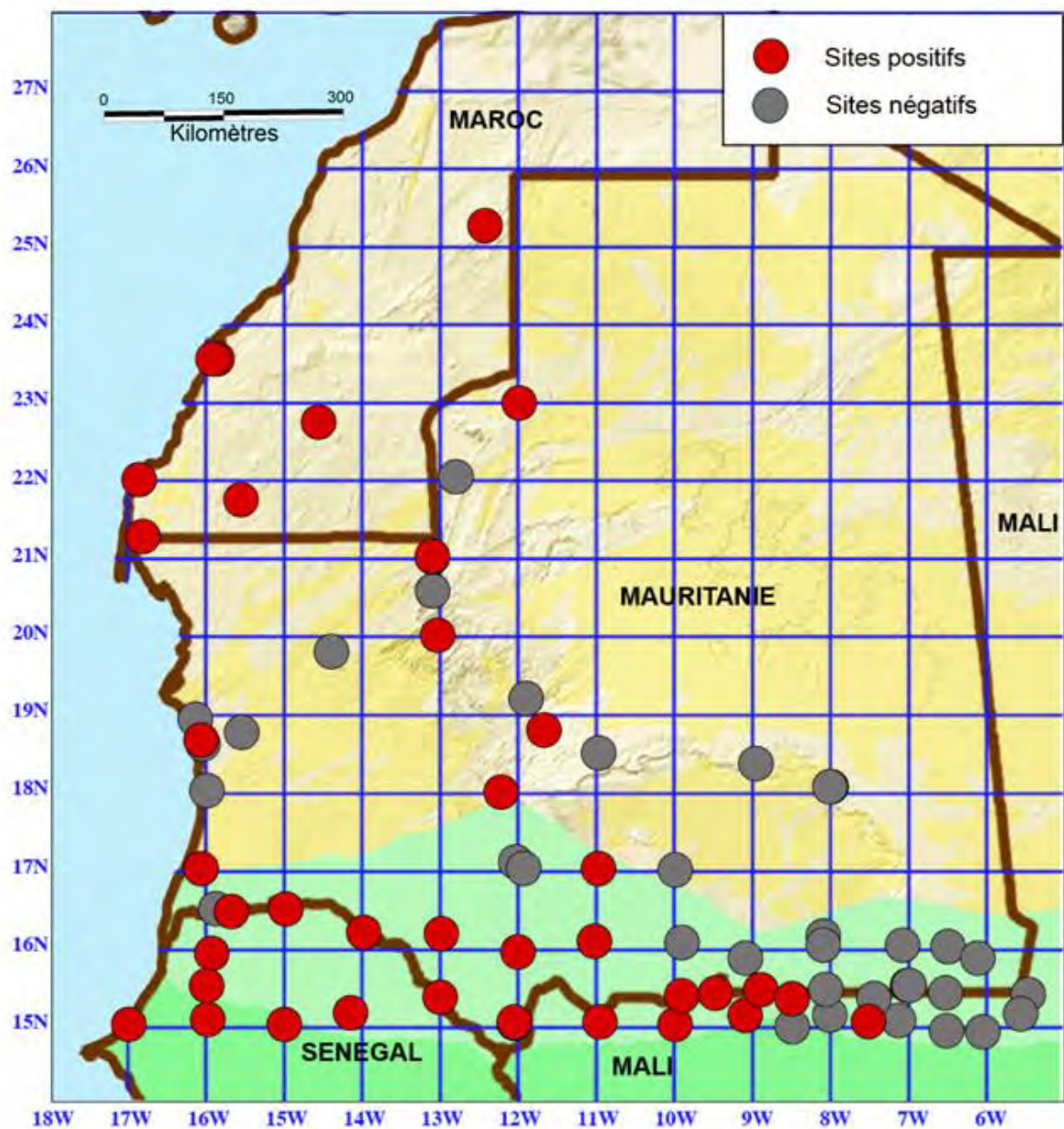


Figure 35 : Distribution spatiale et localisation des sites positifs ou négatifs pour la présence de tiques *O. sonrai* dans des terriers de petits mammifères en Mauritanie et dans les pays limitrophes

## 1-5. Échantillonnage de tiques ornithodores mené au Togo

### ➤ Échantillonnage en transect Nord-Sud

#### ❖ Intersection 10°30'N et 00°E

#### Environs de Dapaong, Togo

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Dapaong (10°33'N-00°12'E). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations. Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

#### ❖ Intersection 09°15'N et 01°E

#### Environs de Bafilo, Togo

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs d'Alédjo (09°15'N-01°13'E). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village d'Alédjo (09°15'N-01°12'E). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

#### ❖ Intersection 08°N et 00°30'E

#### Environs de Blitta, Togo

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Diguengué (08°05'N-00°38'E). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

#### ❖ Intersection 07°15'N et 01°E

#### Environs d'Amlamé, Togo

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Sodo-zion (07°19'N-00°50'E). Aucun terrier ne présentait *O. sonrai*.

#### ❖ Intersection 06°15'N et 01°15'E

#### Environs de Lomé, Togo

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés à l'intérieur des habitations et en péri-domiciliaire du village de Sagonou (06°16'N-01°18'E). Tous étaient négatifs pour *O. sonrai*.

Tableau V : Effectifs et lieu de recherche des tiques *O. sonrai* au Togo, Janvier 2008

| Localisation        | Pays | Date          | Localité proche | Terriers examinés | Terriers infestés | Taux infestation (%) |
|---------------------|------|---------------|-----------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| Complément enquêtes | Togo |               |                 |                   |                   |                      |
| 10°30'N/00°E        |      | 07-08/01/2008 | Dapaong         | 30                | 0                 | 0%                   |
| 09°15'N/01°E        |      | 09-10/01/2008 | Bafilo          | 30                | 0                 | 0%                   |
| 08°N/00°30'E        |      | 11-12/01/2008 | Blitta          | 30                | 0                 | 0%                   |
| 07°15'N/01°E        |      | 13/01/2008    | Amlamé          | 30                | 0                 | 0%                   |
| 06°15'Nx01°15'E     |      | 15/01/2008    | Lomé            | 30                | 0                 | 0%                   |
|                     |      |               | Total           | 150               | 0                 | 0%                   |

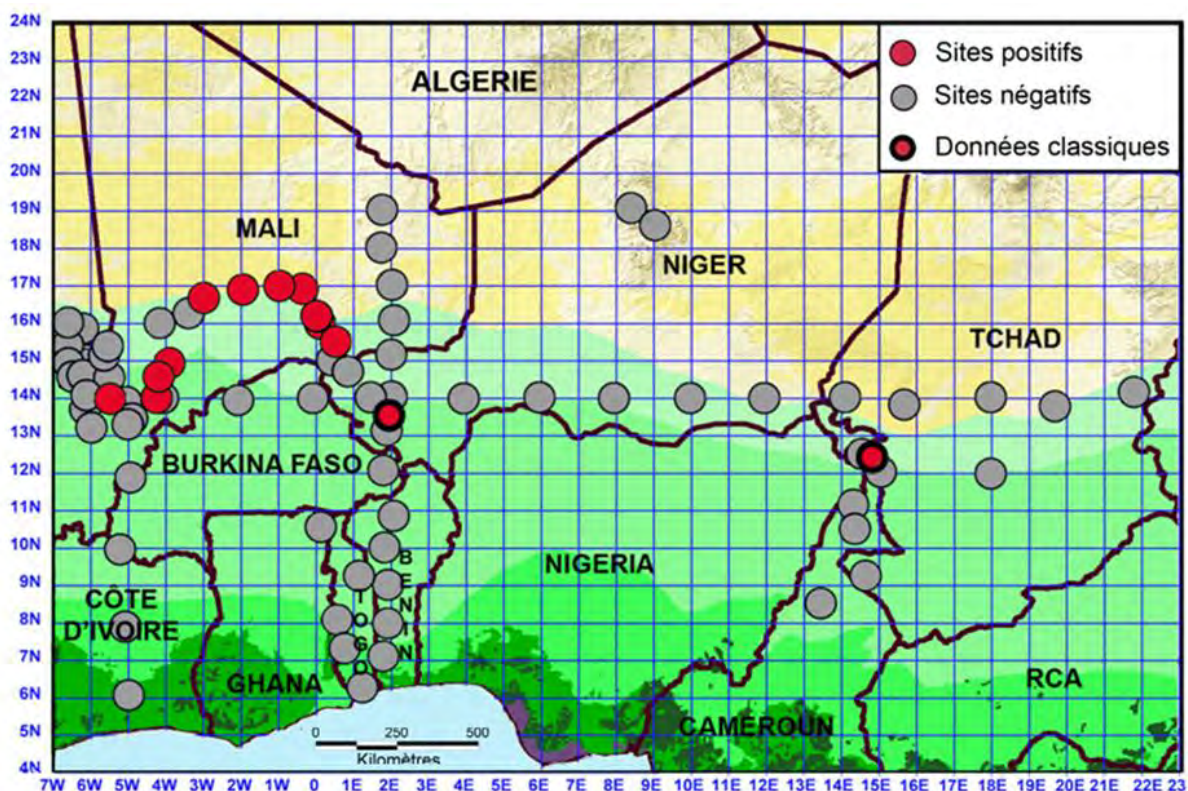


Figure 36 : Sites d'échantillonnage des tiques *O. sonrai* dans des terriers de petits mammifères au Togo et dans les pays limitrophes

## 1-6. Échantillonnage de tiques ornithodores mené au Maroc

### 1-6-1. Enquêtes en transects Sud-Nord, Sud Ouest-Nord Est

#### ❖ Sur le 25<sup>ème</sup> parallèle

#### Environs de Galtat Zemmour, Maroc

→ 20 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel de la vallée d'un oued à végétation d'*Acacia* sp. et d'*A. tortilis*, cernée de montagnes du Zemmour (25°13'N-12°26'W). 2 étaient infestés par des tiques *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 10%.

#### ❖ Sur le 26<sup>ème</sup> parallèle

#### Environs de Bou Kra, Maroc

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel d'une plaine sablonneuse et d'un oued asséché, à végétation d'*A. tortilis*, au sud-est de Bou Kra (26°02'N-12°50'W et 25°58'N-12°52'W). Tous étaient négatifs pour les tiques ornithodores.

❖ **Sur le 27<sup>ème</sup> parallèle**

**Environs d'Es-Smara, Maroc**

→ 7 terriers de rongeurs ont été examinés dans la vallée d'un oued à végétation d'*A. tortilis* et d'*Acacia* sp. au sud-ouest d'Es-Smara (26°57'N-11°57'W et 26°53'N-11°57'W). Aucun terrier ne présentait de tiques *Ornithodoros*.

→ 23 terriers de rongeurs ont été examinés dans la vallée d'un oued à végétation d'*A. tortilis*, près du village de Sidi Ahmed au sud-ouest d'Es-Smara (26°51'N-11°56'W). 2 étaient infestés par *Ornithodoros merionesi*, soit un taux d'infestation de 8,6%.

Sur 30 terriers examinés, 2 étaient infestés par *O. merionesi*, soit un taux d'infestation global de 6,6%.

❖ **Sur le 28<sup>ème</sup> parallèle**

**Environs de Tarfaya, Maroc**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel d'un oued au sud-est de Tarfaya, non loin de Sidi Akhfennir (27°57'N-11°57'W). 15 étaient infestés par *O. merionesi* et *Ornithodoros costalis*, soit un taux d'infestation de 50%.

❖ **Sur le 29<sup>ème</sup> parallèle**

**Environs de Guelmim, Maroc**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés dans un oued asséché à végétation de *M. crassifolia*, au sud-est de Guelmim (29°03'N-09°55'W). 14 étaient infestés par *O. merionesi*, soit un taux d'infestation de 46,6%.

❖ **Sur le 30<sup>ème</sup> parallèle**

**Environs de Tata, Maroc**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel de la vallée d'un oued à végétation de *Zizyphus* sp. et de *Casuarina* sp., cernée de montagnes de l'Anti-Atlas au sud-ouest des environs de Tata (29°53'N-08°05'W). 14 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 46,6%.

❖ **Sur le 31<sup>ème</sup> parallèle**

**Environs de Jbel Sarhro, Maroc**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés dans un oued asséché à végétation de *Zizyphus* sp., cerné de montagnes du Jbel Sarhro (30°55'N-05°50'W) et (30°56'N-05°50'W). 8 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 26,6%.

❖ **Sur le 32<sup>ème</sup> parallèle**

**Environs de Boudnib, Maroc**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel de la vallée d'un oued à végétation de *Zizyphus* sp. au sud-ouest de Boudnib (31°58'N-03°52'W) et (31°58'N-03°55'W). Tous étaient négatifs pour les tiques ornithodores.

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés dans la vallée d'un oued à végétation de *Casuarina* sp. et *Zizyphus* sp., au sud-ouest des environs de Boudnib (31°59'N-03°59'W). 4 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 26,6%.

Sur 30 terriers examinés, 4 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation global de 13%.

❖ **Sur le 33<sup>ème</sup> parallèle**

**Environs de Tandrara, Maroc**

→ 8 terriers de rongeurs ont été examinés dans la vallée d'un oued asséché à tapis herbacé composé essentiellement de l'Alpha et dénudé de couvert végétal (33°08'N-01°58'W). Aucun terrier ne présentait de tiques ornithodores.

→ 22 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel de la vallée d'un oued des environs de Tandrara (33°01'N-02°00'W). 2 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 9%.

Sur 30 terriers examinés, 2 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation global de 6,6%.

❖ **Sur le 34<sup>ème</sup> parallèle**

**Environs d'Aïn-Bénimathar, Maroc**

→ 6 terriers de rongeurs ont été examinés dans un oued asséché des environs d'Aïn-Bénimathar (34°07'N-02°02'W). 2 étaient infestés par *O. sonrai* et *Ornithodoros maroccanus*, soit un taux d'infestation de 33%.

→ 24 terriers de rongeurs ont été examinés (zone de cultures = 16, milieu naturel = 6) dans une plaine sablo-argileuse, à végétation de *Zizyphus* sp., avec un tapis herbacé composé par endroits d'*Artemisia herba alba* (Armoise) en bordure des deux rives droite et gauche des cascades de l'oued Za (34°05'N-02°03'W). 11 étaient infestés par *O. sonrai* et *O. maroccanus*, soit un taux d'infestation de 45,8%.

Sur 30 terriers examinés, 13 étaient infestés par *O. sonrai* et *O. marocanus*, soit un taux d'infestation global de 43%.

❖ **Sur le 35<sup>ème</sup> parallèle**

**Environs de Berkane, Maroc**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel et en bordure de l'oued Kiss, à végétation de *Zizyphus* sp., non loin de la frontière de l'Algérie (34°59'N-02°08'W). 15 étaient infestés par *O. marocanus*, soit un taux d'infestation de 50%.

**1-6-2. Enquêtes complémentaires**

❖ **Intersection 22°04'N et 16°35'W**

**Environs Nord de Lahmiris, Maroc**

→ 6 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel d'un oued asséché des environs nord de Lahmiris (22°01'N-16°35'W). Un seul était infesté par *O. costalis*, soit un taux d'infestation de 16,6%.

❖ **Intersection 21°51'N et 15°29'W**

**Environs de l'Adrar Souttouf, Maroc**

→ 12 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel d'un oued asséché des environs de l'Adrar Souttouf (21°51'N-15°29'W). 2 étaient infestés par *O. sonrai* ssp., soit un taux d'infestation de 16,6%.

❖ **Intersection 22°37'N et 14°30'W**

**Environs d'Aousserd, Maroc**

→ 12 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel d'un oued asséché des environs d'Aousserd (22°37'N-14°30'W). Un seul était infesté par des tiques ornithodores (non testées et non identifiées), soit un taux d'infestation de 8,3%.

❖ **Intersection 23°33'N et 15°53'W**

**Environs de Dakhla, Maroc**

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel de la vallée d'un oued et d'une plaine sableuse, non loin de la côte atlantique près d'El Argoub, au nord-est du Tropique du Cancer (23°33'N-15°53'W). 5 étaient infestés par *O. costalis*, soit un taux d'infestation de 50%.



❖ **Intersection 26°13'N et 14°20'W**

**Environs de Boujdour, Maroc**

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel d'un oued asséché, à végétation d'*E. balsamifera* et d'*Acacia* sp., près de la côte atlantique au nord-est de Boujdour (26°13'N-14°20'W). 2 étaient infestés par *O. costalis*, soit un taux d'infestation de 20%.

❖ **Intersection 32°10'N et 01°21'W**

**Environs de Figuig, Maroc**

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel et en ordure de l'oued Dfilia, à palmeraie dense et végétation de *Zizyphus* sp., au sud-ouest de Figuig (32°10'N-01°21'W). 3 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 30%.

❖ **Intersection 31°45'N et 08°W**

**Environs de Marrakech, Maroc**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés sur le plateau et en bordure d'un oued asséché à végétation de *Zizyphus* sp., palmiers à dattes, près de Marrakech (31°44'N-07°58'W). 13 étaient infestés par *O. marocanus* et *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 86,6%.

❖ **Intersection 32°N et 09°30'W**

**Environs de Safi, Maroc**

→ 16 terriers de rongeurs ont été examinés sous les blocs de rochers en bordure d'une zone de cultures et d'un oued asséché des environs de Souiria Kédima non loin de l'embouchure de l'oued Tensift (32°00'N-09°20'W) et (32°02'N-09°19'W). 8 étaient infestés par *O. costalis* et *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 50%.

❖ **Intersection 33°N et 08°W**

**Environs ouest de Settlat, Maroc**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés sous les blocs de rochers en bordure de l'oued Oum Er-Rbiat près du barrage hydro-électrique de Daorat des environs ouest de Settlat (32°56'N-08°03'W). 12 étaient infestés par *O. marocanus*, soit un taux d'infestation de 80%.

❖ **Intersection 33°N et 06°W**

**Environs ouest de Khénifra, Maroc**

→ 9 terriers de rongeurs ont été examinés en bordure de l'oued Grou dans les environs de Sidi Lamine à l'ouest de Khénifra 32°55'N-06°02'W et 32°55'N-06°03'W). 4 étaient infestés par *O. occidentalis*, soit un taux d'infestation de 44%.



❖ **Intersection 33°N et 04°W**

**Environs de Missour, Maroc**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés sur le plateau d'une colline près de l'oued Choufcherk dans les environs de Missour (33°02'N-04°00'W). 10 étaient infestés par *O. marocanus* et *O. occidentalis*, soit un taux d'infestation de 66,6%.

❖ **Intersection 33°30'N et 08°W**

**Environs Sud de Casablanca, Maroc**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés dans un mur en crépis de ciment dégradé d'une maison en ruines et le long d'une digue bordant une zone de cultures près de Bir-Jdid dans les environs sud de Casablanca (33°22'N-08°00'W). 10 étaient infestés par *O. marocanus*, soit un taux d'infestation de 66,6%.

❖ **Intersection 33°30'N et 07°30'W**

**Environs Nord de Casablanca, Maroc**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés sous les blocs de rochers en bordure de l'oued Mellah près des cascades de Mizab dans les environs nord de Casablanca (33°39'N-07°23'W). 12 étaient infestés par *O. occidentalis*, soit un taux d'infestation de 80%.

❖ **Intersection 34°N et 07°W**

**Environs de Rabat, Maroc**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés le long d'un mur en face de Chellah et du Palais Royal près de l'oued Abou Rak-Rak dans les environs de Rabat (34°00'N-06°49'W). 13 étaient infestés par *O. occidentalis*, soit un taux d'infestation de 86,6%.

❖ **Intersection 34°N et 06°W**

**Environs Nord de Khémisset, Maroc**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en bordure d'un oued asséché le long des champs de cultures dans les environs ouest d'Aiti Yadine et du barrage d'El Kansera au nord de Khémisset (34°00'N-06°02'W). 10 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 66,6%.

❖ **Intersection 34°N et 05°W**

**Environs de Fès, Maroc**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel le long d'un mur bétonné en face du Camping Le Diamant Vert dans les environs de Fès (33°59'N-05°01'W). 9 étaient infestés par *O. occidentalis*, soit un taux d'infestation de 60%.

❖ **Intersection 34°N et 04°W**

**Environs Sud de Taza, Maroc**

→ 8 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel dans les environs du village de Beb-Lerba au sud de Taza (34°00'N-04°05'W, 34°02'N-04°04'W et 34°06'N-04°02'W). Un seul était infesté par *O. occidentalis* (34°00'N-04°05'W), soit un taux d'infestation de 12,5%.

❖ **Intersection 34°15'N et 06°30'W**

**Environs de Kénitra, Maroc**

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel à végétation herbacée des environs de Kénitra (34°18'N-06°29'W). Aucun terrier ne présentait de tiques ornithodores.

→ 5 terriers de rongeurs ont été échantillonnés en zone de cultures et sur le plateau d'une butte en terre non loin de la voie ferrée dans les environs de Kénitra (34°18'N-06°28'W). 2 étaient infestés par *O. costalis*, soit un taux d'infestation de 40%.

Sur 15 terriers examinés, 2 étaient infestés par *O. costalis*, soit un taux d'infestation global de 13%.

❖ **Intersection 34°30'N et 06°30'W**

**Environs de Kénitra, Maroc**

→ 3 terriers de rongeurs ont été examinés le long d'une digue en zone de cultures rizicoles au nord-est des environs du village d'Ouled Ziane Had-Des-Ouled Jeloul (34°32'N-06°20'W). Tous étaient négatifs pour les tiques ornithodores.

→ 4 terriers de rongeurs ont été examinés en péri domestique le long d'un mur en briques de ciment et sous les sommiers en bois d'un point de stockage des denrées alimentaires d'une concession du village d'Ouled Ziane Had-Des-Ouled Jeloul (34°33'N-06°22'W). Un seul était infesté par un individu de tique ornithodore (non testée et non identifiée), soit un taux d'infestation de 25%.

Sur 7 terriers examinés, un seul était infesté par une tique ornithodore (non testée et identifiée), soit un taux d'infestation global de 14%.

❖ **Intersection 34°30'N et 06°W**

**Environs de Kénitra, Maroc**

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés en bordure d'une zone de cultures et le long d'une digue des environs du village de Mèchra Ben-Skiri près de l'oued Ouérha (34°34'N-06°04'W). 5 étaient infestés par *O. costalis*, soit un taux d'infestation de 50%.

❖ **Intersection 35°N et 06°W**

**Environs Sud de Larache, Maroc**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés dans les environs de Garba, le long d'une haie de *Zizyphus* sp., près du village de Ghouazi dans les environs sud de Larache (35°01'N-06°08'W). Tous étaient infestés par *O. costalis* et *O. occidentalis*, soit un taux d'infestation de 100%.

❖ **Intersection 35°10'N et 04°W**

**Environs d'Al Hoceima, Maroc**

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en bordure d'un oued asséché et le long des digues en zone de cultures des environs d'Izemmourèn (34°11'N-03°59'W). 4 étaient infestés par *O. marocanus*, soit un taux d'infestation de 26,6%.

❖ **Intersection 36°N et 05°30'W**

**Environs de Tétouan, Maroc**

→ 3 terriers de rongeurs ont été examinés sur le plateau d'une colline non loin de la frontière avec la ville espagnole Ceuta (Sebta) dans les environs de Tétouan (35°52'N-05°21'W). Tous étaient infestés par *O. occidentalis*, soit un taux d'infestation de 100%.

→ 4 terriers de rongeurs ont été examinés en bordure d'un oued permanent des environs de Tétouan (35°51'N-05°20'W). 3 étaient infestés par *O. occidentalis*, soit un taux d'infestation de 75%.

→ 3 terriers de rongeurs ont été examinés en zone de cultures sous des talus d'arbustes des environs de Fnideq (35°47'N-05°20'W). 1 seul était infesté par *O. occidentalis*, soit un taux d'infestation de 33%.

Sur 10 terriers examinés, 7 étaient infestés par *O. occidentalis*, soit un taux d'infestation global de 70%.

### **1-6-3. Enquêtes menées en Espagne**

❖ **Intersection 36°55'N et 04°19'W**

**Environs de Malaga, Espagne**

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés aux pieds des oliviers dans les environs de Colmenar (36°55'N-04°19'W). Tous étaient négatifs pour les tiques ornithodores.

❖ Intersection 36°55'N et 04°19'W

## Environs de Malaga, Espagne

→ 7 terriers de rongeurs ont été examinés sur une butte en milieu naturel et aux pieds des oliviers dans les environs de Torremolinos (36°38'N-04°30'W). 2 étaient infestés par *O. occidentalis*, soit un taux d'infestation de 28,5%.

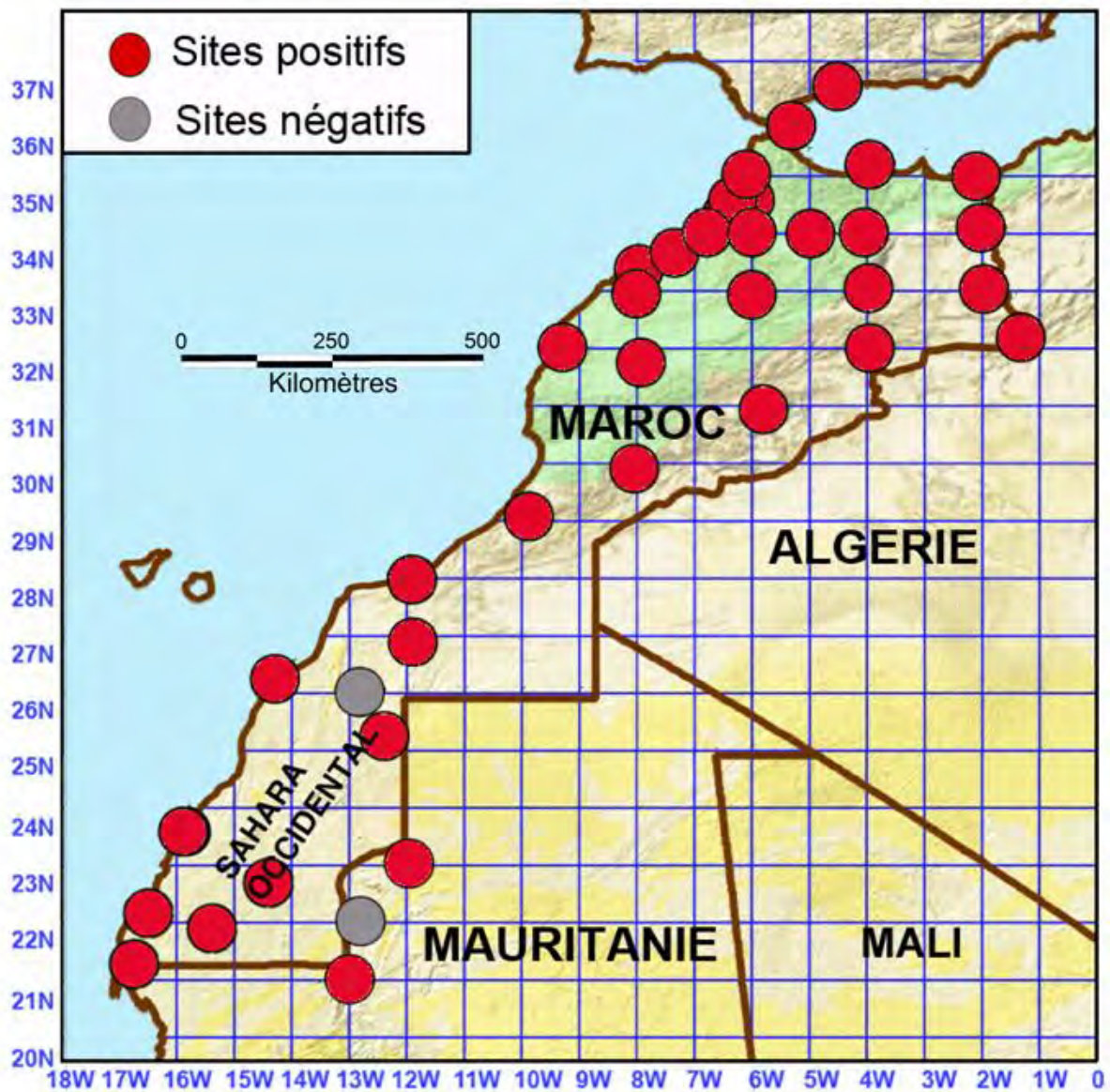


Figure 37 : Distribution spatiale et localisation des sites positifs ou négatifs pour la présence de tiques *Ornithodoros* dans des terriers de petits mammifères au Maroc et sud de l'Espagne

Tableau VI : Effectifs et lieu de recherche des tiques *Ornithodoros* au Maroc et sud de l'Espagne, en 2006, 2009 et 2010

|                                                                                          | Localisation    | Date                                          | Pays    | Localité proche | Terriers étudiés | Terriers infestés | Taux infestation (%) |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------|---------|-----------------|------------------|-------------------|----------------------|
| Transect Sud-Nord<br>(entre le 12 <sup>ème</sup> et le 13 <sup>ème</sup> méridien ouest) | 25°N/12°W       | 02/10/2006                                    | Maroc   | Galtat Zemmour  | 20               | 2                 | 10%                  |
|                                                                                          | 26°N/13°W       | 03/10/2006                                    | Maroc   | Boukra          | 30               | 0                 | 0%                   |
|                                                                                          | 27°N/12°W       | 04/10/2006                                    | Maroc   | Es-Smara        | 30               | 2                 | 6,6%                 |
|                                                                                          | 28°N/12°W       | 05/10/2006                                    | Maroc   | Tarfaya         | 30               | 15                | 50%                  |
| Transect Sud-Ouest/Nord-Est                                                              | 29°N            | 06/10/2006                                    | Maroc   | Guelmim         | 30               | 14                | 46,6%                |
|                                                                                          | 30°N            | 07/10/2006                                    | Maroc   | Tata            | 30               | 14                | 46,6%                |
|                                                                                          | 31°N            | 18-19/10/2006                                 | Maroc   | Jbel Sarhro     | 30               | 8                 | 26,6%                |
|                                                                                          | 32°N            | 17/10/2006                                    | Maroc   | Boudnib         | 30               | 4                 | 13%                  |
|                                                                                          | 33°N            | 14/10/2006                                    | Maroc   | Tendrara        | 30               | 2                 | 6,6%                 |
|                                                                                          | 34°N            | 13-14/10/2006                                 | Maroc   | Aïn-Bénimathar  | 30               | 13                | 43%                  |
| Enquêtes complémentaires                                                                 | 35°N            | 12/10/2006                                    | Maroc   | Berkane         | 30               | 15                | 50%                  |
|                                                                                          | 22°04'N/16°35'W | 14/11/2011                                    | Maroc   | Nord Lahmiris   | 6                | 1                 | 16,6%                |
|                                                                                          | 21°51'N/15°29'W | 16/11/2011                                    | Maroc   | Adrar Souttouf  | 12               | 2                 | 16,6%                |
|                                                                                          | 22°37'N/14°30'W | 13/11/2011                                    | Maroc   | Aousserd        | 12               | 1                 | 8,3%                 |
|                                                                                          | 23°33'N/15°53'W | 01/10/2006                                    | Maroc   | Dakhla          | 10               | 5                 | 50%                  |
|                                                                                          | 26°13'N/14°20'W | 01/10/2006                                    | Maroc   | Boujdour        | 10               | 2                 | 20%                  |
|                                                                                          | 32°N/09°20'W    | 24/10/2009                                    | Maroc   | Safi            | 16               | 8                 | 50%                  |
|                                                                                          | 31°44'N/07°58'W | 26/10/2009                                    | Maroc   | Marrakech       | 15               | 13                | 86,6%                |
|                                                                                          | 32°N/01°21'W    | 15/10/2006                                    | Maroc   | Figuig          | 10               | 3                 | 30%                  |
|                                                                                          | 32°56'N/08°03'W | 18/05/2010                                    | Maroc   | Ouest Settlat   | 15               | 12                | 80%                  |
|                                                                                          | 33°39'N/07°23'W | 11/05/2010                                    | Maroc   | Nord Casablanca | 15               | 12                | 80%                  |
|                                                                                          | 34°00'N/06°49'W | 12/05/2010                                    | Maroc   | Rabat           | 15               | 13                | 86,6%                |
|                                                                                          | 34°00'N/06°02'W | 13/05/2010                                    | Maroc   | Nord Khémisset  | 15               | 10                | 66,6%                |
|                                                                                          | 32°55'N/06°02'W | 13/05/2010                                    | Maroc   | Ouest Khénifra  | 9                | 4                 | 44%                  |
|                                                                                          | 33°59'N/05°01'W | 14/05/2010                                    | Maroc   | Fès             | 15               | 9                 | 60%                  |
|                                                                                          | 33°02'N/04°00'W | 16/05/2010                                    | Maroc   | Missour         | 15               | 10                | 66,6%                |
|                                                                                          | 34°00'N/04°05'W | 15/05/2010                                    | Maroc   | Sud Taza        | 8                | 1                 | 12,5%                |
|                                                                                          | 34°18'N/06°29'W | 10/10/2006                                    | Maroc   | Kénitra         | 15               | 2                 | 13%                  |
|                                                                                          | 33°22'N/08°W    | 23/10/2009                                    | Maroc   | Sud Casablanca  | 15               | 10                | 66,6%                |
|                                                                                          | 34°34'N/06°04'W | 30/10/2009                                    | Maroc   | Kénitra         | 10               | 5                 | 50%                  |
|                                                                                          | 34°33'N/06°22'W | 31/10/2009                                    | Maroc   | Kénitra         | 7                | 1                 | 14%                  |
|                                                                                          | 35°01'N/06°08'W | 12/05/2010                                    | Maroc   | Sud Larache     | 15               | 15                | 100%                 |
|                                                                                          | 35°52'N/05°20'W | 28/10/2009                                    | Maroc   | Tétouan-Ceuta   | 10               | 7                 | 70%                  |
|                                                                                          | 35°11'N/03°59'W | 28/10/2009                                    | Maroc   | Al Hoceima      | 15               | 4                 | 26,6%                |
|                                                                                          | 36°38'N/04°30'E | 17-18/07/2010                                 | Espagne | Torremolinos    | 17               | 2                 | 12%                  |
| Total                                                                                    |                 | 34 sites dans 32 régions (Wilayas) prospectés |         |                 | 605              | 239               | 39,5%                |
|                                                                                          |                 | 1 site dans le sud de l'Espagne               |         |                 | 17               | 2                 | 12%                  |

## 1-7. Échantillonnage de tiques ornithodores mené en Algérie et Tunisie

### 1-7-1. Échantillonnage mené en Algérie

#### 1-7-1-1. Échantillonnage sur les 37<sup>ème</sup>, 36<sup>ème</sup> et 35<sup>ème</sup> parallèles Nord

##### ❖ Intersection 37°N et 08°30'E                      Environs de La Calle (Wilaya d'El Tarf), Algérie

→ 11 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel près de la lagune Mellah dans les environs de la Vieille Calle (36°54'N-08°20'E). 3 étaient infestés par *Ornithodoros erraticus*, soit un taux d'infestation de 27%.

→ 2 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs du croisement d'El Tarf et de La Calle (36°53'N-08°24'E). Aucun ne présentait de tiques ornithodores.

→ 5 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel en bordure d'une colline dans les environs du lac Tonga (36°53'N-08°31'E) et (36°54'N-08°31'E). Un seul était infesté par *O. erraticus*, soit un taux d'infestation de 20%.

→ 5 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel sur le plateau d'une colline près de l'oued Melloul (oued Eurg) dans les environs d'Oum Theboul (36°53'N-08°34'E). 4 étaient infestés par *O. erraticus*, soit un taux d'infestation de 80%.

Sur 23 terriers étudiés dans les environs de La Calle, 8 étaient infestés par *O. erraticus*, soit un taux d'infestation global de 35%.

##### ❖ Intersection 37°N et 07°E                      Environs de Skikda (Wilaya de Skikda), Algérie

→ 5 terriers de rongeurs ont été examinés aux pieds des oliviers en bordure d'un oued des environs de Salah Bouchaour (36°41'N-06°51'E). Tous étaient infestés par *O. erraticus*, soit un taux d'infestation de 100%.

##### ❖ Intersection 37°N et 05°E                      Environs de Béjaïa (Wilaya de Béjaïa), Algérie

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel dans le domaine du parc de Gouraya dans les environs du Cap Carbon (36°45'N-05°05'E) et (36°46'N-05°05'E). Tous étaient négatifs pour les tiques ornithodores.

→ 14 terriers de rongeurs ont été examinés aux pieds des oliviers des environs de l'oued Saket (36°49'N-04°56'E), (36°47'N-05°00'E) et de l'oued Soummam (36°42'N-05°00'E). Un seul était infesté par *O. erraticus* (36°49'N-04°56'E), soit un taux d'infestation de 7%.

Sur 24 terriers étudiés dans les environs de Béjaïa, seulement 1 était infesté par *O. erraticus*, soit un taux d'infestation global de 4%.

❖ **Intersection 36°30'N et 04°E**                      **Environs de Bouira (Wilaya de Bouira), Algérie**

→ 8 terriers de rongeurs ont été examinés aux pieds des oliviers de Taghzout situé à 5 kilomètres au nord-est des environs de Bouira (36°25'N-03°57'E). 5 étaient infestés par *O. occidentalis*, soit un taux d'infestation de 62,5%.

❖ **Intersection 36°30'N et 01°E**                      **Environs de Ténès (Wilaya de Chlef), Algérie**

→ 6 terriers de petits rongeurs ont été examinés aux pieds des oliviers et arbustes, et sous des blocs de rochers des environs de Souk Elbakar à l'ouest de Ténès (36°28'N-01°07'E). Un seul était infesté par *O. occidentalis*, soit un taux d'infestation de 16,6%.

❖ **Intersection 36°N et 01°E**                      **Environs de Chlef (Wilaya de Chlef), Algérie**

Environs ouest de Chlef (36°05'N-01°06'E). Date d'échantillonnage : 10 Juin 2010.

→ 6 terriers de rongeurs ont été examinés au nord-est de Boukadir sur le plateau d'une colline en bordure de l'oued Chlef. 4 étaient infestés par *O. occidentalis*, soit un taux d'infestation de 80%.

❖ **Intersection 36°N et 03°E**                      **Environs de Berrouaghia (Wilaya de Médéa),  
Algérie**

→ 5 terriers de rongeurs ont été examinés aux pieds des oliviers en bordure de l'oued Zéboudj dans les environs est de Berrouaghia (36°09'N-02°58'E). 2 étaient infestés par *O. occidentalis*, soit un taux d'infestation de 40%.

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés dans les environs de Séghouane sur le plateau d'un affluent de l'oued Séghouane dans les environs sud de Berrouaghia (35°57'N-02°50'E). Un seul était infesté par *O. occidentalis*, soit un taux d'infestation de 10%.

Sur 15 terriers étudiés dans les environs de Berrouaghia, 3 étaient infestés par *O. occidentalis*, soit un taux d'infestation global de 20%.

❖ **Intersection 36°N et 04°E**                      **Environs de M'Sila (Wilaya de M'Sila), Algérie**

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel dans les environs de Mélouza au nord-ouest de M'Sila (35°54'N-04°06'E) et (35°51'N-04°06'E). 2 étaient infestés par *Ornithodoros normandi* (35°51'N-04°06'E), soit un taux d'infestation de 20%.

❖ **Intersection 36°N et 05°E**                      **Environs de Sétif (Wilaya de Sétif), Algérie**

→ 7 terriers de rongeurs ont été examinés dans les environs de Ras El Oued au sud-ouest de Sétif (35°59'N-05°47'E). Un seul était infesté par *O. normandi*, soit un taux d'infestation de 14%.

❖ **Intersection 36°15'N et 05°30'E**                      **Environs de Sétif (Wilaya de Sétif), Algérie**

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés en bordure des champs de blé sur le plateau d'une colline des environs nord-est de Sétif (36°12'N-05°30'E). Tous étaient négatifs pour les tiques ornithodores.

❖ **Intersection 35°N et 02°W**                      **Environs de Ghazaouet (Wilaya de Maghnia), Algérie**

→ 6 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de ghazaouet (35°03'N-01°50'W). 2 étaient infestés par *O. marocanus*, soit un taux d'infestation de 33,3%.

❖ **Intersection 35°N et 01°30'W**                      **Environs de Maghnia (Wilaya de Maghnia), Algérie**

→ 5 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Béni-bahdel (34°42'N-01°30'W). Seul 1 terrier était infesté par *O. marocanus*, soit un taux d'infestation de 20%.

❖ **Intersection 35°N et 04°E**                      **Environs de Bou Saada (Wilaya de M'Sila), Algérie**

→ 7 terriers de rongeurs ont été examinés en bordure de l'oued Magtaa dans les environs de Bou Saada non loin du village El Hamel (35°09'N-04°06'E). 4 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 57,1%.

❖ **Intersection 35°N et 03°E**                      **Environs de Djelfa (Wilaya de Djelfa), Algérie**



→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés en bordure de la route et dans les talus à *Zizyphus* sp. près d'une zone de cultures des environs du village d'El Mesrane (34°56'N-03°06'E) et d'Hassi Bahbah (35°03'N-03°02'E) et (35°03'N-03°02'E). Tous étaient négatifs pour les tiques ornithodores.

### 1-7-1-2. Échantillonnage le long du méridien 00°W/E

#### ❖ Sur le 36<sup>ème</sup> parallèle                      Environs Mostaganem (Wilaya de Mostaganem), Algérie

→ 6 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Mostaganem (35°56'W-00°05'E). 4 terriers étaient infestés par *Ornithodoros rupestris*, soit un taux d'infestation de 67%.

→ 5 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Mostaganem (35°58'N-00°08'E). 2 terriers étaient infestés par *O. costalis*, soit un taux d'infestation de 40%.

#### ❖ Sur le 35<sup>ème</sup> parallèle                      Environs de Saïda (Wilaya de Saïda), Algérie

→ 10 terriers de petits rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs Saïda Mt Daïa (34°56'N-00°05'W) et (34°48'N-00°03'E). 2 terriers étaient infestés par *O. rupestris*, soit un taux d'infestation de 50%.

#### ❖ Sur le 34<sup>ème</sup> parallèle                      Environs de Bougtob (Wilaya de Saïda), Algérie

→ 8 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Bougtob (34°00'N-00°02'E). 4 terriers étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 50%.

#### ❖ Sur le 33<sup>ème</sup> parallèle                      Environs de Naama (Wilaya d'Aïn Sefra), Algérie

→ 35 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs d'Alsa (33°00'N-00°08'W). Tous étaient négatifs pour les tiques ornithodores.

### 1-7-1-3. Échantillonnage le long du 6<sup>ème</sup> méridien Est

#### ❖ Sur le 37<sup>ème</sup> parallèle                      Environs de Jijel (Wilaya de Jijel), Algérie

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés aux pieds des oliviers (36°47'N-05°54'E) et en milieu naturel des environs de Taher (36°47'N-05°54'E), (36°49'N-05°55'E) et (36°48'N-05°54'E). 2 étaient infestés par *O. erraticus* (36°47'N-05°54'E), soit un taux d'infestation de 20%.

#### ❖ Sur le 36<sup>ème</sup> parallèle                      Environs de Batna (Wilaya de Batna), Algérie

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés le long d'une haie de cultures et dans un hangar à foin dans les environs d'Aïn-Djasser (35°48'N-06°06'E). Tous étaient négatifs pour les tiques ornithodores.

→ 20 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel à végétation de pins et en bordure d'une zone de cultures des environs de Taya (36°00'N-05°58'E). Tous étaient négatifs pour les tiques ornithodores.

→ 15 terriers de rongeurs ont été examinés en bordure d'un champ de blé des environs ouest de Batna (35°55'N-05°52'E). Tous étaient négatifs pour les tiques ornithodores.

#### ❖ Sur le 35<sup>ème</sup> parallèle                      Environs de Biskra (Wilaya de Biskra), Algérie

→ 3 terriers de rongeurs ont été examinés dans la palmeraie et en bordure du village de M'Chounèche (34°57'N-06°00'E) et (34°56'N-05°58'E). Tous étaient négatifs pour les tiques ornithodores.

→ 23 terriers de rongeurs ont été examinés dans un oued des environs de M'Chounèche (34°55'N-05°58'E). 10 terriers étaient infestés par *O. sonrai* et *O. normandi*, soit un taux d'infestation de 43%.

→ 10 terriers de rongeurs ont été examinés dans un oued des environs de M'Chounèche (34°55'N-05°58'E). 9 étaient infestés par *O. sonrai* et *O. normandi*, soit un taux d'infestation de 90%.

Sur 36 terriers étudiés dans les environs de Biskra, 19 étaient infestés par *O. sonrai* et *O. normandi*, soit un taux d'infestation global de 53%.

❖ **Sur le 34<sup>ème</sup> parallèle** **Environs d'El Méghaier (Wilaya d'El Oued), Algérie**

→ 19 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel à végétation de tamaris sur des buttes de dunes sablonneuses des environs d'El Méghaier (34°00'N-05°52'E). Tous étaient négatifs pour les tiques ornithodores.

→ 14 terriers de rongeurs ont été examinés dans l'oued Melah (33°56'N-05°42'E). 3 terriers étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 21,4%.

Sur 33 terriers étudiés dans les environs d'El Méghaier, 3 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation global de 9%.

❖ **Sur le 33<sup>ème</sup> parallèle** **Environs de Touggourt (Wilaya d'El Oued), Algérie**

→ 13 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel à végétation de tamaris sur des dunes de sable des environs de Sidi Madhi (33°03'N-06°06'E). Tous étaient négatifs pour les tiques ornithodores.

#### 1-7-1-4. Échantillonnage complémentaire

❖ **Intersection 32°N et 03°45'E** **Environs de Ghardaïa (Wilaya de Ghardaia), Algérie**

→ 11 terriers de rongeurs ont été examinés dans des buttes en terre de l'oued Seb-Seb à végétation de *Casuarina* cf *equisetifolia* dans les environs sud-est de Ghardaia (32°05'N-03°46'E). Tous étaient négatifs pour les tiques ornithodores.

→ 6 terriers de rongeurs ont été examinés dans des buttes en terre de l'oued Seb-Seb à végétation de tamaris dans les environs sud-ouest de Ghardaia (32°10'N-03°33'E). Aucun ne contenait des tiques ornithodores.

❖ **Intersection 27°30'N et 00°30'E**                      **Environs Sud-ouest d'Adrar (Wilaya d'Adrar), Algérie**

→ 30 terriers de rongeurs ont été examinés dans des buttes de sable à tapis herbacé composé de Chénopodiacées dans les environs de l'oued Abani (27°29'N-00°20'W). Tous étaient négatifs pour les tiques ornithodores.

❖ **Intersection 31°N et 02°15'W**                      **Environs Sud-ouest de Béchar (Wilaya de Béchar), Algérie**

→ 12 terriers de rongeurs ont été examinés en bordure de deux oueds asséchés à végétation de *Zizyphus* sp. et *Acacia* sp. Dans les environs nord de Taghit (31°02'N-02°11'W) et (31°10'N-02°16'W). Aucun ne contenait les tiques ornithodores.

❖ **Intersection 31°N et 02°45'W**                      **Environs Sud-ouest de Béchar (Wilaya de Béchar), Algérie**

→ 14 terriers de rongeurs ont été examinés respectivement dans les environs est et nord-ouest de l'oued Guir près d'Abadla (30°59'N-02°43'W) et (31°05'N-02°47'W). Un seul était infesté par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 7,1%.

Sur 26 terriers étudiés dans la Wilaya de Béchar, un seul était infesté par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation global de 4%.

Tableau VII : Effectifs et lieu de recherche des tiques *Ornithodoros* en Algérie, 2009-2012

| Localisation                       | Date                           | Localité proche  | Terriers étudiés | Terriers infestés | Taux infestation (%) |
|------------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| 36°53'N/08°31'E<br>36°54'N/08°20'E | 09-10/12/2009<br>07-08/12/2009 | La Vieille Calle | 23               | 8                 | 35%                  |
| 36°41'N/06°51'E                    | 06/06/2010                     | Skikda           | 5                | 5                 | 100%                 |
| 36°47'N/05°54'E                    | 31/05/2010                     | Jijel            | 10               | 2                 | 20%                  |
| 36°00'N/05°58'E                    | 14-15/05/2009, 05/06/10        | Batna            | 45               | 0                 | 0%                   |
| 34°55'N/05°58'E                    | 11&18/05/2009, 18/05/10        | Biskra           | 36               | 19                | 53%                  |
| 33°56'N/05°42'E                    | 13/05/2009, 22/10/10           | El Méghaier      | 33               | 3                 | 9%                   |
| 33°03'N/06°06'E                    | 12/05/2009                     | Touggourt        | 13               | 0                 | 0%                   |
| 32°10'N/03°33'E                    | 20/06/2011                     | Ghardaïa         | 17               | 0                 | 0%                   |
| 32°05'N/03°46'E                    | 20/06/2011                     |                  |                  |                   |                      |
| 27°39'N/00°20'W                    | 22/06/2011                     | Sud-ouest Adrar  | 30               | 0                 | 0%                   |
| 31°02'N/02°11'W                    | 23/06/2011                     | Sud-ouest Béchar | 12               | 0                 | 0%                   |
| 31°10'N/02°16'W                    | 24/06/2012                     |                  |                  |                   |                      |
| 30°59'N/02°43'W                    | 24/06/2012                     | Abadla           | 14               | 1                 | 7,1%                 |
| 31°05'N/02°47'W                    | 24/06/2012                     |                  |                  |                   |                      |
| 33°00'N/00°08'W                    | 05/06/2012                     | Asla             | 35               | 0                 | 0%                   |
| 34°00'N/02°2'E                     | 06/06/2012                     | Bougtoob         | 8                | 4                 | 50%                  |
| 36°49'N/04°56'E                    | 01-02/06/2010                  | Béjaïa           | 24               | 1                 | 4%                   |
| 35°59'N/05°04'E                    | 03/06/2010                     | Sétif            | 7                | 1                 | 14%                  |
| 36°12'N/05°30'E                    | 05/06/2010                     | Sétif            | 10               | 0                 | 0%                   |
| 36°25'N/03°57'E                    | 07/06/2010                     | Bouira           | 8                | 5                 | 62,5%                |
| 35°51'N/04°06'E                    | 04/06/2010                     | M'Sila           | 10               | 2                 | 20%                  |
| 35°56'N/00°05'E                    | 09/06/2012                     | Mostaganem       | 6                | 4                 | 67%                  |
| 35°58'N/00°08'E                    | 10/06/2012                     | Mostaganem       | 5                | 2                 | 40%                  |
| 34°56'N/00°05'W                    | 08/06/2012                     | Saïda Mt Daïa    | 10               | 2                 | 20%                  |
| 34°48'N/00°03'E                    | 08/06/2012                     |                  |                  |                   |                      |
| 35°03'N/01°50'W                    | 04/06/2012                     | Ghazaouet        | 6                | 2                 | 33,3%                |
| 34°42'N/01°31'W                    | 03/06/2012                     | Béni-Bahdel      | 5                | 1                 | 20%                  |
| 35°09'N/04°06'E                    | 19/10/2010                     | Bou Saada        | 7                | 4                 | 57,1%                |
| 35°03'N/03°02'E                    | 20-21/12/2010                  | Djelfa           | 30               | 0                 | 0%                   |
| 36°09'N/02°58'E                    | 09/06/2010                     | Berrouaghia      | 15               | 3                 | 20%                  |
| 35°57'N/02°50'E                    | 09/06/2010                     |                  |                  |                   |                      |
| 36°05'N/01°06'E                    | 10/06/2010                     | Chlef            | 5                | 4                 | 80%                  |
| 36°28'N/01°07'E                    | 11/06/2010                     | Ténès            | 6                | 1                 | 16,6%                |
| Total                              | 23 Régions (Wilayas)           |                  | 435              | 74                | 17%                  |

## 1-7-2. Échantillonnage mené en Tunisie

### ➤ Échantillonnage entre le 08<sup>ème</sup> méridien Est et le 11<sup>ème</sup>

#### ❖ Sur le 37<sup>ème</sup> parallèle                      Environs de Bizerte (Wilaya de Bizerte), Tunisie

→ 8 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel des environs de Bizerte (37°19'N-09°51'E), (37°19'N-09°50'E) et (37°14'N-09°43'E). Un seul était infesté par *O. normandi*, soit un taux d'infestation de 12,5%.

→ 4 terriers de rongeurs ont été examinés dans une butte en terre et le long de la bordure d'une digue des environs de Mateur (37°01'N-09°43'E) et (37°00'N-09°44'E). Tous étaient négatifs pour les tiques ornithodores.

Sur 12 terriers étudiés dans la zone, seulement un terrier était infesté soit un taux d'infestation global de 8,3%.

#### ❖ Sur le 37<sup>ème</sup> parallèle                      Environs de Tabarka (Wilaya de Tabarka), Tunisie

→ 6 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel et en bordure de l'oued Kébir dans les environs de Tabarka (36°57'N-08°47'E) et (36°51'N-08°43'E). 2 étaient infestés par *O. erraticus*, soit un taux d'infestation de 16,6%.

#### ❖ Sur le 36<sup>ème</sup> parallèle                      Environs de Le Kef (Wilaya de Le Kef), Tunisie

→ 6 terriers de rongeurs ont été examinés en bordure d'un oued asséché des environs de Le Kef (36°07'N-08°38'E). 4 étaient infestés par *O. normandi*, soit un taux d'infestation de 66,6%.

#### ❖ Sur le 36<sup>ème</sup> parallèle                      Environs Sud de Tunis (Wilaya de Tunis), Tunisie

→ 3 terriers de rongeurs ont été examinés près d'un talus d'*Acacia* sp. et le long d'une digue en zone de cultures dans les environs sud de Tunis non loin du site archéologique d'Oudhna (36°36'N-10°10'E). 2 étaient infestés par *O. normandi* et *O. costalis*, soit un taux d'infestation de 67%.

❖ **Sur le 35<sup>ème</sup> parallèle** **Environs Sud de Kairouan (Wilaya de Kairouan), Tunisie**

→ 4 terriers de rongeurs ont été examinés en bordure d'un oued asséché des environs sud de Kairouan (35°03'N-10°02'E). 3 étaient infestés par *Ornithodoros kairouanensis*, soit un taux d'infestation de 75%.

❖ **Sur le 34<sup>ème</sup> parallèle** **Environs Nord-ouest de Gabès (Wilaya de Gabès), Tunisie**

→ 8 terriers de rongeurs ont été examinés en bordure des digues d'une zone de cultures des environs de l'oued Ramel (34°07'N-09°58'E). 3 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 37,5%.

❖ **Sur le 34<sup>ème</sup> parallèle** **Environs Nord de Tozeur (Wilaya de Tozeur), Tunisie**

→ 9 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel et en bordure deux oueds asséchés des environs nord de Tozeur (34°00'N-08°10'E, 34°01'N-08°12'E et 34°06'N-08°15'E). Tous étaient négatifs pour les tiques ornithodores.

→ 8 terriers de rongeurs ont été examinés dans les environs de l'oued Sihili au nord-est et nord-ouest de Tozeur (34°09'N-08°16'E et 34°12'N-08°12'E). 2 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 25%.

Sur 17 terriers étudiés, 2 étaient infestés soit un taux d'infestation global de 12%.

❖ **Sur le 34<sup>ème</sup> parallèle** **Environs Gafsa (Wilaya de Gafsa), Tunisie**

→ Des specimens de tiques *O. normandi* ont été collectés, par le Dr Ali Bouattour de l'Institut Pasteur de Tunis, par ouverture mécanique des terriers de rongeurs avec une pelle manuelle montée sur un manche de 2 mètres près d'El Guettar dans les environs de Gafsa (34°16'N-09°04'E).

❖ Sur le 33<sup>ème</sup> parallèle**Environs Nord de Ben Guerdane (Wilaya de Ben Guerdane), Tunisie**

→ 18 terriers de rongeurs ont été examinés en milieu naturel à végétation d'*Acacia* sp. et en bordure de deux oueds asséchés des environs nord de Ben Guerdane (33°08'N-11°05'E, 33°07'N-11°04'E et 33°08'N-11°02'E). 2 étaient infestés par *O. sonrai*, soit un taux d'infestation de 11%.

Tableau VIII : Effectifs et lieu de recherche des tiques *Ornithodoros* en Tunisie, 2010

| Localisation                    | Date                     | Localité proche | Terriers étudiés | Terriers infestés | Taux infestation (%) |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------|------------------|-------------------|----------------------|
| 37°15'N/09°50'E<br>37°N/09°45'E | 22/05/2010<br>21/05/2010 | Bizerte         | 12               | 1                 | 12,5%                |
| 37°N/08°45'E                    | 22/05/2010               | Tabarka         | 6                | 2                 | 33,3%                |
| 36°30'N/10°10'E                 | 02/12/2010               | Sud Tunis       | 3                | 3                 | 100%                 |
| 36°N/08°30'E                    | 23/05/2010               | Le Kef          | 6                | 4                 | 66,6%                |
| 35°N/10°E                       | 23/05/2010               | Kairouan        | 10               | 6                 | 60%                  |
| 34°N/10°E                       | 29/11/2010               | Gabès           | 8                | 3                 | 37,5%                |
| 34°N/08°15'E                    | 01/12/2010               | Tozeur          | 17               | 2                 | 12%                  |
| 33°N/11°E                       | 30/11/2010               | Ben Guerdane    | 18               | 2                 | 11,1%                |
| 34°16'N/09°04'E                 | 04/10/2010               | Gafsa           | 2                | 1                 | 50%                  |
| Total                           | 8 Régions (Wilayas)      |                 | 82               | 23                | 28%                  |



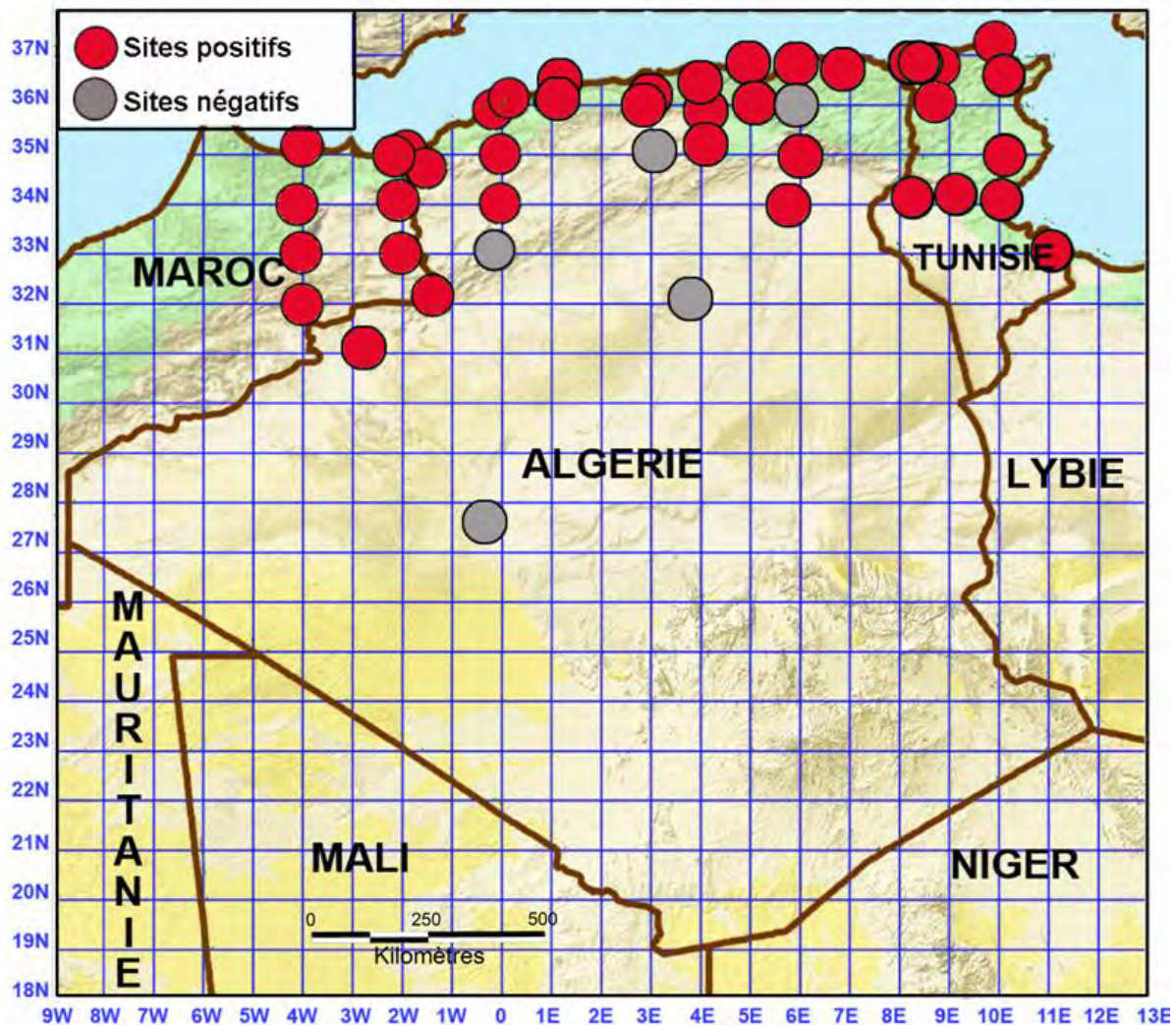


Figure 38 : Distribution spatiale et localisation des sites positifs ou négatifs pour la présence de tiques *Ornithodoros* dans des terriers de petits mammifères en Algérie et Tunisie

## 1-8. Principaux résultats

La présence de tiques *Ornithodoros* a été recherchée dans 7406 terriers étudiés dans 421 stations de 245 sites d'étude (Tableau IX) de 11 pays d'Afrique de l'Ouest (Mauritanie, Sénégal, Gambie, Guinée-Bissao, Guinée Conakry, Mali, Burkina Faso, Niger, Togo, Côte d'Ivoire et Libéria), trois pays d'Afrique du Nord (Maroc, Algérie et Tunisie) et un pays européen (sud de l'Espagne). Des tiques *Ornithodoros* morphologiquement attribuables à *O. sonrai*, *O. erraticus* ou *O. normandi* ont été collectées dans 135 sites distribués au Maroc, en Algérie, Tunisie, Mauritanie, au Sénégal, en Gambie, au Mali et sud de l'Espagne (Tableau IX).

En Afrique occidentale, notamment au Sénégal, Guinée-Bissao, Guinée Conakry, Libéria (Figure 33), Mali, Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Niger, Togo (Figures 34 et 35), tous les terriers situés au sud de la latitude 13°N et à l'est de la longitude 01°E étaient négatifs pour les tiques *O. sonrai*.

Les limites méridionales de collecte des tiques *O. sonrai* étaient respectivement la latitude 13°32'N, 13°35'N et 13°54'N au Sénégal, en Gambie et au Mali, et la limite orientale au sud du Sahara était la longitude 00°34'E dans le Mali (Figures 33 et 34). Dans tous les pays où nous avons trouvé des tiques *O. sonrai* (Figures 33, 34, 35, 37 et 38), leur distribution était généralement contiguë, avec rarement un site négatif entre deux sites positifs, et il a été, donc, possible d'établir sur le terrain les limites précises de distribution. La prévalence des terriers infestés de tiques était de 20,4% (143/699) et 50% (15/30) au Sénégal et en Gambie respectivement (Tableau II), 13,5% (246/1813) au Mali (Tableau III), 6,3% (37/586) en Mauritanie (Tableau IV), 39,5% (239/605) au Maroc (Tableau VI), 17% (74/435) et 28% (23/82) en Algérie et Tunisie respectivement (Tableaux VII et VIII). Dans le centre et l'est du Mali (Figure 34), des tiques *O. sonrai* ont été trouvées uniquement dans des terriers situés à proximité du fleuve Niger et de ses principaux affluents. Par contre, dans les autres régions, la présence de tiques *O. sonrai* dans les terriers était indépendante de tout réseau hydrographique actif ou fossile. Dans la partie centrale du bassin du fleuve Niger, il existe une vaste zone isolée sans tiques *O. sonrai* clairement circonscrite entre le méridien 07°W et 06°W. La distribution des tiques *O. sonrai* qui couvre les 2/3 nord du Sénégal, le nord de la Gambie à la latitude 13°35'N entre les longitudes 15°37'W et 15°W, l'ensemble de la Mauritanie -à l'exception d'un tiers de la partie orientale-, se prolonge dans une grande partie du territoire malien. Des tiques *O. sonrai* ont colonisé des terriers dans les zones les plus arides de Mauritanie au nord de Zouérat. La mise en évidence des tiques *O. sonrai* à Nouadhibou (Mauritanie) en distribution continue jusqu'au Sahara occidental et l'ensemble du Maroc avec des tiques *Ornithodoros*, puis en Algérie et Tunisie atteste parfaitement de l'existence d'une continuité territoriale de la répartition géographiques des ornithodores vecteurs entre la Mauritanie, le Sénégal et le Maroc, puis entre l'est du Maroc et l'Algérie ainsi qu'entre l'est de l'Algérie et la Tunisie (Figures 33, 34, 35, 37 et 38).

Le tableau X montre les différentes valeurs de l'écart-type calculées à partir de la moyenne des terriers infestés par pays étudié. L'écart-type est une mesure de dispersion des terriers infestés de tiques *Ornithodoros* autour la moyenne. Plus l'écart-type est faible, plus la dispersion est homogène, et plus il est élevé plus la dispersion de ces tiques est irrégulière.

Tablau IX : Nombre de sites et terriers investigués, et nombre et proportion de positifs pour les tiques *Ornithodoros* en Afrique de l'Ouest et du Nord, 2006 à 2014

| Pays          | Nombre de terriers |                  | Nombre de sites |                |
|---------------|--------------------|------------------|-----------------|----------------|
|               | Examinés           | Positifs (%)     | Étudiés         | Positifs (%)   |
| Algérie       | 435                | 74 (17%)         | 24              | 19 (79,2%)     |
| Maroc         | 605                | 239 (39,5%)      | 34              | 33 (97,1%)     |
| Tunisie       | 82                 | 23 (28%)         | 9               | 9 (100%)       |
| Mauritanie    | 586 #319           | 37 (6,3%) #59    | 20 (#10)        | 5 (25%) #7     |
| Sénégal       | 3118 #501          | 424 (13,6%) #133 | 81 (#11)        | 48 (59,2%) #10 |
| Gambie        | 30                 | 15 (50%)         | 2               | 2 (100%)       |
| Mali          | 1813 #645          | 246 (13,5%) #27  | 54 (#15)        | 19 (35,2%) #4  |
| Burkina Faso  | 30 #180            | 0 (0%)           | 1 (#3)          | 0%             |
| Niger         | 30 #601            | 0 (0%)           | 1 (#12)         | 0%             |
| Togo          | 150                | 0 (0%)           | 5               | 0%             |
| Côte d'Ivoire | 90                 | 0 (0%)           | 3               | 0%             |
| Guinée        | 270                | 0 (0%)           | 7               | 0%             |
| Guinée-Bissau | 30                 | 0 (0%)           | 1               | 0%             |
| Libéria       | 60                 | 0 (0%)           | 2               | 0%             |
| Espagne       | 17                 | 2 (11,7%)        | 1               | 100%           |
| Total         | 7346               | 1060 (14,3%)     | 245             | 135 (55,1%)    |

#Nombre = Effectifs référés aux travaux de DIATTA (2005)

Tableau X : Valeurs de l'écart-type déterminées dans les pays de distribution des tiques *Ornithodoros* indiquant des différences de dispersion homogène et/ou irrégulière de ces tiques entre les pays endémiques de borréliose

| Pays        | Taux infestation terriers de tiques <i>Ornithodoros</i> (%) | Moyenne terriers infestés | Écart-type | Variance | Médian |
|-------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------|------------|----------|--------|
| Algérie     | 74/435 (17%)                                                | 2,7                       | 4,9        | 24,06    | 1      |
| Maroc       | 239/605 (39,5%)                                             | 7,4                       | 5,3        | 28,3     | 8      |
| Sénégal     | 143/699 (20,4%)                                             | 4,9                       | 6,7        | 45,2     | 2      |
| Tunisie     | 23/82 (28%)                                                 | 4,8                       | 6,9        | 47,7     | 2,5    |
| Gambie      | 15/30 (50%)                                                 | 10                        | 7,8        | 61       | 14     |
| Mauritanie  | 37/586 (6,3%)                                               | 3,1                       | 8,2        | 67,6     | 0      |
| Mali        | 246/1813 (13,5%)                                            | 5,9                       | 8,6        | 74,9     | 0      |
| Sud Espagne | 2/17 (12%)                                                  | 2                         | 0          | 0        | 2      |

La dispersion des tiques *Ornithodoros* est alors plus irrégulière au Mali, en Mauritanie, Gambie, Tunisie, au Sénégal, Maroc et en Algérie respectivement, et reste par contre plus homogène, vice versa, dans ce dernier pays cité jusqu'au premier. La variation de la prévalence de l'infestation des terriers par des tiques *Ornithodoros* est significative tant entre les 4 pays d'Afrique de l'Ouest (Sénégal, Gambie, Mauritanie, Mali), test du Khi-2 = 19,69,

$p = 0,000004$  qu'entre les 3 pays d'Afrique du Nord (Maroc, Algérie, Tunisie), test du Khi-2 = 35,47,  $p < 10^{-6}$  et entre ces différents pays ouest africains étudiés et ceux du Maghreb sus-cités, test du Khi-2 = 31,95,  $p < 10^{-6}$ .

Sur la base des critères morphologiques classiques, toutes les tiques *Ornithodoros* collectées dans les terriers étaient attribuables à la tique *O. sonrai* collectée au Sénégal, en Gambie, au Mali, en Mauritanie et dans les zones les plus arides du Maroc, de l'Algérie et Tunisie, soit à la tique *O. erraticus* trouvée au nord-est de l'Algérie et nord-ouest de la Tunisie ou alors à la tique *O. normandi* collectée au nord-est de l'Algérie et nord de la Tunisie. Les enquêtes réalisées au Niger n'ont pas permis de confirmer la présence de tiques *O. sonrai* (Figure 36) signalée à Niamey par MOREL (1965). De plus, les tiques *O. sonrai* n'ont pas été trouvées au Togo (Figure 36) et leur rôle incriminé dans la transmission de *B. crocidurae* chez des malades fébriles examinés dans des structures sanitaires de ce pays (NORDSTRAND *et al.*, 2007) n'a pas pu être confirmé en l'absence de tiques. Aussi, des foyers reliques de tiques *O. sonrai* n'ont pas été localisés tant dans la Fouta-Djalon que dans la Moyenne, Basse, Haute Guinée, Guinée forestière, au Libéria, en Côte d'Ivoire et Guinée Bissau malgré l'examen de 450 terriers de rongeurs. La tique *O. moubata* n'a jamais été trouvée ni observée dans les terriers examinés.

## 1-9. Conclusion

Ces résultats montrent qu'en Afrique occidentale (Mauritanie, Sénégal, Gambie, Mali) les tiques *O. sonrai* colonisent massivement les terriers des rongeurs et insectivores tant à l'intérieur des habitations que dans le milieu naturel, alors qu'en Afrique du Nord (Maroc, Algérie, Tunisie) et au sud de l'Espagne les tiques *Ornithodoros* sont largement distribuées dans la nature, à l'exception des territoires pourvus de sable dunaire et d'ergs (MOREL, 1965). La localisation des principaux foyers de présence des tiques *Ornithodoros* a été précisée tant en Afrique de l'Ouest que du Nord, contribuant ainsi en partie à mieux comprendre l'épidémiologie de la borréliose à tiques.

## **2. Caractérisation génétique des populations de tiques *Ornithodoros* et des *Borrelia*, et comparaison du fonctionnement génétique du système *Borrelia*/hôte/vecteur en zones sahélo-soudanienne et saharo-méditerranéenne en relation avec les modifications climatiques liées au déficit pluviométrique**

### **2-1. Présentation de l'étude**

Les populations de tiques *Ornithodoros* collectées au cours des investigations de terrain rapportées dans l'étude précédente ont testées par amplification PCR du gène de la flagelline pour rechercher une infection à *Borrelia* et donc identifier des foyers à borrélioses, puis caractérisées génétiquement par des techniques de biologie moléculaire afin de déterminer les principales espèces vectrices. Des marqueurs moléculaires identifiés pour la première fois chez la tique *O. sonrai*, comme le gène 16S mitochondrial et le gène 18S nucléaire couramment utilisés en phylogénie ont été appliqués. Les résultats de ces analyses publiés dans la revue PLoS ONE (Article 1) par TRAPE *et al.* (2013), ont permis d'identifier les différentes espèces de tiques *Ornithodoros* impliquées dans la transmission des espèces de *Borrelia* chez l'homme. Ces résultats sont présentés ci-dessous en détail, par pays, en fonction des différents foyers de contamination par *Borrelia* mis en évidence. Il était intéressant de savoir sur le plan épidémiologique si certains génotypes identifiés chez les tiques *O. sonrai* étaient spécialisés dans le portage et la transmission de certains génotypes de *B. crocidurae* en Afrique de l'Ouest. Les résultats de cette étude réalisée par ELBIR *et al.* (2015) ont également été publiés dans Parasites & Vectors (Article 2) en montrant que la bactérie *B. crocidurae* est présente partout chez toutes les tiques *O. sonrai* étudiées en Afrique occidentale. Ensuite, nous avons comparé le fonctionnement génétique du système *Borrelia*/hôte/vecteur dans un écosystème en relation avec les paramètres climatiques liés au déficit pluviométrique qu'a connu l'Afrique du Nord et sub-Saharienne depuis 1970 (MAHE *et al.*, 1999).



## 2-2. Analyses moléculaires et phylogénétiques des tiques *Ornithodoros* et des infections à *Borrelia* au Sénégal et en Gambie

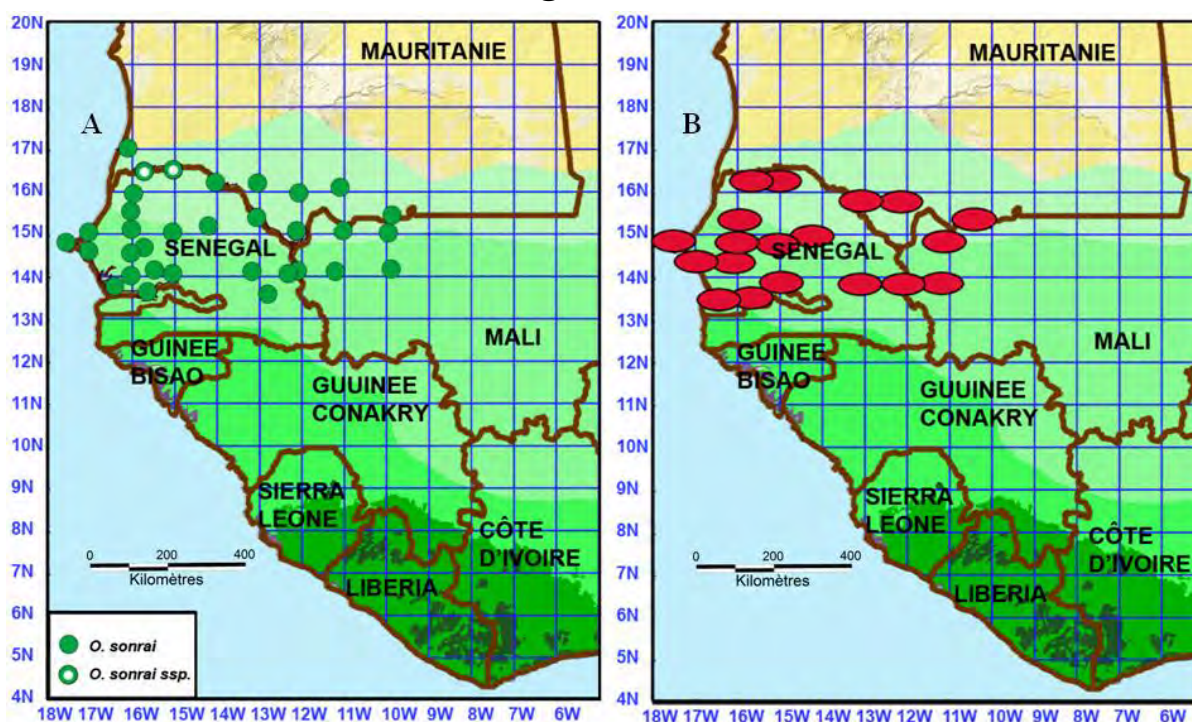


Figure 39 : Distribution spatiale des tiques *O. sonrai* trouvées dans des terriers de petits mammifères (A) et de *B. crocidurae* (B) au Sénégal et en Gambie

## 2-3. Analyses moléculaires et phylogénétiques des tiques *Ornithodoros* et des infections à *Borrelia* au Mali

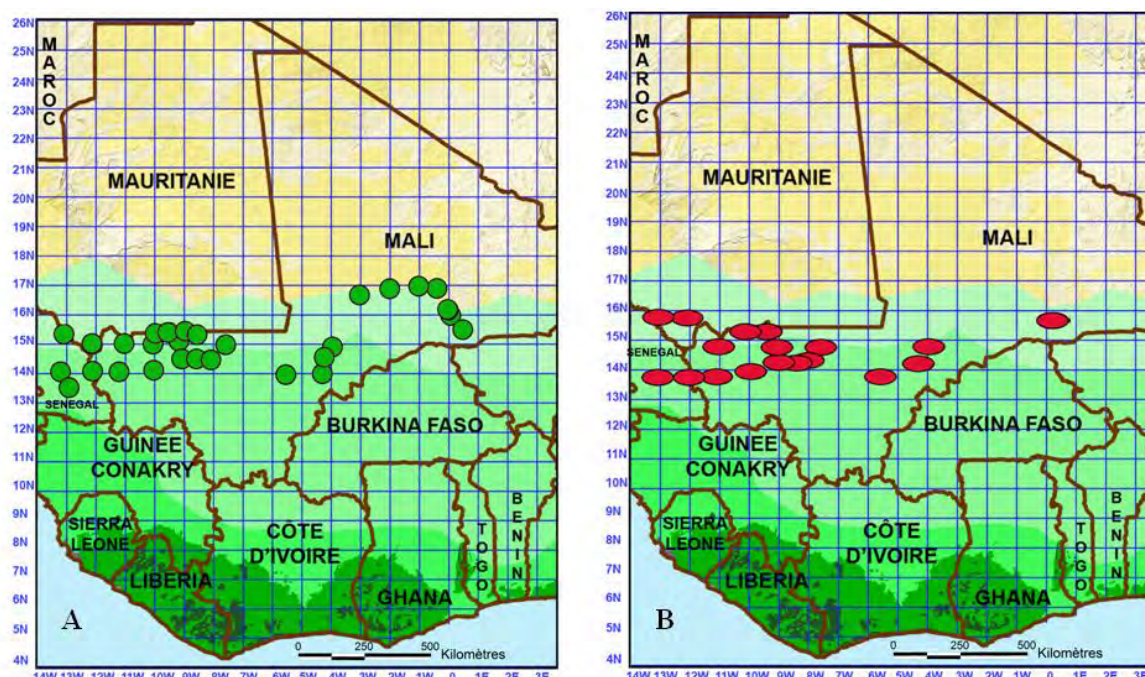


Figure 40 : Distribution spatiale des tiques *O. sonrai* trouvées dans des terriers de petits mammifères (A) et de *B. crocidurae* (B) au Mali



## 2-4. Analyses moléculaires et phylogénétiques des tiques *Ornithodoros* et des infections à *Borrelia* en Mauritanie

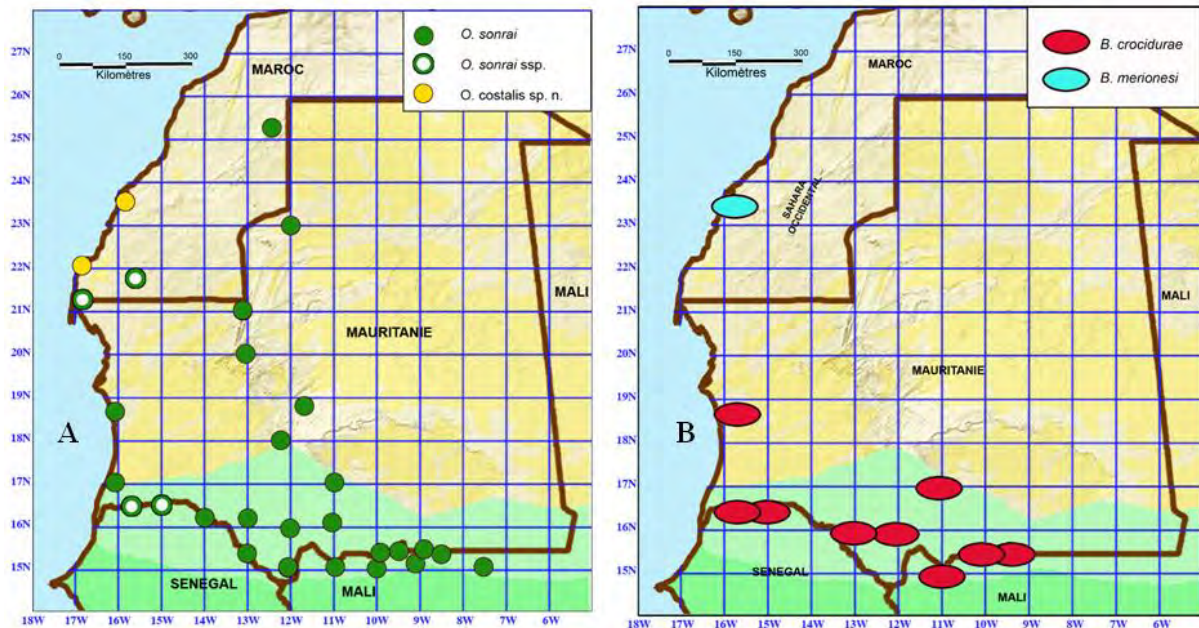


Figure 41 : Distribution spatiale des tiques *O. sonrai* trouvées dans des terriers de petits mammifères (A) et de *B. crocidurae* (B) en Mauritanie

## 2-5. Analyses moléculaires et phylogénétiques des tiques *Ornithodoros* et des infections à *Borrelia* au Maroc et sud de l'Espagne

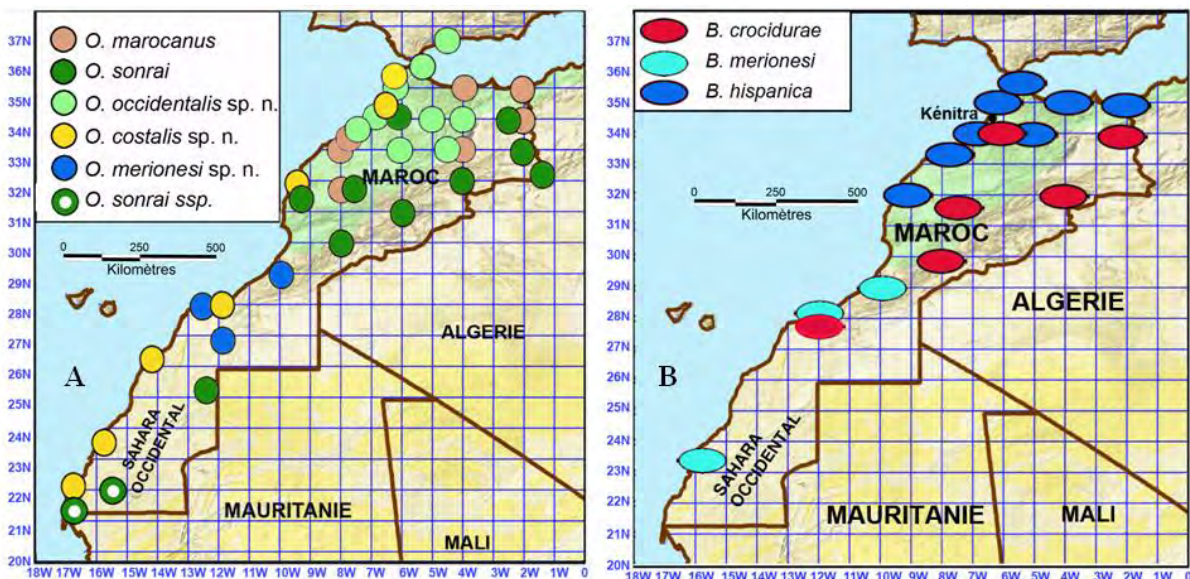


Figure 42 : Distribution spatiale des espèces de tiques *Ornithodoros* trouvées dans des terriers de petits mammifères (A) et des espèces de *Borrelia* mises en évidence chez des tiques et/ou petits mammifères (B) au Maroc et sud de l'Espagne

## 2-6. Analyses moléculaires et phylogénétiques des tiques *Ornithodoros* et des infections à *Borrelia* en Algérie et Tunisie

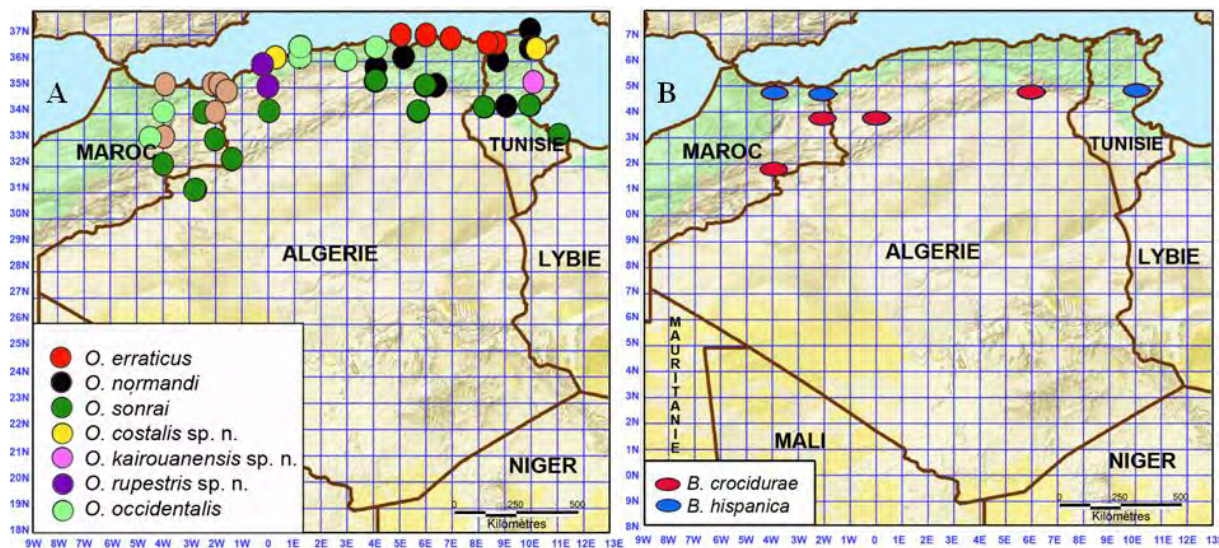


Figure 43 : Distribution spatiale des espèces de tiques *Ornithodoros* trouvées dans des terriers de petits mammifères (A) et des espèces de *Borrelia* mises en évidence (B) en Algérie et Tunisie

## 2-7. Comparaison du fonctionnement génétique du système *Borrelia*/hôte/vecteur en zones sahélo-soudanienne et saharo-méditerranéenne en relation avec les modifications climatiques liées au déficit pluviométrique

Le réchauffement climatique et ses changements climatiques associés ont des répercussions sur un ensemble de processus écologiques, avec notamment des conséquences sur les maladies à transmission vectorielle (WHO TASK GROUP, 1990; DOBSON *et al.*, 1993; LOEVINSOHN, 1994). Comme les tiques *Ornithodoros* sont des agasidés endophiles vivant dans les terriers des régions semi-désertique, sahélienne et soudanienne, il est probable que des taux spécifiques d'humidité et de température dans le sol soient les principaux déterminants de leur distribution (MOREL, 1965; RODHAIN, 1976; TRAPE *et al.*, 1996a). D'après TRAPE *et al.* (1996a), le déficit pluviométrique lié à la persistance de la sécheresse sub-Saharienne depuis 1970 qui a été responsable de la vaste extension en zone soudanienne de la borréliose à tiques en Afrique de l'Ouest, est le premier exemple connu pour une maladie vectorielle dont la progression a été causée par les changements climatiques actuels.



En Afrique du Nord et sub-Saharienne, des travaux récents (MAHE *et al.*, 1999) ont montré un déplacement respectif des isohyètes 250 et 500 mm vers le nord de la zone saharo-méditerranéenne puis vers le sud de la zone sahélo-soudanienne en raison du déficit de la pluviométrie constaté depuis les années 1970. Les effets de ces modifications climatiques (en température, eau, pluviométrie et humidité relative) devraient agir sur les organismes qui y vivent. Ces organismes vivants, en luttant pour leur survie, ont certes développé des mécanismes d'adaptation biologique ayant conduit à des modifications adaptées de leurs constituants physiologiques, biochimiques ou génomiques. Nous pensons que l'action de ces facteurs écologiques voire climatiques sur le milieu a pu impacter le fonctionnement génétique du système *Borrelia*/hôte/vecteur, et montrons ci-dessous les résultats de cet impact sur ce système.

## 2-7-1. Impact du déficit pluviométrique sur le fonctionnement génétique du système *Borrelia*/hôte/vecteur en zone sahélo-soudanienne

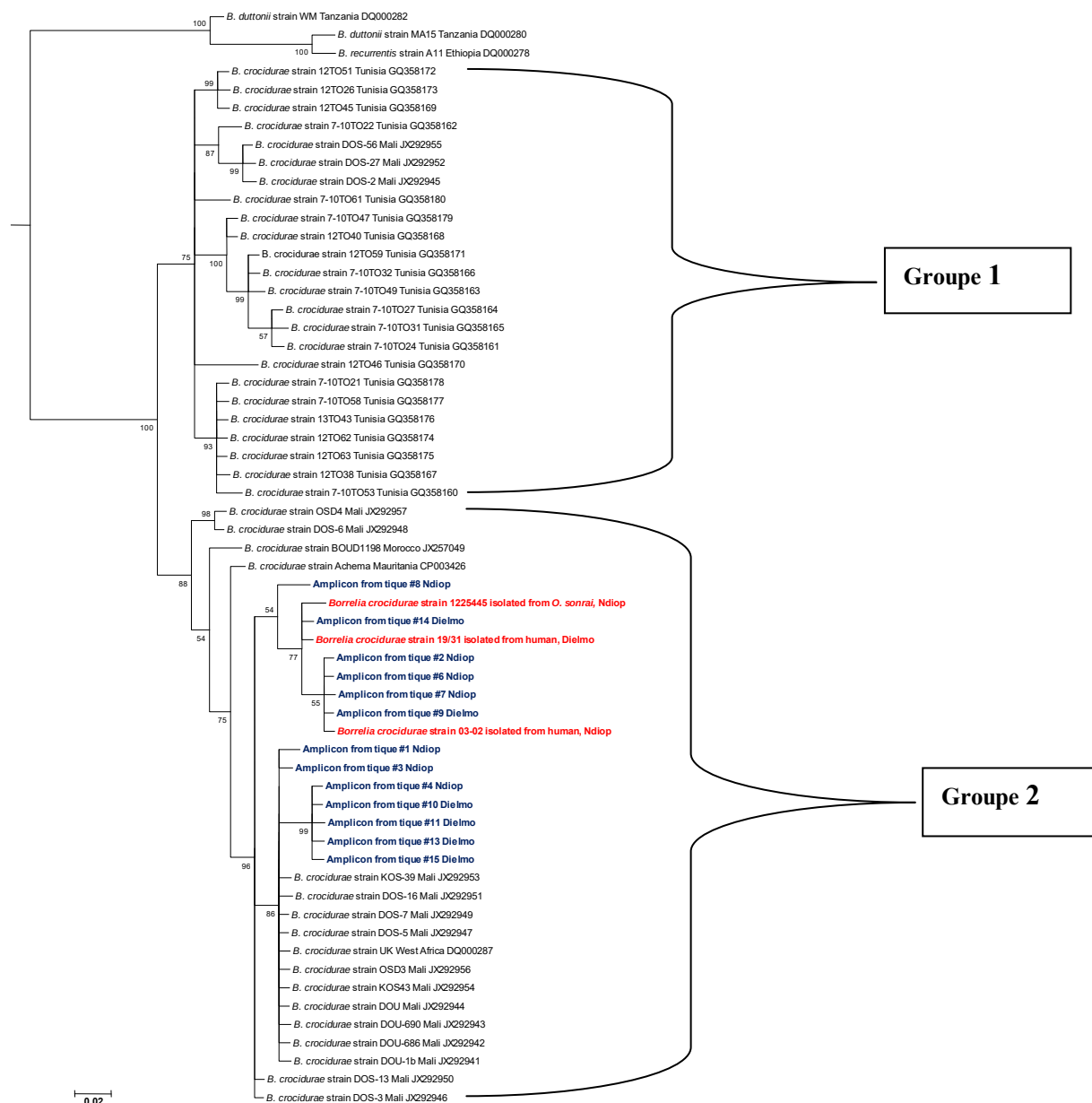


Figure 44 : Groupes phylogénétiques et arbre des relations phylétiques mettant en évidence la souche de *B. crocidurae* 1225445 isolée des tiques *O. sonrai* collectées à Ndiop, des souches de *B. crocidurae* isolées de patients fébriles 03-02 à Ndiop et 19/31 à Dielmo (en rouge), Sénégal, et des amplicons de tiques *O. sonrai* de Dielmo et Ndiop (en violet) par rapport aux autres souches de *B. crocidurae* de tiques (Mauritanie, Mali et Maroc). Les séquences du gène IGS ont été alignées à partir de CLUSTALW et les déductions phylogénétiques ont été obtenues en utilisant l'analyse phylogénétique bayésienne appliquée au logiciel TOPALi 2,5 (Biomathématiques et Statistiques Ecosse, Edimbourg, Royaume-Uni) avec l'application de MrBayes intégrée au modèle de substitution GTR +  $\Gamma$ .

Les numéros de GenBank sont mentionnés à la fin. Les numéros indiqués aux noeuds sont des valeurs de bootstrap obtenues en répétant l'analyse 100 fois pour générer un arbre de consensus majoritaire. Il y a un total de 545 positions dans l'ensemble des données finales. La barre d'échelle indique une divergence des séquences nucléotidiques de 2%.

## 2-7-2. Impact du déficit pluviométrique sur le fonctionnement génétique du système *Borrelia*/hôte/vecteur en zone saharo-méditerranéenne

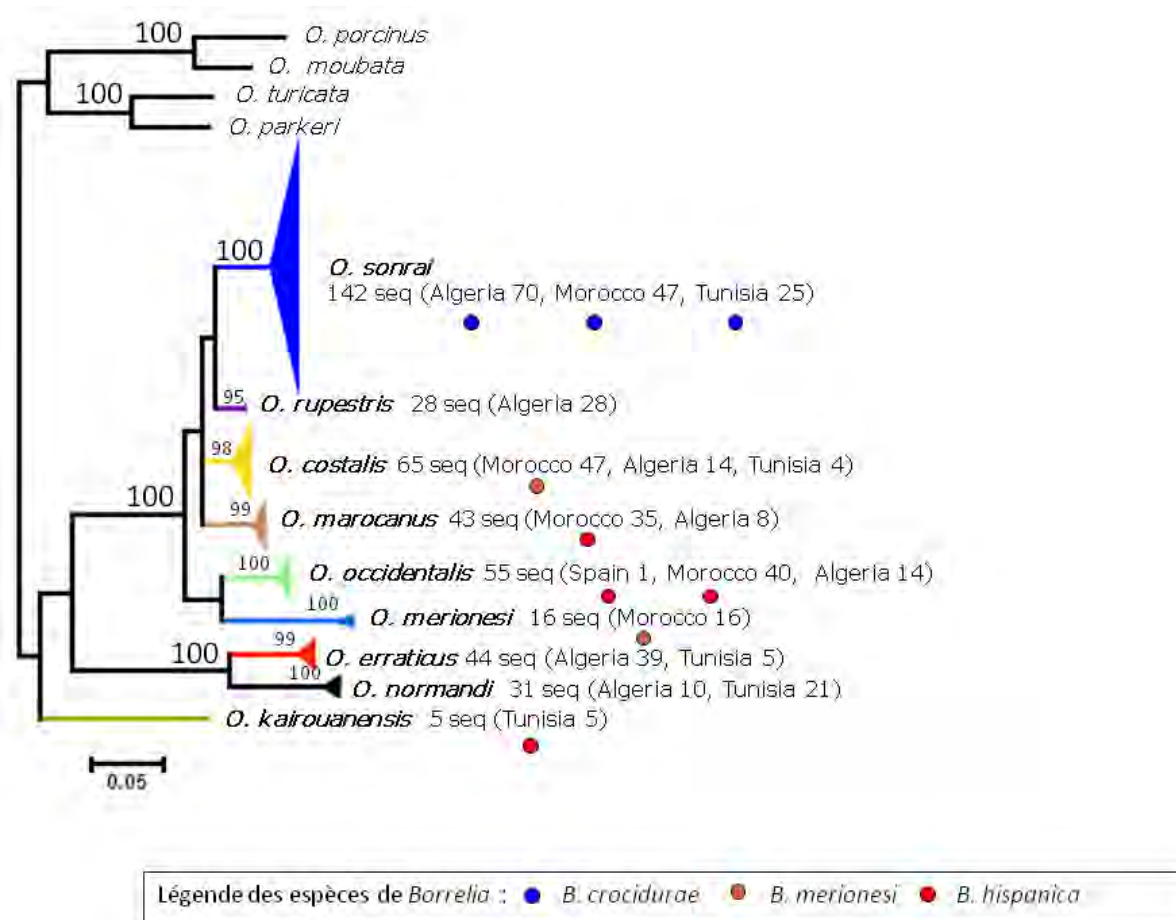


Figure 45 : Relations phylogénétiques entre espèces de tiques *Ornithodoros* mises en évidence en utilisant les séquences du gène 16S ARNr. Les triangles en couleur indiquent la diversité génétique des séquences détectées pour chaque espèce de tique *Ornithodoros*. Les ronds colorés correspondent aux espèces de *Borrelia* détectées dans chacune des espèces de tiques. Le phylogramme a été construit en utilisant une méthode de maximum de vraisemblance à partir des données de séquences partielles du gène 16S. Les valeurs de bootstrap > 90 sont présentées avec une barre d'échelle de 0,05 substitutions par site.

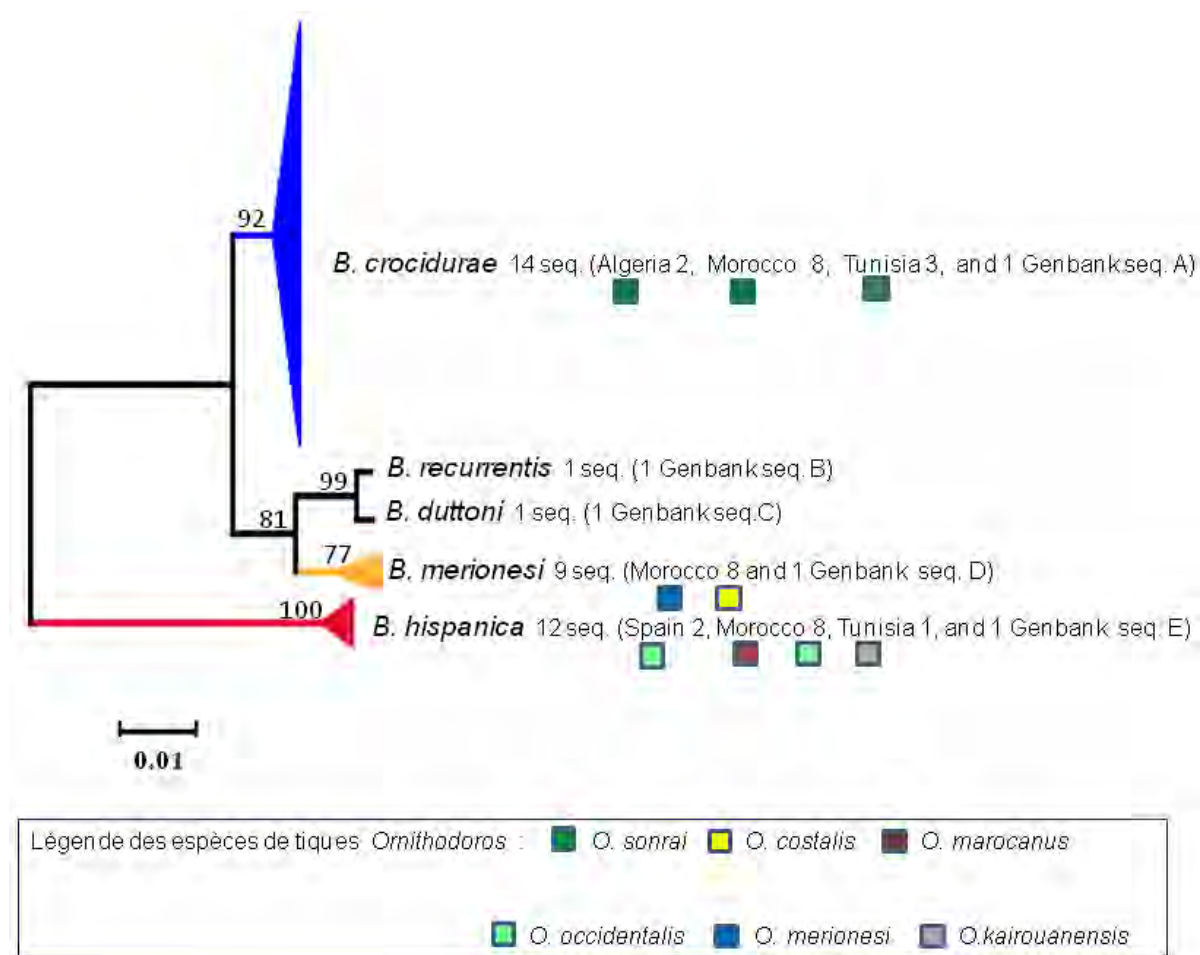


Figure 46 : Relations phylogénétiques entre les espèces de *Borrelia* mises en évidence en utilisant la combinaison des séquences d'une partie du gène 18S de l'espace inter-génique 16S-23S (IGS) et du gène de la flagelline (FLA). Le triangle en couleur a estimé la diversité des espèces de *Borrelia*, et nous y avons inclus le clade *B. merionesi*, une *Borrelia* détectée chez un rongeur capturé à El Argoub au Maroc. Les carrés en couleur correspondent aux espèces de tiques déterminées dans cette étude par l'analyse phylogénétique des séquences du gène 16S. Le phylogramme a été construit en utilisant une méthode de maximum de vraisemblance à partir de la combinaison des données de séquences IGS + flagelline (séquences comprenant des séquences GenBank de références). Les valeurs de bootstrap > 70 sont présentées avec une barre d'échelle de 0,01 substitutions par site.

## 2-8. Principaux résultats

Dans les 7 pays africains où les tiques ornithodores ont été trouvées (Mali, Sénégal, Gambie, Mauritanie, Maroc, Algérie, Tunisie) et le sud de l'Espagne, des tiques *Ornithodoros* ont été testées par des techniques de biologie moléculaire pour déterminer l'espèce vectrice et une infection associée à une *Borrelia*. Sur 1801 tiques testées, 776 provenaient du Sénégal et de la Gambie, 273 du Mali, 72 de la Mauritanie, 419 du Maroc et de l'Espagne et 261 de

l'Algérie et de la Tunisie. La présence d'une infection à *Borrelia* a été mise en évidence chez 199 tiques au Sénégal (199/768, 25,9%) et 4 en Gambie (4/8, 50%), 34 au Mali (34/273, 12,5%), 7 en Mauritanie (7/72, 9,7%), 40 au Maroc (40/415, 9,6%) et 2 en Espagne (2/4, 50%), 5 en Algérie (5/199, 2,5%) et 4 en Tunisie (4/62, 6,5%). Nous avons obtenu, au total, 820 séquences du gène 16S ARN de tiques *Ornithodoros*, et la combinaison de 216 séquences d'une partie du gène la flagelline (Fla) et du gène 18S de l'espace inter-génique (IGS) 16S-23S pour la *Borrelia* détectée.

L'analyse phylogénétique de tiques *Ornithodoros* a été basée sur les 820 séquences du gène 16S ARN répartis sur 165 séquences uniques regroupées dans 9 entités génétiques de tiques *Ornithodoros*. Les 9 entités identifiées ont été génétiquement différenciées et les hybrides entre les populations de ces zones ont été connus pour être infertiles (CHABAUD, 1954), ce qui indique que ces 9 entités devraient être considérées comme des espèces différentes dont cinq espèces n'ont jamais été décrites auparavant. Alors que, l'analyse phylogénétique des *Borrelia* a été réalisée sur 105 séquences différentes des 216 séquences des gènes IGS-FLA obtenues, et trois espèces de *Borrelia* ont été mises en évidence chez les échantillons de tiques : *B. crocidurae*, *B. hispanica*, et une troisième espèce, *B. merionesi*, qui est un spirochète rare décrit à partir des tiques *Ornithodoros* collectées dans la même zone du sud du Maroc (BLANC *et al.*, 1948; DIATTA *et al.*, 2012).

En Afrique de l'Ouest (Mali, Sénégal, Gambie, Mauritanie), seule l'espèce *O. sonrai* a été détectée et l'analyse effectuée sur des séquences du gène 16S de 533 individus de la tique *O. sonrai* de 72 sites d'étude des zones soudanienne, sahélienne et saharienne a montré une vaste distribution de cette espèce au Sénégal et en Gambie, au Mali et en Mauritanie (Figures 39A, 40A et 41A). Cependant, sur l'ensemble des spécimens de la tique *O. sonrai* testés, un groupe de tiques était génétiquement distinct, avec une valeur de bootstrap > 90. Ces tiques ornithodores, localisées au Nord-ouest du Sénégal à Dagana et Richard-Toll, et au Nord-ouest de la Mauritanie à Nouadhibou, constituent une sous-espèce de l'espèce *O. sonrai* (Figures 39A et 40A). Seul l'agent pathogène *B. crocidurae* a été détecté chez les tiques *O. sonrai* collectées dans toute la région ouest africaine (Figures 39B, 40B et 41B) et y est transmis partout par ces tiques.

Une diversité spécifique et génétique de tiques *Ornithodoros* a été observée en Afrique du Nord (Maroc, Algérie, Tunisie) où 9 espèces de tiques ont été identifiées, dont cinq espèces au Maroc et en Espagne, notamment *O. sonrai*, *O. marocanus*, *O. occidentalis*, *O.*

*costalis*, *O. merionesi* (Figure 42A) avec la présence de la sous-espèce de la tique *O. sonrai* rencontrée dans la partie la plus au sud du Maroc (Adrar Souttouf), et 4 autres espèces en Algérie et Tunisie, plus particulièrement *O. rupestris*, *O. erraticus*, *O. normandi*, *O. kairouanensis* (Figure 43A). Ces 9 espèces de tiques ont présenté soit une large distribution dans les zones les plus arides du Maroc, de l'Algérie et de la Tunisie pour ce qui concerne l'espèce *O. sonrai* (Figures 42A et 43A), ou divers modèles de distribution limitée aux régions côtières et/ou intérieures de l'Afrique du Nord et de l'Espagne pour les 8 autres espèces telles que *O. maroccanus*, *O. occidentalis*, *O. costalis*, *O. merionesi*, *O. rupestris*, *O. erraticus*, *O. normandi*, *O. kairouanensis* (Figures 42A et 43A). Parmi les 9 espèces déterminées, cinq sont nouvelles pour la science : *O. occidentalis*, *O. costalis*, *O. merionesi*, *O. rupestris* et *O. kairouanensis* (Figures 42A et 43A). L'agent pathogène *B. crocidurae* déjà présent chez les tiques *O. sonrai* distribuées en Afrique occidentale a également été trouvé chez les mêmes tiques *O. sonrai* d'Afrique du Nord (196 individus infectés au total sur 533 spécimens testés, 36,7%), *B. hispanica* a été détecté chez *O. maroccanus* (5/43, 11,6%), *O. occidentalis* (3/55, 5,5%) et *O. kairouanensis* (1/5, 20,0%) et *B. merionesi* a été diagnostiqué chez *O. costalis* (3/65, 4,6%) et *O. merionesi* (3/16, 18,8%) (Figures 42B et 43B). Aucune infection à *Borrelia* n'a été identifiée chez 28 spécimens de la tique *O. rupestris* dans 2 sites d'étude, ni chez 44 spécimens de la tique *O. erraticus* dans 5 sites de l'étude et chez 31 spécimens de la tique *O. normandi* provenant de 7 sites d'étude.

Au Sénégal, Des lots de tiques ont été constitués avec des specimens de tiques *O. sonrai* collectées au Centre IRD et dans le Parc Zoologique de Hann, et leur broyat a été inoculé à des souris blanches. Une infection à *B. crocidurae* a été mise en évidence chez une souris blanche inoculée avec un lot de tiques collectées au Centre IRD de Hann puis chez une autre inoculée avec un lot de tiques provenant du Parc Zoologique et Forestier de Hann contrôlées toutes à J3 et J6.

Une faible borréliémie a été observée chez ces deux souris blanches infectées. Ces deux souris blanches ont été sacrifiées à J14 puis nous avons inoculé leur sang et broyat de cerveau à huit souris blanches saines en vue d'amplifier la borréliémie. Les souris blanches SB26 infectée par le broyat de cerveau de la souris blanche infectée par le lot de tiques IRD- et SB27 infectée par celui de la souris blanche portant l'infection du lot de tiques collectées au Parc zoologique ont été envoyées à Marseille en France où les deux souches de *Borrelia* ont été isolées et leur caractérisation a confirmé la présence de *B. coccidurae*.

En Guinée Conakry et au Libéria, un total de 899 gouttes épaisses et 1299 séro-buvards de malades fébriles a été confectionné afin de rechercher des borréliés (*Borrelia*) par l'examen direct de la goutte épaisse et la PCR. Toutes les gouttes épaisses examinées ainsi que tous les séro-buvards des 1299 malades fébriles du Libéria testés par PCR nichée avec le gène de la flagelline étaient négatifs pour *Borrelia*. De même, aucune infection par *Borrelia* n'a été identifiée chez 240 séro-buvards de patients fébriles de Guinée testés par PCR, et ayant consulté dans des structures sanitaires de Labé dans le Fouta Djallon et de N'Zérékoré en Guinée forestière.

La Figure 44 montre l'existence de deux groupes phylogénétiques peu différenciés constitués des souches de *B. coccidurae* de la zone sahélo-soudanienne, et les relations phylétiques entre les souches de *B. coccidurae* des tiques *O. sonrai*, des patients fébriles et amplicons des tiques *O. sonrai* de Dielmo et Ndiop (zone soudanienne) par rapport aux souches de *B. coccidurae* de Mauritanie, de Boudnib (Maroc) et Mali. Dans l'un des groupes phylogénétiques (Groupe 2) a été incluses toutes les souches DQ000287 de *B. coccidurae* de Tunisie, les trois souches de *B. coccidurae* de Doucombo (village sahélien : 14°21'N/03°39'W) au Mali isolées des tiques *O. sonrai* et celle isolée de rongeurs *Mastomys natalensis* (SCHWAN *et al.*, 2012). Ce génogroupe (Groupe 2) est assez distinct et homogène. Tous les amplicons obtenus des tiques *O. sonrai* de Dielmo et Ndiop (zone soudanienne) au Sénégal ont entièrement intégré ce second génogroupe avec la plupart des isolats du Mali, ainsi que les souches de *B. coccidurae* du Maroc isolées des tiques *O. sonrai* de Boudnib en zone sahélo-saharienne (DIATTA *et al.*, 2012), et de Mauritanie. Les souches de *Borrelia* trouvées au Sénégal étaient génétiquement hétérogènes et ont formé deux clades à l'intérieur de ce second génogroupe. Les deux clades déterminés à Dielmo et Ndiop sont isolés géographiquement et les souches de *Borrelia* isolées à Dielmo et Ndiop ont une distribution spatiale homogène. Les deux souches de *B. coccidurae* isolées chez des patients fébriles et la souche isolée des tiques *O. sonrai* étaient génétiquement identiques.

Toutes les séquences identifiées et utilisées au cours de cette étude étaient les plus proches de celles de *B. crocidurae* avec 99,5% à 100% de similarité. Par contre, en zone saharo-méditerranéenne une diversité phylogénétique spécifique a été notée tant entre les espèces de tiques *Ornithodoros* vectrices qu'entre les espèces pathogènes de *Borrelia* (Figures 45 et 46).

## 2-9. Conclusion

La caractérisation génétique des populations de tiques *Ornithodoros* a permis de connaître la circulation spatiale de chaque espèce de tique *Ornithodoros* vectrice et de son agent pathogène dans les principaux foyers endémiques de transmission de la borréliose à tiques en Afrique de l'Ouest et du Nord. Les proportions du portage de l'infection à *Borrelia* ont également été déterminées et précisées dans les pays endémiques afin de mieux appréhender la fréquence et le risque majeur d'exposition des populations aux piqûres de tiques *Ornithodoros*, et d'indiquer aussi l'importance du faciès épidémiologique de la maladie. Malgré l'existence de plusieurs génotypes tant chez les tiques *O. sonrai* que chez *B. crocidurae*, il a été démontré que seule la bactérie *B. crocidurae* est omniprésente chez les tiques *O. sonrai* étudiées en Afrique occidentale. En raison de la persistance du déficit pluviométrique survenu en Afrique tropicale au cours des 40 dernières années, l'impact des paramètres climatiques (température, eau, pluviométrie et humidité relative) sur le fonctionnement génétique du système *Borrelia*/hôte/vecteur en zone sahélo-soudanienne n'a pas induit une différenciation génétique suffisante au sein des tiques *Ornithodoros* et des *Borrelia*, tandis qu'en zone saharo-méditerranéenne une variation phylogénétique spécifique a été observée entre les espèces de tiques *Ornithodoros* et celles de *Borrelia*.



### **3. Facteurs déterminant la répartition géographique et la fréquence de l'agent pathogène chez l'homme, la tique vectrice et les micro-mammifères réservoirs de la borréliose**

#### **3-1. Présentation de l'étude**

La distribution spatiale des tiques *Ornithodoros* et des foyers de *Borrelia* dans l'environnement semble être liée à des paramètres climatiques et pédologiques favorables étroitement indissociables. En revanche, la répartition bio-géographique des petits mammifères est bien plus large que celle des tiques *Ornithodoros* (DUPLANTIER *et al.*, 1992), mais toutes les infections à *Borrelia* identifiées chez les rongeurs et insectivores ont été strictement associées à la présence de tiques vectrices, et aucun petit mammifère n'a encore été trouvé infecté par *Borrelia* où les tiques *Ornithodoros* sont absentes. En d'autres termes, la borréliose à tiques qui est une maladie zoonotique endémique ne peut être mise en évidence que dans l'aire de distribution géographique connue des tiques *Ornithodoros* (TRAPE *et al.*, 2013). Dans la nature, la répartition géographique et la fréquence de l'agent pathogène seraient conjointement déterminées et influencées par la présence des petits mammifères infectés, des paramètres pédologiques favorables à l'installation de tiques *Ornithodoros* dans les terriers et/ou infractuosités localisés au nord de l'isohyète 750 mm de pluie. Les résultats d'une étude de synthèse sur l'infection à *Borrelia*, sa prévalence chez les petits mammifères et son lien avec la présence de tiques *Ornithodoros* à l'intérieur des terriers en relation avec les moyennes pluviométriques (1970-1999) des régions à foyers d'ornithodores vecteurs en Afrique de l'Ouest ont été publiés (Article 3) dans la revue *Acta Tropica* (DIATTA *et al.*, 2015), en montrant que la borréliose ne peut pas être endémique où les tiques *O. sonrai* ne sont pas présentes, et tous les rongeurs et insectivores identifiés réservoirs de maladie ont été infectés en étroite association avec la présence de tiques ornithodores vecteurs. S'il a été établi que la distribution des tiques *Ornithodoros* est en relation avec la pluviométrie (TRAPE *et al.*, 1996a), des travaux récents ont indiqué que leur installation naturelle dépend également des paramètres pédologiques du milieu (DIATTA, 2005). Nous présentons ci-dessous les résultats, i) de l'analyse des paramètres pédologiques dans 15 stations et sites positifs pour les tiques *O. sonrai* et dans 14 autres stations et sites négatifs, ii) des infections à *Borrelia* chez les petits mammifères au Maroc, iii) ainsi que des relations climat/ environnement/ borréliose dans une région donnée.

### 3-2. Analyse des paramètres pédologiques

Dans 119 stations et sites d'étude, des prélèvements de sol de terriers ont été effectués pour des analyses, dont 29 prélèvements de sol pour des analyses complètes de granulométrie et teneur en matières organiques du sol, et 90 autres pour des analyses de granulométrie (teneur en argile, limons et sables). Sur les 29 prélèvements destinés à l'analyse complète, 15 étaient infestés par des tiques *O. sonrai* et 14 autres étaient négatifs. Tous les 90 prélèvements de sol des terriers destinés à l'analyse granulométrique étaient négatifs pour les tiques ornithodores. Dans deux cas des examens complémentaires de recherche de salinité du sol ont été demandés.

Les résultats de l'analyse des paramètres pédologiques ont montré une prédominance de sable fin associé à de l'argile à limon gros dans les 15 terriers colonisés par des tiques *O. sonrai* (Figure 47). En revanche, une dominance de sable gros associé à de l'argile à limon gros a été observée chez les terriers négatifs pour les tiques ornithodores (Figure 48). Cette dominance du sable gros sur le sable fin a été notée de façon similaire chez les 90 prélèvements de sol des terriers où des tiques ornithodores n'ont pas été mises en évidence.

Ces résultats indiquent que les sols à sable fin associé à de l'argile à limon gros, qui préservent longtemps l'humidité, sont écologiquement plus favorables à la distribution des tiques *O. sonrai* et à la constitution de foyers de borréliose dans la nature, confirmant ainsi les résultats des travaux antérieurs (DIATTA, 2005). Dans les sols à sable gros associé à de l'argile à limon gros l'installation de tiques *O. sonrai* semble rare, mais reste néanmoins possible (cas dans deux sites en Mauritanie). Les tiques *Ornithodoros* n'ont pas été retrouvées dans les sols salés ainsi que dans les sols des terriers de sable pur de dunes (dépourvu d'argile et de limons), confortant, ainsi, les travaux de MOREL (1965).

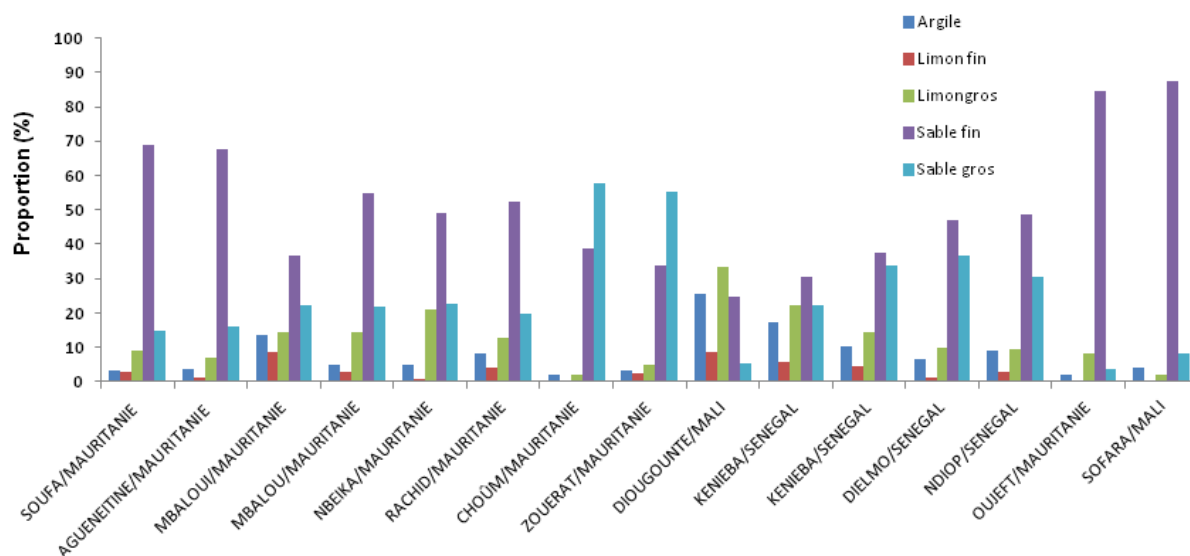


Figure 47 : Texture du sol des terriers de rongeurs positifs pour les tiques *O. sonrai* (%)

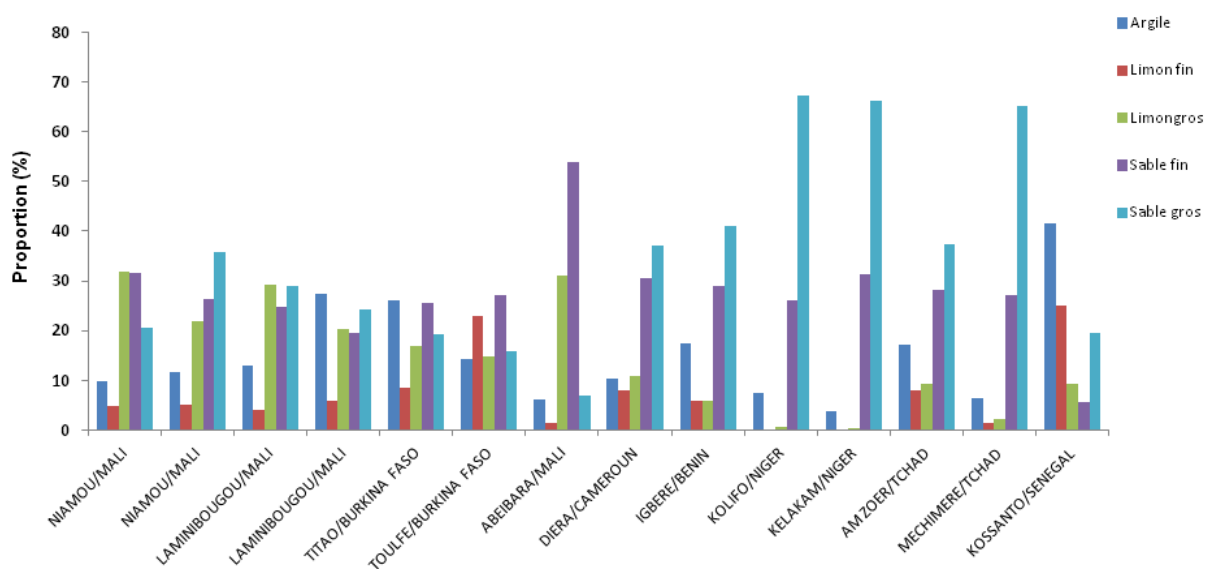


Figure 48 : Texture du sol des terriers de rongeurs négatifs pour les tiques ornithodores (%)

### 3-3. Présence de petits mammifères infectés par *Borrelia* au Maroc

Au total, 126 rongeurs et insectivores appartenant à 12 espèces différentes et 3 familles (Muridae, Sciuridae et Erinaceidae) ont été collectées dans 9 sites au cours de 1732 nuits-pièges de capture. Sur les 126 animaux capturés, 120 ont été testés pour *Borrelia* par la goutte épaisse et 126 par la PCR de cerveau (Tableau XI). La présence d'une infection à *Borrelia* a été observée dans le sang par la goutte épaisse directe chez 4 rongeurs (3,3%) capturés près de Marrakech (2 *Dipodillus campestris*), d'Essaouira (1 *Meriones shawi*) et Taroudant (1 *Gerbillus hoogstraali*). Parmi les 126 animaux dont le cerveau a été testé par une amplification de la PCR nichée, des infections à *Borrelia* ont été détectées chez 11 specimens (8,7%) appartenant à 4 espèces : 3 *D. campestris* et 2 *M. shawi* de Marrakech, 4 *M. shawi* d'Essaouira, 1 *G. hoogstraali* de Taroudant et 1 *Atelerix algirus* de Bou-Jerif. Chez les 126 specimens étudiés par les deux méthodes (goutte épaisse et PCR de cerveau), 8 ont été trouvés positifs par la méthode PCR seule, 1 par la goutte épaisse et 3 par les deux méthodes. Des infections à *Borrelia* n'ont pas été déterminées chez les petits mammifères dans les sites initialement trouvés infestés par des tiques *Ornithodoros*. Les 14 *Gerbillus occiduus* capturés dans la zone de Dakhla au Sahara occidental ont été associés à l'étude de synthèse réalisée sur les rongeurs et insectivores étudiés en Afrique de l'Ouest et ne figurent donc pas parmi les specimens dont les résultats sont présentés ci-dessus.

Tableau XI : Prévalence des infections à *Borrelia* chez les petits mammifères capturés au Maroc, Novembre 2008

| Espèces étudiées              | Nombre collecté | Nombre animaux infectés/Nombre testés |               |               |                       |
|-------------------------------|-----------------|---------------------------------------|---------------|---------------|-----------------------|
|                               |                 | Goutte épaisse                        | PCR cerveau   | Toute méthode | Interv. Confiance 95% |
| <i>Gerbillus hoogstraali</i>  | 12              | 1/12 (8,3%)                           | 1/12 (8,3%)   | 1/12 (8,3%)   | 1,5-35,4              |
| <i>Gerbillus</i> sp.          | 11              | 0/10                                  | 0/11          | 0/11          | 0                     |
| <i>Meriones shawi</i>         | 14              | 1/13 (7,6%)                           | 6/14 (42,8%)  | 6/14 (42,2%)  | 21,4-67,4             |
| <i>Gerbillus gerbillus</i>    | 10              | 0/8                                   | 0/10          | 0/10          | 0                     |
| <i>Meriones libycus</i>       | 1               | 0/1                                   | 0/1           | 0/1           | 0                     |
| <i>Atelerix algirus</i>       | 6               | 0/6                                   | 1/6 (16,6%)   | 1/6 (16,6%)   | 3,0-56,3              |
| <i>Atlantoxerus getulus</i>   | 3               | 0/3                                   | 0/3           | 0/3           | 0                     |
| <i>Rattus norvegicus</i>      | 2               | 0/2                                   | 0/2           | 0/2           | 0                     |
| <i>Mastomys erythroleucus</i> | 2               | 0/2                                   | 0/2           | 0/2           | 0                     |
| <i>Gerbillus occiduus</i>     | 15              | 0/13                                  | 0/15          | 0/15          | 0                     |
| <i>Lemniscomys barbarus</i>   | 1               | 0/1                                   | 0/1           | 0/1           | 0                     |
| Total                         | 126             | 4/120 (3,3%)                          | 11/126 (8,7%) | 12/126 (9,5%) | 5,5-15,9              |

### 3-4. Relations climat/environnement/borréliose

La Figure 49 montre la pluviométrie annuelle moyenne de la période 1940-1969. La Figure 50 indique la pluviométrie annuelle moyenne de la période 1970-1999 et regroupe toutes les données anciennes et actuelles sur la répartition géographique des tiques *Ornithodoros* en Afrique (enquêtes de l'IRD et données de la littérature). Toutes les localités où la présence des tiques *Ornithodoros* a été signalée sont situées dans des régions où la pluviométrie annuelle moyenne est comprise entre moins 50 mm et 750 mm. Il est à noter que l'isohyète 750 mm est étroitement associé à la limite sud d'extension de la borréliose à tiques tant au Sénégal qu'au Mali. Dans ces deux pays et en Mauritanie, les régions à paramètres pédologiques favorables où la pluviométrie est inférieure à 750 mm ont été colonisées par les tiques *O. sonrai*. Par contre, dans les régions à pluviométrie similaire du Burkina Faso et Niger, puis du Tchad, et nord Cameroun mentionnées dans nos travaux antérieurs (DIATTA, 2005), les tiques ornithodores semblent rares ou absentes. Aussi, dans les régions strictement sahariennes de l'est du Mali, les tiques *O. sonrai* sont vraisemblablement rares ou absentes. Globalement, dans toute la moitié ouest de l'Afrique de l'Ouest et du Sahara, les tiques *O. sonrai* sont massivement distribuées au nord de l'isohyète 750 mm. En revanche, dans les régions à pluviométrie similaire de la moitié est de l'Afrique occidentale les tiques *O. sonrai* semblent rares, localisées ou absentes comme c'est également le cas dans les pays étudiés en Afrique centrale (DIATTA, 2005). Les Figures 51 et 52 montrent la répartition géographique des espèces de tiques *Ornithodoros* et de *Borrelia* en relation avec la pluviométrie annuelle moyenne (isohyètes moyens) en Afrique de l'Ouest et du Nord pour la période 1970-1999.

L'analyse des paramètres pédologiques a tenté d'expliquer cette disparité de la répartition des ornithodores dans ces deux parties de l'Afrique (est et centrale), en montrant que les sols à sable fin associé à de l'argile à limon gros -fréquents dans les sites d'étude au Sénégal, les 2/3 ouest de la Mauritanie et dans l'ouest du Mali- sont écologiquement plus favorables à la distribution des tiques *O. sonrai* et à la constitution de foyers de borréliose dans la nature. Alors que dans les sols à sable gros associé à de l'argile à limon gros prédominants au Burkina Faso et Niger, puis de d'autres pays étudiés ayant une pluviométrie identique aux stations et sites positifs (Tchad, nord Cameroun, nord Bénin) mentionnés dans nos travaux antérieurs (DIATTA, 2005), la présence des tiques ornithodores semble rare, mais reste néanmoins possible comme c'est le cas dans deux sites d'étude en Mauritanie.

L'observation sur le terrain des paramètres environnementaux (végétation, orohydrographie, géomorphologie, hydrogéologie, agriculture ou population) n'a pas fourni d'hypothèse plausible pour expliquer cette disparité. De même, l'examen et l'analyse de la faune associée aux terriers n'ont pas permis non plus de proposer une hypothèse susceptible d'expliquer la disparité de la répartition observée.

En considérant les paramètres climatiques à pluviométrie annuelle moyenne équivalente, il a été noté des différences d'hygrométrie et de fréquence des pluies hivernales et de contre saison (pluies d'hiver) entre les régions ouest et est de l'Afrique occidentale soudano-sahélienne et saharienne qui nous ont semblé susceptibles d'expliquer actuellement les différences de répartition.

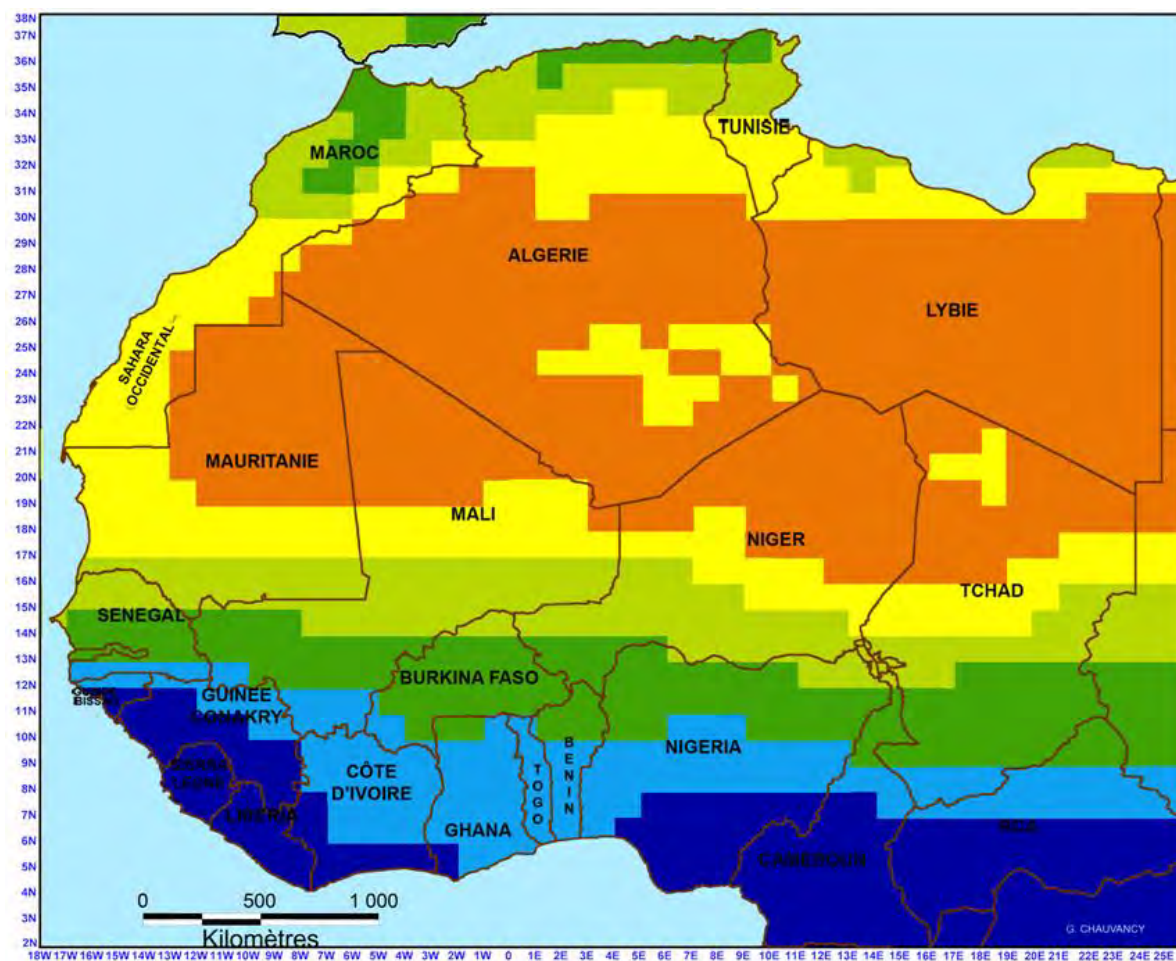


Figure 49 : Pluviométrie annuelle moyenne (isohyètes moyens) en Afrique de l'Ouest et du Nord pour la période 1940-1969 (MAHE *et al.*, 1999)

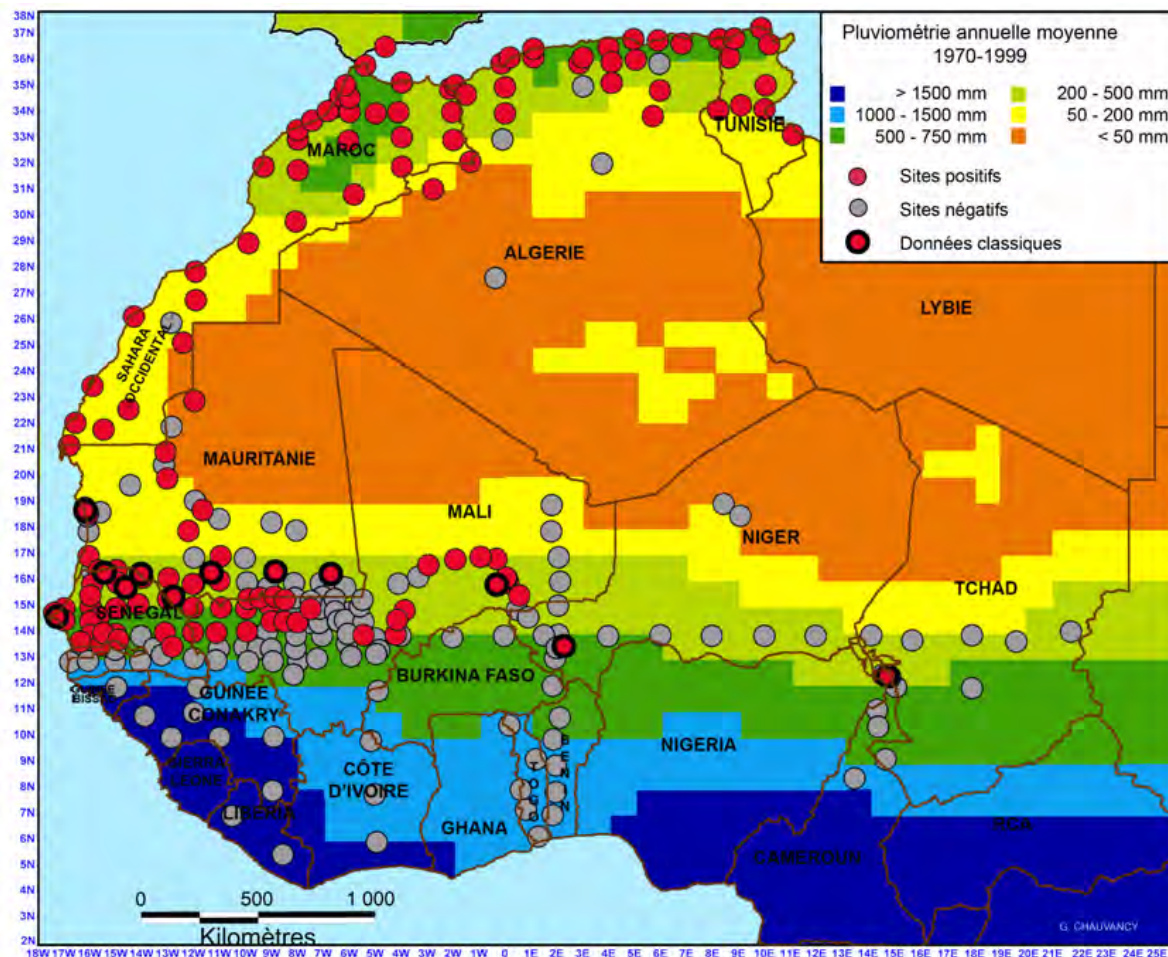


Figure 50 : Répartition géographique des tiques *Ornithodoros* en Afrique de l'Ouest et du Nord, en relation avec les isohyètes moyens (moyennes pluviométriques) pour la période 1970-1999. En rouge, les localités où les tiques *Ornithodoros* ont été trouvées (cercle fin : enquêtes de l'IRD, cercle épais : données de la littérature), en gris les localités où la recherche des vecteurs a été négative



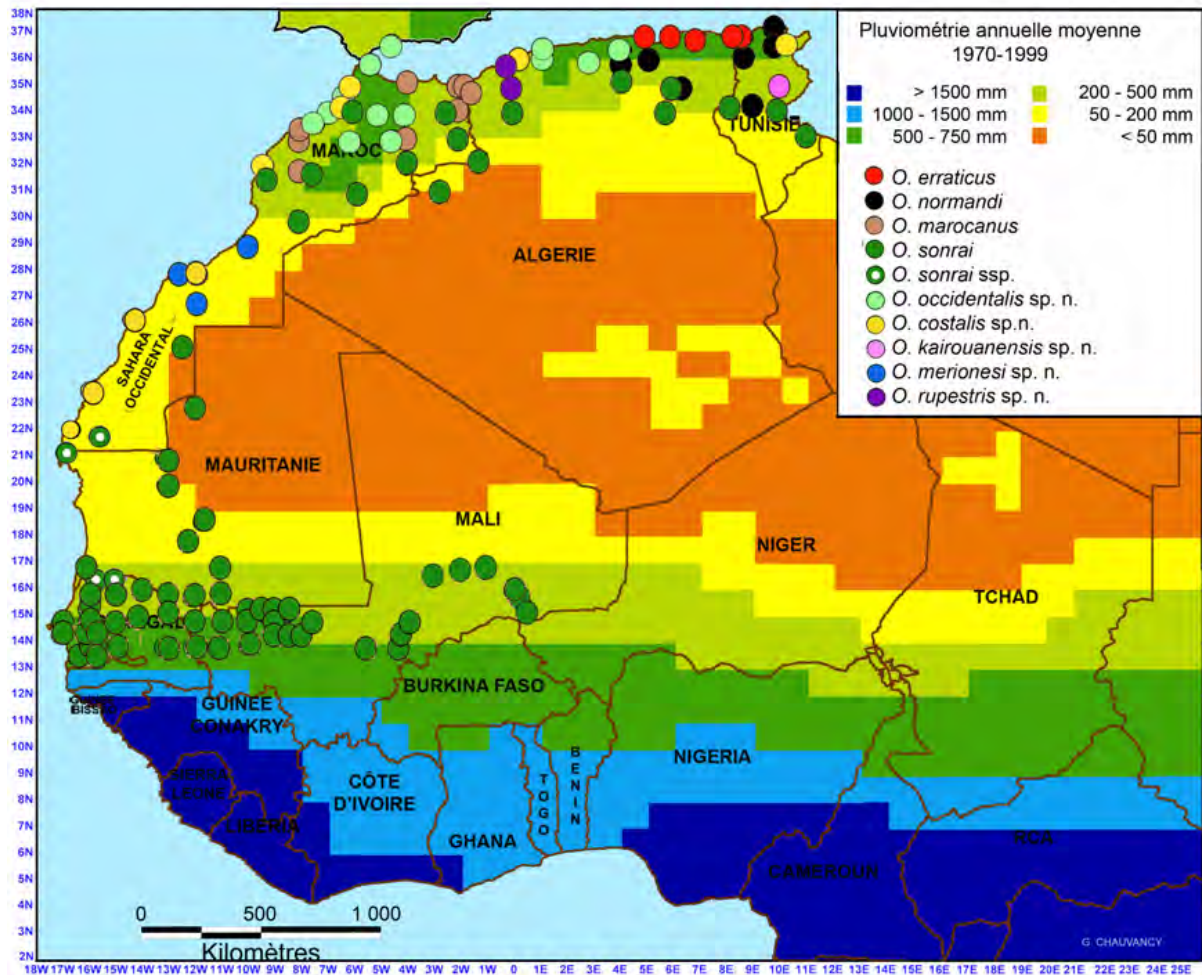


Figure 51 : Répartition géographique des espèces de tiques *Ornithodoros* en Afrique de l'Ouest et du Nord, en relation avec les moyennes pluviométriques (isohyètes moyens) pour la période 1970-1999 (MAHE *et al.*, 1999)



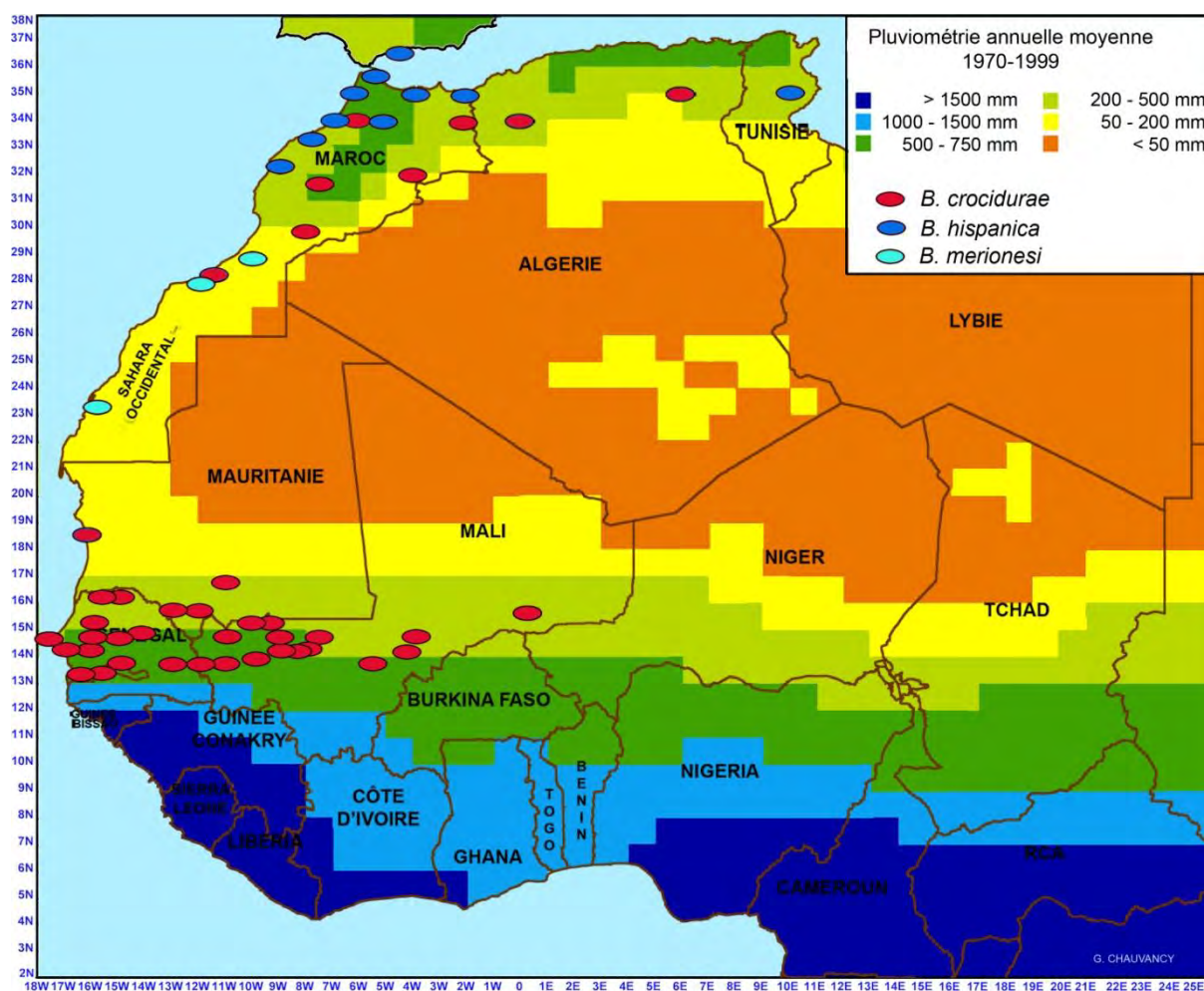


Figure 52 : Répartition géographique des espèces de *Borrelia* en Afrique de l'Ouest et du Nord, en relation avec les moyennes pluviométriques (isohyètes moyens) pour la période 1970-1999 (MAHE *et al.*, 1999)

### 3-5. Principaux résultats

La répartition biogéographique des petits mammifères susceptibles d'héberger des *Borrelia* est connue pour être plus vaste que celle des tiques *Ornithodoros*, mais toutes les espèces infectées par *Borrelia* ou réservoirs de la maladie circulent à l'intérieur de la zone de distribution des ornithodores vecteurs. Par contre, la constitution de foyers de tiques *Ornithodoros* dans la nature reste tributaire des paramètres climatiques et pédologiques favorables à l'installation de ces tiques.

Tous ces paramètres doivent coexister ensemble dans la nature pour déterminer la fréquence et la répartition géographique de l'agent pathogène tant chez l'homme, les tiques *Ornithodoros* que chez les micro-mammifères réservoirs.

Sur 4358 rongeurs et insectivores collectés en Afrique de l'Ouest et du Centre de 1990 à 2013, appartenant à 38 espèces et 7 familles (Soricidae, Muridae, Erinaceidae, Nesomyidae, Sciuridae, Dipodidae et Ctenodactylidae), 3225 specimens provenaient des régions où la présence des tiques *O. sonrai* a été mise en évidence, et 1133 autres des régions où les tiques *O. sonrai* étaient absentes. Une infection à *Borrelia* a été détectée chez 287 des 3109 (9,2%) petits mammifères testés et originaires des régions où les tiques *O. sonrai* étaient présentes, et aucune infection n'a été trouvée chez 1004 animaux testés des autres régions où ces tiques étaient absentes. Les 287 specimens trouvés infectés par *Borrelia* appartenaient à 15 espèces de rongeurs et d'insectivores (116 *Arvicanthis niloticus*, 68 *Mastomys erythroleucus*, 38 *Mastomys huberti*, 11 *Praomys daltoni*, 10 *Crocidura olivieri*, 10 *Gerbilliscus gambianus*, 8 *Taterillus* sp. (plus probablement *T. gracilis* ou *T. pygargus*), 7 *Mastomys natalensis*, 6 *Mus musculus*, 4 *Crocidura* sp., 3 *Cricetomys gambianus*, 2 *Rattus rattus*, 2 *Gerbillus tarabuli*, 1 *Gerbillus gerbillus* et 1 *Gerbillus occiduus*) dont 3 espèces Saharo-sahéliennes (*G. gerbillus*, *G. tarabuli*, *G. occiduus*) identifiées comme réservoirs de la borréliose avaient une distribution limitée à cette zone. Les petits mammifères infectés par *Borrelia* étaient capturés dans des écosystèmes et milieux variés appartenant à différentes régions climatiques. Ils étaient distribués depuis le Sahara occidental (23°54'N-15°48'W) au Maroc jusqu'au Sine-Saloum (13°41'N-16°22'W) au Sénégal et à Doubala (14°28'N-08°01'W) dans la région de Kayes au Mali. Dans ces régions, trois principaux écosystèmes étaient représentés : le désert du Sahara, le Sahel et la savane soudanienne, avec des moyennes annuelles de pluviométrie variant de moins de 50 mm à 750 mm. Dans les régions de savane guinéenne où la pluviométrie a varié de plus 750 à 1500 mm, aucun animal n'a été infecté (0/1004). De plus, aucun animal n'a été trouvé infecté à l'est du méridien 01°E bien que 593 rongeurs et insectivores étaient testés. En moyenne, la prévalence des animaux infectés était de 2,4% (1/41), 10,1% (139/1380), 7,4% (67/900), 10, 1% (80/788) et 0% (0/1004) dans les régions où la pluviométrie moyenne était inférieure à 50 mm, comprise de 50-250 mm, 250-500 mm, 500-750 mm et supérieure à 750 mm respectivement. Les variations de la prévalence des infections à *Borrelia* étaient significatives (test khi-2 = 68,19 ;  $p < 10^{-3}$ ) entre les espèces de petits mammifères infectées.

*C. olivieri* et *A. niloticus* étaient plus infectés (27,8%, 10/30 et 14,4%, 116/804, respectivement) et la souris domestique *M. musculus* (1,8%, 6/340) était beaucoup moins infectée qu'attendu sous l'hypothèse d'une distribution équivalente de l'infection à *Borrelia* entre les espèces. Parmi les rongeurs trouvés infectés, *A. niloticus* et *M. erythroleucus* étaient les seules espèces largement distribuées dans les régions bioclimatiques comprises entre 50-250 mm, 250-500 mm et 500-750 mm.

Aucune différence significative de la prévalence de l'infection à *Borrelia* n'a été observée chez *A. niloticus* (test khi-2 = 0,45 ;  $p > 0,9$ ), alors que chez *M. erythroleucus* la différence était significative (test khi-2 = 15,42 ;  $p < 0,01$ ) entre ces régions de précipitations avec la prévalence la plus élevée (15,2%) dans les étages bioclimatiques compris entre 250 et 500 mm et la moins élevée (1%) entre 50 et 250 mm. Parmi les 126 petits mammifères étudiés au Maroc, 12 animaux (9,5%) ont présenté une infection à *Borrelia*, dont 4 espèces de rongeurs et d'insectivores (*Dipodillus campestris*, *Gerbillus hoogstraali*, *Meriones shawi*, *Atelerix algirus*). Tous les rongeurs et insectivores trouvés infectés provenaient des localités situées à l'intérieur des limites de l'aire de distribution des tiques *Ornithodoros* aussi bien en Afrique de l'Ouest qu'au Maroc.

### 3-6. Conclusion

Vraisemblablement, ce sont les sols à sable fin contenant de l'argile à limon gros, préservant plus longtemps l'humidité qui conditionnent l'installation naturelle des tiques *Ornithodoros* dans les terriers fréquentés par des rongeurs et insectivores naturellement infectés dans les régions à pluviométrie inférieure à 750 mm de pluie. Les paramètres pédologiques et climatiques favorables qui permettent aux tiques *Ornithodoros* de coloniser des terriers de rongeurs doivent être géographiquement situés au nord de l'isohyète 750 mm, et étroitement associés à la présence de petits mammifères infectés qui circulent dans les régions inféodées aux ornithodores vecteurs. Ces facteurs conjugués à l'endophilie des ornithodores déterminent la fréquence et la répartition de l'endémicité de l'agent pathogène dans les principaux foyers de transmission de la maladie. L'existence de zones sans ornithodores vecteurs, identifiées à l'intérieur de l'aire de distribution connue des tiques *Ornithodoros* pourrait être expliquée par la présence de paramètres pédologiques défavorables.

## **4. Étude des cas cliniques à l'Hôpital Provincial de Kénitra au Maroc, et étude fonctionnelle de la borréliose à Dielmo et Ndiop, et dans les villages environnants au Sine-Saloum, Sénégal et stratégie de lutte préventive de la maladie**

### **4-1. Étude des cas cliniques à l'Hôpital Provincial de Kénitra au Maroc**

#### **4-1-1. Présentation de l'étude**

Cette étude a été conduite à l'Hôpital Provincial de Kénitra dans le cadre du suivi épidémiologique de la ré-émergence du paludisme dans la plaine du Gharb située au nord ouest du Maroc, une région de 4745 km<sup>2</sup> avec une population de 1450000 habitants (2004), qui était dans les années 1970 un important foyer de paludisme. Des gouttes épaisses de consultants ayant une fièvre inexpliquée ont été réalisées dans 10 Centres de santé de la région et envoyées au Laboratoire de diagnostic du paludisme de cet Hôpital. Outre la présence de *Plasmodium*, la recherche des *Borrelia* a été systématiquement investiguée de 2000 à 2005, et les résultats mentionnés dans les registres de laboratoire y compris les données de l'âge et de sexe des malades sont présentés ci-dessous.

#### **4-1-2. Cas de borréliose diagnostiqués chez des consultants fébriles à l'Hôpital Provincial de Kénitra, au Maroc**

Sur 89995 patients examinés entre 2000 et 2005, 102 cas (0,11%) ont été diagnostiqués au total par la goutte épaisse, dont 57% étaient constitués par des hommes et 43% par des femmes (DIATTA *et al.*, 2012). Aucun cas de paludisme transmis localement n'a été observé. Le nombre annuel de cas de borréliose a varié entre 7 et 22 cas (Figure 53). Tous les malades qui étaient infectés par *Borrelia* se plaignaient de fièvre aiguë. Il y avait une forte tendance saisonnière dans la distribution des cas, et la plupart d'entre eux sont survenus entre Juin et Novembre (Figure 54) en relation avec l'augmentation de la moyenne de température. Les malades âgés de 15 ans ou plus représentaient 60% des cas, et les enfants de moins de 1 an, 1-4 ans, 5-9 ans et 10-14 ans représentaient respectivement 3%, 7%, 12% et 18% des cas.

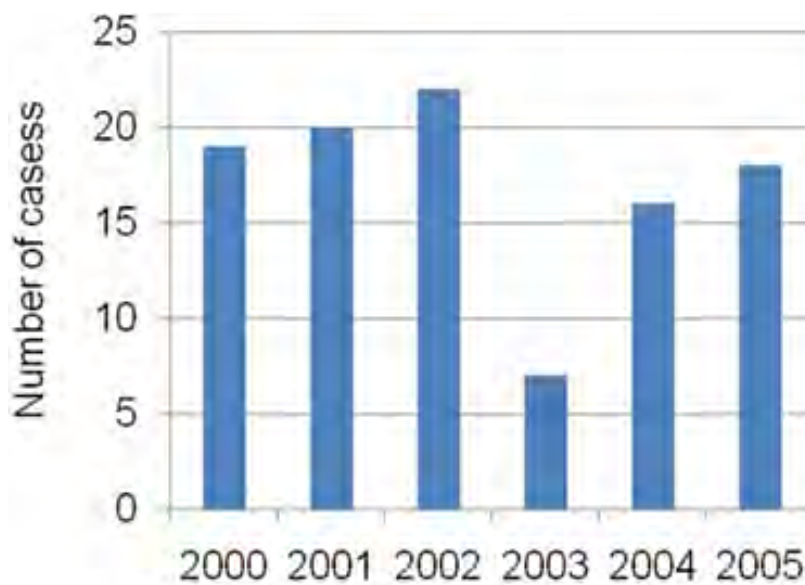


Figure 53 : Distribution annuelle des cas de borrélie diagnostiqués chez des consultants fébriles à l'Hôpital Provincial de Kénitra, Maroc

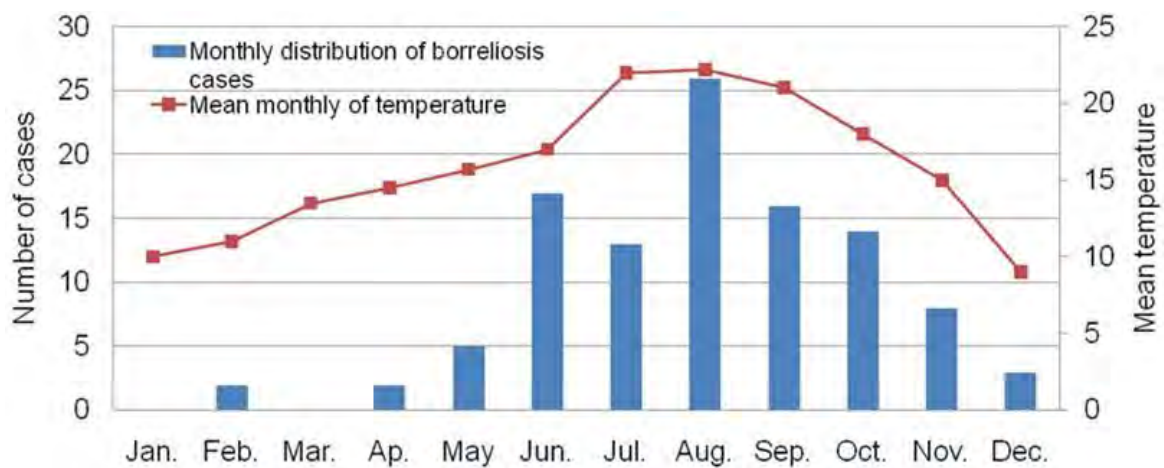


Figure 54 : Distribution mensuelle des cas de borrélie diagnostiqués chez des consultants fébriles à l'Hôpital Provincial de Kénitra, Maroc

## 4-2. Étude fonctionnelle de la borréliose à Dielmo et Ndiop, et dans les villages environnants au Sine-Saloum, Sénégal et stratégie de lutte préventive de la maladie

### 4-2-1. Présentation de l'étude

Au Sénégal, en zone rurale sahélienne et soudano-sahélienne, la borréliose à tiques constituait après le paludisme, la principale cause de fièvre de l'enfant et de l'adulte jusqu'en 2004. La morbidité liée à cette maladie représenterait environ 5% des motifs de consultation en dispensaire pour un syndrome fébrile dans la moitié nord du Sénégal (TRAPE *et al.*, 1991). L'incidence de la borréliose a été souvent équivalente ou supérieure à celle du paludisme chez l'adulte, cependant le diagnostic est exceptionnellement réalisé et la maladie a été systématiquement confondue avec un paludisme chimiorésistant. Cinq facteurs principaux sont responsables de cette confusion : i) la méconnaissance de l'existence de la borréliose par des médecins, infirmiers et agents de la santé, ii) les symptômes similaires des deux maladies, iii) les récurrences fébriles de la borréliose qui évoquent une chimiorésistance lorsque le patient est traité par des antipaludiques, iv) la densité très faible des *Borrelia* dans le sang du malade (habituellement moins de 10 *Borrelia*/µl de sang), ce qui rend difficile la mise en évidence des borrelies par la goutte épaisse, v) la fréquence élevée de l'association fortuite d'une borréliose et d'une parasitémie asymptomatique à *Plasmodium falciparum* chez les sujets semi-immuns (Figure 55), et seul *P. falciparum* a été diagnostiqué sur la goutte épaisse et qui dès lors est tenu pour responsable de la fièvre. Jusqu'en 2004, le paludisme de l'adulte en zone rurale au Sénégal guérissait presque toujours en moins de 48 heures avec ou sans traitement antipaludique du fait de l'immunité acquise. Cependant, à cause des moyens de lutte antipaludique mis en œuvre, l'adulte est devenu plus vulnérable au paludisme du fait de la perte ou diminution de sa prémunition antipaludique (O'MEARA *et al.*, 2008; COTTER *et al.*, 2013; WHITE *et al.*, 2014), et ne peut donc plus guérir tout seul de son paludisme par immunité acquise. Avec l'avènement du test de diagnostic rapide (TDR) à *P. falciparum* ou toute espèce plasmodiale dans le cadre de la prise en charge des malades fébriles ou des causes de fièvre, il faut penser à la borréliose dès que le test se révèle négatif chez toute personne résidant ou ayant séjourné en zone rurale endémique. Les résultats de la relation borréliose/paludisme à Dielmo, des investigations liées à la distribution des tiques *O. sonrai* à Dielmo-Ndiop et dans les villages environnants et à la caractérisation de la limite sud de progression des tiques ornithodores sont présentés ci-dessous.

Une approche de lutte préventive de la borréliose a été initiée et déroulée à Dielmo et Ndiop et dont les résultats probants ont été publiés (Article 4) dans la revue *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene* (DIATTA *et al.* 2016).

#### 4-2-2. Relation borréliose à tiques/Paludisme à Dielmo

La borréliose et le paludisme sont souvent confondus à cause de leurs symptômes identiques. De nombreux cas de fièvres récurrentes de l'adulte qui étaient considérés comme des accès palustres résistants étaient en réalité des borrélioses. A Dielmo, de 1990 à 2004, la confection et la lecture systématique d'une goutte épaisse en cas de fièvre a permis de conclure que la borréliose constituait la deuxième cause de consultation par maladie infectieuse à transmission vectorielle après le paludisme (Figure 55). La relation borréliose/paludisme a été observée chez les villageois asymptomatiques et les patients fébriles suivis mensuellement au cours de la période d'étude 1990-2012. Chez les villageois asymptomatiques suivis mensuellement, 38597 gouttes épaisses (GE) étaient toutes négatives en *Borrelia*, tandis que 17938 étaient positives en *Plasmodium*. Par contre, chez les patients fébriles, 62040 gouttes épaisses ont été examinées, 1162 étaient des infections à *Borrelia*, 38444 étaient positives en *Plasmodium* alors que 399 infections à *Borrelia* étaient associées à un *Plasmodium*, soit plus de 34% des patients fébriles suivis médicalement ont développé une infection à *Borrelia* associée à un *Plasmodium*. Le paludisme a été la pathologie la plus détectée au sein de la population de Dielmo de 1990 à 2004, excepté en 1997 où l'incidence de la borréliose était plus élevée que celle du paludisme et en 1998 où les deux pathologies ont présenté une incidence similaire (Figure 55). La distinction paludisme/borréliose par la goutte épaisse reste délicate du fait de l'association fréquente *P. falciparum*/*Borrelia* au cours d'un même accès fébrile. A la différence du paludisme dont les fortes infections sont symptomatiques, la présence de quelques borrelies dans le sang du malade provoque toujours un épisode fébrile. Malgré leur association fréquente, il est possible de distinguer les deux pathologies par un diagnostic différentiel. Du fait de l'introduction de la bithérapie (FANSIDAR ou Sulfadoxine/ Pyriméthamine/ Amodiaquine) à Dielmo en 2003, puis des combinaisons thérapeutiques à base d'Artémisinine (CTA) en 2006 et des moustiquaires imprégnées à longue durée d'action (MILDA) en 2008, la borréliose est actuellement la maladie la plus prédominante au sein de la population depuis 2005, et cela malgré la mise en place en Mars 2013 d'une stratégie de lutte préventive de la maladie associée à des mesures d'accompagnement (Figure 55, graphique 1 bleu).

La technique de la goutte épaisse est présentement renforcée par un POC (Point-of-Care) fonctionnel, qui est un laboratoire de diagnostic par des techniques de biologie moléculaire pour rechercher des infections à *Borrelia*, *P. falciparum*, rickettsies et/ou tout autre agent pathogène responsable de fièvre.

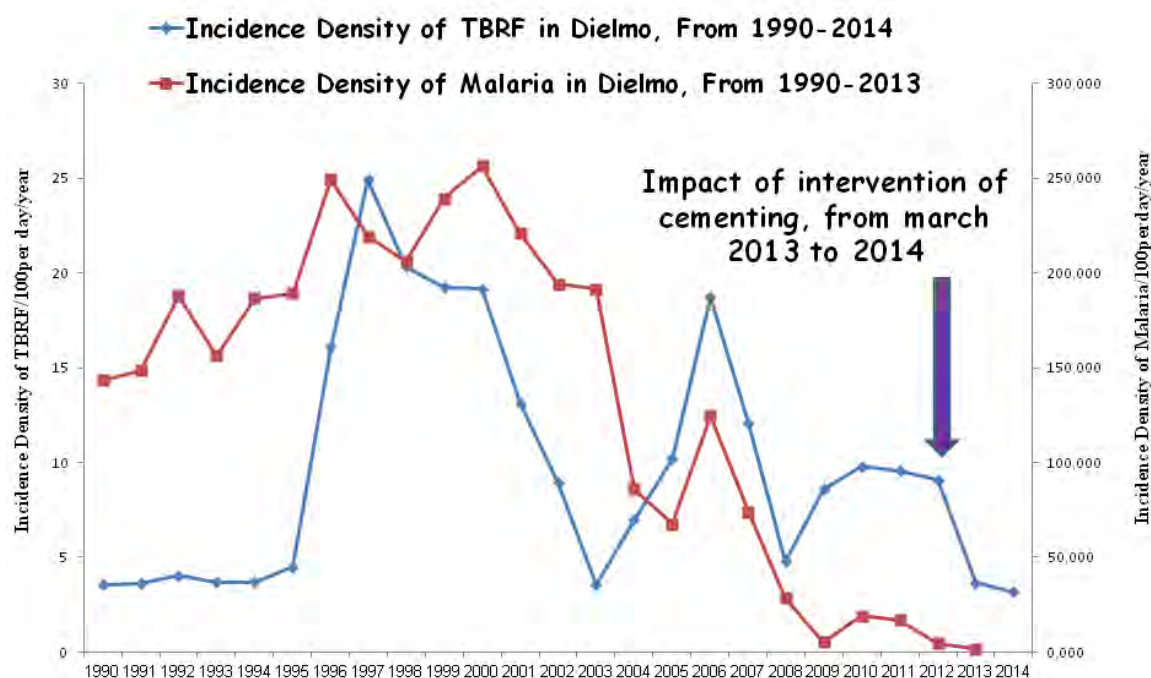


Figure 55 : **Graphique 1 (bleu)** : Évolution de la densité d'incidence de la borréliose à tiques à Dielmo, de 1990 à 2012, et impact de la lutte preventive de la maladie de 2013 à 2014 ; **Graphique 2 (rouge)** : Évolution de la densité d'incidence du paludisme à Dielmo, de 1990 à 2013

#### 4-2-3. Distribution des tiques *Ornithodoros sonrai* à Dielmo-Ndiop et dans les villages environnants, et caractérisation de la limite sud de progression des ornithodores

Un total de 2419 terriers de rongeurs a été étudié à Dielmo-Ndiop et dans les villages environnants, dont 1666 terriers ont été échantillonnés en 2002 et 2003 et 753 autres en 2013 et 2014, dans 51 villages situés au Nord/Nord-est et Sud/Sud-est de Dielmo-Ndiop (Tableaux XII et XIII). Toutes les tiques *Ornithodoros* collectées dans cette zone ont été déterminées morphologiquement et étaient attribuables à la tique *O. sonrai*. La présence des tiques *O. sonrai* a été mise en évidence dans 10,4% (252/2419) de l'ensemble des terriers examinés (Tableaux XII et XIII).



Parmi les 51 villages étudiés, 33 étaient positifs pour la présence de tiques *O. sonrai* (Figure 56). Plus de 64% (33/51) des villages de la zone situés entre 13°47'N et 13°41'N étaient infestés par des tiques *O. sonrai*. Jamais, à aucun moment la tique *O. moubata* et/ou *O. porcinus* a été trouvée dans les terriers. Tous les terriers échantillonnés dans les villages situés à proximité des plaines inondables du bassin (marigot) Diaban, de la rivière Néma ou Djikoye et au sud de la latitude 13°41'N étaient négatifs pour les tiques *O. sonrai* (Figure 56). La limite sud (méridionale) de distribution des tiques *O. sonrai* dans la zone de Dielmo et Ndiop au Sine-Saloum a atteint la latitude 13°40'N, ce qui correspond approximativement à l'isohyète 750 mm de pluie. Sur 263 individus de tiques *O. sonrai* testés pour rechercher une infection à *Borrelia*, 0,7% (2/263) ont été trouvés infectés.

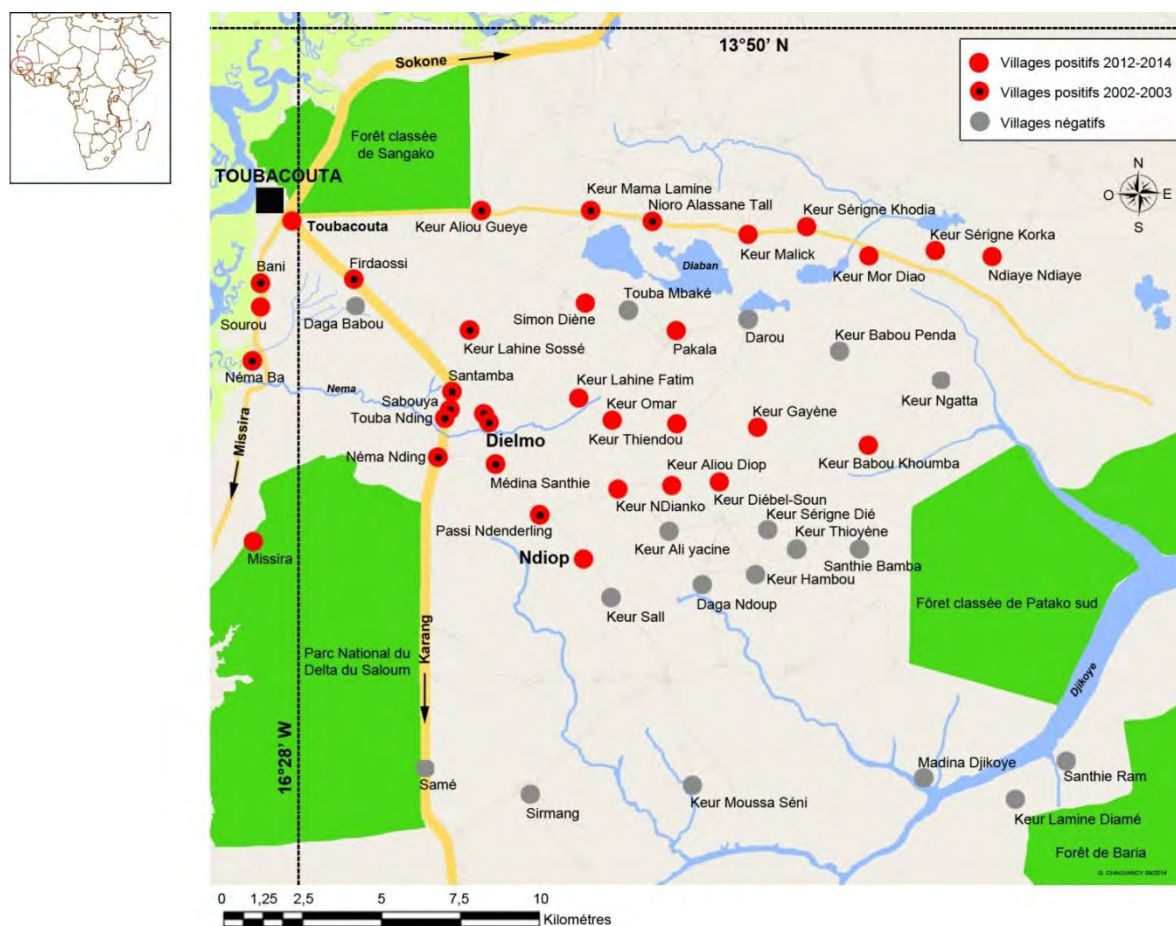


Figure 56 : Distribution spatiale et localisation des tiques *O. sonrai* à Dielmo et Ndiop, et dans les autres villages environnants, Sine-Saloum, Sénégal

Table XII : Échantillonnage de tiques *O. sonrai* en limite sud d'extension de la borréliose dans les villages environnants au Nord et Sud de Dielmo-Ndiop, Sine-Saloum, Sénégal, 2002-2003

| Localité étudiée                                                                              | Date                         | Coordonnées lieu d'échantillonnage | Terriers examinés | Terriers infestés | Infestation (%) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Keur Aliou Gueye                                                                              | 23 au 24/06/2003             | 13°47'N/16°24'W                    | 50                | 3                 | 6%              |
| Keur Mama Lamine                                                                              | 25 au 26/06/2003             | 13°46'N/16°23'W                    | 50                | 1                 | 2%              |
| Nioro Alassane Tall                                                                           | 27 au 28/06/2003             | 13°46'N/16°20'W                    | 47                | 5                 | 10,6%           |
| Bani                                                                                          | 25 au 27/10/2002             | 13°45'N/16°28'W                    | 50                | 27                | 54%             |
| Firdaossi                                                                                     | 23 au 24/10/2002             | 13°45'N/16°27'W                    | 44                | 19                | 42,1%           |
| Néma Ba                                                                                       | 20 au 22/10/2002             | 13°44'N/16°28'W                    | 50                | 29                | 58%             |
| Santamba                                                                                      | 17 au 18/10/2002             | 13°44'N/16°25'W                    | 50                | 2                 | 4%              |
| Keur Lahine Sossé                                                                             | 19 au 20/10/2002             | 13°44'N/16°25'W                    | 41                | 5                 | 12,1%           |
| Keur Lahine Fatim                                                                             | 24 au 25/08/2002             | 13°44'N/16°24'W                    | 50                | 0                 | 0%              |
| Sabouya                                                                                       | 15 au 16/10/2002             | 13°43'N/16°25'W                    | 50                | 19                | 38%             |
| Touba Nding                                                                                   | 13 au 14/10/2002             | 13°43'N/16°25'W                    | 50                | 10                | 20%             |
| Dielmo                                                                                        | 17 au 21/04/2002             | 13°43'N/16°24'W                    | 61                | 9                 | 14,7%           |
| Dielmo                                                                                        | 15 au 24/06/2002             | 13°43'N/16°24'W                    | 181               | 11                | 6%              |
| Dielmo                                                                                        | 1 <sup>er</sup> au 03/9/2002 | 13°43'N/16°24'W                    | 50                | 21                | 42%             |
| Dielmo                                                                                        | 27 au 29/10/2002             | 13°43'N/16°24'W                    | 50                | 13                | 26%             |
| Néma Nding                                                                                    | 11 au 12/10/2002             | 13°42'N/16°25'W                    | 50                | 1                 | 2%              |
| Médina Santhie                                                                                | 26 au 27/08/2002             | 13°42'N/16°24'W                    | 44                | 1                 | 2,2%            |
| Passi Ndenderling                                                                             | 28 au 29/08/2002             | 13°42'N/16°23'W                    | 50                | 1                 | 2%              |
| Ndiop Keur Omar Sarr                                                                          | 30/08/2002                   | 13°41'N/16°23'W                    | 50                | 0                 | 0%              |
| Same                                                                                          | 08 au 09/07/2003             | 13°37'N/16°25'W                    | 50                | 0                 | 0%              |
| Sirmang                                                                                       | 10 au 11/08/2003             | 13°37'N/16°23'W                    | 50                | 0                 | 0%              |
| Keur Moussa Sény                                                                              | 12 au /08/2003               | 13°37'N/16°21'W                    | 50                | 0                 | 0%              |
| Madina Djikoye                                                                                | 13 au 15/09/2002             | 13°37'N/16°17'W                    | 50                | 0                 | 0%              |
| Keur Lamine Diame                                                                             | 16 au 19/09/2002             | 13°37'N/16°15'W                    | 22                | 0                 | 0%              |
| Santhie Ram                                                                                   | 20 au 22/09/2002             | 13°37'N/16°14'W                    | 50                | 0                 | 0%              |
| Total                                                                                         |                              |                                    | 1340              | 177               | 13,2%           |
| Collectes extra-domiciliaires de tiques <i>O.sonrai</i> en zone de cultures et milieu naturel |                              |                                    |                   |                   |                 |
| Localité étudiée                                                                              | Date                         | Situation                          | Terriers examinés | Terriers infestés | Infestation (%) |
| Keur Aliou Gueye                                                                              | 22/05/2003                   | Sud du village                     | 25                | 0                 | 0%              |
| Keur Lahine Sossé                                                                             | 20/05/2003                   | Sud du village                     | 25                | 4                 | 22,1%           |
|                                                                                               | 21/05/2003                   | Nord du village                    | 25                | 7                 |                 |
|                                                                                               | 18/05/2003                   | Entre Dielmo et Santhe Mouride     | 13                | 1                 |                 |
| Dielmo                                                                                        | 17/05/2003                   | Sud du village                     | 30                | 2                 | 8%              |
|                                                                                               | 19/05/2003                   | Nord du village                    | 57                | 5                 |                 |
|                                                                                               | 15/05/2003                   | Sud du village                     | 26                | 0                 |                 |
| Médina Santhie                                                                                | 16/05/2003                   | Nord du village                    | 25                | 1                 | 2%              |
|                                                                                               | 13/05/2003                   | Sud du village                     | 25                | 2                 |                 |
| Passy Ndenderling                                                                             | 14 au 15/05/2003             | Nord du village                    | 25                | 1                 | 6%              |
| Ndiop Keur Omar Sarr                                                                          | 12 au 13/05/2003             | Nord du village                    | 50                | 1                 | 2%              |
| Total                                                                                         |                              |                                    | 326               | 24                | 7,4%            |

Table XIII : Échantillonnage de tiques *O. sonrai* en limite sud d'extension de la borréliose dans les villages environnants au Nord/Nord-est et Sud/Sud-est de Dielmo-Ndiop, Sine-Saloum, Sénégal, 2013-2014

| collectes intra ou péri-domiciliaires et/ou en milieu naturel de tiques <i>O. sonrai</i> |                        |                                  |                   |                   |                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Zone d'étude                                                                             | Date                   | Coordonnées lieu échantillonnage | Terriers examinés | Terriers infestés | Infestation (%) |
| Toubacouta                                                                               | 14/03/2013             | 13°46'N-16°28'W                  | 30                | 13                | 43,3%           |
| Keur Mama Lamine                                                                         | 15/03/2013             | 13°46'N-16°22'W                  | 30                | 1                 | 3,3%            |
| Keur Malick                                                                              | 16/03/2013             | 13°46'N-16°21'W                  | 30                | 1                 | 3,3%            |
| Keur Sérigne Khodia                                                                      | 17/03/2013             | 13°46'N-16°19'W                  | 30                | 1                 | 3,3%            |
| Keur Mor Diao                                                                            | 18/03/2013             | 13°46'N-16°18'W                  | 30                | 2                 | 2,6%            |
| Keur Sérigne Korka                                                                       | 18/03/2013             | 13°46'N-16°17'W                  | 30                | 6                 | 20%             |
| Ndiaye Ndiaye                                                                            | 20/03/2013             | 13°46'N-16°15'W                  | 30                | 2                 | 6,6%            |
| Ndiop Keur Omar                                                                          | 21/03/2013             | 13°41'N-16°23'W                  | 30                | 1                 | 3,33%           |
| Missira                                                                                  | 22/03/2013             | 13°41'N-16°28'W                  | 30                | 5                 | 16,6%           |
| Santhie Bamba                                                                            | 23/03/2013             | 13°41'N-16°18'W                  | 30                | 0                 | 0%              |
| Daga Babou                                                                               | 10/02/2014             | 13°45'N-16°27'W                  | 30                | 0                 | 0%              |
| Sourou                                                                                   | 16/02/2014             | 13°45'N-16°28'W                  | 5                 | 2                 | 50%             |
| Simon Diène                                                                              | 11/02/2014             | 13°44'N-16°23'W                  | 8                 | 2                 | 25%             |
| Keur Lahine Sossé                                                                        | 12/02/2014             | 13°44'N-16°24'W                  | 16                | 1                 | 6,25%           |
| Touba Mbaké                                                                              | 12 au 13/02/2014       | 13°45'N-16°22'W                  | 30                | 0                 | 0%              |
| Pakala                                                                                   | 13/02/2014             | 13°45'N-16°21'W                  | 5                 | 1                 | 20%             |
| Darou                                                                                    | 14/02/2014             | 13°45'N-16°20'W                  | 30                | 0                 | 0%              |
| Keur Babou Penda                                                                         | 15 au 16/02/2014       | 13°45'N-16°19'W                  | 30                | 0                 | 0%              |
| Keur Ngatta                                                                              | 16 au 17/02/2014       | 13°45'N-16°18'W                  | 30                | 0                 | 0%              |
| Keur Lahine Fatim                                                                        | 17 au 18/02/2014       | 13°44'N-16°23'W                  | 26                | 1                 | 3,8%            |
| Keur Thiendou                                                                            | 18/02/2014             | 13°43'N-16°21'W                  | 5                 | 1                 | 33,3%           |
| Keur Gayène                                                                              | 19/02/2014             | 13°43'N-16°20'W                  | 16                | 2                 | 12,5%           |
| Keur Babou Khoumba                                                                       | 19/02/2014             | 13°43'N-16°18'W                  | 5                 | 1                 | 20%             |
| Keur Omar                                                                                | 20/02/2014             | 13°43'N-16°22'W                  | 6                 | 1                 | 16,6%           |
| Keur NDianko                                                                             | 20/02/2014             | 13°42'N-16°22'W                  | 18                | 1                 | 5,5%            |
| Keur Aliou Diop                                                                          | 21/02/2014             | 13°42'N-16°21'W                  | 7                 | 3                 | 42,8%           |
| Keur Diébel-Soun                                                                         | 21/02/2014             | 13°42'N-16°20'W                  | 6                 | 3                 | 50%             |
| Keur Thioyène                                                                            | 22/02/2014             | 13°41'N-16°19'W                  | 30                | 0                 | 0%              |
| Keur Sérigne Dié                                                                         | 23/02/2014             | 13°41'N-16°19'W                  | 30                | 0                 | 0%              |
| Keur Ali Yacine                                                                          | 24/02/2014             | 13°41'N-16°21'W                  | 30                | 0                 | 0%              |
| Keur Sall                                                                                | 25/02/2014             | 13°40'N-16°22'W                  | 30                | 0                 | 0%              |
| Daga Ndoup                                                                               | 26/02/2014             | 13°40'N-16°21'W                  | 30                | 0                 | 0%              |
| Keur Hambou                                                                              | 27/02/2014             | 13°40'N-16°20'W                  | 30                | 0                 | 0%              |
| Total                                                                                    | 33 villages prospectés |                                  | 753               | 51                | 6,7%            |

### 4-3. Principaux résultats

Tous les cas de borréliose trouvés infectés par *Borrelia* dans cette région nord du Maroc ont été diagnostiqués uniquement par la technique de la goutte épaisse et représentaient 0,11% des patients ayant une fièvre inexplicée à l'Hôpital Provincial de Kénitra. Au cours des trois premières années (2000-2002) de l'étude, le nombre de patients ayant développé une borréliose a atteint en moyenne un maximum de 20 cas par an. En 2003, 7 cas ont été détectés, tandis qu'entre 2004 et 2005 le nombre de cas a respectivement augmenté de 16 à 18 cas. Des enfants de moins de 1 an, et toutes les autres tranches d'âge ont été atteints par la maladie. Une nette saisonnalité de la distribution des cas de borréliose a été notée entre Juin et Novembre.

La relation borréliose/paludisme, observée à Dielmo par la technique de la goutte épaisse, indique qu'aucun villageois asymptomatique examiné ne porte manifestement de *Borrelia* dans le sang ou rarement, pendant que 46,5% de ces sujets asymptomatiques examinés étaient infectés en *Plasmodium*. Par contre, l'association fréquente borréliose/paludisme a représenté 34,3% des patients fébriles suivis mensuellement à Dielmo, et le paludisme étaient pratiquement la pathologie la plus rencontrée jusqu'en 2004 où avec le déploiement des moyens nationaux de lutte contre cette pandémie, la borréliose est devenue plus couramment diagnostiquée au sein de la population à partir de 2005. La présence des tiques *O. sonrai* a été investiguée à l'intérieur des habitations à Dielmo et Ndiop en 2012, et les prévalences de l'infestation et des tiques infectées étaient de 33,3% (10/30) et 30% (9/30), puis de 7,4% (7/94) et 33,3% (8/24) respectivement. Dans les Villages environnants, 10,4% (252/2419) des terriers examinés étaient infestés de tiques *O. sonrai* dans 33 villages des 51 qui ont été explorés, ce qui correspondrait à plus de 64% d'infestation pour l'ensemble des villages des environs de la zone de Dielmo et Ndiop. Tous les villages localisés à proximité des plaines inondables des bassins de la Néma, du Diaban et Djikoye sont négatifs pour les tiques ornithodoros. La limite sud actuelle de propagation des tiques *O. sonrai* dans le Sine-Saloum correspond approximativement à la latitude 13°40'N. Avant la stratégie d'intervention, l'incidence moyenne annuelle de la borréliose était de 10,55 cas pour 100 personnes-années à Dielmo et 3,79 cas pour 100 personnes-années à Ndiop. La mise en place d'une stratégie de lutte préventive de la borréliose à Dielmo et Ndiop depuis Mars 2013 jusqu'en Septembre 2015, associée à des mesures d'accompagnement a permis de réduire significativement l'incidence de la maladie.

Cette réduction a été plus évidente à Dielmo, passant de 10,55 à 2,63 cas pour 100 personnes-années (test khi-2 = 56,51 ;  $p < 0,001$ ), puis de 3,79 à 1,39 cas pour 100 personnes-années (test khi-2 = 11,07 ;  $p < 0,001$ ) à Ndiop. Grâce à la stratégie mise en place, nous avons pu éviter 36 cas d'infection de borréliose (28 à Dielmo et 8 à Ndiop), pour un coût économique de 345033 F CFA (526 euros) par infection évitée.

#### 4-4. Conclusion

L'étude des cas cliniques de borréliose à l'Hôpital Provincial de Kénitra au Maroc a révélé que toutes les tranches d'âge peuvent être infectées par des *Borrelia*. Le faible portage de l'infection à *Borrelia* observé chez près de 90000 consultants fébriles peut être expliqué par la faible sensibilité de la technique de goutte épaisse, et pourrait donc être plus important avec une méthode plus sensible comme la PCR.

A Dielmo et Ndiop, et dans les villages environnants, la distribution des tiques *O. sonrai* est généralisée dans toutes les localités situées au nord de latitude 13°40'N avec des proportions d'infestation élevées, mais il existe des villages non infestés de tiques ornithodores, situés à la même latitude que celle de Ndiop (13°41'N), certainement du fait de l'extension récente de la progression sud ou des paramètres climatiques et/ou pédologiques défavorables. Le modèle de la stratégie de lutte préventive de la borréliose présenté dans cette étude a été déroulé avec succès à Dielmo et Ndiop et a contribué à réduire significativement l'incidence de la maladie de 89,8% et 81,5% respectivement. Plus de 87% (36/41) des infections de borréliose ont été évitées dans les deux villages grâce à la stratégie de lutte préventive mise en place.

## **CHAPITRE IV : DISCUSSION GÉNÉRALE**

## Chapitre IV : Discussion générale

La borréliose à tiques est une pathologie négligée, longtemps considérée comme une maladie isolée voire sporadique. Son importance épidémiologique en santé publique n'est apparue depuis que des travaux de TRAPE *et al.* (1991, 1996a) ont indiqué que cette maladie représente chez l'homme une cause majeure de morbidité dans les motifs de consultation pour épisode de fièvre en zones rurales. Toutefois, les quelques données classiques disponibles, tant en Afrique de l'Ouest et du Nord (LUCAS, 1849; LEGER, 1917; MATHIS, 1928; NICOLLE *et al.*, 1928; COLAS-BELCOUR, 1930; NICOLLE *et al.*, 1931; NICOLLE *et al.*, 1932; MATHIS *et al.*, 1934; BALTHAZARD, 1937; BERGERET *et al.*, 1948; MATHIS, 1948; BOIRON, 1949; CHABAUD, 1954; MOREL, 1965; RODHAIN, 1976; GOUBAU, 1984) ne pouvaient permettre d'expliquer ni d'interpréter de façon exhaustive ces résultats associés à l'hypothèse soulevée d'une distribution généralisée des ornithodores vecteurs en zone de savane soudanienne. Les modalités définies pour une étude à vaste échelle sur cette pathologie, conduite en Afrique occidentale et centrale ont été exécutées, et les résultats obtenus encore préliminaires (DIATTA, 2005) méritaient alors d'être poursuivis et approfondis en Afrique de l'Ouest et du Nord pour mieux comprendre le faciès épidémiologique de la maladie. Nous avons présenté dans cette thèse, i) la compréhension épidémiologique de la distribution géographique de la borréliose à tiques, ii) la caractérisation génétique des populations de tiques *Ornithodoros* et des *Borrelia*, et la comparaison du fonctionnement génétique du système *Borrelia*/Hôte/Vecteur en zones sahélo-soudanienne et saharo-méditerranéenne en relation avec les modifications climatiques liées au déficit pluviométrique, iii) les facteurs déterminant la répartition géographiques et la fréquence de l'agent pathogène chez l'homme, la tique vectrice et les petits mammifères réservoirs de la borréliose, et iv) l'étude des cas cliniques à l'Hôpital Provincial de Kénitra au Maroc ainsi qu'une étude fonctionnelle de la borréliose à Dielmo et Ndiop, et dans les villages environnants au Sine-Saloum, Sénégal confortée par la mise en œuvre d'une approche de lutte préventive de la maladie que nous discutons dans ce chapitre.

## 1. Compréhension épidémiologique de la répartition géographique de la borréliose à tiques en Afrique de l'Ouest et du Nord

Les résultats de nos investigations montrent que la répartition actuelle des tiques *Ornithodoros* (TRAPE *et al.*, 2013) qui couvre les 2/3 nord du Sénégal (TRAPE *et al.*, 1996a; DIATTA *et al.*, 2005c), une partie de la Gambie (TRAPE *et al.*, 2013) et l'ensemble de la Mauritanie (DIATTA *et al.*, 2005a) -à l'exception d'un tiers de la partie orientale- se prolonge dans une grande partie du territoire malien (DIATTA *et al.*, 2005b; TRAPE *et al.*, 2013). Des tiques *O. sonrai* ont été retrouvées dans des terriers des zones très arides au nord de la Mauritanie (DIATTA *et al.*, 2005a) comme le Guelb El Mhaoûdat près de Zouérat et dans des terriers du sud marocain, ce qui atteste de l'existence d'une continuité territoriale de la distribution géographique de ces populations de tiques entre celles du sud et sud-est du Maroc et celles de la totalité des 2/3 ouest de la Mauritanie qui viennent ainsi fusionner avec les populations de tiques *O. sonrai* distribuées entre le Sénégal, la Gambie et le Mali (TRAPE *et al.*, 2013). Au Maroc, les tiques *Ornithodoros* qui sont largement distribuées dans la nature sur la quasi-totalité du territoire colonisent également assez fréquemment des terriers de rongeurs depuis la partie est du Maroc jusqu'à l'est de l'Algérie et sont massivement rencontrées en milieu naturel dans la Tunisie. Ces tiques *Ornithodoros* sont considérablement abondantes en Afrique de l'Ouest et du Nord avec des proportions moyennes de terriers infestés de 13% (Sénégal, Gambie, Mali, Muritanie) et 30% (Maroc, Tunisie, Algérie) respectivement. Sur le plan morphologique, il était facile de séparer les populations de tiques *Ornithodoros* collectées en deux groupes en s'inspirant des travaux de BOUATTOUT et collègues (2010). Le premier groupe comprenait deux espèces distribuées dans le nord-est de l'Algérie et nord de la Tunisie et caractérisées morphologiquement par un sillon transverse sur la coxae de la première paire de pattes, et le second groupe était constitué de toutes les autres espèces de tiques *Ornithodoros* caractérisées par un sillon oblique sur la coxae de la première paire de patte, comme il a été initialement illustré (BOUATTOUT *et al.*, 2010). Les tiques *Ornithodoros* du premier groupe comprenaient respectivement tous les specimens de La Calle (localité type de la tique *O. erraticus* (LUCAS, 1849), en Algérie, et des sites côtiers proches de l'Algérie et de la Tunisie et également tous les specimens de Le Kef (localité type de la tique *O. normandi* (LARROUSSE, 1923), en Tunisie, et des sites de montagne près de la Tunisie et de l'Algérie (LUCAS, 1849; LARROUSSE, 1923).

Nous n'avons pas trouvé de bons critères pour distinguer morphologiquement la tique *O. erraticus* de la tique *O. normandi*.



En Afrique du Nord, l'existence des tiques *Ornithodoros* était connue depuis longtemps, notamment au Maroc et en Tunisie (NICOLLE *et al.*, 1928; COLAS-BELCOUR, 1930; BALTHAZARD, 1937; MOREL, 1965), et peu ou presque aucune donnée documentée de leur existence n'était disponible en Algérie. Mais, c'est pour la première fois que l'abondance exceptionnelle de ces tiques *Ornithodoros* a été établie par les investigations que nous avons effectuées dans ces trois pays avec des connaissances nouvelles sur la répartition géographique des différentes espèces vectrices. Aucun échantillonnage n'a été réalisé en Égypte où la présence des tiques ornithodores avait été signalée (MOREL, 1965).

En Afrique de l'Ouest, la présence des tiques *O. sonrai* était connue depuis que des travaux ont mentionné l'existence de terriers colonisés par des tiques ornithodores au Sénégal, particulièrement à Dakar, Sébikotane, Rufisque, Sangalkam, Gandigal, Tivaouane, dans le sud de la Mauritanie à Rosso, Aleg, Kaédi, Mbout, Kiffa, Ayoûn El Atroûs, Néma, Tiouilit sur la côte atlantique au nord de Nouakchott (DURIEUX, 1932; MATHIS and DURIEUX, 1932; MATHIS *et al.*, 1934; MOREL, 1965), au Mali notamment à Nioro, Kayes (MOREL, 1965) et Gao, la localité type de la tique *O. sonrai* (SAUTET and WITKOWSKI, 1944), puis à Niamey au Niger (MOREL, 1965). Au Sénégal, la distribution des foyers de tiques *O. sonrai* a montré l'existence d'une vaste zone sans vecteur, circonscrite entre les longitudes 14°30'W et 13°30'W. Dans le Sine-Saloum, la localité de collecte la plus au sud a atteint la latitude 13°41'N et la limite sud de progression des ornithodores correspond approximativement à la latitude 13°40'N (limite de l'isohyète 750 mm). Cette limite sud méridionale est exceptionnellement interrompue par la présence d'une population de tiques dont l'aire de distribution se prolonge plus au sud de cette limite en colonisant des terriers de rongeurs à la latitude 13°35'N au nord de la Gambie entre les longitudes 15°37'W et 15°W, soit une extension sud et est de l'aire de répartition des tiques *O. sonrai* à l'intérieur de la Gambie d'au moins 60 kilomètres. Dans la partie orientale du Sénégal, la limite de collecte la plus à l'est était la latitude 13°15'N (TRAPE *et al.*, 1996a), mais une population de tiques localement distribuée à l'intersection 13°32'N et 13°W a été actuellement mise en évidence (TRAPE *et al.*, 2013), soit une nouvelle extension vers le sud de terriers colonisés sur plus de 30 kilomètres. La limite sud orientale approximative des tiques *O. sonrai* semble correspondre à la latitude 13°30'N (TRAPE *et al.*, 1996a; TRAPE *et al.*, 2013).

En Mauritanie, les tiques *O. sonrai* n'ont pas été retrouvées dans une zone comprise entre le 10<sup>ème</sup> méridien ouest et le 6<sup>ème</sup> (à l'est de la longitude 10°W), couvrant le tiers est du territoire,

ce qui est inattendu dans la mesure où le vecteur *O. sonrai* avait été déjà signalé à Ayoûn El Atroûs et à Néma (MOREL, 1965). Les tiques *O. sonrai* n'ont pas également été trouvées dans les environs de Nouakchott et du littoral atlantique de la ville. Dans le bassin du Niger au Mali, l'aire de répartition ouest des tiques *O. sonrai* s'est rétrécie progressivement de la latitude 14°30'N à 15°N entre les longitudes 09°30'W et 07°30'W, et une vaste zone isolée sans vecteur a été clairement circonscrite entre le 07<sup>ème</sup> méridien ouest et le 06<sup>ème</sup> montrant ainsi une discontinuité de la distribution. Comme dans le cas de la partie orientale du Sénégal, la répartition des tiques *O. sonrai* semble avoir pour limite sud approximative la latitude 13°30'N, ce qui correspond à l'isohyète 750 mm. Il est à noter que dans le centre et l'est du Mali, la répartition des tiques *O. sonrai* semble étroitement associée au lit majeur et aux rives du fleuve Niger et de ses principaux affluents, puisque des études en transects Est-ouest et Nord-sud effectuées au Mali, Burkina Faso et Niger ont montré que la plupart des sites étudiés (6 sites) sur le 14<sup>ème</sup> parallèle ou plus au nord étaient tous négatifs (DIATTA, 2005). Or, dans l'ouest du Mali, on retrouve une forte abondance de tiques *O. sonrai* non associée au réseau hydrographique. Aussi, au Sénégal et dans les 2/3 ouest de la Mauritanie, à l'instar de ce qui est observé dans l'ouest du Mali, il n'existe pas d'association particulière entre le réseau hydrographique et l'abondance des tiques *O. sonrai* (DIATTA, 2005). Dans ces deux pays et la partie ouest du Mali, les tiques *O. sonrai* sont abondantes et l'examen de 30 terriers est presque toujours suffisant pour mettre en évidence la tique vectrice *O. sonrai* au nord de l'isohyète 750 mm de pluie. Les tiques *O. sonrai* n'ont pas été retrouvées au Burkina Faso, bien que la pluviométrie annuelle moyenne dans les sites et stations étudiés soit équivalente à celle des localités positives du Sénégal et Mali situées à la même latitude. Cette situation a été notée de façon similaire dans les sites et stations négatifs étudiés au Tchad, Cameroun, Niger et nord Bénin (DIATTA, 2005). De plus, aucune tique *O. sonrai* n'a été identifiée dans les terriers examinés en milieu naturel et/ou à l'intérieur des habitations dans toutes les localités situées au sud de la latitude 13°N ainsi qu'à l'est du méridien 01°E (TRAPE *et al.*, 2013). Dans la savane humide et les zones forestières, la présence des tiques *O. sonrai* n'a jamais été signalée (LEESON, 1953; HOOGSTRAAL, 1956; MOREL, 1965; CAMICAS *et al.*, 1998), ce qui a été confirmé par nos enquêtes réalisées au Togo, Bénin, en Guinée Conakry, Guinée-Bissao, Côte d'Ivoire et au Libéria où un total de 900 terriers examinés dans plusieurs centaines d'habitations de ménages étaient négatifs.

L'hypothèse d'une distribution discontinue des tiques *O. sonrai* avec co-existence de foyers reliques de borréliose tant dans le Fouta-Djalou que dans la Moyenne, Basse, Haute Guinée n'a pas été corroborée.

## **2. Caractérisation génétique des populations de tiques *Ornithodoros* et des *Borrelia*, et comparaison du fonctionnement génétique du système *Borrelia*/hôte/vecteur en zones sahélo-soudanienne et saharo-méditerranéenne en relation avec les modifications climatiques liées au déficit pluviométrique**

Nous avons montré dans l'étude précédente, les sites de présence des principaux foyers de tiques *Ornithodoros* susceptibles de transmettre un agent pathogène de la borréliose à tiques en Afrique de l'Ouest et du Nord. Dans la présente étude, nous avons identifié par des techniques de biologie moléculaire les implications de chaque espèce de tique vectrice dans la transmission de la maladie chez l'homme.

Les analyses moléculaires réalisées pour caractériser génétiquement les populations de tiques *Ornithodoros* ont révélé l'existence de 9 espèces de tiques fortement différenciées génétiquement. Les distances génétiques entre les 9 clades de tiques *Ornithodoros* collectées dans notre étude ont varié de 5,2% à 25,1%, une distance identique à celles trouvées entre les espèces de tiques *Ornithodoros* des autres régions du monde (TRAPE *et al.*, 2013). Un fait intéressant à noter est que les études moléculaires ont confirmé à l'instar des critères de détermination morphologique, l'existence de deux groupes de tiques *Ornithodoros* au sein des 9 espèces de tiques identifiées. Les deux espèces de tiques qui composent le premier groupe sont constituées par la tique *O. erraticus* dont tous les spécimens provenaient de La Calle (localité type de la tique *O. erraticus* (LUCAS, 1849) en Algérie, et des sites côtiers proches de l'Algérie et de la Tunisie, comme nous l'avons évoqué dans l'étude précédente, et la tique *O. normandi* dont tous les spécimens venaient de Le Kef (localité type de la tique *O. normandi* (LARROUSSE, 1923) en Tunisie, et des sites de montagne proches de la Tunisie et de l'Algérie (LUCAS, 1849; LARROUSSE, 1923) comme nous l'avons mentionné dans la première étude. Ces deux espèces sont clairement distinctes génétiquement et possèdent également des exigences distinctes et préférences écologiques.

Le second groupe est constitué de 7 espèces de tiques, comprenant *O. maroccanus*, *O. sonrai*, *O. occidentalis*, *O. costalis*, *O. kairouanensis*, *O. merionesi* et *O. rupestris*, dont 5 espèces ont été identifiées pour la première fois (*O. occidentalis*, *O. costalis*, *O. kairouanensis*, *O. merionesi* et *O. rupestris*) (TRAPE *et al.*, 2013). Sur les 7 espèces de tiques ainsi déterminées, seulement deux de ces espèces étaient initialement connues : *O. maroccanus* (VELU, 1919), de la localité type de “vieille casbah” près de Casablanca, au Maroc et *O. sonrai*, de la localité type de Gao, au Mali. Une diversité polyphylétiques et spécifique des espèces de tiques *Ornithodoros* a été observée chez les populations distribuées en Afrique du Nord (Maroc, Algérie, Tunisie), contrairement en Afrique de l’Ouest où c’est une population monophylétique de tiques *O. sonrai* qui colonise les terriers de rongeurs en présence de la sous-espèce de tiques *O. sonrai* dont la distribution est strictement localisée au nord du Sénégal à Richard-Toll et Dagana, nord de la Mauritanie à Nouadhibou et au sud du Maroc (Sahara occidental) dans l’Adrar Souttouf. Parmi les 7 espèces de tiques *Ornithodoros* qui composent le second groupe, 5 espèces ont une distribution géographique extrêmement vaste (*O. sonrai*, *O. costalis*, *O. occidentalis*, *O. maroccanus* et *O. merionesi*). La population de tiques *O. sonrai* qui est la seule à coloniser massivement en Afrique de l’Ouest (Mauritanie, Sénégal, Gambie, Mali) les terriers de rongeurs présente une distribution qui se prolonge essentiellement dans les parties arides sud (Sahara occidental) et sud-nord du Maroc, et montre, par ailleurs, une intrusion de population relique à Khémisset (34°00’N/06°02’W) près de Rabat. La même population de tiques *O. sonrai* est également rencontrée dans les terriers des régions semi-désertiques de l’Algérie et Tunisie. Les terriers des plateaux du littoral atlantique marocain sont colonisés par les tiques *O. costalis*, que l’on rencontre aussi dans les terriers du littoral nord-ouest méditerranéen à Mostaganem, en Algérie et du sud de Tunis à Oudhna, en Tunisie où elles vivent en sympatrie respective avec les tiques *O. rupestris* et *O. normandi*. Les terriers des régions nord, nord-ouest et nord-est de la bordure méditerranéenne au Maroc et de la frontière ouest de l’Algérie sont habités par des populations de tiques *O. occidentalis* et *O. maroccanus*, et nous avons noté que les tiques *O. maroccanus* ont occupé la même niche écologique à Marrakech et Aïn-Bénimathar, puis à Missour dans l’oued Choufcherk que les tiques *O. sonrai* et *O. occidentalis* respectivement. Les tiques *O. occidentalis* ont été retrouvées, par ailleurs, dans des terriers au nord de l’Algérie notamment à Bouira, Berrouaghia, Chlef, Ténès et sud de l’Espagne à Torremolinos, et leur distribution pourrait s’étendre jusqu’au Portugal et en Grèce où la maladie a été signalée (DE BUEN, 1926).

Les tiques *O. merionesi* distribuées particulièrement à Es-Smara et Guelmim, au Maroc, partagent la même niche écologique avec les tiques *O. costalis* à Tarfaya. Seule la distribution de deux espèces de tiques semble être strictement localisée : *O. rupestris* trouvées à Mostaganem et Saïda au nord-ouest de l'Algérie et *O. kairouanensis* présente au sud de Kairouan, en Tunisie. Grâce aux analyses de biologie moléculaire les espèces de l'ex-complexe *O. erraticus* qui étaient classiquement constituées de la tique *O. erraticus* (LUCAS, 1849) longtemps appelée "grande forme ou grande variété", *O. sonrai* appelée "petite forme ou petite variété" de la tique *O. erraticus* et *O. marocanus* (VELU, 1919) considérée comme une espèce synonyme juniore de la tique *O. erraticus* (CAMICAS *et al.*, 1998; GUGLIELMONE *et al.*, 2010) ont ainsi été distinguées et différenciées génétiquement.

Toutes les espèces pathogènes de *Borrelia* caractérisées génétiquement (*B. hispanica*, *B. crocidurae* et *B. merionesi*) ont été isolées des tiques *Ornithodoros*, mais *B. merionesi* a aussi été isolé d'un petit rongeur (*Gerbillus occiduus*) capturé à Dakhla (Sahara occidental), au Maroc. Ces trois espèces de *Borrelia* sont distribuées dans une ou plusieurs régions d'Afrique du Nord. Une étude prospective récente a indiqué que des tiques *O. sonrai* étaient infectées par *B. crocidurae* dans la région du Gharb au nord-ouest du Maroc, ce qui représente une extension de 350 kilomètres vers le Nord (SOUIDI *et al.*, 2014) depuis la région de Marrakech où ce spirochète sahélo-saharien avait été signalé (CHABAUD, 1954; DIATTA *et al.*, 2012). La progression sud-nord de *B. crocidurae/O. sonrai* dans cette région nord-ouest, saharo-méditerranéenne du Maroc, pourrait être causée par l'aridité croissante liée aux changements climatiques (SOUIDI *et al.*, 2014). C'est une situation similaire, mais d'extension vers le sud de *B. crocidurae/O. sonrai*, qui a déjà été démontrée en zone de savane soudano-sahélienne d'Afrique de l'Ouest (TRAPE *et al.*, 1996a; TRAPE *et al.*, 2013) où la plupart des terriers de rongeurs localisés au nord de l'isohyète 750 mm de pluie sont infestés de tiques infectantes. Dans une autre localité (Aiti Yadine à Khémisset) proche de Rabat, située à 50 km au sud de la région du Gharb (Kénitra), la présence des tiques *O. sonrai* infectées par *B. crocidurae* a également été indiquée (TRAPE *et al.*, 2013) et serait probablement attribuable à la persistance de l'aridité liée au déficit pluviométrique depuis 1970 dans la plupart des régions du Maroc.

Chez 75 spécimens des tiques *O. erraticus* et *O. normandi* testés par PCR au cours de notre étude, aucun individu n'a été infecté par *B. hispanica*, *B. crocidurae* ou *B. merionesi*, comme l'a d'ailleurs souligné une étude antérieure réalisée en Tunisie (BOUATTOUR *et al.*, 2010), ce qui suggère que les tiques *O. erraticus* stricto sensu et *O. normandi* seraient des vecteurs ou réservoirs médiocres de la borréliose à tiques. En revanche, six des sept espèces de tiques (*O. maroccanus*, *O. sonrai*, *O. occidentalis*, *O. costalis*, *O. merionesi* et *O. kairouanensis*) du second groupe ont été trouvées infectées par une de ces espèces de *Borrelia*, le plus souvent avec des proportions élevées de prévalence variant d'un minimum de 4,6% chez *O. costalis* à un maximum de 36,6% chez *O. sonrai* (TRAPE *et al.*, 2013). *B. crocidurae* a été uniquement détecté chez les tiques *O. sonrai*, ce qui montre que les différents variants génotypiques identifiés en Afrique de l'Ouest au sein de l'espèce vectrice *O. sonrai* ne possèdent aucune spécialisation ni capacité à héberger et transmettre *B. crocidurae* (ELBIR *et al.*, 2015). *B. hispanica* a été identifié chez les tiques *O. maroccanus*, *O. occidentalis* et *O. kairouanensis*, qui constituent actuellement un complexe de trois espèces (TRAPE *et al.*, 2013) de grande taille (longueur de la femelle adulte 5,5-7,5 mm) distribuées habituellement dans les régions méditerranéennes du Maroc, de l'Algérie, Tunisie et de l'Espagne, et qui étaient jadis confondues avec la tique *O. erraticus* (NEUMANN, 1896; DE BUEN, 1926; COLAS-BELCOUR, 1930; ANDERSON, 1935; BALTHAZARD *et al.*, 1950; CHABAUD, 1954; MOREL, 1965; RODHAIN, 1976). L'agent pathogène *B. merionesi*, mal connu (BLANC *et al.*, 1948; DIATTA *et al.*, 2012), apparaît localisé aux régions côtières de l'Atlantique et du désert du Sahara où il est transmis par deux espèces de tiques *Ornithodoros* confondues auparavant avec la tique *O. sonrai* : *O. costalis* et *O. merionesi*. On ne sait pas, par ailleurs, si *B. merionesi* est également pathogène pour l'homme parce que des expériences antérieures réalisées avec ce spirochète ont manqué de déduire la présence de l'infection chez l'homme. Il est intéressant de noter qu'aucune espèce de tique *Ornithodoros* n'a été trouvée infectée par plus d'une espèce de *Borrelia* malgré la prévalence élevée des tiques infectées. L'abondance considérable des tiques *Ornithodoros* vectrices de la borréliose à tiques en Afrique du Nord et de l'Ouest -variant de 39,5% des terriers colonisés par des tiques vectrices au Maroc à 13,7% en Afrique de l'Ouest (Sénégal, Gambie, Mali, Mauritanie)- couplée avec le taux d'infection élevée de ces vecteurs par au moins deux espèces de *Borrelia* pathogènes pour l'homme suggèrent que la borréliose est une maladie courante dans l'aire de distribution de ces vecteurs.

Des travaux récents (NORDSTRAND *et al.*, 2007) ont indiqué l'existence d'une transmission locale de *B. crocidurae* et *B. duttonii* au Togo, un pays qui se trouve en dehors de l'aire de distribution connue de la borréliose à tiques (TRAPE *et al.*, 2013), ce qui est un fait troublant puisque nos investigations ont montré que les tiques *Ornithodoros* sont absentes sur le territoire togolais et que même des gouttes épaisses de patients fébriles n'ont pas permis de mettre en évidence la présence de spirochètes trouvés dans des échantillons de sang supposés positifs par PCR. Si la survenue d'un foyer relique de transmission de *B. crocidurae* et *B. duttonii* devait être confirmée au Togo, voire dans les autres pays environnants à pluviométrie annuelle moyenne équivalente à celle des sites et stations positifs en tiques, cela voudrait dire qu'il pourrait exister un système inconnu de vecteurs/réservoirs d'infections à *Borrelia* dans les régions de savane humide d'Afrique de l'Ouest différent de ce que nous avons étudié.

En Afrique occidentale, particulièrement au Sénégal, la borréliose à tiques à *B. crocidurae* est connue depuis longtemps (LEGER, 1918; MATHIS *et al.*, 1934; AUBRY *et al.*, 1983), mais l'importance de la maladie en santé publique a été démontrée au début des années 1990 (TRAPE *et al.*, 1991). En Mauritanie, la borréliose était aussi déjà connue notamment à Tiouilit où un lot de tiques a été testé et trouvé infecté par *B. crocidurae* (RODHAIN *et al.*, 1991) et des cas de maladie chez l'homme ont été signalés à Bogué (MOREL, 1965) et à Makthar Lahjar (MOLEZ *et al.*, 1996). Au Mali par contre, aucun cas humain n'a jamais été signalé dans ce pays malgré la mise en évidence de tiques et rongeurs infectés par *B. crocidurae*.

En Afrique du Nord, spécialement au Maroc, les trois espèces de *Borrelia* identifiées (*B. hispanica*, *B. crocidurae* et *B. merionesi*) qui circulent dans ce pays étaient classiquement connues et signalées respectivement dans des travaux antérieurs (LEGER, 1917; DE BUEN, 1926; NICOLLE *et al.*, 1928; BALTHAZARD, 1937; BLANC *et al.*, 1948; DIATTA *et al.*, 2012). La maladie était très facile à mettre en évidence au Maroc et en Espagne, mais plus difficile à trouver en Tunisie (NICOLLE *et al.*, 1931) et en Algérie où le premier cas humain a été observé en 1933 (SERGENT *et al.*, 1933). En Tunisie, l'infection naturelle des tiques ornithodores par *B. hispanica* était alors rare, alors que les tiques ornithodores étaient fréquemment récoltées. Les premiers cas d'infection de fièvre récurrente à tiques ou borréliose ont été rapportés par les travaux de NICOLLE *et al.* (1932), et c'est ANDERSON (1935) qui a mis en évidence l'infection à *B. hispanica* chez le vecteur *O. maroccanus* faussement confondu à la tique *O. erraticus* (TRAPE *et al.*, 2013).

Puis, la maladie a été négligée et des données documentées disponibles étaient également en manques. Dans une étude récemment réalisée dans quatre zones à faciès bioclimatiques différents, aucun cas clinique diagnostiqué n'a été rapporté dans le pays (BOUATTOUR *et al.*, 2010).

Les résultats de séquençage et des analyses moléculaires des tiques *Ornithodoros* et des *Borrelia* ont permis de comprendre le fonctionnement génétique du système *Borrelia*/hôte/vecteur au sein duquel évolue une espèce de *Borrelia* spécifique à chaque vecteur. Dans une zone endémique, une espèce de *Borrelia* circule spécifiquement d'un hôte infectant vers un vecteur et du vecteur vers un nouvel hôte. Ce qui suppose que toute modification éventuelle du matériel génétique de l'hôte ou du vecteur devrait impacter la *Borrelia* en présence et se traduire par une modification spécifique de son génome. Les modifications climatiques liées au déficit pluviométrique intervenues en cours des 40 dernières années en Afrique tropicale subsaharienne et maghrébine du pourtour méditerranéen ont vraisemblablement eu un impact sur les organismes qui vivent dans les éco-systèmes subsahariens et méditerranéens se traduisant par un changement de comportement et de régime alimentaire accompagné de mécanismes d'adaptation à l'environnement modifié ou agressé. Ces mécanismes d'adaptation développés par les organismes vivant dans un milieu modifié ou qui en subit les effets conduisent à des modifications biologiques, biochimiques ou génomique de leurs constituants organiques. L'analyse des constituants génomiques du système *Borrelia*/hôte/vecteur en zone sahélo-soudanienne a ainsi révélé qu'au sein de la tique *O. sonrai* et de *B. crocidurae* existe une diversité de variants génotypiques peu différenciés. Il est intéressant de constater qu'une souche de *B. crocidurae* est portée par différents génotypes de la tique *O. sonrai*, aussi différentes souches de *B. crocidurae* sont portées par un génotype de la tique *O. sonrai* (ELBIR *et al.*, 2015), ce qui semble indiquer qu'en Afrique de l'Ouest sahélienne et soudano-sahélieenne il n'y a pas de spéciation observée chez la tique *O. sonrai* et *B. crocidurae* et qu'il pourrait bien s'agir d'une évolution génomique récente au sein d'*O. sonrai*/*B. crocidurae*. L'existence d'une diversité génotypique élevée au sein de l'espèce *B. crocidurae* a été rapportée chez les tiques *O. sonrai* de la zone saharo-sahélieenne de Tunisie (BOUATTOUR *et al.*, 2010). Ce polymorphisme génotypique a également été observé chez des souches de *B. crocidurae* isolées de tiques *O. sonrai* du Mali (SCHWAN *et al.*, 2012), plus proches de la souche Achema de Mauritanie (CP003426) et des souches 12T038 et 7-10T047 de Tunisie.



Au Sénégal, les géotypes de *B. crocidurae* isolés des tiques *O. sonrai* et patients fébriles de Dielmo et Ndiop (zone soudanienne) sont proches des souches de *B. crocidurae* du Mali (groupe A et B), Maroc (Boudnib (JX257049), une zone sahélo-saharienne) et de la Mauritanie (Achema CP003426), mais sont clairement distincts des souches maliennes de *B. crocidurae* du groupe D (isolées de tiques *O. sonrai* et de *M. natalensis*) et des souches de *B. crocidurae* de Tunisie (isolées de tiques *O. sonrai*). Par contre, en zone saharo-méditerranéenne, les constituants génomiques du système *Borrelia*/hôte/vecteur analysés ont montré la présence d'une diversité génétique et spécifique au sein des espèces de tiques *Ornithodoros* et des *Borrelia*, confirmée, d'ailleurs, dans les travaux de TRAPE et collègues (2013). Cette variation génétique, qui a été particulièrement évidente dans la zone saharo-méditerranéenne pourrait être attribuée à des mutations survenues au sein de ce système *Borrelia*/hôte/vecteur.

### **3. Facteurs déterminant la répartition géographique et la fréquence de l'agent pathogène chez l'homme, la tique vectrice et les micro-mammifères réservoirs de la borréliose**

Nous venons de préciser dans les deux précédentes études l'existence d'une aire de répartition géographique des principaux foyers de tiques *Ornithodoros* avec la diversité des espèces de tiques vectrices et des *Borrelia* pathogènes impliquées dans la compréhension de l'épidémiologie de la borréliose à tiques en Afrique du Nord et de l'Ouest. Ensuite, nous démontrons dans cette étude que l'aire de distribution de la borréliose est plutôt une zone endémique naturelle qui est conditionnée par l'influence favorable de paramètres écologiques notamment biologiques, pédologiques et bioclimatiques étroitement liés dans le milieu. Cette aire de répartition géographique de la borréliose ou zone endémique naturelle est localisée au nord de l'isohyète 750 mm de pluie, ce qui correspond approximativement à la latitude 13°30'N. Elle est caractérisée par la présence de petits mammifères infectés par des *Borrelia*, des tiques ornithodores vecteurs habitant les terriers de rongeurs et/ou les infractuosités intra-domiciliaires, et des paramètres pédologiques favorables à l'installation naturelle de ces tiques *Ornithodoros* comme les sols à sable fin associé à de l'argile à limon gros qui préservent plus longtemps l'humidité (DIATTA, 2005).

Dans l'étude de la compréhension de la répartition géographique de la borréliose à tiques, nous avons noté et observé que l'aire de distribution des espèces de tiques *Ornithodoros* et des *Borrelia* ne présente pas une distribution continue et des zones sans ornithodores vecteurs ont été parfois identifiées par endroits au sein de cette aire à borréliose (zone endémique naturelle). L'existence de paramètres pédologiques défavorables à l'installation naturelle des tiques *Ornithodoros* au sein de la zone endémique à borréliose pourrait probablement être la cause majeure pouvant permettre d'expliquer cette situation. Seule la conjugaison des paramètres biologiques (petits mammifères infectés et tiques *Ornithodoros* dans les terriers et/ou anfractuosités intra-domiciliaires), pédologiques et climatiques favorables existant au sein de l'aire de répartition de la borréliose à tiques permet, en définitive, de maintenir et de déterminer la fréquence de l'endémicité de la maladie chez l'homme, la tique vectrice et les micro-mammifères réservoirs pour que le vecteur assure la propagation sud et nord de l'infection à *Borrelia* en relation avec les modifications climatiques liées au déficit pluviométrique : c'est le principe de la relation typique climat/environnement/borréliose.

En Afrique de l'Ouest, des zones sans vecteurs ont été identifiées au sein de l'aire de répartition de la borréliose, notamment en Mauritanie, au Sénégal et Mali, à cause des paramètres environnementaux locaux défavorables à la présence de la tique vectrice et de son agent pathogène (DIATTA, 2005).

☞ En Mauritanie, des tiques *O. sonrai* étaient absentes voire très rares dans le 1/3 est ou la partie orientale comprise entre le 10<sup>ème</sup> méridien ouest et le 6<sup>ème</sup> (TRAPE *et al.*, 2013) en raison des paramètres pédologiques défavorables, tels que les sols à sable gros associé à de l'argile à limon gros qui ne préservent pas longtemps l'humidité (DIATTA, 2005) et qui semblent y être prédominants. Le déficit pluviométrique et hygrométrique lié à la persistance de la sécheresse sub-saharienne depuis 1970 pourrait aussi être une cause ajoutée. Par contre, dans les environs (agglomération) de Nouakchott et le littoral atlantique le long du 16<sup>ème</sup> méridien ouest où les tiques *O. sonrai* n'ont pas été retrouvées (TRAPE *et al.*, 2013), l'existence d'une vaste étendue de remontée de la langue salée à la surface du sol marquée par des zones de sabkha, ajoutée à la présence de cordons dunaires semblent expliquer la rareté et/ou l'absence des tiques *O. sonrai* et de *B. crocidurae* dans les environs de la ville, confortant ainsi l'idée de MOREL (1965) qui indique que les tiques ornithodores sont absentes dans les terriers des sols salés et de sable pur des dunes.

☞ Au Sénégal, nous avons noté au sein des foyers de transmission de la borréliose la présence d'une vaste zone sans ornithodores vecteurs circonscrite entre les longitudes 14°30'W et 13°30'W, puis ensuite au nord-ouest de Rosso Sénégal (TRAPE *et al.*, 2013) dans le village de Khor (16°30'N-15°55'W) où l'effet respectif des mêmes paramètres pédologiques, climatiques et de salinité des sols défavorables observé en Mauritanie a impacté négativement sur la distribution des ornithodores, occasionnant ainsi l'absence des tiques *O. sonrai* et de l'agent pathogène *B. crocidurae* qui sont facilement retrouvés à Richard-Toll situé à plus de 57 kilomètres à l'est du village de Khor. En revanche, une extension spectaculaire et relative vers le sud de l'aire de progression des tiques *O. sonrai* et de *B. crocidurae* a été constatée respectivement au Sénégal oriental (TRAPE *et al.*, 2013) -en évoluant de la latitude 13°15'N à 13°32'N entre 1995-2008- et au Sine-Saloum -en passant de la latitude 13°41',26''N à 13°41',04''N entre 2003-2013- du fait du déficit pluviométrique et de la persistance de la sécheresse sub-saharienne qui a permis aux tiques *O. sonrai* de coloniser des zones de savane soudanienne (TRAPE *et al.*, 1996a).

☞ Au Mali, les mêmes effets liés aux paramètres pédologiques et climatiques défavorables observés en Mauritanie et au Sénégal ont produit certainement les mêmes causes entraînant ainsi dans un premier temps un rétrécissement progressif de l'aire de répartition des tiques *O. sonrai*, de *B. crocidurae* et de leur fréquence dans la partie ouest du Mali, de la latitude 14°30'N à 15°N entre les longitudes 09°30'W et 07°30'W, pour finalement présenter entre le 07<sup>ème</sup> méridien ouest et le 06<sup>ème</sup> une vaste zone isolée sans vecteurs clairement circonscrite montrant une discontinuité de la distribution des tiques *O. sonrai* et de *B. crocidurae* dans la partie centrale du bassin du Niger au Mali. Il apparaît ainsi, que les sols à sable fin associé à de l'argile à limon gros plus fréquents dans les sites et stations positifs pour les ornithodores semblent écologiquement les plus favorables à la présence et à la distribution des tiques *O. sonrai* dans la nature (DIATTA, 2005), puisque ces types de sols conservent plus longtemps l'humidité et joueraient un rôle déterminant dans la répartition et fréquence de *B. crocidurae* chez le vecteur, l'homme et les petits mammifères. L'impact des paramètres pédologiques défavorables pourrait aussi être à l'origine de l'absence ou rareté des tiques *O. sonrai* et de *B. crocidurae* dans les sites et stations du Burkina Faso situés à la même latitude que les localités positives du Sénégal et Mali ayant une pluviométrie équivalente.

En Afrique du Nord, particulièrement au Maroc, en Algérie et Tunisie, de vastes zones sans tiques *Ornithodoros* n'étaient quasiment pas identifiées comme c'était le cas en Mauritanie, au Sénégal et Mali. La répartition et fréquence des infections à *Borrelia* étaient plus courantes au Maroc chez les vecteurs, l'homme et les micro-mammifères qu'en Algérie et Tunisie à cause des paramètres écologiques certainement plus favorables. Mais, des sites sans ornithodores vecteurs ont été plus repertoriés en Algérie qu'au Maroc à cause probablement de la présence de paramètres environnementaux locaux défavorables comme les sols à sable gros associé à de l'argile à limon gros (DIATTA, 2005) et le sable pur des dunes (MOREL, 1965). Au Maroc, l'impact du déficit pluviométrique attribué à la persistance de la sécheresse depuis 1970 a été à l'origine d'une extension considérable sud-nord de l'aire de distribution des tiques *O. sonrai* (SOUIDI *et al.*, 2014), avec probablement la présence d'une infection à *B. crocidurae* courante chez la tique vectrice, l'homme et les petits mammifères réservoirs.

Les *Borrelia* sont des germes inféodés aux tiques *Ornithodoros*, et les tiques *Ornithodoros* sont de potentiels réservoirs de *Borrelia* puisqu'elles conservent ces germes toute leur vie et les transmettent à leurs descendants (transmission verticale) puis aux rongeurs et insectivores réservoirs (transmission horizontale) qui les abritent dans leurs terriers (GOLVAN, 1983). L'homme est contaminé accidentellement. Ces aspects épidémiologiques sus-mentionnés ajoutés à l'endophilie et à la longévité des tiques *Ornithodoros* joueraient un rôle majeur et déterminant, ce qui permettrait à la tique vectrice d'influer sur la répartition géographique et la fréquence de l'agent pathogène chez l'homme et les micro-mammifères réservoirs. Les petits mammifères trouvés infectés par des *Borrelia* dans l'aire de répartition de la borréliose à tiques ont une distribution géographique qui s'étend au-delà de la zone endémique naturelle à borréliose, mais ils n'ont jamais été trouvés infectés en dehors de l'aire de répartition connue de la maladie et dans des régions où les tiques *Ornithododors* étaient absentes. De la même manière que les espèces de tiques *Ornithodoros*, réservoir invertébré, circulent au sein de cette aire à borréliose, les espèces de petits mammifères, réservoir animal, qui y vivent, hébergent des *Borrelia* dans leurs organes profonds (cerveau, foie, rate, moelle osseuse, les poumons, les reins, les organes lymphoïdes) et dans leur sang puisqu'ils infectent les tiques *Ornithodoros* hématophages (RODHAIN, 1976), et contribuent à déterminer la fréquence et la répartition géographique des *Borrelia* chez les tiques *Ornithodoros* et l'homme.

Nos données sur les petits mammifères infectés couplées à celles d'autres auteurs indiquent que 17 espèces de rongeurs et 4 d'insectivores servent de réservoirs de la borréliose à tiques en Afrique de l'Ouest (MATHIS, 1928; BOIRON, 1949; SCHWAN *et al.*, 2012; DIATTA *et al.*, 2015), alors que pour toute l'Afrique de l'Ouest et du Nord 21 espèces de rongeurs et 6 d'insectivores ont été identifiées comme les principaux réservoirs de la maladie (DIATTA *et al.*, 2012; DIATTA *et al.*, 2015). *G. gerbillus*, *G. tarabuli* et *G. occiduus* sont des porteurs potentiels d'infection à *Borrelia* strictement limités à la zone saharo-sahélienne (DIATTA *et al.*, 2015), tandis qu'*A. niloticus*, *M. huberti* et *T. gracilis* trouvés infectés sont surtout des espèces sahéliennes et *M. erythroleucus*, *M. natalensis*, *Praomys daltoni*, *C. olivieri*, *G. gambianus*, *C. gambianus* sont caractéristiques d'une infection à borréliose dans la zone soudanienne (GRANJON *et al.*, 2009; DIATTA *et al.*, 2015) fréquentée également par *M. musculus* et *R. rattus* qui vivent exclusivement à l'intérieur des habitations humaines. Les espèces de rongeurs les plus fréquemment capturées en Afrique de l'Ouest étaient *A. niloticus*, *M. erythroleucus*, *M. huberti* et *M. musculus* et représentent le principal réservoir naturel de l'infection à *Borrelia* à cause de leur abondance et de la proportion élevée de leur infection au sein des communautés de petits mammifères (DIATTA *et al.*, 2015). *C. olivieri*, *T. gracilis*, *R. rattus* et *C. gambianus* qui suivent dans le classement de l'abondance constituent le réservoir secondaire des infections à *Borrelia* (DIATTA *et al.*, 2015). La prévalence des infections à *Borrelia* chez les petits mammifères a varié de 1,7% à 28% et la variation de la prévalence de l'infection entre les espèces était statistiquement significative. *A. niloticus* et *M. erythroleucus* les plus répandus des rongeurs sahélo-soudaniens (GRANJON *et al.*, 2009) ont été trouvés infectés dans chacune des trois zones bioclimatiques situées entre 50-250 mm, 250-500 mm et 750 mm (DIATTA *et al.*, 2015). Pour expliquer pourquoi une espèce de petits mammifères est probablement plus infectée qu'une autre à l'intérieur de l'aire de distribution des tiques *Ornithodoros*, nous pouvons proposer différentes hypothèses liées à son mode de vie, à la structure de son terrier, son écologie, son comportement social et/ou aux caractéristiques de son pelage. Il est intéressant de noter que la structuration de l'âge des populations de petits mammifères peut aussi avoir influencé la proportion d'animaux trouvés infectés comme cela a déjà été rapporté dans une étude réalisée sur des rongeurs capturés au nord du Sénégal, où la proportion de specimens d'*A. niloticus* infectés a diminué de 50% chez les juvéniles à moins de 3% chez les individus plus âgés à cause des facteurs immuns (GODELUCK *et al.*, 1994).

#### **4. Étude des cas cliniques à l'Hôpital Provincial de Kénitra au Maroc, et étude fonctionnelle de la borréliose à Dielmo et Ndiop, et dans les villages environnants au Sine-Saloum, Sénégal et stratégie de lutte préventive de la maladie**

Dans cette dernière étude, nous montrons, en définitive, que les populations humaines qui vivent, mènent des activités et se déplacent dans un environnement où circulent le réservoir animal infectant avec la présence des espèces de tiques *Ornithodoros* vectrices infectées par des *Borrelia* sont fortement exposées à la contamination et à développer la borréliose.

Au Maroc, les résultats de l'étude clinique ont révélé qu'à l'Hôpital Provincial de Kénitra, 102 cas de borréliose (0,11%, 102/89995) ont été détectés (DIATTA *et al.*, 2012) en cinq ans (2000-2005) dans la seule région du Gharb avec en moyenne 17 cas par an, et aucun cas de paludisme local n'a jamais été observé. Le nombre de personnes contaminées mensuellement a été plus élevé au mois d'Août avec 26 cas, alors qu'aucun cas n'a été diagnostiqué en Janvier et Mars. Les cas diagnostiqués commencent à augmenter au printemps pour atteindre le maximum en été, puis diminuer en automne et sont presque absents en hiver à cause probablement des basses températures qui annihileraient l'activité des tiques *Ornithodoros* vectrices. Bien que toutes les tranches d'âge soient affectées, le début de l'âge adolescent semble être un facteur d'exposition parce que les personnes âgées de 15 ans ou plus étant plus affectées (DIATTA *et al.*, 2012) seraient plus exposées au risque de contamination (60%) à cause probablement de leur mode vie et de leurs activités quotidiennes. Le fait que de très jeunes enfants étaient atteints par la maladie, signifie qu'ils auraient certainement voyagé dans une zone endémique avec leurs parents. Les cas de borréliose uniquement détectés par la technique de goutte épaisse auraient pu être beaucoup plus importants si une autre méthode plus sensible avait été utilisée. En effet, une étude réalisée dans la même région chez 57 patients et 70 autres ayant une fièvre inexplicée en 2005 et 2006 respectivement, et diagnostiqués par les méthodes PCR, a permis de déterminer une prévalence moyenne de 20,5% (26/127) de patients infectés (SARIH *et al.*, 2009). Il est probable que la borréliose constitue une cause fréquente de morbidité dans toutes les régions du Maroc, mais, la maladie semble y être rarement diagnostiquée comme dans les autres pays d'Afrique du Nord.

Dans une récente étude réalisée en Tunisie, aucun cas humain n'a été rapporté bien que des spécimens de tiques *O. sonrai* testés par PCR aient été trouvés infectés par *B. crocidurae* (24/159) avec une prévalence élevée de 15,1% (BOUATTOUT *et al.*, 2010). La fréquence des terriers infestés (39,5%) et prévalence élevée des tiques infectées (10%) dans la nature au Maroc indiquent que le risque majeur de contamination interviendrait surtout pendant les activités agricoles et le camping puisque les conditions d'habitat en milieu urbain et rural sont de meilleure qualité que celles prédominant l'habitat traditionnel ouest africain.

Le fonctionnement de la borréliose à Dielmo et Ndiop, et dans les villages environnants au Sine-Saloum, Sénégal, a été évalué à travers des paramètres évocateurs de la présence et fréquence de la maladie, notamment les terriers et anfractuosités intra-domiciliaires infestés de tiques infectées et les petits mammifères infectants, et son incidence a été déterminée.

👉 Ainsi, la densité des facteurs de risque (terriers et anfractuosités intra-domiciliaires) était identique dans les deux villages avec le même risque probable de contamination. La proportion élevée de terriers infestés de tiques *O. sonrai* (33%) dans le village de Dielmo indique que des terriers habitant des tiques à l'intérieur des chambres constituent le principal facteur de transmission de la maladie (VIAL *et al.*, 2006). Cette infestation élevée de terriers dans les chambres, dont beaucoup d'entre eux contiennent des tiques infectées par *Borrelia* nous a permis de proposer des voies de transmission corrélées aux données antérieures (MATHIS *et al.*, 1934; DIATTA *et al.*, 2015), en considérant que : i) les villageois sont infectés, très probablement, à l'intérieur de leurs habitations quand des terriers s'ouvrent dans les chambres et/ou les habitants dorment sur des nattes ou matelas à même le sol, ii) la transmission peut aussi se produire durant les travaux de ménage ou dans les champs environnants au cours de différentes activités de plein air, iii) la contamination peut survenir dans les aires de jeux des enfants ou en dehors du village lors d'un voyage dans des zones à haut risque (zone endémique). L'échantillonnage complémentaire élargi dans les autres villages environnant de Dielmo et Ndiop a montré que la borréliose n'est pas seulement spécifique à Dielmo et Ndiop, et que plus de 64% des villages de la zone étaient infestés par des tiques *O. sonrai*, ce qui suggère qu'au Sénégal, la borréliose est un problème de santé publique en milieu rural dans tous les villages situés au nord de la latitude 13°40'N.

👉 Aussi, la prévalence de l'infection chez les tiques *O. sonrai* était plus élevée à Ndiop (33,3%) qu'à Dielmo (7,4%), et il n'y a aucune explication évidente pour justifier cette différence bien que le fait que des tiques *O. sonrai* collectées à Ndiop, dans la même concession endémique peut être suspecté. Cette prévalence des tiques infectées à Ndiop semble proche de celle récemment rapportée (26%) au Sénégal (TRAPE *et al.*, 2013).

Au Mali, 12,5% des tiques *O. sonrai* (TRAPE *et al.*, 2013) et 18% d'autres specimens (SCHWAN *et al.*, 2012) étaient infectées par *B. crocidurae*, contre 15% des tiques *O. sonrai* (BOUATTOUR *et al.*, 2010) et 6,5% (TRAPE *et al.*, 2013) en Tunisie, et 10% de taux d'infection chez les tiques *O. erraticus* s.l. (DIATTA *et al.*, 2012) au Maroc. La prévalence de l'infection à *Borrelia* chez le réservoir animal a également été identifiée élevée tant à Dielmo (DIATTA, 2005; VIAL *et al.*, 2006; DIATTA *et al.*, 2015) qu'à Ndiop (DIATTA, 2005; DIATTA *et al.*, 2015).

👉 L'incidence de la borréliose suivie quotidiennement au sein de ces deux populations rurales était de 10,55 cas pour 100 personnes-années à Dielmo pendant plus de 22 ans et 3,79 cas pour 100 personnes-années à Ndiop au cours de 4 ans. Le taux d'incidence de la borréliose observé à Dielmo est considérable et représente l'unique incidence connue la plus élevée en Afrique et dans le monde pour une maladie bactérienne. Des travaux antérieurs avaient indiqué un taux d'incidence presque similaire de 11 cas pour 100 personnes-années et 9,7 cas pour 100 personnes-années à Dielmo (VIAL *et al.*, 2006; MEDIANNIKOV *et al.*, 2014). A Ndiop village, situé à la lisière de la limite sud de progression de la borréliose, la maladie n'est apparu au sein de la population qu'en 2010 (MEDIANNIKOV *et al.*, 2014) et son taux d'incidence paraissait déjà inquiétant dès les trois premières années. La fréquence des cas de borréliose couramment diagnostiqués dans ces deux villages, nous a conduit à mettre en place une stratégie de lutte préventive de la maladie qui a consisté à cimenter toutes les chambres de couchages et les autres dépendances à forte fréquentation humaine afin d'éviter les contacts humains avec les tiques *O. sonrai* vectrices, (DIATTA *et al.*, 2016). Cette intervention a permis de démontrer que lorsque nous avons amélioré les conditions d'habitat intra-domiciliaire à Dielmo et Ndiop, couplées à des mesures d'accompagnement notamment la capture de petits mammifères à l'intérieur des habitations et l'hygiène sanitaire, l'incidence de la borréliose a significativement diminué, passant de 10,55 à 2,63 cas pour 100 personnes-années à Dielmo ( $p < 0,001$ ), puis de 3,79 à 1,39 cas pour 100 personnes-années à Ndiop ( $p < 0,001$ ) (DIATTA *et al.*, 2016).



La stratégie ainsi initiée pour la première fois, associée à ces mesures d'accompagnement a fortement contribué à éviter la survenue de 28 cas de borréliose à Dielmo et 8 cas à Ndiop, soit une réduction de 89,8% et 81,5% respectivement. Le risque relatif (RR) de développer une borréliose à Dielmo ( $RR_{DL} = 0,2950 = 29,5\%$ ) et à Ndiop ( $RR_{NDP} = 0,1847 = 18,5\%$ ) est inférieur à 1, ce qui indique que la méthode préventive de contrôle de la borréliose est un facteur protecteur qui a considérablement réduit l'incidence de la maladie à Dielmo, et a joué un rôle important dans la prévention de sa propagation à Ndiop. Le nombre de cas moyens diagnostiqués annuellement au cours de la période d'intervention (2 ans et 7 mois) était de 10 cas à Dielmo et 5 cas à Ndiop, alors qu'il y avait 31 cas à Dielmo et 10 cas à Ndiop avant l'intervention. La stratégie préventive d'élimination des contacts humains avec les tiques vectrices ainsi déroulée, couplée à des mesures d'accompagnement est un outil efficace et approprié qui va permettre de contrôler et réduire drastiquement la survenue des cas de borréliose (DIATTA *et al.*, 2016), surtout dans les zones rurales endémiques (TRAPE *et al.*, 1991; TRAPE *et al.*, 1996b; PAROLA *et al.*, 2011). Les résultats de la stratégie suggèrent qu'avec un coût de 345033 F CFA (526 euros) par infection évitée, l'intervention est économiquement supportable pour les pays à faible revenu ou pays en voie de développement (PED). Comme la stratégie et les mesures d'accompagnement ont été transférées au niveau communautaire en 2016, le coût par infection évitée pourrait également chuter à 171861 F CFA (262 €) en 2016, considérant qu'au dernier trimestre 2015, 3 cas de borréliose ont été rapportés à Dielmo contre un seul cas à Ndiop. Pour cette raison, nous avons estimé qu'à la fin de l'année 2016, l'incidence pourrait baisser à 1,56 cas pour 100 personnes-années et 0,26 cas pour 100 personnes-années à Dielmo et Ndiop respectivement, ce qui correspondrait à 36 cas d'infections supplémentaires évitées.

## **CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES**

## CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Les investigations sur la borréliose à tiques, qui viennent de compléter nos travaux antérieurs (2003-2005), ont associé six équipes françaises, des équipes de onze pays ouest africains et trois pays maghrébins. Elles représentent la première étude longitudinale à vaste échelle jamais réalisée sur cette maladie en Afrique occidentale, centrale et maghrébine. Les résultats obtenus dans le présent travail indiquent que :

👉 Des données importantes de terrain sur la répartition géographique des tiques *Ornithodoros* et des *Borrelia* pathogènes ont été collectées au Sénégal, en Gambie, Guinée Bissao, Mauritanie, Guinée Conakry, au Mali, Burkina Faso, Niger, Togo, Libéria, en Côte d'Ivoire, au Maroc, en Algérie, Tunisie et dans le sud de l'Espagne. Un total de 7406 terriers de rongeurs a été exploré dans 421 stations de 245 sites d'études de ces quinze pays pour rechercher la présence de tiques *Ornithodoros* vectrices. Des captures de petits mammifères ont été effectuées dans 96 localités de 7 pays d'Afrique de l'Ouest et du Centre, puis un pays du Maghreb (Maroc), et ont permis de collecter 4484 rongeurs et insectivores appartenant à 57 espèces et 7 familles, dont 4239 animaux ont été testés pour rechercher une infection à *Borrelia* parmi lesquels 299 spécimens (7,05%) appartenant à 19 espèces ont été trouvés infectés naturellement. Tous les animaux infectés provenaient uniquement des régions où la présence des tiques *Ornithodoros* a été mise en évidence et aucun animal n'a été infecté où ces tiques étaient absentes.

👉 Le plan d'échantillonnage des tiques *Ornithodoros* basé sur les seules coordonnées géographiques s'est montré adapté et pertinent, puisqu'il a permis d'éviter tout facteur subjectif dans le choix des sites et de renforcer la signification des résultats. Il a été possible d'échantillonner exactement au point GPS prédéfini. La définition du site d'échantillonnage comme la zone située dans un rayon de 20 kilomètres autour de ce point a résolu les problèmes d'accessibilité. Aussi, la méthode qui consiste à prédéfinir, le nombre de 30 terriers à examiner (aspirer) par site pour rechercher des tiques ornithodores, avec jusqu'à 30 terriers supplémentaires étudiés si les 30 premiers se révélaient tous négatifs s'est avérée suffisante, car tous les sites positifs des études en transect ont été identifiés sans jamais avoir deux sites consécutifs négatifs.

En revanche, tous les sites négatifs des études en transect dont le site suivant était également négatif ont formé un ensemble continu sans aucun site positif, particulièrement dans la partie orientale de la Mauritanie, le delta central du Niger au Mali, au Niger jusqu'au Tchad, le long du fleuve Niger et les localités de délimitation de la limite sud des ornithodores vecteurs au Sénégal et Mali.

👉 Des méthodes de biologie moléculaire ont été appliquées à l'étude de caractérisation génétique des tiques *Ornithodoros* et des *Borrelia*. Les résultats des analyses moléculaires ont révélé l'existence d'une diversité génétique et spécifique chez 9 espèces de tiques *Ornithodoros*, parmi lesquelles 5 espèces sont décrites pour la première fois (*O. occidentalis*, *O. costalis*, *O. rupestris*, *O. kairouanensis*, *O. merionesi*) et 6 espèces étaient infectées (*O. sonrai*, *O. marocanus*, *O. occidentalis*, *O. kairouanensis*, *O. merionesi*, *O. costalis*) par trois espèces pathogènes de *Borrelia* : *B. crocidurae*, *B. hispanica* et *B. merionesi*. Les espèces de *Borrelia* sont très répandues chez les tiques *Ornithodoros* et les petits mammifères réservoirs. Mais, les tiques *Ornithodoros* semblent absentes des autres régions de l'Ouest ou Centre de l'Afrique et les rongeurs et insectivores ne sont infectés dans ces régions. La tique *O. erraticus* stricto sensu présente une distribution localisée aux seules régions côtières nord-est de l'Algérie et nord-ouest de la Tunisie et son rôle de vecteur classique de *B. hispanica* n'a pas été confirmé.

👉 A l'issue de cette étude, les grandes lignes de la répartition géographique des principaux foyers de distribution de la borréliose et de connaissance des espèces de tiques *Ornithodoros* impliquées dans la transmission des espèces de *Borrelia* ont été clairement établies. Les tiques *O. sonrai* sont massivement distribuées dans les terriers de rongeurs situés au nord de l'isohyète 750 mm dans toute la moitié ouest de l'Afrique occidentale (Mauritanie, Sénégal, Gambie, Mali). Les tiques *O. sonrai* ainsi présentes au Sénégal, en Gambie, au Mali et jusqu'à l'extrême nord de la Mauritanie ont été également rencontrées dans les terriers de rongeurs du sud marocain (Sahara occidental), ce qui atteste l'existence d'une continuité territoriale de la répartition de la borréliose entre l'Afrique de l'Ouest et le Maroc. Cette continuité territoriale de distribution des tiques *Ornithodoros* existe aussi entre le Maroc et la Tunisie, ce qui suggère que la répartition géographique des différentes espèces de tiques *Ornithodoros* intéresse la quasi-totalité de l'Afrique du Nord et du Sahara occidental.

L'hypothèse d'une extension généralisée des tiques *O. sonrai* et de *B. crocidurae* en zone de savane soudanienne sous l'influence de la persistance de la sécheresse depuis 1970 a été corroborée par les résultats de notre étude. Une extension similaire de l'aire de distribution spatiale de la tique *O. sonrai* et de son agent pathogène (*B. crocidurae*) en relation avec l'aridité croissante liée au déficit pluviométrique des années 1970 a aussi été mise en évidence en zone méditerranéenne au Maroc. Les limites sud et est de progression des tiques *O. sonrai* ont été déterminées sur le terrain avec une grande précision tant au Sénégal, en Gambie et au Mali car la prévalence des terriers colonisés y est immédiatement élevée. Aucune population relique de tiques *O. sonrai* n'a été identifiée ni dans le Fouta Djallon, ni dans les savanes soudano-sahéliennes et forêts humides (Guinée Conakry, Libéria, Côte d'Ivoire, Togo, Bénin) localisées au sud de la limite de progression des tiques ornithodores. L'hypothèse de l'existence au Togo d'un autre système *Borrelia*/hôte/vecteur dont l'épidémiologie semble différente de celle du système *Borrelia*/hôte/vecteur que nous avons étudié en Afrique occidentale mérite d'être élucidé afin de mieux comprendre l'étiologie des cas de borréliose signalés dans ce pays par les travaux de NORDSTRAND et collègues.

Dans la moitié est de l'Afrique de l'Ouest (Burkina Faso, Niger, Togo) où la pluviométrie est équivalente aux sites et stations positifs du Sénégal et Mali, les tiques *O. sonrai* semblent rares ou absentes à la fois en zones soudanienne, sahélienne et sahérienne, à l'instar des résultats obtenus en Afrique centrale (Tchad, Cameroun) rapportés par les travaux de DIATTA (2005). Ces résultats ont été surprenants puisque les tiques *O. sonrai* étaient jadis signalées à Niamey et Ndjaména, mais pourraient trouver leur explication dans la conjonction des paramètres climatiques et environnementaux locaux défavorables liés à la sécheresse subsaharienne depuis 1970. En outre, nos investigations montrent qu'il existe au niveau du bassin du Niger une zone de transition où des tiques *O. sonrai* se maintiennent au nord de l'isohyète 750 mm uniquement à proximité du lit majeur du fleuve Niger et de ses principaux affluents. Par contre, au Sénégal, en Gambie, Mauritanie et dans l'ouest du Mali la répartition des tiques *O. sonrai* est indépendante du réseau hydrographique.

👉 L'analyse des paramètres pédologiques a montré que les sols à sable fin associé à de l'argile à limon gros semblent écologiquement plus favorables à la présence et à la distribution des tiques *Ornithodoros* dans la nature. Ces types de sols préservent plus longtemps l'humidité et semblent jouer un rôle déterminant dans la répartition des tiques *Ornithodoros*.

Pour tenter d'expliquer la limite est de répartition des tiques *O. sonrai*, de nombreux paramètres climatiques et autres paramètres environnementaux- végétation, orohydrographie, géomorphologie, hydrogéologie, agriculture, population et faune associée- ont été testés. Vraisemblablement, nous pensons que la plus grande hygrométrie de saison sèche et la plus grande fréquence des pluies de contre saison qui sont observées au Sénégal, en Gambie, Mauritanie et dans l'ouest du Mali, conjuguées à des paramètres édaphiques (eau, texture et structure du sol), sont actuellement les seuls facteurs identifiés susceptibles d'expliquer les différences de répartition des tiques *O. sonrai* au nord de l'isohyète 750 mm en Afrique occidentale et centrale. L'humidité de saison sèche associée à la présence de paramètres pédologiques favorables au niveau du delta central du Niger pourrait aussi expliquer le maintien localisé des tiques *O. sonrai* dans cette partie centrale de l'Afrique de l'Ouest au nord de l'isohyète 750 mm.

👉 La borréliose est rarement diagnostiquée en Afrique, où elle est régulièrement confondue avec le paludisme dans de nombreuses régions. Mais l'abondance considérable des tiques *Ornithodoros* dans les terriers colonisés en Afrique du Nord et de l'Ouest, variant de 39,5% au Maroc à 13,7% en Afrique de l'Ouest (Sénégal, Gambie, Mali, Mauritanie), couplée aux taux d'infection à *Borrelia* élevée chez les tiques vectrices, suggèrent que l'incidence de la maladie pourrait être plus élevée dans une grande partie de l'Afrique où l'habitat traditionnel est prédominant (87%).

Au Maroc, l'étude des cas cliniques a montré que la prévalence de l'infection à *Borrelia* chez des patients fébriles de la région du Gharb (Kénitra) aurait pu être plus importante (0,11 à 20%) avec une méthode diagnostique plus sensible comme la PCR, malgré les conditions d'habitat de meilleure qualité. Il est très probable que la contamination chez l'homme se produise pendant le camping et/ou les longs séjours en milieu naturel liés aux activités agricoles. Au Sénégal, notamment à Dielmo et Ndiop (Sine-Saloum), où un suivi médical et épidémiologique de la population a été réalisé quotidiennement, l'incidence annuelle moyenne de la borréliose était considérablement plus élevée à Dielmo (10,5%) qu'à Ndiop (3,8%), ce qui indique que la borréliose, problème réel de santé publique, représenterait une incidence similaire dans les principales régions endémiques d'Afrique de l'Ouest sahélienne et soudano-sahélienne si une surveillance épidémiologique y est permanente.

La stratégie de lutte préventive de la borréliose que nous avons mise en place à Dielmo et Ndiop, associée à des mesures d'accompagnement, a fortement contribué à réduire significativement l'incidence de la maladie dans les deux villages, suggérant que la borréliose peut être réduite largement si les populations sont impliquées. Cette stratégie et ses mesures d'accompagnement ont été transférées au niveau communautaire en 2016 afin de soutenir durablement les résultats satisfaisants et encourageants obtenus. La lutte préventive de la borréliose, qui vise à combattre les tiques *Ornithodoros* vectrices pour éviter les contacts humains, mérite d'être considérée comme un outil efficace pour prévenir la transmission de la maladie dans les principaux foyers des pays ouest africains où prédomine l'habitat traditionnel. De plus, ce modèle technique de contrôle des tiques ornithodores en milieu rural doit être adopté par les autorités de santé publique ou tout acteur de la santé et/ou les organisations non gouvernementales (ONG) pour promouvoir la santé rurale à travers des programmes nationaux de prévention. Actuellement, une technique de dépistage rapide de la borréliose à tiques est en cours de réalisation à l'Unité de Recherche sur les Maladies Infectieuses et Tropicales Émergentes (URMITE) de Marseille, en France, afin d'améliorer et de renforcer la prise en charge des patients fébriles dans les structures sanitaires.

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 ADAM, F., HUBERT, B., POULET, A.R. (1979). Zoogéographie des mammifères. *In: Atelas du Sénégal*. IGN. Paris, pp. 147.
- 2 ANADU, P.A. (1979a). Gestion period and early development in *Praomys (Myomys) daltoni* (Rodentia: Muridae). *Terre vie*, **33**: 59-60.
- 3 ANDERSON, C. (1935). Sur la présence d'*Ornithodoros erraticus* infecté par *Spirocheta hispanicus* dans la banlieue de Dakar. *Arch Inst Pasteur de Tunis*, **24**: 483-492.
- 4 ASSOUS, M.V., WILAMOWSKI, A., BERCOVIER, H., MARVA, E. (2006). Molecular characterization of tickborne relapsing fever *Borrelia*, Israel. *Emerg Infect Dis*, **12**: 1740-1743.
- 5 AUBRY, P., RENAMBOT, J., TEYSSIER, J., BUISSON, Y., GRANIC, G., BRUNETTI, G., DANO, P., BAUER, P.H. (1983). La borréliose à tiques au Sénégal, à propos de 23 Observations. *Dakar Méd*, **28**(3): 413-420.
- 6 BA, E.H. (2001). Epidémiologie clinique de la borréliose à tiques dans une zone rurale du Sénégal. Mémoire de fin d'étude d'Ingénieur. *Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar*, pp. 58.
- 7 BALTHAZARD, M. (1937). Présence au Maroc d'un spirochète du type *duttonii* transmis dans la nature par *Ornithodoros erraticus*. *Bull. Soc. Path. Exot.*, **30**: 551-555.
- 8 BALTHAZARD, M., BAHMANYAR, M., MODIFI, C. (1950). *Ornithodoros erraticus* et fièvres récurrentes. *Bull. Soc. Pathol. Exot.*, **43**: 595-601.
- 9 BARBOUR, A.G. (1999). Relapsing fever and other *Borrelia* infections: *In: GUERANT R.L., W.D.H., .WELLER P.F., eds. Tropical infectious diseases: principles, pathogens and practice. Philadelphia Churchill Livingstone: 535-546.*
- 10 BARBOUR, A.G., TESSIER, S.L., STOENNER, H.G. (1982). Variable major proteins of *Borrelia hemersii*. *J. Exp. Med*, **158**: 2127-2140.
- 11 BARCLAY, A.J.G., COULTER, J.B.S. (1990). Tick-borne relapsing fever in central Tanzania. *Trans R Soc Trop Med Hyg*, **84**:. 852-856.
- 12 BARON, J.C., HUBERT, B., P., L., J.M., F. (1974). Serological differentiation of two species of *Taterillus* (Rodontia, Gerbillidae) from Senegal: *T. gracilis* (Thomas, 1892) and *T. pygargus* (Cuvier, 1832). *Comparative Biochemistry and Physiology*, **47A**: 441-446.
- 13 BERCHE, P., GAILLARG, J.L., SIMONET, M. (1988). Bactériologie. Bactéries des infections humaines. *Flamm. Méd.-Sci.*, **1**: 472-474.

- 14 BERGERET, C., RAOULT, A. (1948). Notes sur les formes nerveuses de la fièvre récurrente. Fièvre récurrente à tiques d'Afrique Occidentale Française. *Bull Med AOF*, **5**: 271-283.
- 15 BERNARD, J. (1969). Les mammifères de Tunisie et des régions voisines. *Bulletin de la faculté d'agronomie de Tunis*, 24-25, pp. 160.
- 16 BLANC, G., MAURICE, A. (1948). Contribution à l'étude du spirochète de Goulimine. *Bull Soc Pathol Exot*, **41**: 139-141.
- 17 BOIRON, H. (1949). Considérations sur la fièvre récurrente à tiques au Sénégal. L'importance du rat comme réservoir de virus. *Bull Soc Path Ex*, **42**(1): 62-70.
- 18 BOUATTOUT, A., GARNIER, M., M'GHIRBI, Y., SARIH, M., GERN, L., FERQUEL, E., POSTIC, D., CORNET, M. (2010). *Borrelia crocidurae* infection of *Ornithodoros erraticus* (Lucas, 1849) Ticks in Tunisia. *Vector Borne Zoonotic Dis*, **10**: 825-830.
- 19 BRITTON-DAVIDIAN, J., CATALAN, J., GRANJON, L., DUPLANTIER, J.M. (1995). Chromosomal phylogeny and evolution in the genus *Mastomys* (Mammalia, Rodentia). *J. Mamm.*, **76**: 248-262.
- 20 BRUMPT, E. (1949). Précis de parasitologie. *MASSON & Cie*, **1**: 89-108.
- 21 BRYCESON, A.D.M., PARRY, E.H.O., PERINE, P.L., WARRELL, D.A., VUKOTICH, D., LEITHEAD, C.S. (1970). Louse-borne relapsing fever: a clinical and laboratory study of 62 cases in Ethiopia and reconsideration of the literature. *Quart. J. Med.*, **39**: 129-170.
- 22 BURMAN, N., SHAMAEI-TOUSI, A., BERGSTRÖM, S. (1998). The spirochete *Borrelia crocidurae* causes erythrocyte rosetting during relapsing fever. *Infect. Immun*, **66**: 815-819.
- 23 CADAVID, D. and BARBOUR, A.G. (1998). Neuroborreliosis during relapsing fever: review of clinical manifestations, pathology, and treatment of infections in humans and experimental animals. *Clin Infect Dis*, **26**: 151-164.
- 24 CALIA, K.E., CALIA, F.M. (2000). Tick-borne relapsing fever: In CUNHA, B.A., ed. Tick-borne infectious diseases: diagnosis and management. New-York. *Marcel Dekker*: 169-183.
- 25 CAMICAS, J.L., HERVY, J.P., ADAM, F., MOREL, P.C. (1998). Les Tiques du monde. Nomenclature, stades décrits, hôtes, répartition. The Ticks of the World Nomenclature, Described stages, Hosts, Distribution (Acarida, Ixodida). *Paris ORSTOM*: 233.
- 26 CHABAUD, A.G. (1954). L'*Ornithodoros erraticus* (Lucas, 1849) : multiplicité de ses races. *Ann Parasitol Hum Comp*, **29**: 89-130.
- 27 CHARMOT, G., RODHAIN, F., DUPONT, B., SANSONETTI, P., LAPRESLE, C. (1986). Méningo-encéphalite chez un rapatrié du Sénégal. Pensez à une borréliose. *Presse Med*, **15**: 979.

- 28 CHATEL, G., GULLETTA, M., MATTEELLI, A., MARANGONI, A., SIGNORINI, L., OLADEJI, O., CALIGARIS, S. (1999). Short report: diagnosis of tick-borne relapsing fever by the quantitative buffy coat fluorescence method. *Am J Trop Med Hyg*, **60**: 738-739.
- 29 COE, M.J. (1975). Mammalian ecological studies on Mount Nimba, Liberia. *Mammalia*, **39**: 523-581.
- 30 COLAS-BELCOUR, J. (1930). Sur l'identité d'*Ornithodoros erraticus* Lucas et d'*O. maroccanus* Vélú. *Arch Inst Pasteur Tunis*, **19**: 1-12.
- 31 COLEBUNDERS, R., DE SERRANO, P., VAN GOMPEL, A., WYNANTS, H., BLOT, K., VAN DEN ENDEN, E.; VAN DEN ENDE, J. (1993). Imported relapsing fever in European tourists. *Scand J Infect Dis*, **25**: 533-536.
- 32 COTTER, C., STURROCK, H.J., HSIANG, M.S., LIU, J., PHILLIPS, A.A., HWANG, J., GUEYE, C.S., FULLMAN, N., GOSLING, R.D., FEACHEM, R.G. (2013). The changing epidemiology of malaria elimination: new strategies for new challenges. *Lancet*, **382**(9895): 900-911.
- 33 CUTLER, S.J., ABDISSA, A., TRAPE, J.F. (2009). New concepts for the old challenge of African relapsing fever borreliosis. *Clin Microbiol Infect*, **15**: 400-406.
- 34 DE BUEN, S. (1926). Note préliminaire sur l'épidémiologie de la fièvre récurrente espagnole. *Ann Parasit*, **4**: 185-192.
- 35 DEAN A.G., SULLIVAN, K.M., SOE, M.M. (2013). OpenEpi: Open Epidemiologic Statistics for public Health 2013; Version 2.3.1, [www.OpenEpi.com](http://www.OpenEpi.com), updated 2013/04/06, accessed 2016/06/25.
- 36 DIATTA, G. (1992). Étude épidémiologique de la borréliose dans deux régions du Sénégal. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) de Biologie Animale. *Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar*, pp. 82.
- 37 DIATTA, G. (2005). Étude de la répartition géographique de la borréliose à tiques à *B. crocidurae* en Afrique occidentale et centrale. Mémoire de Doctorat de 3<sup>ème</sup> Cycle de Biologie Animale. *Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar*, pp. 248.
- 38 DIATTA, G., DUPLANTIER, J.M., GRANJON, L., BA, K., CHAUVANCY, G., NDIAYE, M., TRAPE, J.F. (2015). *Borrelia* infection in small mammals in West Africa and its relationship with tick occurrence inside burrows. *Acta Tropica*, **152**(2015): 131-140.
- 39 DIATTA, G., MEDIANNIKOV, O., BOYER, S., SOKHNA, C., BASSENE, H., FENOLLAR, F., CHAUVANCY, G., NDIAYE, A.A., DIENE, F., PAROLA, P., RAOULT, D. (2016). An Alternative Preventive Control of Tick-borne Relapsing Fever in Rural areas of Sine-Saloum, Senegal. *Am J Trop Med Hyg.*, (soumis après révision).

- 40 DIATTA, G., SOUIDI, Y., GRANJON, L., ARNATHAU, C., DURAND, P., CHAUVANCY, G., MANE, Y., SARIH, M., BELGHYTI, D., RENAUD, F., TRAPE, J.F. (2012). Epidemiology of tick-borne borreliosis in Morocco. *Plos Neg Trop. Drosophila Inf Serv*, **6**: e1810.
- 41 DIATTA, G., TRAPE, J.F., LEGROS, F., ROGIER, C., DUPLANTIER, J.M. (1994). A comparative study of three methods of detection of *Borrelia crocidurae* in wild rodents in Senegal. *Trans. Roy. Soc. Trop. Med. Hyg.*, **88**: 423-424.
- 42 DIATTA, G., VIAL, L., DUPLANTIER, J.M., AWONO-AMBENE, P., MALLAYE, P., BA, K., CAMICAS, J.L. and TRAPE, J.F. (2004). Enquête sur la borréliose à tiques à *Borrelia crocidurae* au Tchad et au Cameroun. *Dakar, IRD*, pp. 54.
- 43 DIATTA, G., VIAL, L., DUPLANTIER, J.M., BA, H., OULD MOHAMED, S.A., BA, K., KANE, M., MANE, Y., CAMICAS, J.L., LO, B. and TRAPE, J.F. (2005a). Enquête sur la borréliose à tiques à *B. crocidurae* en Mauritanie. *Dakar, IRD*, pp. 32.
- 44 DIATTA, G., VIAL, L., MANE, Y., DUPLANTIER, J.M., GRANJON, L., NOMAO, A., ZOUNGRANA, B., ADJENYA, A., BA, K., S.A., A., ABOUMAHAMAD, I.A., NAHUM, A., RUFFINE, R., DABO, A., CAMICAS, J.L., AKOGBETO, M., TRAPE, J.F. (2005b). Enquête sur la borréliose à tiques à *B. crocidurae* au Mali, Niger, Burkina Faso et Bénin. *Dakar, IRD*, pp. 59.
- 45 DIATTA, G., VIAL, L., NIANG, O., BOUGANALI, C., TRAPE, J.F. (2005c). Enquête sur la borréliose à tiques à *B. crocidurae* au Sénégal. *Dakar, IRD*, pp. 33.
- 46 DOBSON, A., CARPER, R. (1993). Biodiversity. *Lancet*, **342**: 1096-1099.
- 47 DUPLANTIER, J.M. (1988). Biologie évolutive des populations du genre *Mastomys* (Rongeur, Muridé) au Sénégal. Thèse Dr d'Etat, *Univ. Montpellier II*, pp. 215.
- 48 DUPLANTIER, J.M., BA, K. (2001). Swimming ability in six West African rodents under laboratory conditions: evaluation of their potentialities to invade islands. In DENY, C., GRANJON, L., POULET, A (eds): *African Small Mammals*, Paris, Editions IRD: 331-342.
- 49 DUPLANTIER, J.M., BRITTON-DAVIDIAN, J., GRANJON, L. (1990a). Chromosomal characterization of three species of the genus *Mastomys* in Senegal. *Zool. Syst. Evolut -forsch.*, **28**: 289-298.
- 50 DUPLANTIER, J.M., GRANJON, L. (1990). Rythmes d'activité chez 6 espèces de Muridés du Sénégal appartenant aux genres *Mastomys*, *Arvicanthis*, *Praomys* (*Myomys*) et *Dasymys*. *Mammalia*, **54**: 173-182.
- 51 DUPLANTIER, J.M., GRANJON, L. (1992). Liste révisée des rongeurs du Sénégal. *Mammalia*, **56**: 425-431.
- 52 DUPLANTIER, J.M., GRANJON, L., BA, K. (1997). Répartition biogéographique des petits rongeurs au Sénégal. *J. Afr. Zool.*, **111**: 17-26.
- 53 DUPLANTIER, J.M., GRANJON, L., MATHIEU, E., BONHOMME, F. (1990b). Structures génétiques comparées de trois espèces de rongeurs africains du genre *Mastomys* au Sénégal. *Genetica*, **81**: 179-192.

- 54 DURIEUX, C. (1932). Cas de fièvre récurrente observés à Dakar et dans ses environs. Découverte de l'ornithodore agent de transmission de l'infection. *Bull. Soc. Path. Exot.*, **25**(1): 13-18.
- 55 ELBIR, H., FOTSOFOFOTSO, A., DIATTA, G., TRAPE, J.F., ARNATHAU, C., RENAUD, F., DURAND, P. (2015). Ubiquitous bacteria *Borrelia crociduræ* in Western African ticks *Ornithodoros sonrai*. *Parasites & Vectors*, **8**: 477
- 56 GABER, M.S., KHALIL, G.M., HOOGSTRAAL, H., ABOUL-NASR, A.E. (1984). *Borrelia crociduræ* localization and transmission in *Ornithodoros erraticus* and *O. savignyi*. *Parasitology*, **88**: 403-413.
- 57 GAUD, M. and MORGAN, M. (1947). Etude épidémiologique sur la fièvre récurrente en Afrique du Nord (1943-1945). *Bull. Wld Hlth Org*, **1**: 75-98.
- 58 GLASS, G.E., CHILDS, J.E., KORCH, G.W., LEDUC, J.W. (1989). Comparative ecology and social interactions of Norway rat (*Rattus norvegicus*) populations in Baltimore Maryland. *Occasional Papers of the Museum of Natural History of the University of Kansas*, **130**: 1-33.
- 59 GODELUCK, B., DUPLANTIER, J.M., BA, K., TRAPE, J.F. (1994). A longitudinal survey of *Borrelia crociduræ* prevalence in rodents and insectivores in Senegal. *Am J Trop Med Hyg*, **50**: 165-168.
- 60 GOLVAN, Y.J. (1983). Elément de parasitologie médicale. *Flamm. Méd.Sc.*, éd., **4**: 360-372.
- 61 GONNET, C. (1942). Complications méningées de la fièvre récurrente africaine. *Med Trop*, **2**: 895-902.
- 62 GOUBAU, P.F. (1984). Relapsing fevers: A review. *Ann Soc Belge Med Trop*, **64**: 335-364.
- 63 GOUBAU, P.F., MUNYANGEYO, C. (1983). Fièvre récurrente à tiques et grossesse. Une étude clinique au Rwanda. *Ann Soc Belg Med Trop*, **63**: 347-355.
- 64 GRANJON, L., DUPLANTIER, J.M. (2009). Les rongeurs de l'Afrique sahélo-soudanienne. *Mars IRD*, pp. 215.
- 65 GRASSE, P.P. (1955). Ordre des Insectivores : Affinités zoologiques des diverses familles entre elles avec les autres ordres de Mammifères. In Grassé, P.P. *Traité de zoologie*, T **17**, fasc. 2 Masson & Cie Ed: 1642-1653.
- 66 GUGLIELMONE, A.A., ROBBINS, R.G., APANASKEVICH, D.A., PETNEY, T.N., ESTRADA-PEN˜A, A., HORAK, I.G., SHAO, R., BARKER, S.C. (2010). The Argasidae, Ixodidae and Nuttalliellidae (Acari: Ixodida) of the world: a list of valid species names. *Zootaxa*, **2528**: 1-28.
- 67 HOOGSTRAAL, H. (1956). *Ornithodoros*. In: *Ticks of the Sudan*. Cairo, U.S.: Naval Medical Research Unit 3, Research Report NM 005050.29.07, 113-130.

- 68 HUBERT, B., ADAM, F., POULET, A. (1973). Liste préliminaire des rongeurs du Sénégal. *Mammalia*, **37**(1): 76-87.
- 69 KINGDON, J., HAPPOLD, D., BUTYNSKI, T., HOFFMANN, M., HAPPOLD, M., KALINA, J. (2013a). Mammals of Africa. *Edit 1<sup>st</sup>*, vol. **3**, pp. 784.
- 70 KINGDON, J., HAPPOLD, D., BUTYNSKI, T., HOFFMANN, M., HAPPOLD, M., KALINA, J. (2013b). Mammals of Africa. *Edit 1<sup>st</sup>*, vol. **4**, pp. 800.
- 71 LA RAJA, M., PIOTROWSKI, M., PITZUS, E. (1998). An uncommon finding in a peripheral blood smear. *Haematologica*, **83**: 663.
- 72 LARROUSSE, F. (1923). Présence au Kef (Tunisie) d'une nouvelle espèce du genre *Ornithodoros* : *O. normandi* n. sp. *Ann Parasit*, **1**: 170-177.
- 73 LE BERRE, M. (1990). Faune du Sahara, Mammifères, vol. **2**: In: *Collection Terres Africaines*. Rodentia ; 231-317.
- 74 LECOMPTE, Y., TRAPE, J.F. (2003). La fièvre récurrente à tiques d'Afrique de l'Ouest. *Ann Biol Clin*, **61**: 541-548.
- 75 LEESON, H.S. (1953). Some notes on the recorded distribution of old world species of *Ornithodoros* (Acarina). *Bull Entomol Res* **44**: 517-526. Doi:10.1017/S0007485300025591.
- 76 LEGER, A. (1917). Spirochète de la musaraigne (*Crocidura stampflii*, Jentik). *Bull. Soc. Path. Exot.*, **10**: 280-281.
- 77 LEGER, A. (1918). Spirochétose sanguine animale à Dakar. Sa valeur au point de vue épidémiologique. *Bull. Soc. Patho. Exot.*, **20**: 472-485.
- 78 LOEVINSOHN, M.E. (1994). Climatic warming and increased malaria incidence in Rwanda. *Lancet*, **343**: 714-718.
- 79 LUCAS, H. (1849). Exploration scientifique de l'Algérie. Zoologie I. Histoire naturelle des animaux articulés Première partie. Crustacés, arachnides, myriapodes et hexapodes. Paris, *Imprimerie Nationale*: 316-317. PubMed: 20794664.
- 80 MAHE, G., ROUCHE, N., DIEULIN, C., BOYER, J.F., IBRAHIM, B., CRES, A., SERVAT, E., VALTON, C., PATUREL, J.E. (1999). Shifting of the isohyetal lines: averages from 1940-1969 and 1970-1999. Annual rainfall map of Africa. *IRD, HydroSciences, Montpellier*.
- 81 MATHIS, C. (1928). Identité à Dakar, du spirochète des rats, du spirochète de la musaraigne et du spirochète récurrent humain. *Bull. Soc. Path. Exot.*, **20**: 472-485.
- 82 MATHIS, C. (1948). La spirochétose récurrente à tiques au Sénégal. L'œuvre des Pastoriens en Afrique Noire (Afrique Occidentale Française). *Paris Presse Universitaire de France*.

- 83 MATHIS, C., DURIEUX, C. (1932). Identité, à Dakar, de *Spirochaeta duttonii* var. *crocidurae* et du spirochète infectant dans la nature *Ornithodoros erraticus*. *Bull. Soc. Pathol. Exot.*, **25**(7): 843-853.
- 84 MATHIS, C., DURIEUX, C., ADVIER, M. (1934). Transmission naturelle et expérimentale à l'homme du spirochète infectant dans la nature, à Dakar, la tique : *Ornithodoros erraticus* var. *maroccanus*. *Ann. Inst. Past.*, **52**: 166-178.
- 85 MCCONNELL, J. (2003). Tick-borne relapsing fever under-reported. *Lancet Infect Dis*, **3**: 604.
- 86 MEDIANNIKOV, O., SOCOLOVSCHI, C., BASSÈNE, H., DIATTA, G., RATMANOV, P., FENOLLAR, F., SOKHNA, C., RAOULT, D. (2014). High incidence of *Borrelia crocidurae* in acute febrile patients in Senegal. *Emerg Infect Dis*, **20**: 1335-1338.
- 87 MOLEZ, J.F., FAYE, O. (1996). Transect Sud-Nord Fleuve/Oasis : vecteurs du paludisme et incidence palustre. *Document ORSTOM Dakar*, n°21/97-MZ/DK, pp. 27.
- 88 MOREL, P.C. (1965). Les tiques d'Afrique et du Bassin méditerranéen, Maisons-Alfort: IEMVT, 2003: 1342 pp.
- 89 NEEL, R., PAYET, M., GONNET, C. (1949). La fièvre récurrente à tiques de Madagascar. Historique. Etat actuel de la question. *Bull. Soc. Path. Exot.*, **42**: 384-394.
- 90 NEUMANN, G. (1896). Révision de la famille des Ixodidés. *Mem Soc Zool France*, **9**: 25-44.
- 91 NEWMAN, K.J., JOHNSON, R.C. (1981). In vivo evidence that an intact lytic complement pathway is not essential for successful removal of circulating *Borrelia turitae* from mouse blood. *Inf. Imm*, **31**: 465-469.
- 92 NICOLLE, C., ANDERSON, C. (1928). Présence au Maroc du spirochète de la fièvre récurrente d'Espagne. *Arch Inst Pasteur Tunis*: 83-107.
- 93 NICOLLE, C., ANDERSON, C., LAIGRET, J. (1932). Etude des trois premiers cas de fièvre récurrente hispano-africaine observés en Tunisie et plus spécialement de leurs virus. *Arch Inst Pasteur Tunis*, **21**: 43-72.
- 94 NICOLLE, C., ANDERSON, C., LE CHUITON, F. (1931). Sur l'existence en Tunisie de la fièvre récurrente espagnole. *C. R. Acad. Sci. Fr*, **100**(92): 194-196.
- 95 NORDSTRAND, A., BUNIKIS, I., LARSSON, C., TSOGBE, K., SCHWAN, T.G., NILSSON, M., BERGSTRÖM, S. (2007). Tickborne relapsing fever diagnosis obscured by malaria, Togo. *Emerg Infect Dis*, **13**: 117-123.
- 96 NOVY, F.G., KNAPP, R.E. (1906). Studies on *Spirillum obermeieri* and related organisms. *J. Infect. Dis.*, **3**: 291-393.

- 97 O'MEARA, W.P., BEJON, P., MWANGI, T.W., OKIRO, E.A., PESHU, N., SNOW, R.W., NEWTON, C.R., MARSH, K. (2008). Effect of a fall in malaria transmission on morbidity and mortality in Kilifi, Kenya. *Lancet* **372**(9649): 1555-1562.
- 98 PAROLA, P., DIATTA, G., SOCOLOVSCHI, C., MEDIANNIKOV, O., TALL, A., BASSÈNE, H., TRAPE, J.F., RAOULT, D. (2011). Tick-borne relapsing fever borreliosis, rural Senegal. *Emerg Infect Dis*, **17**: 883-885.
- 99 PAROLA, P., RAOULT, D. (2001). Fièvres récurrentes. In : *Encyclopédie Médico-Chirurgicale*. Paris, Elsevier: 8-039-p-10.
- 100 PAVLOVSKY, E.N., SHRYNNIK, A.N. (1952). An experimental analysis of the signifiante of the various phases of metamorphosis in *Ornithodoros pallipes* in the transmission of the spirochetes of tick-borne relapsing fever. *Parasitol. Sborn. Zool. Inst. Akad. NauK. SSR.*, **14**: 47-55.
- 101 REYNAUD, R., MASSSAT, R., PICCA, M., REVIL, M. (1965). A propos de douze cas de fièvres récurrentes à tiques. *Bull Soc Méd Afr Noire Lang Fr*, **10**: 1-4.
- 102 REYNES, V. (1955). Précis d'épidémiologie et prophylaxie des grandes endémies tropicales. *MASSON & Cie, édit.*, **3**: 7-254.
- 103 ROBBINS, C.B., VAN DER STREATEN, E. (1989). Comments on the systematics of *Mastomys* (Thomas, 1915) with the description of a new West African species. *Senckenbergiana Biologica*, **69**: 1-14.
- 104 RODHAIN, F. (1976). *Borrelia* et fièvres récurrentes : aspects épidémiologiques actuels. *Bull Inst Pasteur*, **74**: 173-218.
- 105 RODHAIN, F., PEREZ, C. (1985). Précis d'entomologie médicale et vétérinaire. Notion d'épidémiologie des maladies à vecteurs. *MALOINE S.A., M., édit.*, **1**: 305-383.
- 106 RODHAIN, F., POUPEL, O., JACQUES, J.C. (1991). Les *Borrelia* d'ornithodores de la région afro-tropicale : intérêt et limites des essais de protection croisée chez la souris. *Bull Soc Path Ex*, **84**: 30-45.
- 107 SARIH, M., GARNIER, M., BOUDEBOUCH, N., BOUATTOR, A., RIHANI, A., HASSAR, M., GERN, L., POSTIC, D. CORNET, M. (2009). *Borrelia hispanica* relapsing fever, Morocco. *Emerg Infect Dis*, **10**: 1626-1629.
- 108 SAUTET, J., WITKOWSKI, M. (1944). A propos d'un ornithodore trouvé à Gao. *Bull Soc Pathol Exot*, **37**: 182-188.
- 109 SCHWAN, T.G., ANDERSON, J.M., LOPEZ, J.E., FISCHER, R.J., RAFFEL, S.J., MCCOY, B.N., SAFRONETZ, D., SOGOBA, N., MAÏGA, O., TRAORE, S. (2012). Endemic Foci of the Tick-borne Relapsing Fever Spirochete *Borrelia crocidurae* in Mali, West Africa and the Potential for Human Infection. *PLoS Negl Trop Dis*, **6**: 1-13/e1924.
- 110 SERGENT, A., MONCEAUX, A., BALLISTE, R. (1933). Premier cas de fièvre récurrente hispano-africaine observé en Algérie. *Bull Soc Path Exot*, **26**: 906.



- 111 SHAMAEI-TOUSI, A., COLLIN, O., BERGH, A., BERGSTRÖM, S. (2001). Testicular damage by microcirculatory disruption and colonization of an immune-privileged site during *Borrelia crocidurae* infection. *J Exp Med*, **193**: 995-1004.
- 112 SOKHNA, C., MEDIANNIKOV, O., FENOLLAR, F., BASSENE, H., DIATTA, G., TALL, A., TRAPE, J.F., DRANCOURT, M., RAOULT, D. (2013). Point-of-Care Laboratory of Pathogen Diagnosis in Rural Senegal. *PLoS Negl Trop Dis*, **7**: e1999.
- 113 SOUIDI, Y., BOUDEBOUCH, N., EZIKOURI, S., BELGHYTI, D., TRAPE, J.F., SARIH, M. (2014). *Borrelia crocidurae* in *Ornithodoros* Ticks from Northwestern Morocco: A Range Extension in Relation to Climatic Change? *Journal of Vector Ecology*, **39**(2): 316-320.
- 114 STEPAN, D.E. and JOHNSON, R.C. (1981). Helical conformation of *Treponema pallidum*, *Treponema paraluis-caniculi*, *Treponema denticola*, *Borrelia turicatae* and unidentified oral spirochetes. *Inf. Imm.*, **32**: 937-940.
- 115 TOUIMI, B.J.E. (1985). Contribution à l'étude des borrélioses au Maroc de 1964-1984. *Faculté de Médecine et de Pharmacie de Casablanca*.
- 116 TRANIER, M. (1974). Polymorphisme chromosomique multiple chez des *Taterillus* du Niger (Rongeurs, Gerbillidés). *Compte rendu de l'Académie des sciences. Paris*, **278**: 3347-3350.
- 117 TRANIER, M., HUBERT, B., PETTER, F. (1973). *Taterillus* de l'ouest du Tchad et du nord du Cameroun (Rongeurs, Gerbillidés). *Mammalia*, **37**: 637-641.
- 118 TRAPE, J.F. (1999). Changements climatiques et maladies infectieuses : le cas du paludisme et de la borréliose à tiques. *Med Mal Infect*, **29**: 296-300.
- 119 TRAPE, J.F., DIATTA, G., ARNATHAU, C., BITAM, I., SARIH, M., BELGHYTI, D., BOUATTOR, A., ELGUERO, E., VIAL, L., MANE, Y., BALDE, C., PRUGNOLLE, F., CHAUVANCY, G., MAHE, G., GRANJON, L., DUPLANTIER, J.M., DURAND, P., RENAUD, F. (2013). The Epidemiology and Geographic Distribution of Relapsing Fever Borreliosis in West and North Africa, with a Regview of the *Ornithodoros erraticus* Complex (Acari: Ixodida). *PloS ONE*, **8**: 1-19/e78473.
- 120 TRAPE, J.F., DUPLANTIER, J.M., BOUGANALI, H., GODELUCK, B., LEGROS, F., CORNET, J.P., CAMICAS, J.L. (1991). Tick-borne borreliosis in West Africa. *Lancet*, **337**: 473-475.
- 121 TRAPE, J.F., GODELUCK, B., DIATTA, G., ROGIER, C., LEGROS, F., ALBERGEL, J., PÉPIN, Y., DUPLANTIER, J.M. (1996a). The spread of tick-borne borreliosis in West Africa and its relation to Subsaharan drought. *Am J Trop Med Hyg*, **54**: 289-296.
- 122 TRAPE, J.F., GODELUCK, B., DIATTA, G., ROGIER, C., LEGROS, F., ALBERGEL, J., PÉPIN, Y., DUPLANTIER, J.M. (1996b). Tick-borne borreliosis in West Africa: recent epidemiological studies. *Ann Acad Med Bialostociensis*, **41**: 136-141.

- 123 VAN DAM, A.P., VAN GOOL, T., WETSTEYN, J.C., DANKERT, J. (1999). Tick-borne relapsing fever from West Africa: diagnosis by quantitative buffy coat analysis and in vitro culture of *Borrelia crocidurae*. *J Clin Microbiol*, **37**: 2027-2030.
- 124 VAN DER STREATEN, E., VERHEYEN, W.N. (1978b). Taxonomical notes on the West African *Myomys* with the description of *Myomys derooi* (Mammalia-Muridae). *Z. Saugetierk.*, **43**: 31-41.
- 125 VELU, H. (1919). Existence au Maroc d'une nouvelle espèce d'ornithodore. *Bull Soc Pathol Exot*, **12**: 99-104.
- 126 VIAL, L., DIATTA, G., TALL, A., BA, E.H., BOUGANALI, H., DURAND, P., SOKHNA, C., ROGIER, C., RENAUD, F., TRAPE, J.F. (2006). Incidence of tick-borne relapsing fever in West Africa: longitudinal study. *Lancet*, **368**: 37-43.
- 127 WALTON, G.A. (1962). The *Ornithodoros moubata* superspecies problem in relation to human relapsing fever epidemiology. Aspects of disease transmission by ticks. *Symp Zool Soc Lond*: 83-153.
- 128 WHITE, N.J., PUKRITTAYAKAMEE, S., HIEN, T.T., FAIZ, M.A., MOKUOLU, O.A., DONDORP, A.M. (2014). Malaria. *Lancet* **383**(9918): 723-735.
- 129 WHO TASK GROUP (1990). *Potential Health Effects of Climatic Changes*. Geneva: World Health Organization.
- 130 WYPLOSZ, B., MIHAILA-AMROUCHE, L., BAIXENCH, M.T., BIGEL, M.L., BERARDI-GRASSIAS, L., FONTAINE, C., HORNSTEIN, M., IZRI, A., BARANTON, G. and POSTIC, D. (2005). Imported tick-borne relapsing fever, France. *Emerg Infect Dis*, **11**: 1801-1803.

# ANNEXE

## Article 1

Jean-François Trape, **Georges Diatta**, Céline Arnathau, Idir Bitam, M'hammed Sarih, Driss Belghyti, Ali Bouattour, Eric Elguero, Laurence Vial, Youssouph Mané, Cellou Baldé, Franck Pugnolle, Gilles Chauvancy, Gil Mahé, Laurent Granjon, Jean-Marc Duplantier, Patrick Durand, François Renaud. **The Epidemiology and Geographic Distribution of Relapsing Fever Borreliosis in West and North Africa, with a Review of the *Ornithodoros erraticus* Complex (Acari: Ixodida).** PLoS ONE

# The Epidemiology and Geographic Distribution of Relapsing Fever Borreliosis in West and North Africa, with a Review of the *Ornithodoros erraticus* Complex (Acari: Ixodida)

Jean-François Trape<sup>1\*</sup>, Georges Diatta<sup>1</sup>, Céline Arnathau<sup>2</sup>, Idir Bitam<sup>3</sup>, M'hammed Sarih<sup>4</sup>, Driss Belghyti<sup>5</sup>, Ali Bouattour<sup>6</sup>, Eric Elguero<sup>2</sup>, Laurence Vial<sup>1,2</sup>, Youssouph Mané<sup>1</sup>, Cellou Baldé<sup>7</sup>, Franck Pugnonne<sup>2</sup>, Gilles Chauvancy<sup>1</sup>, Gil Mahé<sup>8</sup>, Laurent Granjon<sup>9</sup>, Jean-Marc Duplantier<sup>9</sup>, Patrick Durand<sup>2</sup>, François Renaud<sup>2</sup>

**1** Institut de recherche pour le développement, Laboratoire de Paludologie Et Zoologie Médicale, Dakar, Senegal, **2** Institut de Recherche pour le Développement, UMR (CNRS IRD) MIVEGEC, Montpellier, France, **3** Institut Pasteur d'Algérie, Laboratoire d'Écologie des Systèmes Vectoriels, Algiers, Algeria, **4** Institut Pasteur du Maroc, Laboratoire des Maladies Vectorielles, Casablanca, Morocco, **5** Université Ibn Tofail, Département de Biologie, Faculté des Sciences, Kénitra, Morocco, **6** Institut Pasteur de Tunis, Service d'Entomologie Médicale, Tunis, Tunisia, **7** Institut Pasteur de Guinée, Laboratoire d'Entomologie Médicale et de Vénimologie, Kindia, Guinea, **8** Institut de Recherche pour le Développement, UMR Hydrosociétés, Montpellier, France, **9** Institut de Recherche pour le Développement, Centre de Biologie et de Gestion des Populations, Dakar, Senegal

## Abstract

**Background:** Relapsing fever is the most frequent bacterial disease in Africa. Four main vector / pathogen complexes are classically recognized, with the louse *Pediculus humanus* acting as vector for *B. recurrentis* and the soft ticks *Ornithodoros sonrai*, *O. erraticus* and *O. moubata* acting as vectors for *Borrelia crocidurae*, *B. hispanica* and *B. duttonii*, respectively. Our aim was to investigate the epidemiology of the disease in West, North and Central Africa.

**Methods And Findings:** From 2002 to 2012, we conducted field surveys in 17 African countries and in Spain. We investigated the occurrence of *Ornithodoros* ticks in rodent burrows in 282 study sites. We collected 1,629 small mammals that may act as reservoir for *Borrelia* infections. Using molecular methods we studied genetic diversity among *Ornithodoros* ticks and *Borrelia* infections in ticks and small mammals. Of 9,870 burrows investigated, 1,196 (12.1%) were inhabited by *Ornithodoros* ticks. In West Africa, the southern and eastern limits of the vectors and *Borrelia* infections in ticks and small mammals were 13°N and 01°E, respectively. Molecular studies revealed the occurrence of nine different *Ornithodoros* species, including five species new for science, with six of them harboring *Borrelia* infections. Only *B. crocidurae* was found in West Africa and three *Borrelia* species were identified in North Africa: *B. crocidurae*, *B. hispanica*, and *B. merionesi*.

**Conclusions:** *Borrelia* Spirochetes responsible for relapsing fever in humans are highly prevalent both in *Ornithodoros* ticks and small mammals in North and West Africa but *Ornithodoros* ticks seem absent south of 13°N and small mammals are not infected in these regions. The number of *Ornithodoros* species acting as vector of relapsing fever is much higher than previously known.

**Citation:** Trape J-F, Diatta G, Arnathau C, Bitam I, Sarih M, et al. (2013) The Epidemiology and Geographic Distribution of Relapsing Fever Borreliosis in West and North Africa, with a Review of the *Ornithodoros erraticus* Complex (Acari: Ixodida). PLoS ONE 8(11): e78473. doi:10.1371/journal.pone.0078473

**Editor:** Sven Bergström, Umeå University, Sweden

**Received:** March 29, 2013; **Accepted:** September 6, 2013; **Published:** November 4, 2013

**Copyright:** © 2013 Trape et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

**Funding:** The study received grants from the GICC programme of the French Ministry of Ecology (ref: CV02000201), the programmes "Santé-Environnement" and "Santé-Travail" of the Agence Nationale de la Recherche (ref: 3215AO-3R077-STEV), and the IRD special programme "Evolution Climatique et Santé" (ref: IRD-ATI-ECS). The funders had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

**Competing interests:** The authors have declared that no competing interest exist.

\* E-mail: jean-francois.trape@ird.fr

These authors contributed equally to this work.

## Introduction

Relapsing fever has long been recognized as major cause of disease and death in several regions of Africa [1–5]. Initially discovered in India in 1907 [6], the responsibility of *Pediculus humanus* in the transmission of *Borrelia recurrentis*, the Obermeier's spirochete, was confirmed the following year in Algeria [7]. Dramatic epidemics of louse-borne relapsing fever (LBRF) responsible for several millions of cases and a high fatality rate occurred throughout Africa after World Wars I and II when French and British colonial soldiers infected in Europe or North Africa returned to their countries [8–12]. More recently, several epidemics occurred in Sudan and LBRF still persists in the mountains of Ethiopia where it is endemic and can account for up to 27% of hospital admissions [5,13–16]. Tick-borne relapsing fever (TBRF) was first recognized in East Africa in 1904 [17,18], in North Africa in 1928 [19], and in West Africa in 1932 [20]. Studies conducted between 1905 and 1960 progressively established the classical picture of TBRF in Africa, with three different vector/pathogen complexes involving soft ticks (*Argasidae*) of the genus *Ornithodoros*. In the savanna areas of eastern and southern Africa, from 16°N (Erythrea) to 34°S (Cape province, South Africa), TBRF is caused by *Borrelia duttonii* with *O. moubata* s.l. as vector [21]. In the wild, the two vector species of the *O. moubata* complex (*O. moubata* s.s. and *O. porcinus*) lives in large animal burrows of antbears, warthogs and porcupines [22]. They have adapted secondarily to human dwellings and domestic animal shelters, where they live in the cracks of walls and floors. There is no known mammal reservoir of the disease and *O. moubata* s.l. act both as the vector and the only reservoir of *B. duttonii* [23]. The annual incidence of the disease may reach up to 384 per thousand among children <1 year of age and 163 per thousand in children <5 years of age in Tanzania [24], and a lethality rate of 16% among pregnant women suffering from the disease has been reported from Rwanda [25]. In North Africa, from Morocco to Algeria and Tunisia, TBRF is classically caused by *Borrelia hispanica* with *O. erraticus* as vector and small mammals as reservoir host [2,26–31]. *O. erraticus* is found both in large and small burrows, under stones, and has adapted to domestic animal shelters. Most human infections occur during summer among people sleeping in the fields or in farm buildings [32]. In West Africa, TBRF is caused by *Borrelia crocidurae*, with *O. sonrai* as vector and rodents and insectivores as reservoir host [33–37]. Most reports of the disease are from Senegal, but the few available data on the occurrence of the vector also include Mali, Mauritania, southern Morocco, Niger, Chad, Egypt and Kenya [23]. *O. sonrai* inhabits rodent burrows and like the other *Ornithodoros* species, it is a rapid feeder, blood meals lasting only a few minutes. People are generally infected during their sleep, when burrows open into their bedrooms [36].

The high incidence of TBRF in places where it was specifically investigated contrasts with the rarity of reports from other areas, suggesting that most cases remain undiagnosed because usually confused with malaria whose diagnosis is usually based only on clinical symptoms [38]. In Senegal, as a result of the ongoing drought since the 1970s, the tick has colonized the Sudan savanna, with the 750 mm isohyet as

southern limit [36]. Rodent burrows colonized by *O. sonrai* occur in 87% of villages north of 13°30'N. In these areas, we have shown that the average incidence of TBRF at the community level is the highest described for any bacterial disease, reaching 11 per 100 person-years [39]. In out-patients clinics, TBRF is the second most common cause of fever after malaria [38]. These observations in Senegal have prompted us to investigate the distribution and epidemiology of TBRF in West, North, and Central Africa. Here we present the result of studies conducted between 2002 and 2012 in 17 African countries.

## Methods

### Ticks sampling

To investigate the geographic distribution of *Ornithodoros* ticks, we conducted four series of studies

i) One transect study along the 14th parallel in Senegal, Mali, Burkina Faso, Niger and Chad, from 16°W (near the Atlantic coast of Senegal) to 22°E (near the border of Sudan in Chad). Sampling was conducted at each two degrees of longitude (i.e. at 16°W/14°N, 14°W/14°N, 12°W/14°N, and up to 22°E/14°N), either at the exact meridian/parallel junction point as determined with a Global Positioning System (GPS) receiver, or depending on the accessibility of this point and local environment, within a 10' radius around it (i.e. maximum distance: 20 km). The 14th parallel was selected since it was entirely located within the limits of the supposed range of *O. sonrai* (presumed southern limit: 750 mm isohyet, period 1970–2002) [36].

ii) Three North/South transect studies along three meridians: 12°W (in Morocco, Mauritania, Senegal, and Guinea), 2°E (in Mali, Niger, Burkina Faso and Benin), and 14°E (in Chad and Cameroon). Sampling was undertaken at each degree of latitude, from 10°N to 28°N, 6°N to 19°N, and 8°N to 14°N, respectively. In Morocco, the transect was further continued SW/NE up to the Mediterranean coast.

iii) Based on the results of the transect studies, additional surveys were conducted in Senegal, The Gambia, Mauritania, Mali and Niger in order to determine either on a 10 km square scale (Western Senegal) or on a half or quarter square degree scale the southern and eastern limits of the geographic distribution of *Ornithodoros* species.

iv) We also undertook additional surveys in selected areas of Morocco, Algeria, Tunisia, Niger, Guinea, Guinea Bissau, Liberia, Ivory Coast, Burkina Faso and Togo. All surveys were conducted in predefined sites based on their geographic position. One site south of Spain, where the first studies on TBRF in Europe were conducted in the 1920s by Sadi de Buen [32], was also sampled for comparison of local tick population with African *Ornithodoros* species.

For each sampling site, as a general rule 30 to 60 burrows were investigated (60 burrows during transect studies when all burrows were negative for the presence of *Ornithodoros* ticks, 30 burrows when one or more burrows were positive; only 30 burrows even when all were negative during additional surveys), except in sites rapidly positive during additional

surveys in North Africa where only 5 to 15 burrows were investigated. Ticks were collected by introducing a flexible tube inside burrows and aspirating their contents using a portable petrol-powered aspirator. After collection, they were immediately stored in absolute ethanol (one tube per positive burrow) until morphological determination and DNA extraction. As a general rule, two or three sampling stations were selected in each site, including one village (except in most Saharan and North African sites) where several houses were surveyed for the occurrence of ticks both inside burrows and in cracks in the floor or walls. Outside villages, sampling stations were selected according to local environment either in natural or human-impacted ecosystems and croplands or both of them.

### Small mammals sampling

To investigate the reservoir of *Borrelia*, we captured rodents and insectivores in Senegal, Mali, Benin, Niger, Chad, Cameroon, Mauritania and Morocco. These collections were made along 12°W, 2°E and 14°E meridians and in further sites in Senegal, Mali and Morocco. Animals were trapped alive with lattice-work traps baited with peanut butter or onions. We adopted the method of trap lines for captures, with a 10-meter space between traps. In order to collect both diurnal and nocturnal species traps were placed in the afternoon and withdrawn late in the morning. Approximately 200 traps/days of captures were made in each site. In addition, hand captures of rodents were performed by night in most sites and during travel between sites. We necropsied trapped animals in the field by means of cervical dislocation and drew 1 mL of blood from each by cardiac puncture. We immediately prepared a thick blood film for detection of *Borrelia*. Samples of brain were stored in nitrogen then at -80°C for further intraperitoneal inoculation to white mouse as previously described [40] and/or *Borrelia* molecular studies as described below.

The nomenclature here adopted follows Wilson & Reeder [41] unless otherwise mentioned [42]. Classical body measurements were taken and some individual rodents were kept alive for further chromosomal analyses, as described in Granjon & Dobigny [43]. Most of the rodents of the Sahelo-Sudanian region could be diagnosed to the species level based on our morphological, ecological and biogeographical knowledge on rodents from this geographic area [42]. However, molecular or chromosomal data were necessary to confirm unambiguously the specific determination of some specimens of the genera *Arvicanthis*, *Gerbillus*, *Gerbilliscus*, *Mastomys*, and *Taterillus* especially. This was done according to methods previously described [43–47]. Shrews were determined on the basis of external and skull criteria [Granjon et al, unpublished]. A selection of voucher specimens was kept in formalin or ethanol and is housed at IRD (UMR 22, Dakar and Montpellier). Organ samples as well as DNA and bone marrow cells extracts that have been used for molecular/cytogenetic studies are also kept in the IRD tissue collection.

### DNA isolation and PCR amplification in ticks

Ticks were individually washed in three sterile water baths, air dried and collected in sterile microtubes. DNA was individually crushed by shaking with a bead beater (mixer mill

MM301, Qiagen, Hilden, Germany), and then DNA was isolated and purified using the DNeasy Blood and Tissue extraction Kit (Qiagen).

For each tick, 16S rRNA was amplified by PCR with Tm16S +1 (5'-CTGCTCAATGATTTTAAATTGC-3') and Tm16S-1 (5'-CCGGTCTGAACTCAGATCATGTA-3') primers designed by Fukunaga et al. [48]. The sequenced product size was around 450 bp long and PCRs were performed with the Multiplex PCR Kit (Qiagen) in a 25 µl volume containing 12.5 µl of 2x Multiplex PCR Master Mix (Qiagen), 2 µM of each Primer, 2.5 µl of Q-solution and 4 µl (40–100 ng/µL) of DNA template. The amplification cycle involved a denaturation step at 95°C for 15 min followed by 10 cycles of 1 min at 92°C, 1.5 min at 48°C, and 1.5 min at 72°C and 32 cycles of 1 min at 92°C, 1.5 min at 54°C, and 1.5 min at 72°C. A final extension step was carried out for 10 min at 72°C. The amplified products were detected by electrophoresis on 1.5% agarose gel in TAE 0.5X buffer and staining with Envision (Amresco). Remaining reaction mixtures were stored at -20°C for direct sequencing.

### Detection of *Borrelia* infections in ticks and small mammals

DNA isolation was conducted as above. *Borrelia* detection was based on nested PCR amplification of a 350 bp fragment of the flagella gene (FLA). This gene encodes the periplasmic protein peculiar to *Borrelia*. The amplification was performed using primers (Bfpad and Bfpdu for the first PCR, Bfpbu and Bfpdr for the second PCR) designed for *B. duttonii* [48]. Each PCR was performed in a 25 µl volume containing 5 µl 5X buffer (Promega), 2 mM MgCl<sub>2</sub>, 200 µM of each dNTP, 0.2 µM of each primer and 2.5 unit of GoTaq DNA polymerase (Promega). 3 µl of DNA template was added in the first reaction and 1 µl of the first amplified product was added in the second reaction. Amplification cycles consisted of an initial DNA denaturation step at 94°C for 3 min followed by 30 cycles of 40 sec at 94°C, 40 sec at 55°C for the first PCR and 51°C for the second PCR, and 40 sec at 72°C. A final extension step was carried out for 10 min at 72°C.

For the 16S-23S ribosomal RNA intergenic spacer (IGS), *rrs rrlA* intergenic spacer IGS/F and IGS/R for the first PCR and *rrs rrlA* IGS/Fn and IGS/Rn for the second PCR were amplified as previously described [49]. Each PCR was performed in a 25 µl volume containing 5 µl 5X buffer (Promega), 2 mM MgCl<sub>2</sub>, 200 µM of each dNTP, 5 picomoles of each primer and 2.5 unit of GoTaq DNA polymerase (Promega). 2 µl of DNA template was added in the first reaction and 1 µl of the first amplified product was added in the second reaction. Amplification cycles consisted of an initial DNA denaturation step at 94°C for 3 min followed by 35 cycles of 30 sec at 94°C, 30 sec at 56°C, 30 sec at 72°C and a final extension 5 min at 72°C for the first PCR. For the second PCR, amplification cycles consisted of an initial DNA denaturation step at 94°C for 3 min followed by 40 cycles of 30 sec at 94°C, 30 sec at 60°C, 30 sec at 72°C and a final extension 5 min at 72°C for the first PCR. A final extension step was carried out for 5 min at 72°C. The amplified products were detected by electrophoresis as above. Negative control was included in each nested PCR analysis to monitor contamination and false-positive amplification. To rule out amplicon carry-

over, nucleotide-free water negative control was used throughout the steps of the protocol. The sequence-derived data reported herein were authenticated as negative controls introduced in every PCR experiment remained negative, excluding the possibility of cross-contamination during the experiments. The amplified products for 16S rDNA, IGS and FLA were directly sequenced by Eurofins (Ebersberg, Germany).

### Sequence alignment and phylogenetic inferences

All sequences obtained were aligned using ClustalW (v.1.8.1 in BioEdit v.7.0.5.3.) [50]. Maximum Likelihood (PhyML) tree reconstruction was conducted from the 16S rRNA aligned sequences (457 nucleotides) of ticks. For each *Borrelia* of soft tick, the FlaB gene (FLA, 269 nucleotides) and Intergenic Spacer (IGS, 510 nucleotides) sequences were concatenated for the phylogenetic analyses (PhyML). For each dataset, we used Modeltest 3.4 [51] to select the appropriate model of molecular evolution. The best-fitting ML model was HKY85 [52] for 16S rRNA sequences and GTR (General Time Reversible + Gamma distribution) for IGS-FLA concatenated sequences. The highest-likelihood DNA and corresponding bootstrap support values were obtained by PhyML (freely available at <http://mobyli.pasteur.fr/cgi-bin/portal>) using NNI (Nearest Neighbor Interchange) branch swapping and 100 bootstrap replicates [53].

Molecular distances with standard error estimate were conducted using the Kimura 2-parameter model among *Ornithodoros* 16S sequences and among *Borrelia* concatenated IGS-FLA sequences as used in other phylogenetical pathogens/vectors studies [54,55]. In the final dataset, the analysis involved 165 different sequences grouping 821 16S RNA tick sequences and 105 different sequences grouping 216 IGS-FLA *Borrelia* sequences. Evolutionary analyses were conducted in MEGA 5 [56] and all positions containing gaps and missing data were eliminated.

Phylogenetic analyses of *Ornithodoros moubata* 16S rRNA (GenBank accession number AB073679), *O. porcinus* (GenBank acc. no. AB105451), *O. turicata* (GenBank acc. no. L34327), and *O. parkeri* (GenBank acc. no. EU009925) were treated as outgroups. *Borrelia crocidurae* (GenBank acc. no. GU350723 and NC017808), *B. duttonii* (GenBank acc. no. DQ000279 and DQ346833), *B. hispanica* (GenBank acc. no. GU350718 and GU357614), *B. merionesi* (GenBank acc. no. JX257047 and JX257050) and *B. recurrentis* (GenBank acc. no. DQ000277 and DQ346814) for the IGS and FLA sequences were concatenated for the phylogenetic analyses of spirochetes.

In the goal of molecular diagnostic of *Ornithodoros* species of North and West African countries, we determined Single Nucleotide Polymorphism (SNP) based on 16S rRNA sequences using parsimony-informative site.

### Analysis of environmental factors

We investigated relationship between environmental factors (latitude, longitude, mean annual temperature, mean annual rainfall [57], elevation and distance to the seashore) and tick

species distribution using a linear discriminant analysis. All calculations were performed with R software [58].

### Nomenclatural acts

The electronic edition of this article conforms to the requirements of the amended International Code of Zoological Nomenclature, and hence the new names contained herein are available under that Code from the electronic edition of this article. The published work and the nomenclatural acts it contains have been registered in ZooBank, the online registration system for the ICZN. The ZooBank LSIDs (Life Science Identifiers) can be resolved and the associated information viewed through any standard web browser by appending the LSID to the prefix <http://zoobank.org/>. The LSID for this publication is: urn:lsid:zoobank.org:pub:583BB2C2-B859-4EB5-85D7-70945C923642. The electronic edition of this work was published in a journal with an ISSN, and has been archived and is available from the following digital repositories: PubMed Central, LOCKSS.

The holotypes and paratypes of the new species are deposited at the Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique, Brussels, Belgium (IRSNB). Sequences obtained from a segment of leg of one or several specimens of the type series are deposited in GenBank.

### Ethics Statement

The study protocol was approved by the Steering Committee of the IRD Special Programme Evolution Climatique et Santé (IRD, Montpellier, France), reference project ATI-ECS-07-H/2002. Animals were treated in a humane manner, and in accordance with authorizations and guidelines of the American Society of Mammalogists (Animal Care and Use Committee 1998). Captures of rodents and insectivores (Senegal, Mali, Benin, Niger, Cameroon, Chad, Mauritania, Morocco) and ticks (Senegal, Mali, Burkina Faso, Niger, Cameroon, Chad, Guinea Bissau, Guinea, Gambia, Liberia, Côte d'Ivoire, Togo, Benin, Mauritania, Morocco, Algeria, Tunisia, Spain) excluded national parks and protected areas, did not involve endangered or protected species (CITES, IUCN, and national guidelines), and were conducted as part of research agreements between IRD, national institutions, national ministries of health and/or scientific research. All tick, rodent and insectivores captures inside houses and private lands were conducted after the owner of the house and land gave permission to conduct the study on this site.

### Results

#### Geographic distribution of *Ornithodoros* ticks

We investigated the occurrence of *Ornithodoros* ticks in 9,870 burrows from 484 sampling stations in 282 study sites in 12 West African countries (Mauritania, Senegal, The Gambia, Guinea Bissau, Guinea, Mali, Burkina Faso, Niger, Ivory Coast, Benin, Togo, Liberia), three North African countries (Morocco, Algeria, Tunisia), two Central African countries (Cameroon, Chad), and one European country (Spain) (Table S1).



**Table 1.** Number of sites and burrows investigated and number and proportion positive for the presence of *Ornithodoros* ticks.

| Country       | No. of burrows |              | No. of sites |              |
|---------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
|               | Investigated   | Positive (%) | Investigated | Positive (%) |
| Algeria       | 435            | 74 (17.0)    | 24           | 19 (79.2)    |
| Morocco       | 605            | 239 (39.5)   | 34           | 33 (97.1)    |
| Tunisia       | 82             | 23 (28.1)    | 9            | 9 (100)      |
| Mauritania    | 905            | 96 (10.6)    | 30           | 12 (40.0)    |
| Senegal       | 2,861          | 474 (16.6)   | 61           | 37 (60.7)    |
| The Gambia    | 30             | 15 (50.0)    | 2            | 2 (100.0)    |
| Mali          | 2,458          | 273 (11.1)   | 69           | 23 (33.3)    |
| Burkina Faso  | 210            | 0 (0.0)      | 4            | 0 (0.0)      |
| Niger         | 631            | 0 (0.0)      | 13           | 0 (0.0)      |
| Benin         | 300            | 0 (0.0)      | 5            | 0 (0.0)      |
| Togo          | 150            | 0 (0.0)      | 5            | 0 (0.0)      |
| Ivory Coast   | 90             | 0 (0.0)      | 3            | 0 (0.0)      |
| Guinea        | 270            | 0 (0.0)      | 7            | 0 (0.0)      |
| Guinea Bissau | 30             | 0 (0.0)      | 1            | 0 (0.0)      |
| Liberia       | 60             | 0 (0.0)      | 2            | 0 (0.0)      |
| Chad          | 458            | 0 (0.0)      | 8            | 0 (0.0)      |
| Cameroon      | 278            | 0 (0.0)      | 4            | 0 (0.0)      |
| Spain         | 17             | 2 (11.7)     | 1            | 1 (100.0)    |
| Total         | 9,87           | 1,196 (12.1) | 282          | 136 (48.2)   |

doi: 10.1371/journal.pone.0078473.t001

*Ornithodoros* ticks morphologically attributable to *O. sonrai*, *O. erraticus* or *O. normandi* were collected in 136 sites distributed in Morocco, Algeria, Tunisia, Mauritania, Senegal, The Gambia, Mali and Spain (Table 1). In West and Central Africa, all burrows located east of 01°E and south of 13°N were negative (Figure 1). The southernmost limits were 13°32'N, 13°35'N and 13°54'N in Senegal, The Gambia and Mali, respectively, and the easternmost limit south of Sahara was 00°34'E in Mali. In all countries where we found *Ornithodoros* ticks, their distribution was generally contiguous, with rarely a negative site between two positive sites, and thus it has been possible to establish in the field precise distribution limits (i.e. at a few km scale in western Senegal and at one quarter degree scale in other areas of Senegal and in western Mali). In central and eastern Mali, we found *Ornithodoros* ticks only in burrows located close to the flood plain of the Niger River. In other areas, the occurrence of *Ornithodoros* ticks in burrows was independent of any hydrographic system either active or fossil. Based on classical morphological criteria, all *Ornithodoros* ticks collected in burrows were attributable either to *O. sonrai* (Senegal, The Gambia, Mali, Mauritania, and the most arid areas of Morocco, Algeria and Tunisia), *O. erraticus* (northern Morocco, northwestern Algeria and a few ticks from northern Tunisia) or *O. normandi* (northeastern Algeria and northern Tunisia). We never observed *O. moubata*.

### **Borrelia infections in small mammals**

A total of 1,629 small mammals belonging to 8 families (rodents: Ctenodactylidae, Dipodidae, Muridae, Nesomyidae,

Sciuridae; insectivores: Erinaceidae, Soricidae; carnivores: Mustelidae) were collected in Senegal, Mauritania, Mali, Niger, Benin, Chad, Cameroon and Morocco (Table S2). As shown in Table 2, these specimens belonged to 50 identified species and a few additional undetermined species. A thick blood film was prepared in 1,270 specimens (Senegal: 80; Mauritania: 224; Morocco: 134; Mali: 413; Niger: 95; Benin: 101; Chad: 52; Cameroon: 171) and brain samples of 1,089 specimens (Senegal: 92; Mauritania: 176; Mali: 322; Niger: 115; Benin: 152; Chad: 52; Cameroon: 180) were inoculated to white mice. As previously reported, brain samples of the 140 specimens collected in Morocco were also studied by PCR [40]. A *Borrelia* infection was demonstrated in 57 animals from Senegal, Mali, Mauritania or Morocco (4.1 % of the 1,386 specimens tested by at least one method) belonging to 13 rodent species and two insectivore species (Table 2). All infected rodents and insectivores were collected in sites or areas where we documented the presence of *Ornithodoros* ticks. In these areas, we tested 868 animals and the proportion of those found infected by thick blood film examination, brain inoculation and PCR was 3.3% (28/850), 4.2% (21/499), and 8.6% (12/140), respectively. Except for Senegal, where 22.8% (21/92) of brain inoculations to white mice were positive (all were performed within a few days after sampling), all other brain inoculations to white mice were negative, including those from specimens from Mali and Mauritania with positive thick blood films, this certainly in relation to badly preserved spirochetes in brain tissue after sampling.

### **Molecular analysis of *Ornithodoros* ticks and *Borrelia* infections**

A total of 1,801 *Ornithodoros* ticks from 113 study sites distributed in 7 African countries (Mali, Senegal, The Gambia, Mauritania, Morocco, Algeria and Tunisia) and in Spain were tested for molecular species determination and associated *Borrelia* infection. We observed the presence of *Borrelia* infections in 295 ticks (16.4%) distributed in all countries and 37.2% of sites (42/113). We obtained 820 sequences of 16S rRNA of *Ornithodoros* ticks, 216 concatenated partial sequences of FlaB gene, and partial sequences of Intergenic spacer for the *Borrelia* detected (Table 3).

### **Phylogenetic analysis of *Ornithodoros* ticks**

The phylogenetic analysis based on 820 16S rRNA sequences divided on 165 unique sequences which clustered in nine entities of *Ornithodoros* ticks (Figure 2). The genetic distance estimates (Kimura 2-parameters model) between entities varied from 0.062±0.013 (*O. costalis* - *O. maroccanus* distance) to 0.251±0.030 (*O. merionesi* - *O. normandi* distance) (Table 4). The nine entities were genetically differentiated and hybrids between populations of these areas were known to be infertile [29], indicating that they should be considered as nine different species, including five previously undescribed species (see below and Appendix for designation of types, description of species and criteria for diagnosis):

- *O. occidentalis* Trape, Diatta, Durand & Renaud, sp. nov.

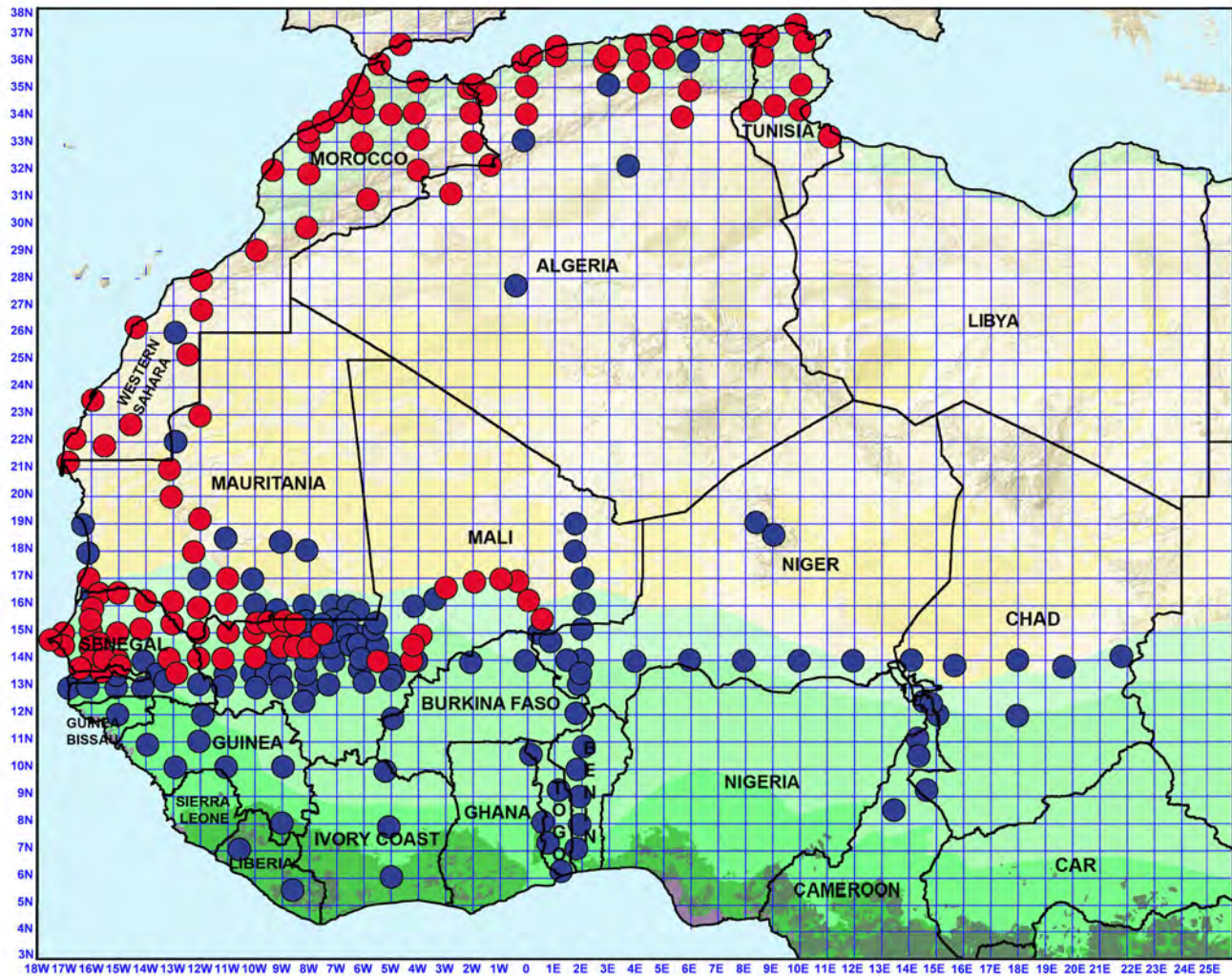


**Figure 1. Map of northwestern Africa with the location of study sites positive (red circles) or negative (blue circles) for the occurrence of *Ornithodoros* ticks in small mammal burrows.** At least 30 burrows were investigated in each negative site.

doi: 10.1371/journal.pone.0078473.g001

Holotype: IRSNB IG.32.280/004/1; ZooBank: urn:lsid:zoobank.org:act:DC0E7B5B-FBC3-4A7B-A223-77E0F2CFF2F5; GenBank: KC311536, KC311537.

• *O. costalis* Diatta, Bouattour, Durand, Renaud & Trape, sp. nov.

Holotype: IRSNB IG.32.280/005/1; ZooBank: urn:lsid:zoobank.org:act:43B277DD-7488-4277-8EC6-7AA9653882D0; GenBank: KC311531, KC311532.

• *O. rupestris* Trape, Bitam, Renaud & Durand, sp. nov.

Holotype: IRSNB IG.32.280/003/1; ZooBank: urn:lsid:zoobank.org:act:B76003D9-C807-4194-97C7-1FE7CFA3398D; GenBank: KC311545.

• *O. kairouanensis* Trape, Diatta, Bouattour, Durand & Renaud, sp. nov.

Holotype: IRSNB IG.32.280/002/1; ZooBank: urn:lsid:zoobank.org:act:DCC9185B-5FA8-494C-BF45-985A60478DC7; GenBank: KC311546.

• *O. merionesi* Trape, Diatta, Belghyti, Sarih, Durand & Renaud, sp. nov.

Holotype: IRSNB IG.32.280/001/1; ZooBank: urn:lsid:zoobank.org:act:8B64EB2B-0288-4488-9E39-94A2E3367FF5; GenBank: KC311538.

The four other species identified were: *O. erraticus*, GenBank: KC311539, KC311540, KC311541, neotype: IRSNB 32.280/006; *O. marocanus*, GenBank: KC311533, KC311537, KC311535; neotype: IRSNB 32.280/007; *O. sonrai*, GenBank: KC311525, KC311526, KC311527, KC311528, KC311529,

**Table 2.** List of small mammals collected and number of specimens found infected by *Borrelia*.

| Family              | Species                          | No. collected | No. Tested | No. Infected * |
|---------------------|----------------------------------|---------------|------------|----------------|
| <b>Rodents</b>      |                                  |               |            |                |
| Ctenodactylidae     | <i>Felovia vae</i>               | 1             | 1          | 0              |
| Dipodidae           | <i>Jaculus jaculus</i>           | 37            | 36         | 0              |
| Muridae             | <i>Acomys airensis</i>           | 38            | 28         | 0              |
|                     | <i>Acomys chudeaui</i>           | 17            | 14         | 0              |
|                     | <i>Arvicanthis ansorgei</i>      | 3             | 3          | 0              |
|                     | <i>Arvicanthis niloticus</i>     | 26            | 26         | 1 (I:1)        |
|                     | <i>Arvicanthis rufinus</i>       | 5             | 0          | 0              |
|                     | <i>Arvicanthis</i> spp.          | 51            | 38         | 0              |
|                     | <i>Desmodilliscus braueri</i>    | 11            | 8          | 0              |
|                     | <i>Gerbilliscus gambianus</i>    | 5             | 4          | 0              |
|                     | <i>Gerbilliscus kemp</i>         | 4             | 0          | 0              |
|                     | <i>Gerbilliscus</i> spp.         | 54            | 45         | 0              |
|                     | <i>Gerbillus campestris</i>      | 59            | 59         | 4 (B:2, P:3)   |
|                     | <i>Gerbillus gerbillus</i>       | 42            | 37         | 1 (B:1)        |
|                     | <i>Gerbillus henleyi</i>         | 1             | 1          | 0              |
|                     | <i>Gerbillus hoogstraali</i>     | 12            | 12         | 1 (B:1, P:1)   |
|                     | <i>Gerbillus pyramidum</i>       | 28            | 28         | 0              |
|                     | <i>Gerbillus nanus</i>           | 25            | 21         | 0              |
|                     | <i>Gerbillus nigeriae</i>        | 28            | 26         | 0              |
|                     | <i>Gerbillus occiduus</i>        | 29            | 29         | 1 (P:1)        |
|                     | <i>Gerbillus tarabuli</i>        | 107           | 90         | 2 (B:2)        |
|                     | <i>Gerbillus</i> spp.            | 41            | 20         | 0              |
|                     | <i>Lemniscomys barbarus</i>      | 1             | 1          | 0              |
|                     | <i>Lemniscomys bellieri</i>      | 2             | 0          | 0              |
|                     | <i>Lemniscomys zebra</i>         | 10            | 8          | 0              |
|                     | <i>Lemniscomys</i> spp.          | 14            | 14         | 0              |
|                     | <i>Mastomys erythroleucus</i>    | 205           | 179        | 9 (B:2, I:8)   |
|                     | <i>Mastomys huberti</i>          | 76            | 76         | 1 (B:1)        |
|                     | <i>Mastomys kollmannspergeri</i> | 38            | 38         | 0              |
|                     | <i>Mastomys natalensis</i>       | 220           | 164        | 7 (B:7)        |
|                     | <i>Mastomys</i> spp.             | 26            | 18         | 0              |
|                     | <i>Meriones libycus</i>          | 1             | 1          | 0              |
|                     | <i>Meriones shawi</i>            | 14            | 14         | 6 (B:1, P:6)   |
|                     | <i>Mus musculus</i>              | 23            | 15         | 1 (I:1)        |
|                     | <i>Pachyuromys duprasi</i>       | 1             | 0          | 0              |
|                     | <i>Praomys daltoni</i>           | 180           | 175        | 11 (B:11)      |
|                     | <i>Praomys derooi</i>            | 15            | 12         | 0              |
|                     | <i>Rattus norvegicus</i>         | 2             | 2          | 0              |
|                     | <i>Rattus rattus</i>             | 18            | 15         | 2 (I:2)        |
|                     | <i>Taterillus arenarius</i>      | 7             | 5          | 0              |
|                     | <i>Taterillus conchicus</i>      | 2             | 2          | 0              |
|                     | <i>Taterillus gracilis</i>       | 8             | 6          | 0              |
|                     | <i>Taterillus lacustris</i>      | 7             | 5          | 0              |
|                     | <i>Taterillus petteri</i>        | 2             | 2          | 0              |
|                     | <i>Taterillus</i> spp.           | 13            | 10         | 0              |
|                     | <i>Uranomys ruddi</i>            | 15            | 14         | 0              |
| Nesomyidae          | <i>Cricetomys gambianus</i>      | 7             | 4          | 0              |
| Sciuridae           | <i>Atlantoxerus getulus</i>      | 3             | 3          | 0              |
|                     | <i>Heliosciurus gambianus</i>    | 1             | 1          | 0              |
|                     | <i>Xerus erythropus</i>          | 6             | 3          | 0              |
| <b>Insectivores</b> |                                  |               |            |                |
| Erinaceidae         | <i>Atelerix albiventris</i>      | 8             | 2          | 0              |
|                     | <i>Atelerix algirus</i>          | 6             | 6          | 1 (P:1)        |



**Table 2 (continued).**

| Family            | Species                        | No. collected | No. Tested | No. Infected * |
|-------------------|--------------------------------|---------------|------------|----------------|
| Soricidae         | <i>Hemiechinus aethiopicus</i> | 3             | 2          | 0              |
|                   | <i>Crocidura olivieri</i>      | 41            | 33         | 9 (I:9)        |
|                   | <i>Crocidura viaria</i>        | 9             | 9          | 0              |
|                   | <i>Crocidura</i> spp.          | 20            | 20         | 0              |
| <b>Carnivores</b> |                                |               |            |                |
| Mustelidae        | <i>Ictonyx striatus</i>        | 1             | 1          | 0              |

\* B: Thick blood film examination; I: white mice inoculation with brain tissue; P: PCR with brain tissue (Morocco specimens only).

doi: 10.1371/journal.pone.0078473.t002

KC311530, neotype: IRSNB 32.280/007; and *O. normandi*, GenBank KC311542, KC311543, KC311544.

Figure 3 shows that high specific diversity was observed in North Africa where the nine species were found and presented either a wide distribution in the most arid areas of Morocco, Algeria and Tunisia (one species: *O. sonrai*), or various restricted distribution patterns in coastal and/or inland areas of North Africa and Spain (eight species).

In West Africa, only *O. sonrai* was observed, and analysis performed on the 16S sequences of 533 *O. sonrai* ticks from 72 study sites in Sudanian, Sahelian and Saharan areas showed a large distribution of *O. sonrai* in West and North Africa (Figure 3). However, over the whole molecular range observed for this species, one group was genetically distinct (bootstrap >90). These ticks were sampled in an area extending from northwestern Senegal (Dagana, Richard-Toll) to northwestern Mauritania (Nouâdhibou) and the most southern part of Morocco (Adrar Souttuf) and we consider that they constitute a distinct sub-species of *O. sonrai* (Figure 3).

### Phylogenetic analysis of *Borrelia*

The phylogenetic analysis of *Borrelia* was based on 105 different sequences among 216 IGS-FLA sequences obtained. Figure 4 shows that three *Borrelia* species were present in sampled ticks: *B. crocidurae*, *B. hispanica*, and a third species, *B. merionesi*, a rare spirochaete that was formerly described from *Ornithodoros* ticks collected in the same area of southern Morocco than our specimens [59,60] (Figure 5). The genetic distance estimates among *Borrelia* species varied from 0.003±0.002 (*B. recurrentis* - *B. duttonii* distance) to 0.076±0.010 (*B. hispanica* - *B. recurrentis* distance) (Table 5). Sequences of *B. crocidurae* previously obtained from patients from Dielmo (Senegal) [39] and *B. hispanica* from patients from Kenitra, Morocco [30] were identical to those collected in *Ornithodoros* ticks in the same areas.

The IGS-FLA phylogenetic analysis indicated that *B. crocidurae* was only found in *O. sonrai* (196 out of 533 specimens, 36.7%), *B. hispanica* was found in *O. maroccanus* (5/43, 11.6%), *O. occidentalis* (3/55, 5.5%) and *O. kairouanensis* (1/5, 20.0%), and *B. merionesi* was found in *O. costalis* (3/65, 4.6%) and *O. merionesi* (3/ 16, 18.8%). No *Borrelia* infection was detected in 28 specimens of *O. rupestris* from 2 study sites, nor in 44 specimens of *O. erraticus* from 5

**Table 3.** Distribution and prevalence of infected *Ornithodoros* ticks by *Borrelia* in seven North and West Africa countries and in one locality of Spain.

| Country    | No. of<br>sites tested |      | No. of<br>ticks | No. of<br>infected<br>ticks | No. of IGS-FLA                               |                                      |
|------------|------------------------|------|-----------------|-----------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|
|            |                        |      |                 |                             | <i>Borrelia</i><br>concatenated<br>sequences | No. of 16S<br>rDNA tick<br>sequences |
|            |                        |      |                 | Prevalence(786 nu.)         |                                              | (457 nu.)                            |
| Algeria    | 18                     | 199  | 5               | 2.5                         | 2                                            | 183                                  |
| Gambia     | 1                      | 8    | 4               | 50.0                        | 4                                            | 1                                    |
| Mali       | 18                     | 273  | 34              | 12.5                        | 26                                           | 88                                   |
| Mauritania | 9                      | 72   | 7               | 9.7                         | 7                                            | 21                                   |
| Morocco    | 29                     | 415  | 40              | 9.6                         | 24                                           | 188                                  |
| Senegal    | 28                     | 768  | 199             | 25.9                        | 146                                          | 281                                  |
| Spain      | 1                      | 4    | 2               | 50.0                        | 2                                            | 1                                    |
| Tunisia    | 9                      | 62   | 4               | 6.5                         | 4                                            | 57                                   |
| Total      | 113                    | 1801 | 295             | 16.4                        | 215                                          | 820                                  |

The number of partial sequences obtained of concatenated Intergenic spacer – FlaB gene (IGS-FLA) for *Borrelia* and 16S rDNA for ticks are shown. No.: number; Nu: nucleotide.

doi: 10.1371/journal.pone.0078473.t003

study sites, nor in 31 specimens of *O. normandi* from 7 study sites.

### Diagnostic SNPs of *Ornithodoros* ticks

To allow a rapid molecular identification of *Ornithodoros* species, we highlighted 25 single nucleotide polymorphisms among the 9 species in 16S rRNA sequence dataset (Table 6). We detected at least one diagnostic SNP for each species, i.e. at a given position of the 16S sequence a nucleotide type is present in all sequences of a given species and absent in other species. According to species, the total number of diagnostic SNPs that can be used for taxonomic purpose of soft tick of the genus *Ornithodoros* varied from 1 to 8 (Table 6).

### Environmental factors and tick species distribution

To investigate the relationship between environmental factors and species distribution, we included in the analysis ticks from 110 study sites. Figure 6 shows the projection of the individual ticks on the first factorial plane. The first two axes

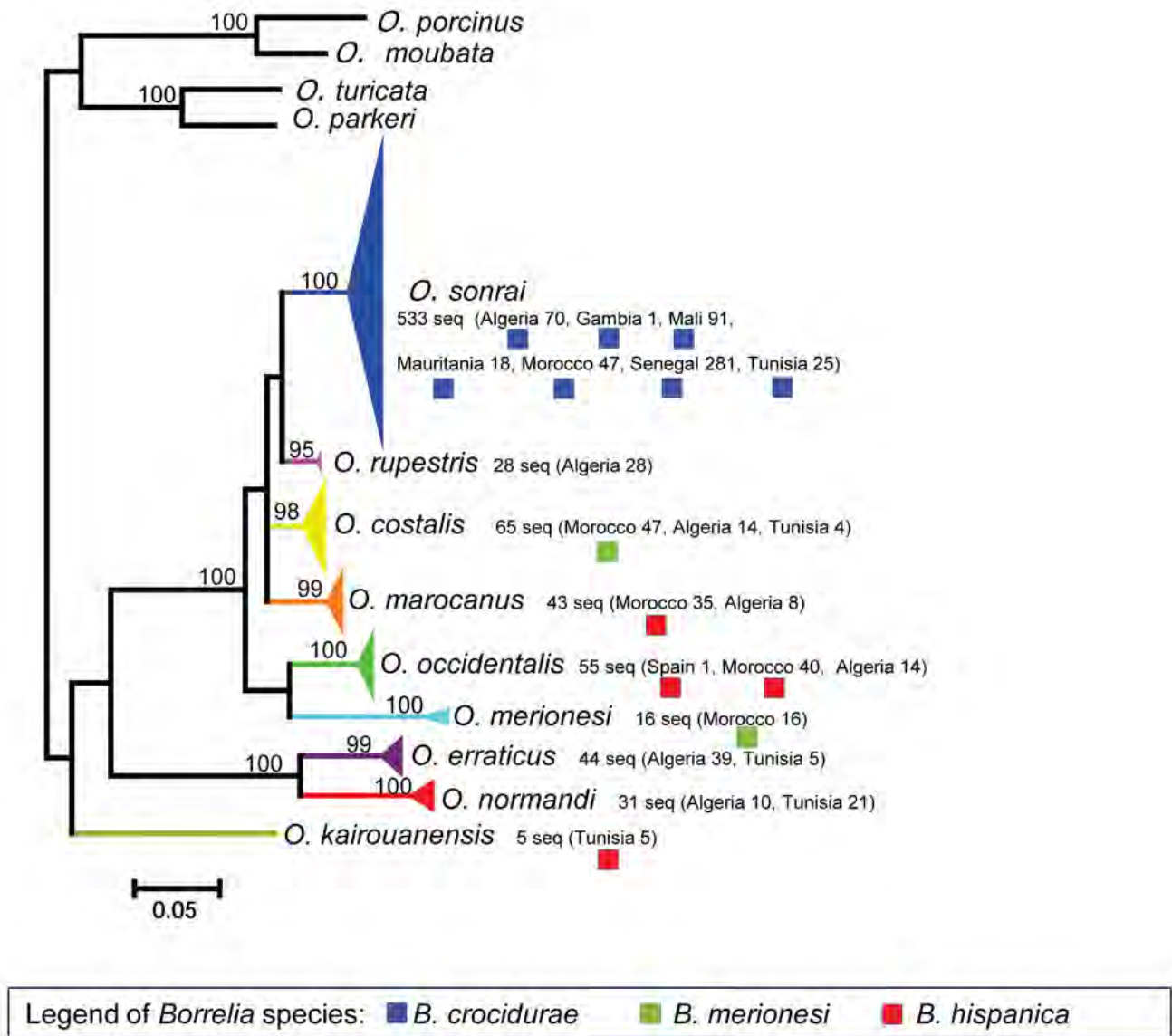


**Figure 2. Phylogenetic relationships among *Ornithodoros* species using 16S rRNA sequences (820 seq.).** The colored triangles indicate the genetic diversity of the sequences detected for each *Ornithodoros* species. The colored-spots correspond to the *Borrelia* species detected in each tick species. The phylogram was constructed using a maximum-likelihood method from partial 16S sequence data (457 nucleotides). Bootstrap values >90 are shown (Scale bar, 0.05 substitutions per site). *Ornithodoros moubata* (GenBank accession number AB073679), *O. porcinus* (GenBank acc. no. AB105451), *O. turicata* (GenBank acc. no. L34327), and *O. parkeri* (GenBank acc. no. EU009925) were treated as outgroups. Five of these species are newly described: *O. occidentalis*, *O. costalis*, *O. rupestris*, *O. kairouanensis*, and *O. merionesi*.

doi: 10.1371/journal.pone.0078473.g002

explain 92% of the between-species variance. The predictive power (percentage of well-classified data) is 76%. The variable most positively correlated with axis 1 is the mean annual rainfall ( $\text{cor} = 0.87$ ), the most negatively correlated with axis 1 is mean temperature ( $\text{cor} = -0.69$ ). The variable most positively correlated with axis 2 is the longitude ( $\text{cor} = 0.81$ ), and the most negatively correlated with axis 2 is elevation ( $\text{cor} = -0.45$ ). *O. sonrai* lies essentially on the negative part of axis 1,

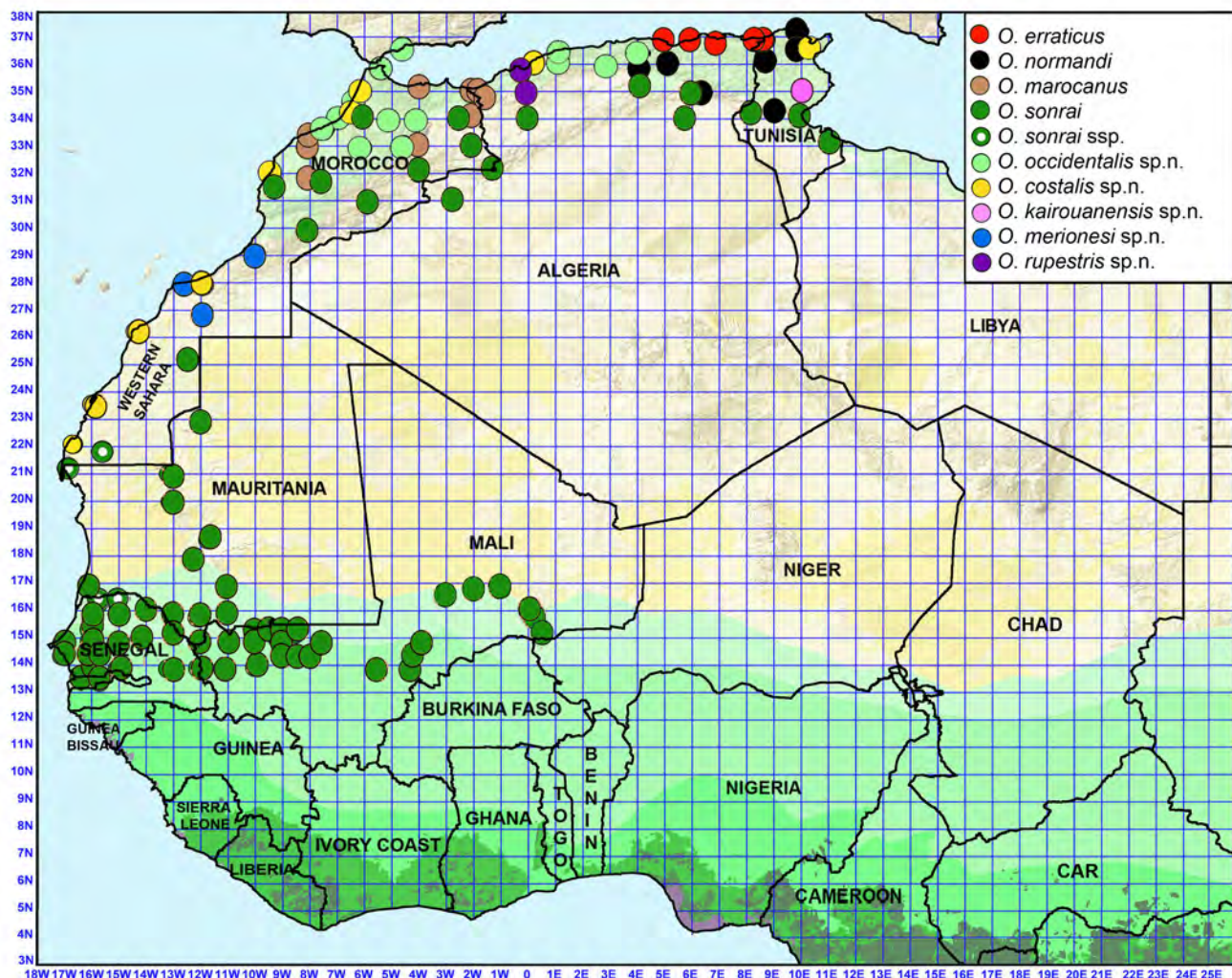
and thus appears related to drier climates and higher temperature than the other species. *O. costalis*, *O. maroccanus*, *O. occidentalis* and *O. merionesi* lie generally on the negative part of axis 2 and are not well separated. *O. normandi* and *O. erraticus* lie on the positive part of both axes. Longitude (except for *O. costalis*) and rains (high rains for *O. erraticus* and *O. normandi*, low rains for *O. merionesi*) appear as the most discriminant factors.

**Table 4.** Estimates of molecular distance (Kimura 2-parameter model) between the nine *Ornithodoros* species based on 16S sequences of 16S rRNA.

|                         | <i>O. costalis</i> | <i>O. maroccanus</i> | <i>O. occidentalis</i> | <i>O. merionesi</i> | <i>O. kairouanensis</i> | <i>O. erraticus</i> | <i>O. normandi</i> | <i>O. rupestris</i> |
|-------------------------|--------------------|----------------------|------------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| <i>O. sonrai</i>        | 0.073 (0.013)      | 0.075 (0.013)        | 0.095 (0.017)          | 0.120 (0.019)       | 0.200 (0.025)           | 0.219 (0.025)       | 0.222 (0.026)      | 0.058 (0.012)       |
| <i>O. costalis</i>      |                    | 0.062 (0.013)        | 0.084 (0.015)          | 0.113 (0.020)       | 0.194 (0.022)           | 0.212 (0.023)       | 0.220 (0.026)      | 0.052 (0.011)       |
| <i>O. maroccanus</i>    |                    |                      | 0.087 (0.014)          | 0.113 (0.019)       | 0.185 (0.023)           | 0.209 (0.023)       | 0.212 (0.026)      | 0.061 (0.011)       |
| <i>O. occidentalis</i>  |                    |                      |                        | 0.114 (0.019)       | 0.204 (0.026)           | 0.224 (0.025)       | 0.242 (0.028)      | 0.079 (0.015)       |
| <i>O. merionesi</i>     |                    |                      |                        |                     | 0.203 (0.026)           | 0.230 (0.026)       | 0.251 (0.030)      | 0.114 (0.020)       |
| <i>O. kairouanensis</i> |                    |                      |                        |                     |                         | 0.186 (0.025)       | 0.223 (0.028)      | 0.184 (0.023)       |
| <i>O. erraticus</i>     |                    |                      |                        |                     |                         |                     | 0.109 (0.015)      | 0.201 (0.023)       |
| <i>O. normandi</i>      |                    |                      |                        |                     |                         |                     |                    | 0.198 (0.023)       |

Standard error estimates are shown in parenthesis and were obtained by a bootstrap procedure (100 replicates).

doi: 10.1371/journal.pone.0078473.t004

**Figure 3.** Map of northwestern Africa with the distribution of *Ornithodoros* species found in small mammal burrows.

doi: 10.1371/journal.pone.0078473.g003



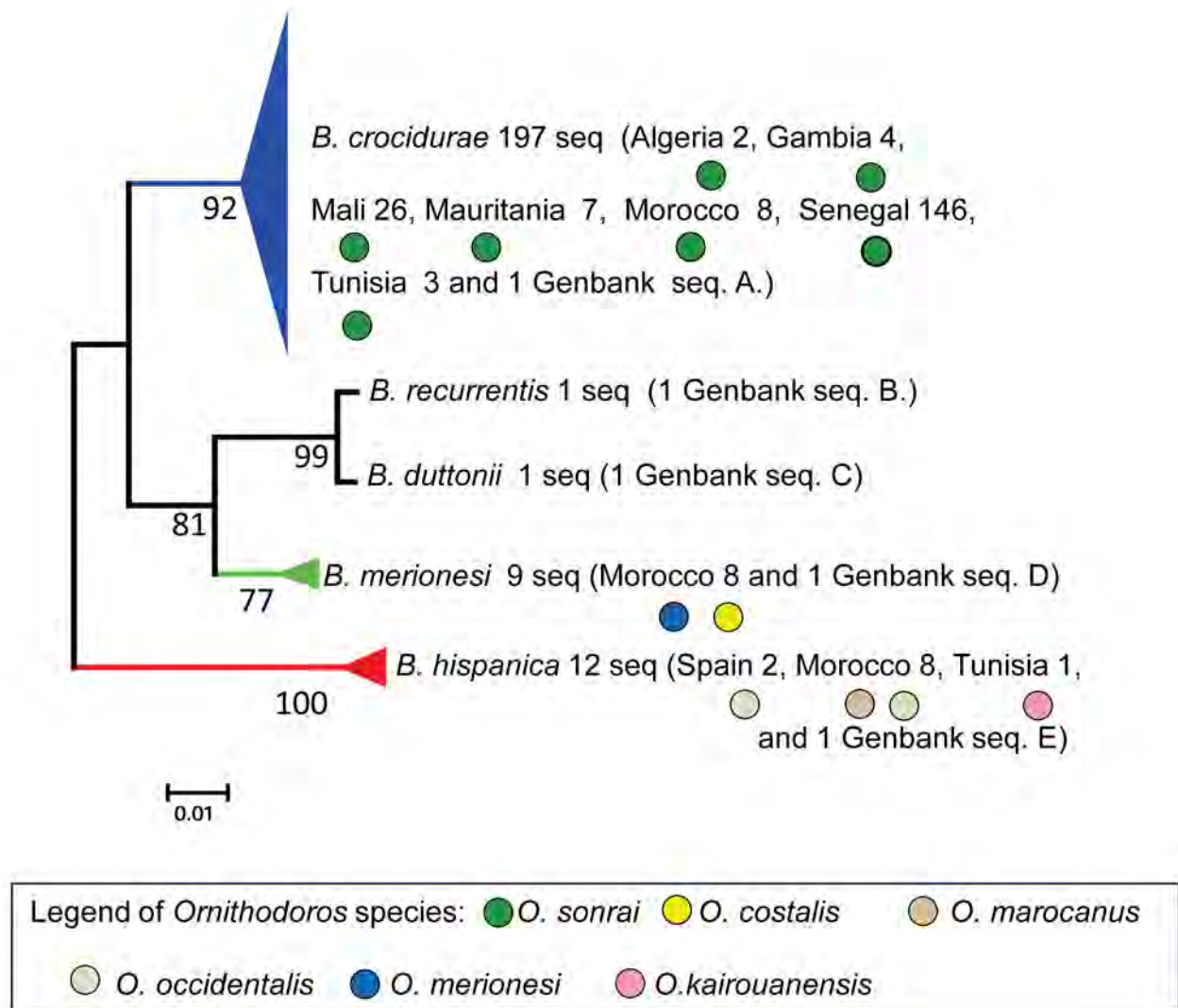


**Figure 4. Phylogenetic relationships among *Borrelia* species using partial Intergenic spacer (IGS, 510 nucleotides) and partial FlaB gene (FLA, 269 nucleotides) concatenated sequences.** (PhyML 100 bootstraps, available at <http://mobyli.pasteur.fr/cgi-bin/portal.py>). The colored triangle estimated the *Borrelia* species diversity. We included in the *B. merionesi* clade (9 seq.) a *Borrelia* detected in a rodent captured in El Argoub (Morocco). The colored full circle correspond to the tick species determined by the 16S phylogenetic analysis of this study. The phylogram was constructed using a maximum-likelihood method from concatenated sequence data (220 sequences including GenBank reference sequences, 779 nucleotides). Bootstrap values >70 are shown (Scale bar, 0.01 substitutions per site). Seq. A.: *B. crocidurae* (GU350723 and NC017808), seq. B.: *B. recurrentis* (DQ000277 and DQ346814), seq. C.: *B. duttonii* (DQ000279 and DQ346833), seq. D.: *B. merionesi* (JX257047 and JX257050), seq. E.: *B. hispanica* (GU350718 and GU357614) and concatenated sequences were used as references.

doi: 10.1371/journal.pone.0078473.g004

## Discussion

Genetic distances between the nine clades of *Ornithodoros* ticks collected in this study ranged from 5.2 to 25.1%, a distance similar to those found between *Ornithodoros* species from other parts of the world. For comparison, the genetic distance between *O. puertoricensis* and *O. rioplatensis*, two species from South America, based on 16S rRNA sequencing, is approximately 12.7% [61]. Morphologically, it was easy to

separate these nine species in two groups, the first one comprising two small species distributed in northeastern Algeria and northwestern Tunisia and characterized, among other diagnostic characters, by a transverse groove on coxae I, the second one comprising the seven other species and characterized by an oblique groove on coxae I, as previously illustrated elsewhere [31]. These two groups are confirmed by our molecular study (Figure 2). The two species of the first group includes respectively (a) all specimens from La Calle,

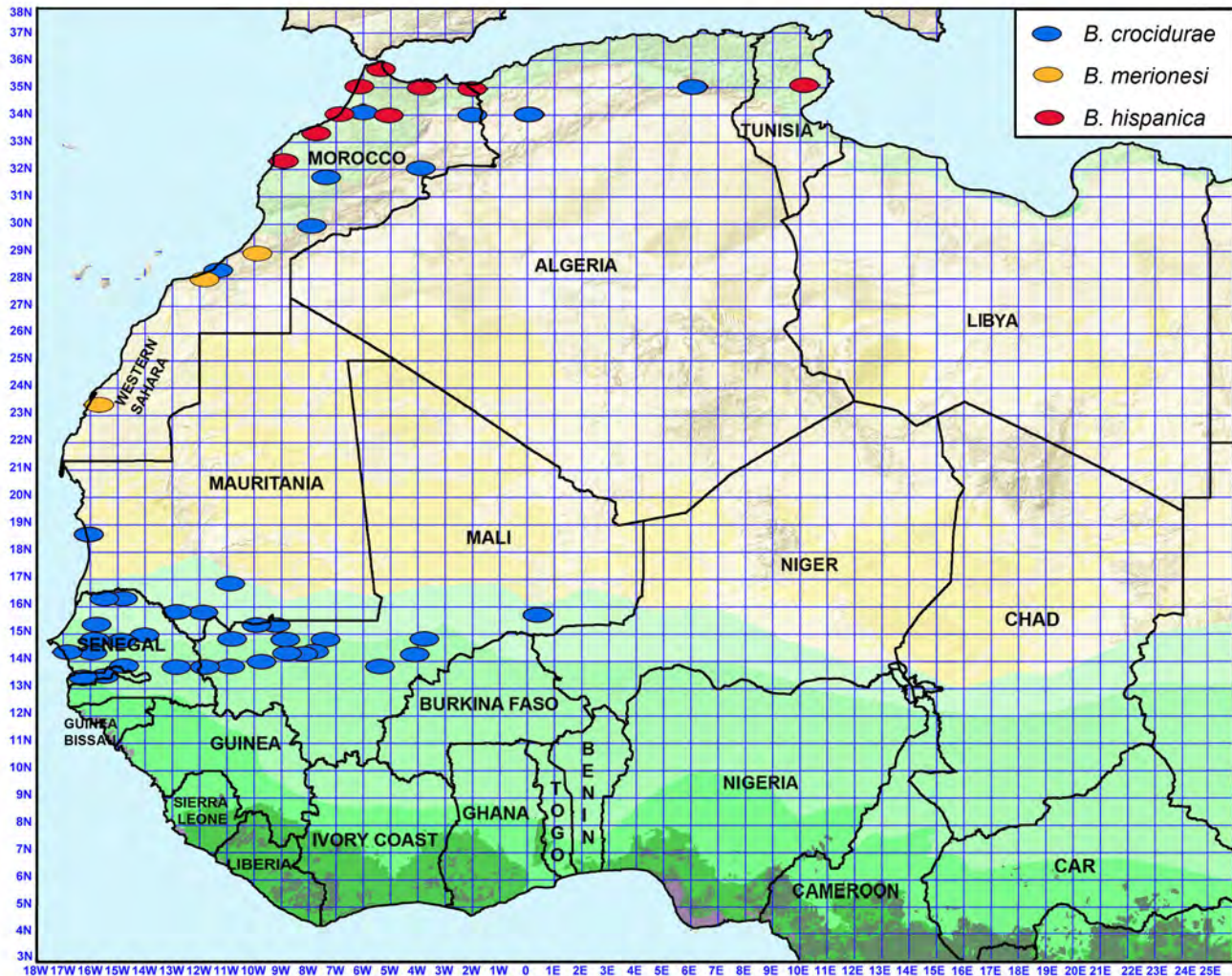


**Figure 5.** Map of northwestern Africa with the distribution of *Borrelia* species found in *Ornithodoros* ticks and/or rodents.

doi: 10.1371/journal.pone.0078473.g005

Algeria - type locality of *O. erraticus* (Lucas, 1849) - and nearby coastal sites of Algeria and Tunisia, and (b) all specimens from Le Kef, Tunisia - type locality of *O. normandi* Larousse, 1923 - and nearby highland sites of Tunisia and Algeria [62,63]. None of 75 specimens of these two species were found infected by *B. hispanica*, *B. crocidurae* or *B. merionesi* in this study nor in a previous study in Tunisia [31], suggesting that *O. erraticus* sensu stricto and *O. normandi* may be poor vectors or reservoirs of TBRF. By contrast, six of the seven species of the second morphological group of *Ornithodoros* ticks were found infected by one of these *Borrelia* species, most often with high prevalence rates (minimum 4.6% for *O. costalis*, maximum 36.6% for *O. sonrai*).

Among the seven species of the second group, only two species were previously known: *O. maroccanus* Velu, 1919, type locality "vieille casbah" near Casablanca, Morocco and *O. sonrai* Sautet and Witkovski, 1943, type locality Gao, Mali [64,65]. However, since the work of Colas-Belcour [66], *O.*

**Table 5.** Estimates of molecular distance (Kimura 2-parameter model) between the three *Borrelia* species detected, based on 220 concatenated IGS-FLA sequences (779 nucleotides), and comparison with *B. recurrentis* and *B. duttonii*.

|                       | <i>B. crocidurae</i> | <i>B. hispanica</i> | <i>B. merionesi</i> | <i>B. recurrentis</i> |
|-----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| <i>B. crocidurae</i>  | -                    |                     |                     |                       |
| <i>B. hispanica</i>   | 0.062 (0.008)        | -                   |                     |                       |
| <i>B. merionesi</i>   | 0.039 (0.007)        | 0.065 (0.009)       | -                   |                       |
| <i>B. recurrentis</i> | 0.043 (0.008)        | 0.076 (0.010)       | 0.035 (0.006)       | -                     |
| <i>B. duttonii</i>    | 0.040 (0.007)        | 0.073 (0.010)       | 0.035 (0.006)       | 0.003 (0.002)         |

Standard error estimates are shown in parenthesis and were obtained by a bootstrap procedure (100 replicates).

doi: 10.1371/journal.pone.0078473.t005



PLOS ONE | www.plosone.org

13

November 2013 | Volume 8 | Issue 11 | e78473

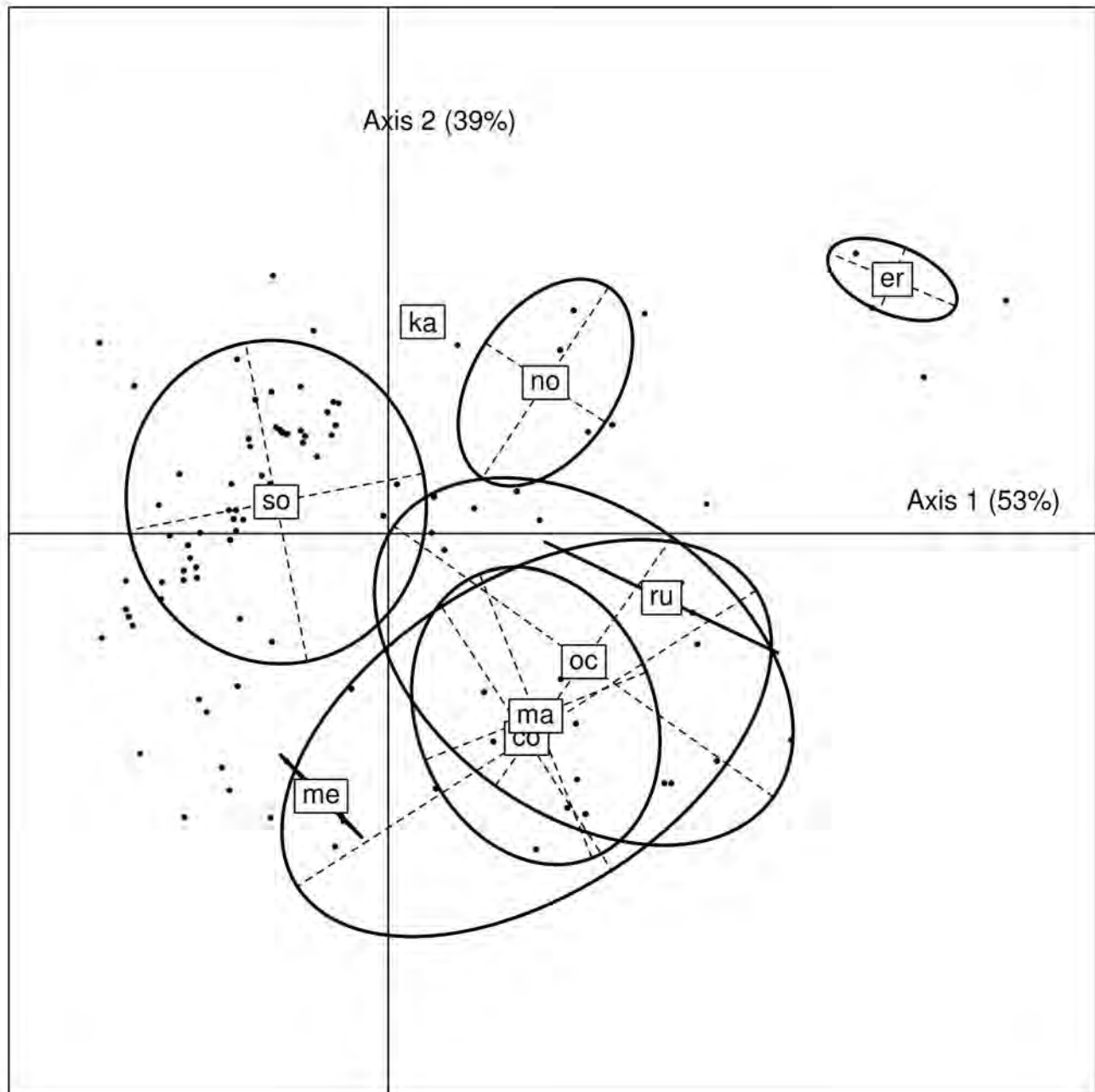


**Figure 6. Projection of individual ticks on the first factorial plane of a Linear Discriminant Analysis.** All ticks collected in the same location project to the same point. The percentages along the axes labels are the proportions of between-species variance explained by the corresponding linear discriminant. Units have no meaning. The labels indicating each species are located at the center of the individual points belonging to that species. Ellipses encompass around 66% of the distribution of each species. Abbreviations: so: *O. sonrai*, co: *O. costalis*, ma: *O. maroccanus*, oc: *O. occidentalis*, me: *O. merionesi*, ka: *O. kairouanensis*, er: *O. erraticus*, no: *O. normandi*, ru: *O. rupestris*.

doi: 10.1371/journal.pone.0078473.g006

*maroccanus* was considered as a junior synonym of *O. erraticus* [67,68]. Although most Algerian arthropods collected by Lucas [62] were deposited at the Museum National d'Histoire Naturelle in Paris, part of the collection was lost, including the

three *O. erraticus* syntypes. The original description of these specimens was very short and *O. erraticus* was later redescribed by Neumann [69] on the basis of specimens not from La Calle but from Nemours (= Ghazaouet) and Marnia in

northwestern Algeria near the Moroccan border, an area where our study shows that *O. erraticus* is absent but where *O. maroccanus* is widely distributed. Since our study also shows that *O. erraticus* is the only species distributed in coastal areas of northeastern Algeria, from where the three syntypes of Lucas were described [61] and our specimens match their short description, *O. maroccanus* must be resurrected from the synonymy of *O. erraticus* and the distribution of this later species appears much more restricted than previously thought. Morphologically, we failed to find good criteria for distinguishing *O. erraticus* from *O. normandi*, but these two species are clearly distinct genetically and have also distinct ranges and ecological preferences. In addition, comprehensive cross-mating experiments between eight populations of *O. erraticus* sensu lato from areas investigated in our study (Casablanca, Oujda, Marrakech, Tunis, Dakar, southern Morocco, southern Spain) and from central and southern Iran performed by Chabaud [29] in the early 1950s indicated that all hybrids of the first or second generation were either sterile or have very low fertility [29]. The results of these experiments combined with our data and the partial sympatry of several of these species clearly support the full specific rank of the seven species of the *O. maroccanus* / *O. sonrai* group identified in our study (Figure 7).

Interestingly, our data confirm the tick-spirochete species specificity highlighted by previous authors [70]. *B. crocidurae* was only detected in *O. sonrai*, and both this vector and this spirochete were genetically very close North and South of the Sahara desert, certainly because they present a continuous distribution through Mauritania and Western Sahara (but probably not through central Sahara, a much dryer area [57] where we failed to find *O. sonrai*). The only apparent disjunction in the distribution of this vector was observed in central Mali, where we failed to find a connection between the populations of *O. sonrai* bordering the Niger River and those distributed from western Mali to North Africa. *B. hispanica* was detected in *O. maroccanus*, *O. occidentalis* and *O. kairouanensis*, a complex of three large species (female adult length 5.5 - 7.5 mm) distributed in typically Mediterranean areas of Morocco, Algeria, Tunisia and Spain and previously confused with *O. erraticus* [2,23,28-32,60,66-69]. Finally, the poorly known *B. merionesi* [59,60] appears restricted to Atlantic coastal areas of the Sahara desert where it is transmitted by two *Ornithodoros* species previously confused with *O. sonrai*: *O. costalis* and *O. merionesi*. Interestingly, no *Ornithodoros* species was found infected by more than one *Borrelia* species despite the high prevalence of infected ticks.

The considerable abundance of *Ornithodoros* TBRF vectors in North and West Africa - from 39.5 % of rodent burrows colonized by vector ticks in Morocco to 13.7 % in West Africa (Senegal, The Gambia, Mali and Mauritania) - coupled with the high infection rate of these vectors by at least two *Borrelia* species pathogenic for humans suggest that TBRF is a common disease in the whole range of distribution of these vectors. In rural Senegal, we have previously shown that the incidence of *B. crocidurae* TBRF reached 11 per 100 person-years and was the highest described in the world literature for any bacterial disease [39]. In northwestern Morocco, we found

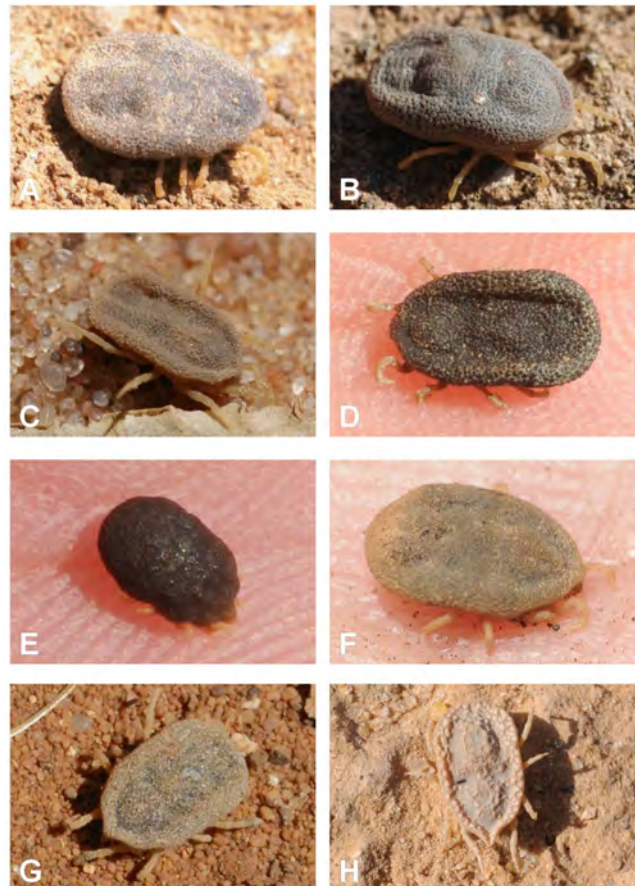


**Figure 7. Dorsal view of *O. erraticus* (A), *O. maroccanus* (B), *O. sonrai* (C), *O. costalis* (D), *O. merionesi* (E), *O. occidentalis* (F), *O. rupestris* (G), and *O. kairouanensis* (H).**

doi: 10.1371/journal.pone.0078473.g007

that 20.5% of patients with an unexplained fever had *B. hispanica* TBRF [30]. Clearly, similar incidence rates are likely to occur in most areas where we demonstrated the occurrence of one or more of the seven species of the *O. maroccanus* - *O. sonrai* complex. It is not known if *B. merionesi* is also pathogenic for humans. However, a few previous experiments with this spirochete failed to induce TBRF in humans [59].

We consistently failed to find any *Ornithodoros* tick inside burrows or houses in West Africa south of 13°N and east of 01°E. We also failed to find these ticks in Cameroon and Chad. In the literature, there were in these areas only two mentions of *Ornithodoros* species known as potential vectors of TBRF, one doubtful report of two larvae of *O. erraticus* collected on *Arvicanthus niloticus* in Ndjamena before 1959 [71] and the mention of one nymph of *O. sonrai* collected in a burrow of *Xerus erythropus* in Niamey in 1956 [23]. The later report was consistent with the current known distribution of *O. sonrai* along the Niger River in Mali, but our extensive investigations (132 burrows examined) in Niamey and along the Niger River between Niamey and the Malian border were negative. In Mali, a recent comprehensive study of the small mammal reservoir

of *B. crocidurae* in 20 villages from different areas of the country indicated that 11% of 663 rodents and 14% of 63 shrews had antibodies to spirochetes and 2.2% had confirmed active *B. crocidurae* infections [37]. Interestingly, distribution of seropositive mammals and *O. sonrai* ticks supported our own data, except for some villages of southern Mali where a few rodents were found seropositive although collected south of the known distribution limit of *O. sonrai*. Since low rates of serological cross reactivity and/or dispersal or accidental introduction of rodents south of places where they were infected cannot be excluded, further studies are needed to confirm local transmission of TBRF in these areas. In the Malian study, three rodent species (*M. erythroleucus*, *M. natalensis*, *P. daltoni*) and two insectivores species (*C. olivieri*, *C. fulvastra*) were found infected by thin blood film examination, a method where the amount of blood examined in each microscopic field is approximately 20-fold less than by thick blood film examination [72]. In Senegal, additional mammal species found infected during previous studies include *A. albiventris*, *R. norvegicus*, *G. gambianus* and *G. gracilis* [35,36]. With these species and *C. fulvastra* found infected in Mali [37], the known small mammal reservoir of TBRF in West and North Africa currently comprises 21 species.

A recent study in Togo indicated that 7.9% and 1.2% of 239 patients with fever from all regions of the country had *B. crocidurae* and *B. duttonii* infections, respectively, according to PCR blood testing [73]. However, in wet savanna and forest areas of West Africa, *Ornithodoros* ticks have never been reported [23,67,74,75], and this was confirmed by our surveys in Togo, Benin, Guinea, Guinea Bissau, Ivory Coast and Liberia where a total of 900 burrows and several hundred household examined were negative. If the occurrence of local transmission of *B. crocidurae* and *B. duttonii* in these areas is confirmed (since thick blood films failed to show the presence of spirochetes in PCR positive blood samples in the Togo study), this would suggest the existence of unknown vector / reservoir systems of *Borrelia* infections in wet savanna areas of West Africa.

Finally, our study as those previously conducted in northern, western, central, eastern and southern Africa [25,39,59,76,77] highlight the need of much more attention from health services, researchers and funding agencies to the continued burden of relapsing fevers due to *Borrelia* spp. in African populations.

## Appendix

**Description of *Ornithodoros merionesi*, *O. kairouanensis*, *O. rupestris*, *O. occidentalis* and *O. costalis*, and designation of neotypes for *O. erraticus*, *O. maroccanus* and *O. sonrai*.**

***Ornithodoros merionesi*.** Trape, Diatta, Belghyti, Sarih, Durand & Renaud, sp. nov.

**Holotype:** IRSNB/RBINS IG.32.280/001/1, formerly IRD.TR-Mar7T8M, a nymph of 3.2 mm long collected on 6 October 2006 inside a rodent burrow in a steppe area located at 29°03'47"N / 09°55'42"W, approximately 16 km NE of Guelmin (Morocco), by G. Diatta, Y. Mané and J.F. Trape.

**Paratypes:** IRSNB/RBINS IG.32.280/001/2-14. Two females, two males and nine nymphs. Same date, location and collectors than the holotype.

**Diagnosis:** An Argasidae tick of the *O. maroccanus* group of the genus *Ornithodoros*, characterized by an oblique groove on coxae I., and belonging to the subgroup of small / medium sized species (average female length < 5.2 mm, average male length < 3.0 mm) of this complex (subgroup *O. sonrai* complex). Medium sized, morphologically indistinguishable from large specimens of *O. sonrai* and small specimens of *O. maroccanus*, but genetically differing from these species and from all other species of the *O. maroccanus* group by the unique position of A, A, T, and G on 16S rRNA aligned sequences (positions 209, 237, 256 and 301, respectively, see Table 6).

**Geographic distribution:** Morocco

***Ornithodoros kairouanensis*.** Trape, Diatta, Bouattour, Durand & Renaud, sp. nov.

**Holotype:** IRSNB/RBINS IG.32.280/002/1, formerly IRD.TR-Tun5T3MN, a female of 7.1 mm long collected on 22 May 2010 inside a rodent burrow in a small cliff bordering a wadi located at 35°03'35"N / 10°02'23"E, approximately 70 km S of Kairouan (Tunisia), by G. Diatta and J.F. Trape.

**Paratypes:** IRSNB/RBINS IG.32.280/002/2-3. Two nymphs. Same date, location and collectors than the holotype.

**Diagnosis:** An Argasidae tick of the >*O. maroccanus* group of the genus *Ornithodoros*, characterized by an oblique groove on coxae I, and belonging to the subgroup of large species (average female length > 5.2 mm, average male length > 3.0 mm) of this complex (subgroup *O. maroccanus* complex). This species is characterized by crater-like formations on the soft dorsal cuticle (see Fig. 7H). Genetically differing from *O. maroccanus* and from all other species of the *O. maroccanus* group by the unique position of T, T, C, G, T, G, G, and T on 16S rRNA aligned sequences (positions 74, 81, 189, 194, 217, 244, 257 and 438, respectively, see Table 6).

**Geographic distribution:** Tunisia

***Ornithodoros rupestris*.** Trape, Bitam, Renaud & Durand, sp. nov.

**Holotype:** IRSNB/RBINS IG.32.280/003/1, formerly IRD.TR-Alg12066bMN, a female of 6.1 mm long collected on 9 June 2012 inside a rodent burrow in a canyon located at 35°56'08"N / 00°05'07"E in the town of Mostaganem (Algeria) by J.F. Trape and I. Bitam.

**Paratypes:** IRSNB/RBINS IG.32.280/003/2-12. Three females, three males and five nymphs. Same date, location and collectors than the holotype.

**Diagnosis:** An Argasidae tick of the *O. maroccanus* group of the genus *Ornithodoros*, characterized by an oblique groove on coxae I, and belonging to the subgroup of large species (average female length > 5.2 mm, average male length > 3.0 mm) of this complex (subgroup *O. maroccanus* complex). Morphologically indistinguishable from *O. maroccanus*, but genetically differing from *O. maroccanus* and from all other species of the *O. maroccanus* group by the unique position of G on 16S rRNA aligned sequences (position 288, see Table 6).

**Geographic distribution:** Algeria.

***Ornithodoros occidentalis*.** Trape, Diatta, Durand & Renaud, sp. nov.

**Holotype:** IRSNB/RBINS IG.32.280/004/1, a female of 5.3 mm long collected on 18 July 2010 inside a rodent burrow in a pine woodland located at 36°38'25"N / 04°30'41"W near Torremolinos, Spain by G. Diatta and J.F. Trape.

**Paratypes:** IRSNB/RBINS IG.32.280/004/2-3. Two females. Same date, location and collectors than the holotype.

**Diagnosis:** An *Argasidae* tick of the *O. maroccanus* group of the genus *Ornithodoros*, characterized by an oblique groove on coxae I, and belonging to the subgroup of large species (average female length > 5.2 mm, average male length >3.0 mm) of this complex (subgroup *O. maroccanus* complex). Morphologically indistinguishable from *O. maroccanus*, but genetically differing from *O. maroccanus* and from all other species of the *O. maroccanus* group by the unique position of T and A on 16S rRNA aligned sequences (positions 172 and 214, respectively, see Table 6).

**Geographic distribution:** Spain, Morocco, Algeria.

***Ornithodoros costalis.*** Diatta, Bouattour, Durand, Renaud & Trape, sp. nov.

**Holotype:** IRSNB/RBINS IG.32.280/005/1, formerly IRD.TR-Tun9T1MN, a female of 6.0 mm collected on 2 December 2010 inside a rodent burrow located at 36°36'42"N, 10°10'14"E near Oudhna (Tunisia) by G. Diatta.

**Paratypes:** IRSNB/RBINS IG.32.280/005/2-4. Two females and one male. Same date, location and collectors than the holotype.

**Diagnosis:** An *Argasidae* tick of the *O. maroccanus* group of the genus *Ornithodoros*, characterized by an oblique groove on coxae I., and belonging to the subgroup of large sized species (average female length > 5.2 mm, average male length >3.0 mm) of this complex (subgroup *O. maroccanus* complex). Morphologically indistinguishable from *O. maroccanus*, but genetically differing from these species and from all other species of the *O. maroccanus* group by the unique position A/C on 16S rRNA aligned sequences (position 244, see Table 6).

**Geographic distribution:** Coastal areas of Morocco, Algeria and Tunisia.

***Ornithodoros erraticus.*** (Lucas, 1849).

The three syntypes of *Ornithodoros erraticus* are not in Paris MNHN. According to M. Judson (curator for arthropods, personal communication), they were certainly destroyed during transport to Paris as many other specimens of Lucas's collection of Algerian arthropods.

**Neotype:** IRSNB/RBINS 32.280/006, formerly IRD.TR-Alg5T5MN, a female of 3.1 mm long collected on 8 December 2009 inside a rodent burrow at 36°53'N / 08°31'E near La Calle, Algeria by G. Diatta.

***Ornithodoros maroccanus.*** Velu, 1919.

The types of *O. maroccanus* were sent by Velu [64] to the Pasteur Institute of Paris after he described this species. They could not be traced either in Paris or Casablanca and are now considered as lost (F. Rhodain, personal communication).

**Neotype:** IRSNB/RBINS 32.280/007, formerly IRD.TR-Mar16T11ZC, a female of 5.9 mm long collected on 23 October 2009 inside a rodent burrow at 33°22'N / 08°00'W near Casablanca, Morocco by G. Diatta.

***Ornithodoros sonrai.*** Sautet & Witkowski, 1943.

The types of *O. sonrai* could not be traced either in Paris or Dakar and are now considered as lost (J.-L. Camicas and F. Rhodain, personal communications).

**Neotype:** IRSNB/RBINS 32.280/008, formerly IRD.TR-MalG2T4, a female of 4.0 mm long collected on 22 January 2005 inside a rodent burrow at 15°59'22"N / 00°08'41"E in the village of Haousssa Foulane near Gao, Mali by G. Diatta, L. Vial & J.F. Trape.

## Supporting Information

**Table S1. Detailed results of *Ornithodoros* ticks surveys.** (DOCX)

**Table S2. Detailed results of small mammals surveys.** (DOCX)

## Acknowledgments

We thank Jean-Louis Camicas (IRD, Montpellier) for assistance in tick determination and Stephen C. Barker (University of Queensland, Brisbane) for useful comments on a first draft of the manuscript. We thank all those in Dakar, Bamako, Ouagadougou, Niamey, NDjamena, Yaoundé, Cotonou, Lomé, Lamto, Monrovia, Kindia, Bissau, Nouakchott, Kénitra, Casablanca, Algiers, Annaba, Tunis and Montpellier who provided assistance for field surveys, laboratory work or data analysis.

## Author Contributions

Conceived and designed the experiments: JFT PD FR. Performed the experiments: JFT GD CA IB MS DB AB EE LV YM CB FP GC GM LG JMD PD FR. Analyzed the data: JFT GD EE GM LG JMD PD FR. Contributed reagents/materials/analysis tools: JFT IB MS DB AB LV YM CB FP GC GM LG JMD PD FR. Wrote the manuscript: JFT GD PR FR.

## References

1. Southern PM, Sanford JP (1969) Relapsing fever. A clinical and microbiological review. *Medicine* 48: 129-149.
2. Rodhain F (1976) *Borrelia* et fièvres récurrentes: aspects épidémiologiques actuels. *Bull Inst Pasteur* 74: 173-218.
3. Goubau PF (1984) Relapsing fevers. A review. *Ann Soc Belg Med Trop* 64: 335-364. PubMed: 6397148.
4. Cadavid D, Barbour AG (1998) Neuroborreliosis during relapsing fever: review of clinical manifestations, pathology, and treatment of infections in humans and experimental animals. *Clin Infect Dis* 26: 151-164. doi: 10.1086/516276. PubMed: 9455525.
5. Bryceson ADM, Parry EHO, Perine PL, Warrell DA, Vukotich D et al. (1970) Louse-borne relapsing fever. *Q J Med* 153: 129-170.
6. Mackie FP (1907) The part played by *Pediculus corporis* in the transmission of relapsing fever. *BMJ* 2: 1706-1709. doi:10.1136/bmj.2.2450.1706. PubMed: 20763589.
7. Sergeant E, Foley H (1908) Fièvre récurrente du sud-oranais et *Pediculus vestimenti*. *Bull Soc Pathol Exot* 1: 174-176.
8. Mathis C (1946) La spirochétose à poux. In: C Mathis. *L'œuvre des Pasteuriens en Afrique noire (Afrique Occidentale Française)*. Paris: Presses Universitaires de France. pp. 313-317.

9. Gaud M, Morgan M (1947) Etude épidémiologique sur la fièvre récurrente en Afrique du Nord (1943-1945). *Bull Wld Hlth Org* 1: 75-98.
10. Gaud M, Khalil M, Vaucel M (1947) L'évolution de l'épidémie de fièvre récurrente (1942-1946). *Bull Wld Hlth Org* 1: 99-107.
11. Garnham PCC, Heisch RB, Timms GL (1947) An epidemic of louse-borne relapsing fever in Kenya. *Trans R Soc Trop Med Hyg* 41: 140-171. PubMed: 20270461.
12. Weldon ED (1955) World Distribution of Spirochetal Diseases. 2. Relapsing Fevers: Louse-Borne-Tick-Borne. New York: Map, American Geographical Society.
13. Cutler SJ (2006) Possibilities for Relapsing Fever reemergence. *Emerg Infect Dis* 12: 369-374. doi:10.3201/eid1203.050899. PubMed: 16704771.
14. Sparrow H (1958) Etude du foyer éthiopien de fièvre récurrente. *Bull Wld Hlth Org* 19: 673-710.
15. Eguale T, Abate G, Balcha F (2002) Relapsing fever in Hossana, Ethiopia: a clinical and epidemiological study. *Ethiop. J Health Sci* 12: 103-108.
16. Ramos JM, Malmierca E, Reyes F, Tesfamariam A (2008) Results of a 10-year survey of louse-borne relapsing fever in southern Ethiopia: a decline in endemicity. *Ann Trop Med Parasitol* 102: 467-469. doi: 10.1179/136485908X300887. PubMed: 18577339.
17. Ross PH, Milne AD (1904) Tick Fever. *BMJ* ii: 1453-1454.
18. Dutton JE, Todd JL (1905) The nature of tick fever in the Eastern part of the Congo Free State, with notes on the distribution and bionomics of the tick. *BMJ* 2341: 1259-1260.
19. Nicolle C, Anderson C (1928) Présence au Maroc du spirochète de la fièvre récurrente d'Espagne 17. *Arch Inst Pasteur Tunis*. pp. 83-107.
20. Mathis C, Durieux C (1932) Identité, à Dakar, de *Spirochaeta duttoni* var. *crocidurae* et du spirochète infectant dans la nature *Ornithodoros erraticus*. *Bull Soc Pathol Exot* 21: 472-485.
21. Leeson HS (1952) The recorded distribution of *Ornithodoros moubata* (Murray) (Acarina). *Bull Entomol Res* 43: 407-411. doi:10.1017/S000748530004058X.
22. Walton GA (1962) The *Ornithodoros moubata* superspecies problem in relation to human relapsing fever epidemiology. In: Aspects of disease transmission by ticks. *Symp Zool Soc Lond*: 83-153.
23. Morel PC (1965) Les tiques d'Afrique et du Bassin Méditerranéen. Maisons-Alfort: IEMVT, 2003.
24. Barclay AJG, Coulter JBS (1990) Tick-borne relapsing fever in central Tanzania. *Trans R Soc Trop Med Hyg* 84: 852-856. doi: 10.1016/0035-9203(90)90106-O. PubMed: 2096523.
25. Goubau PF, Munyangeyo C (1983) Fièvre récurrente à tiques et grossesse. Une étude clinique au Rwanda. *Ann Soc Belg Med Trop*; 63: 347-355. PubMed: 6667057.
26. Hornus P (1928) Note au sujet de la fièvre récurrente marocaine, 17. *Tunis: Arch Inst Pasteur*. pp. 327-331.
27. Sergent A, Manceaux A, Balliste R (1933) Premier cas de fièvre récurrente hispano-africaine observé en Algérie. *Bull Soc Pathol Exot* 26: 906-908.
28. Anderson C (1935) Sur la présence d'*O. erraticus* infecté par *Sp. hispanicum* dans la banlieue de Tunis. *Tunis: Arch Inst Pasteur*; 22: 350-363.
29. Chabaud AG (1954) L'*Ornithodoros erraticus* (Lucas 1849); multiplicité de ses races. *Ann Parasitol Hum Comp* 29: 89-130. PubMed: 13181221.
30. Sarih M, Garnier M, Boudebouch N, Bouattour A, Rihani A et al. (2009) *Borrelia hispanica* relapsing fever, Morocco. *Emerg Infect Dis* 10: 1626-1629. PubMed: 19861058.
31. Bouattour A, Garnier M, M'Ghirbi Y, Sarih M, Gern L et al. (2010) *Borrelia crocidurae* infection of *Ornithodoros erraticus* (Lucas, 1849) ticks in Tunisia. *Vector Borne Zoonotic Dis* 10: 825-830. doi:10.1089/vbz.2009.0151. PubMed: 20420529.
32. De Buen S (1926) Note préliminaire sur l'épidémiologie de la fièvre récurrente espagnole. *Ann Parasit* 4: 185-192.
33. Mathis C, Durieux C, Advier M (1934) Transmission naturelle et expérimentale à l'homme du spirochète infectant dans la nature, à Dakar, la tique: *Ornithodoros erraticus* var. *maroccanus*. *Ann Inst Pasteur* 52: 166-178.
34. Bergeret C, Raoult A (1946) La fièvre récurrente à tiques à Dakar. *Bull Med AOF* 3: 29-56.
35. Boiron H (1949) Considérations sur la fièvre récurrente à tiques au Sénégal. L'importance du rat comme réservoir de virus. *Bull Soc Pathol Exot* 42: 62-70.
36. Trape JF, Godeluck B, Diatta G, Rogier C, Legros F et al. (1996) The spread of tick-borne borreliosis in West Africa and its relationship to sub-saharan drought. *Am J Trop Med Hyg* 54: 289-293. PubMed: 8600768.
37. Schwan TG, Anderson JM, Lopez JE, Fischer RJ, Raffel SJ et al. (2012) Endemic foci of the tick-borne relapsing fever spirochete *Borrelia crocidurae* in Mali. Africa: West, and the potential for human infection. *Plos Negl Trop Dis* 6, e. p. 1924.
38. Trape JF, Duplantier JM, Bouganali H, Rogier C, Legros F et al. (1991) Tick-Borne Borreliosis in West Africa. *Lancet* 337: 473-475. doi: 10.1016/0140-6736(91)93404-W. PubMed: 1671481.
39. Vial L, Diatta G, Tall A, Ba EH, Bouganali H et al. (2006) Incidence of tick-borne relapsing fever in West Africa: longitudinal study. *Lancet* 368: 37-43. doi:10.1016/S0140-6736(06)68968-X. PubMed: 16815378.
40. Diatta G, Trape JF, Legros F, Rogier C, Duplantier JM (1994) A comparative study of three methods of detection of *Borrelia crocidurae* in wild rodents in Senegal. *Trans R Soc Trop Med Hyg* 88: 423-424. doi:10.1016/0035-9203(94)90412-X. PubMed: 7570827.
41. Wilson DE, Reeder DM (2005) Mammals of the world: a taxonomic and geographic reference, vol 1 & 2. Baltimore: John Hopkins University Press. 2142 pp.
42. Granjon L, Duplantier JM (2009) Les rongeurs de l'Afrique sahélo-soudanienne. *Mars IRD*: 215.
43. Granjon L, Dobigny G (2003) The importance of chromosomally-based identifications for correct understanding of African rodent zoogeography: Lake Chad murids as an example. *Mamm Rev* 33: 77-91. doi:10.1046/j.1365-2907.2003.00007.x.
44. Lecompte E, Denys C, Granjon L (2005) Confrontation of morphological and molecular data: the *Praomys* group (Rodentia, Murinae) as a case of adaptive convergences and morphological stasis. *Mol Phylogenet Evol* 37: 899-919. doi:10.1016/j.ympev.2005.06.018. PubMed: 16111900.
45. Dobigny G, Aniskin V, Granjon L, Cornette R, Volobouev V (2005) Recent radiation in West African Taterillus (Rodentia, Gerbillinae): the concerted role of climatic and chromosome changes. *Heredity* 95: 358-368. doi:10.1038/sj.hdy.6800730. PubMed: 16106262.
46. Colangelo P, Granjon L, Taylor PJ, Corti M (2007) Evolutionary systematics in African gerbilline rodents of the genus *Gerbilliscus*: inference from mitochondrial genes. *Mol Phylogenet Evol* 42: 797-806. doi:10.1016/j.ympev.2006.10.001. PubMed: 17113792.
47. Dobigny G, Tataru C, Kane M, Gauthier P, Brouat C et al. (2011) A cytotoxic and DNA-based Survey of rodents from Northern Cameroon and Western Chad. *Mamm Biol* 76: 417-427.
48. Fukunaga M, Ushijima Y, Aoki Y, Talbert A (2001) Detection of *Borrelia duttoni*, a tick-borne relapsing fever agent in Central Tanzania, within ticks by Flagellin gene-based nested polymerase chain reaction. *Vector Borne Zoonotic Dis* 1: 331-338. doi:10.1089/15303660160025949. PubMed: 12653131.
49. Buniks J, Tsao J, Berglund J, Fish D, Barbour AG (2004) Sequence typing reveals extensive strain diversity of the Lyme borreliosis agents *Borrelia burgdorferi* in North America and *Borrelia afzelii* in Europe. *Microbiology* 150: 1741-1755. doi:10.1099/mic.0.26944-0. PubMed: 15184561.
50. Hall TA (1999) BioEdit: a user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for Windows 95/98/NT. *Nucleic Acids Symp S* 41: 95-98.
51. Posada D, Crandall KA (1998) MODELTEST: testing the model of DNA substitution. *Bioinformatics* 14: 817-818. doi:10.1093/bioinformatics/14.9.817. PubMed: 9918953.
52. Hasegawa M, Kishino H, Yano T (1985) Dating of the Human-Ape splitting by a molecular clock of mitochondrial-DNA. *J Mol Evol* 22: 160-174. doi:10.1007/BF02101694. PubMed: 3934395.
53. Guindon S, Gascuel O (2003) A simple, fast, and accurate algorithm to estimate large phylogenies by maximum likelihood. *Syst Biol* 52: 696-704. doi:10.1080/10635150390235520. PubMed: 14530136.
54. Vitorino L, Chelo IM, Bacellar F, Zé-Zé L (2007) Rickettsiae phylogeny: a multigenic approach. *Microbiology* 153: 160-168.
55. Chausov EV, Ternovoi VA, Protopopova EV, Konovalova SN, Kononova YV et al. (2010) Genetic diversity of tick-borne pathogens in Tomsk and environs. *Entomol Rev* 90: 240-250. doi:10.1134/S0013873810020090.
56. Tamura K, Peterson D, Peterson N, Stecher G, Nei M et al. (2011) MEGA5: Molecular Evolutionary Genetics Analysis using Maximum Likelihood, Evolutionary Distance, and Maximum Parsimony Methods. *Mol Biol Evol* 28: 2731-2739. doi:10.1093/molbev/msr121. PubMed: 21546353.
57. Mahé G, Rouché N, Dieulin C, Boyer JF, Ibrahim B et al. (2012) Carte des pluies annuelles en Afrique / Annual rainfall map of Africa. *Bondy: IRD*.
58. R-Development Core Team (2006) R: a language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.



59. Blanc G, Maurice A (1948) Contribution à l'étude du spirochète de Goulimine. Bull Soc Pathol Exot 41: 139-141.
60. Diatta G, Souidi Y, Granjon L, Arnathau C, Durand P et al. (2012) Epidemiology of tick-borne borreliosis in Morocco. Plos Neg Trop. Drosophila Inf Serv 6: e1810.
61. Venzal JM, Estrada-Peña A, Mangold AJ, González-Acuña D, Guglielmone AA (2008) The *Ornithodoros (Alectorobius) talaje* species group (Acari: Ixodida: Argasidae): description of *Ornithodoros (Alectorobius) rioplatensis* n. sp. from southern South America. J Med Entomol 45: 832-840. doi: 10.1603/0022-2585(2008)45[832:TOATSG]2.0.CO;2. PubMed: 18826024.
62. Lucas H (1849) Exploration scientifique de l'Algérie. Zoologie I. Histoire naturelle des animaux articulés Première partie. Crustacés, arachnides, myriapodes et hexapodes. Paris: Imprimerie Nationale. pp. 316-317. PubMed: 20794664
63. Larrousse F (1923) Présence au Kef (Tunisie) d'une nouvelle espèce du genre *Ornithodoros* : *O. normandi* n. sp. Ann Parasit 1: 170-177.
64. Velu H (1919) Existence au Maroc d'une nouvelle espèce d'ornithodore. Bull Soc Pathol Exot 12: 99-104.
65. Sautet J, Witkowski M (1944) A propos d'un ornithodore trouvé à Gao. Bull Soc Pathol Exot; 37: 182-188.
66. Colas Belcour J (1930) Sur l'identité d'*Ornithodoros erraticus* Lucas et d'*O. maroccanus* Vélú. Arch Inst Pasteur Tunis 19: 1-12
67. Camicas JL, Hervy JP, Adam F, Morel PC (1998) Les Tiques du monde. Nomenclature, stades décrits, hôtes, répartition. / The Ticks of the World Nomenclature, Described stages, Hosts, Distribution (Acarida, Ixodida). Paris ORSTOM: 233.
68. Guglielmone AA, Robbins RG, Apanaskevich DA, Petney TN, Estrada-Peña A et al. (2010) The Argasidae, Ixodidae and Nuttalliellidae (Acari: Ixodida) of the world: a list of valid species names. Zootaxa 2528: 1-28.
69. Neumann G (1896) Révision de la famille des Ixodidés. Mem Soc Zool France 9: 25-44.
70. Balthazard M, Bahmanyar M, Modifi C (1950) *Ornithodoros erraticus* et fièvres récurrentes. Bull Soc Pathol Exot 43: 595-601.
71. Morel PC, Magimel J (1959) Les tiques des animaux domestiques de la région de Fort-Lamy (Tchad) et Fort-Foureaux (Cameroun). Ann Parasitol Hum Comp 12: 53-58.
72. Trape JF (1985) Rapid evaluation of malaria parasite density and standardization of thick smear examination for epidemiological investigations. Trans R Soc Trop Med Hyg 79: 181-184. doi: 10.1016/0035-9203(85)90329-3. PubMed: 3890280.
73. Nordstrand A, Bunikis I, Larsson C, Tsogbe K, Schwan TG et al. (2007) Tickborne relapsing fever diagnosis obscured by malaria, Togo. Emerg Infect Dis 13: 117-123. doi:10.3201/eid1301.060670. PubMed: 17370524.
74. Leeson HS (1953) Some notes on the recorded distribution of old world species of *Ornithodoros* (Acarina). Bull Entomol Res 44: 517-526. doi: 10.1017/S0007485300025591.
75. Hoogstraal H (1956) *Ornithodoros*. In: Ticks of the Sudan. Cairo, U.S.: Naval Medical Research Unit No. 3, Research Report NM 005 050.29.07, 113-130
76. Cutler SJ, Abdissa A, Trape JF (2009) New concepts for the old challenges of African relapsing fever borreliosis. Clin Microbiol Infect 15: 400-406. doi:10.1111/j.1469-0691.2009.02819.x. PubMed: 19489922.
77. Kisinza WN, McCall PJ, Mitani H, Talbert A, Fukunaga M (2003) A newly identified tick-borne *Borrelia* species and relapsing fever in Tanzania. Lancet 362: 1283-1284. doi:10.1016/S0140-6736(03)14609-0. PubMed: 14575974.

**Supplementary Table S1.** Detailed results of *Ornithodoros* ticks surveys

| Study area         | Coordinates of sampling sites | Date          | Burrows   |                          | <i>Ornithodoros</i> species           |
|--------------------|-------------------------------|---------------|-----------|--------------------------|---------------------------------------|
|                    |                               |               | Studied   | With <i>Ornithodoros</i> |                                       |
| <b>Morocco</b>     |                               |               |           |                          |                                       |
| Tetouan 1          | 35°52'N/05°21'W               | 28/10/2009    | 10 (N)*   | 7 (70%)*                 | <i>O. maroccanus</i>                  |
| Tetouan 2          | 35°47'N/05°20'W               | 28/10/2009    |           |                          |                                       |
| Tetouan 3          | 35°51'N/05°20'W               | 28/10/2009    |           |                          |                                       |
| Izemmourèn         | 34°11'N/03°59'W               | 29/10/2009    | 15 (F)    | 4 (27%)                  | <i>O. maroccanus</i>                  |
| Berkane Oued Kiss  | 34°59'N/02°08'W               | 12/10/2006    | 30 (N)    | 15 (50%)                 | <i>O. maroccanus</i>                  |
| Ghouazi / Garba    | 35°01'N/06°08'W               | 12/05/2010    | 15 (F)    | 15 (100%)                | <i>O. costalis</i>                    |
| Kenitra 1          | 34°18'N/06°29'W               | 10/10/2006    | 15 (N)*   | 2 (13%)*                 | <i>O. costalis</i>                    |
| Kenitra 2          | 34°18'N/06°28'W               | 10/10/2006    |           |                          |                                       |
| Oued Ouerrha       | 34°34'N/06°04'W               | 30/10/2009    | 10 (F)    | 5(50%)                   |                                       |
| Ouled Ziane 1      | 34°33'N/06°22'W               | 31/10/2009    | 7 (PD)*   | 1 (14%)*                 | Not tested                            |
| Ouled Ziane 2      | 34°32'N/06°20'W               | 31/10/2009    |           |                          |                                       |
| Rabat              | 34°00'N/06°49'W               | 12/05/2010    | 15 (N)    | 13 (87%)                 | <i>O. occidentalis</i>                |
| West Aiti Yadine   | 34°00'N/06°02'W               | 13/05/2010    | 15 (N/F)  | 10 (67%)                 | <i>O. sonrai</i>                      |
| Fes (Diamant Vert) | 33°59'N/05°01'W               | 14/05/2010    | 15 (N)    | 9 (60%)                  | <i>O. occidentalis</i>                |
| Beb-Lerba 1        | 34°00'N/04°05'W               | 15/05/2010    | 8 (N)*    | 1 (12%)*                 | <i>O. occidentalis</i>                |
| Beb-Lerba 2        | 34°02'N/04°04'W               | 15/05/2010    |           |                          |                                       |
| Beb-Lerba 3        | 34°06'N/04°02'W               | 15/05/2010    |           |                          |                                       |
| Aïn-Benimathar (1) | 34°05'N/02°03'W               | 13-14/10/2006 | 30 (N)*   | 13 (43%)*                | <i>O. maroccanus, O. sonrai</i>       |
| Aïn-Benimathar (2) | 34°07'N/02°02'W               | 13-13/10/2006 |           |                          |                                       |
| Oued Mellah        | 33°39'N/07°23'W               | 11/05/2010    | 15 (N)    | 12 (80%)                 | <i>O. occidentalis</i>                |
| Bir-Jdid           | 33°22'N/08°00'W               | 23/10/2009    | 15 (F; N) | 10 (67%)                 | <i>O. maroccanus</i>                  |
| Oued Oum Er-Rbiat  | 32°56'N/08°03'W               | 18/05/2010    | 15 (N)    | 12 (80%)                 | <i>O. maroccanus</i>                  |
| Oued Grou 1        | 32°55'N/06°02'W               | 13/05/2010    | 9 (N)*    | 4 (44%)*                 | <i>O. occidentalis</i>                |
| Oued Grou 2        | 32°55'N/06°03'W               | 13/05/2010    |           |                          |                                       |
| Oued Choufcherk    | 33°02'N/04°00'W               | 16/05/2010    | 15 (N)    | 10 (67%)                 | <i>O. maroccanus, O. occidentalis</i> |
| Tendrara 1         | 33°01'N/02°00'W               | 14/10/2006    | 30 (N)*   | 2 (7%)*                  | <i>O. sonrai</i>                      |
| Tendrara 2         | 33°08'N/01°58'W               | 14/10/2006    |           |                          |                                       |
| Figuig             | 32°10'N/01°21'W               | 15/10/2006    | 10 (N)    | 3 (30%)                  | <i>O. sonrai</i>                      |
| Boudnib 1          | 31°59'N/03°59'W               | 17/10/2006    | 30 (N)*   | 4 (13%)*                 | <i>O. sonrai</i>                      |
| Boudnib 2          | 31°58'N/03°52'W               | 17/10/2006    |           |                          |                                       |
| Boudnib 3          | 31°58'N/03°55'W               | 17/10/2006    |           |                          |                                       |
| Marrakech          | 31°44'N/07°58'W               | 26/10/2009    | 15 (N)    | 13 (87%)                 | <i>O. maroccanus, O. sonrai</i>       |
| Oued Tensift 1     | 32°00'N/09°20'W               | 24/10/2009    | 16 (N/F)* | 8 (50%)*                 | <i>O. costalis, O. sonrai</i>         |



|                      |                 |               |            |                    |                                  |
|----------------------|-----------------|---------------|------------|--------------------|----------------------------------|
| Oued Tensift 2       | 32°02'N/09°19'W | 24/10/2009    |            |                    |                                  |
| Jbel Sarhro 1        | 30°56'N/05°50'W | 18-19/10/2006 | 30 (N)*    | 8 (27%)*           | <i>O. sonrai</i>                 |
| Jbel Sarhro 2        | 30°55'N/05°50'W | 18-19/10/2006 |            |                    |                                  |
| Tata                 | 29°53'N/08°05'W | 07/10/2006    | 30 (N)     | 14 (47%)           | <i>O. sonrai</i>                 |
| Guelmin              | 29°03'N/09°55'W | 06/10/2006    | 30 (N)     | 14 (47%)           | <i>O. merionesi</i>              |
| Sidi Akhfennir       | 27°57'N/11°57'W | 05/10/2006    | 30 (N)     | 15 (50%)           | <i>O. merionesi, O. costalis</i> |
| Sidi Ahmed 1         | 26°51'N/11°56'W | 04/10/2006    | 30 (N)*    | 2 (7%)*            | <i>O. merionesi</i>              |
| Sidi Ahmed 2         | 26°57'N/11°57'W | 04/10/2006    |            |                    |                                  |
| Sidi Ahmed 3         | 26°53'N/11°57'W | 04/10/2006    |            |                    |                                  |
| Boujdour             | 26°13'N/14°20'W | 01/10/2006    | 10 (N)     | 2 (20%)            | <i>O. costalis</i>               |
| Bou Kra 1            | 25°58'N/12°52'W | 03/10/2006    | 30 (N)*    | 0*                 |                                  |
| Bou Kra 2            | 26°02'N/12°50'W | 03/10/2006    |            |                    |                                  |
| Galtat Zemmour       | 25°13'N/12°26'W | 02/10/2006    | 20 (N)     | 2 (10%)            | <i>O. sonrai</i>                 |
| El Argoub            | 23°33'N/15°53'W | 01/10/2006    | 10 (N)     | 5 (50%)            | <i>O. costalis</i>               |
| Aousserd             | 22°37'N/14°28'W | 13/11/2011    | 12 (N)     | 1 (8%)             | Not tested                       |
| Lahmiris             | 22°04'N/16°35'W | 14/11/2011    | 6 (N)      | 1 (17%)            | <i>O. costalis</i>               |
| Adrar Souttouf       | 21°51'N/15°29'W | 16/11/2011    | 12 (N)     | 2 (17%)            | <i>O. sonrai</i> ssp.            |
| <b>Total Morocco</b> |                 |               | <b>605</b> | <b>239 (39.5%)</b> |                                  |
| <b>Algeria</b>       |                 |               |            |                    |                                  |
| Vieille Calle 1      | 36°54'N/08°20'E | 08-10/12/2009 | 23 (N)*    | 8 (35%)*           | <i>O. erraticus</i>              |
| Vieille Calle 1      | 36°53'N/08°24'E | 09/10/12/2009 |            |                    |                                  |
| Vieille Calle 2      | 36°53'N/08°31'E | 08-10/12/2009 |            |                    |                                  |
| Vieille Calle 3      | 36°54'N/08°31'E | 08-10/12/2009 |            |                    |                                  |
| Vieille Calle 4      | 36°53'N/08°34'E | 09-10/12/2009 |            |                    |                                  |
| Salah Bouchaour      | 36°41'N/06°51'N | 06/06/2010    | 5 (N)      | 5 (100%)           | <i>O. erraticus</i>              |
| Taher 1              | 36°47'N/05°54'E | 31/05/2010    | 10 (N)*    | 2 (20%)*           | <i>O. erraticus</i>              |
| Taher 2              | 36°49'N/05°55'E | 31/05/2010    |            |                    |                                  |
| Taher 3              | 36°48'N/05°54'E | 31/05/2010    |            |                    |                                  |
| Taya 1               | 36°00'N/05°58'E | 15/05/2009    | 45 (N)*    | 0*                 |                                  |
| Taya 2               | 35°48'N/06°06'E | 14/05/2009    |            |                    |                                  |
| Taya 3               | 35°55'N/05°52'E | 05/06/2010    |            |                    |                                  |
| M'Chounèche 1        | 34°55'N/05°58'E | 11/05/2009    | 36 (N)*    | 19 (53%)*          | <i>O. sonrai, O. normandi</i>    |
| M'Chounèche 2        | 34°57'N/06°00'E | 11/05/2009    |            |                    |                                  |
| M'Chounèche 3        | 34°56'N/05°58'E | 18/05/2009    |            |                    |                                  |
| M'Chounèche 1 2010   | 34°55'N/05°58'E | 11/05/2010    |            |                    |                                  |
| Oued Melah 1         | 33°56'N/05°42'E | 13/05/2009    | 33 (N)*    | 3 (9%)*            | <i>O. sonrai</i>                 |
| Oued Melah 2         | 34°00'N/05°52'E | 13/05/2009    |            |                    |                                  |
| Oued Melah 1 2010    | 33°56'N/05°42'E | 22/10/2010    |            |                    |                                  |
| Sidi Madhi/Sebseb 1  | 33°03'N/06°06'E | 12/05/2009    | 30 (N)*    | 0*                 |                                  |
| Sidi Madhi/Sebseb 2  | 32°10'N/03°33'E | 20/06/2011    |            |                    |                                  |

|                      |                 |               |            |                   |                        |
|----------------------|-----------------|---------------|------------|-------------------|------------------------|
| Sidi Madhi/Sebseb 3  | 32°05'N/03°46'E | 20/06/2011    |            |                   |                        |
| Oued Abani           | 27°39'N/00°20'W | 22/06/2011    | 30 (N)     | 0                 |                        |
| Taghit 1             | 31°02'N/02°11'W | 23/06/2011    | 12 (N)*    | 0*                |                        |
| Taghit 2             | 31°10'N/02°16'W | 24/06/2012    |            |                   |                        |
| Abadla 1             | 30°59'N/02°43'W | 24/06/2012    | 14 (N)*    | 1 (7%)*           | <i>O. sonrai</i>       |
| Abadla 2             | 31°05'N/02°47'W | 24/06/2012    |            |                   |                        |
| Oued Saket 1         | 36°49'N/04°56'E | 02/06/2010    | 24 (N/F)*  | 1 (4%)*           | <i>O. erraticus</i>    |
| Oued Saket 2         | 36°45'N/05°05'E | 01/06/2010    |            |                   |                        |
| Oued Saket 3         | 36°46'N/05°05'E | 01/06/2010    |            |                   |                        |
| Oued Saket 4         | 36°47'N/05°00'E | 02/06/2010    |            |                   |                        |
| Oued Saket 5         | 36°42'N/05°00'E | 02/06/2010    |            |                   |                        |
| Sétif 1              | 35°59'N/05°04'E | 03/06/2010    | 17 (N)*    | 1 (6%)*           | <i>O. normandi</i>     |
| Sétif 2              | 36°12'N/05°30'E | 05/06/2010    |            |                   |                        |
| Bouira               | 36°25'N/03°57'E | 07/06/2010    | 8 (N)      | 5 (63%)           | <i>O. occidentalis</i> |
| Melouza 1            | 35°51'N/04°06'E | 04/06/2010    | 10 (N)*    | 2 (20%)*          | <i>O. normandi</i>     |
| Melouza 2            | 35°54'N/04°06'E | 04/06/2010    |            |                   |                        |
| Oued Magtaa          | 35°09'N/04°06'E | 19/10/2010    | 7 (N)      | 4 (57%)           | <i>O. sonrai</i>       |
| El Mesrane 1         | 34°56'N/03°06'E | 20-21/12/2010 | 30 (N)*    | 0*                |                        |
| El Mesrane 2         | 35°03'N/03°02'E | 20-21/12/2010 |            |                   |                        |
| El Mesrane 3         | 35°06'N/03°01'E | 20-21/12/2010 |            |                   |                        |
| Berrouaghia 1        | 36°09'N/02°58'E | 09/06/2010    | 15 (N)*    | 3 (20%)*          | <i>O. occidentalis</i> |
| Berrouaghia 2        | 35°57'N/02°50'E | 09/06/2010    |            |                   |                        |
| Chlef                | 36°05'N/01°06'E | 10/06/2010    | 5 (N)      | 4 (80%)           | <i>O. occidentalis</i> |
| Ténès                | 36°28'N/01°07'E | 11/06/2010    | 6 (N)      | 1 (17%)           | <i>O. occidentalis</i> |
| Ghazaouet            | 35°03'N/01°50'W | 04/06/2012    | 6 (N)      | 2 (33%)           | <i>O. marocanus</i>    |
| Beni-Bahdel          | 34°42'N/01°31'W | 03/06/2012    | 5 (N)      | 1 (20%)           | <i>O. marocanus</i>    |
| Asla                 | 33°00'N/00°08'W | 05/06/2012    | 35 (N)     | 0                 |                        |
| Bougto               | 34°00'N/00°02'E | 06/06/2012    | 8 (N)      | 4 (50%)           | <i>O. sonrai</i>       |
| Saïda Mt Daïa 1      | 34°56'N/00°05'W | 08/06/2012    | 10 (N)*    | 2 (50%)*          | <i>O. rupestris</i>    |
| Saïda Mt Daïa 2      | 34°48'N/00°03'E | 08/06/2012    |            |                   |                        |
| Mostaganem 1         | 35°56'N/00°05'E | 09/06/2012    | 6 (N)      | 4 (67%)           | <i>O. rupestris</i>    |
| Mostaganem 2         | 35°58'N/00°08'E | 10/06/2012    | 5 (N)      | 2 (40%)           | <i>O. costalis</i>     |
| <b>Total Algeria</b> |                 |               | <b>435</b> | <b>74 (17.0%)</b> |                        |
| <b>Tunisia</b>       |                 |               |            |                   |                        |
| Bizerte 1            | 37°19'N/09°50'E | 22/05/2010    | 12 (N)*    | 1 (13%)*          | <i>O. normandi</i>     |
| Bizerte 2            | 37°14'N/09°43'E | 22/05/2010    |            |                   |                        |
| Bizerte 3            | 37°01'N/09°43'E | 21/05/2010    |            |                   |                        |
| Bizerte 4            | 37°00'N/09°44'E | 21/05/2010    |            |                   |                        |
| Bizerte 5            | 37°19'N/09°51'E | 22/05/2010    |            |                   |                        |
| Tabarka 1            | 36°51'N/08°43'E | 22/05/2010    | 6 (N)*     | 2 (33%)*          | <i>O. erraticus</i>    |

|                      |                 |               |            |                   |                                         |
|----------------------|-----------------|---------------|------------|-------------------|-----------------------------------------|
| Tabarka 2            | 36°57'N/08°47'E | 22/05/2010    |            |                   |                                         |
| Oudhna (Tunis)       | 36°36'N/10°10'E | 02/12/2010    | 3 (F)      | 2 (67%)           | <i>O. normandi</i> , <i>O. costalis</i> |
| Le Kef               | 36°07'N/08°38'E | 23/05/2010    | 6 (N)      | 4 (67%)           | <i>O. normandi</i>                      |
| Kairouan Sud         | 35°03'N/10°02'E | 23/05/2010    | 10 (N)     | 6 (60%)           | <i>O. kairouanensis</i>                 |
| Oued Ramel           | 34°07'N/09°58'E | 29/11/2010    | 8 (N)      | 3 (38%)           | <i>O. sonrai</i>                        |
| Tozeur 1             | 34°12'N/08°12'E | 01/12/2010    | 17 (N)*    | 2 (12%)*          | <i>O. sonrai</i>                        |
| Tozeur 2             | 34°00'N/08°10'E | 01/12/2010    |            |                   |                                         |
| Tozeur 3             | 34°01'N/08°12'E | 01/12/2010    |            |                   |                                         |
| Tozeur 4             | 34°06'N/08°15'E | 01/12/2010    |            |                   |                                         |
| Tozeur 5             | 34°09'N/08°16'E | 01/12/2010    |            |                   |                                         |
| Ben Guerdane 1       | 33°08'N/11°02'E | 30/11/2010    | 18 (N)*    | 2 (11%)*          | <i>O. sonrai</i>                        |
| Ben Guerdane 2       | 33°08'N/11°05'E | 30/11/2010    |            |                   |                                         |
| Ben Guerdane 3       | 33°07'N/11°04'E | 30/11/2010    |            |                   |                                         |
| Gafsa                | 34°16'N/09°04'E | 04/10/2010    | 2 (N)      | 1 (50%)           | <i>O. normandi</i>                      |
| <b>Total Tunisia</b> |                 |               | <b>82</b>  | <b>23 (28.1%)</b> |                                         |
| <b>Mauritania</b>    |                 |               |            |                   |                                         |
| Mbalou 1             | 15°01'N/12°04'W | 15/11/2003    | 30 (N)*    | 17 (57%)*         | <i>O. sonrai</i>                        |
| Mbalou 2             | 15°02'N/12°05'W | 15/11/2003    |            |                   |                                         |
| Soufa 1              | 15°56'N/12°01'W | 13/11/2003    | 30 (N/HD)* | 8 (27%)*          | <i>O. sonrai</i>                        |
| Soufa 2              | 15°56'N/12°04'W | 13/11/2003    |            |                   |                                         |
| Soufa 3              | 15°58'N/12°04'W | 13/11/2003    |            |                   |                                         |
| Soufa 4              | 15°58'N/12°05'W | 13/11/2003    |            |                   |                                         |
| Soufa 5              | 15°55'N/12°02'W | 14/11/2003    |            |                   |                                         |
| Iguéva 1             | 17°00'N/11°57'W | 17/11/2003    | 32 (N)*    | 0*                | <i>O. sonrai</i>                        |
| Iguéva 2             | 17°05'N/12°03'W | 17/11/2003    |            |                   |                                         |
| Nbeïka 2003          | 17°59'N/12°14'W | 18-19/11/2003 | 27 (N/PD)  | 11 (41%)          | <i>O. sonrai</i>                        |
| Nbeïka 2004          | 17°59'N/12°14'W | 14-16/10/2004 | 30 (N)     | 18 (60%)          | <i>O. sonrai</i>                        |
| Rachid / Ag Mouret 1 | 18°47'N/11°41'W | 20/11/2003    | 56 (N)*    | 1 (1.8%)*         | <i>O. sonrai</i>                        |
| Rachid / Ag Mouret 2 | 18°53'N/11°49'W | 21/11/2003    |            |                   |                                         |
| Rachid / Ag Mouret 3 | 19°11'N/11°55'W | 05/12/2007    |            |                   |                                         |
| Rachid / Ag Mouret 4 | 18°55'N/11°48'W | 05/12/2007    |            |                   |                                         |
| Oujeft               | 20°00'N/13°03'W | 21/11/2003    | 30 (N/PD)  | 2 (7%)            | <i>O. sonrai</i>                        |
| Aggui 1              | 21°01'N/13°07'W | 26-27/11/2003 | 31 (N)     | 1 (3%)            | <i>O. sonrai</i>                        |
| Aggui 2              | 21°10'N/13°06'W | 26/11/2003    |            |                   |                                         |
| Touajil 1            | 22°07'N/12°41'W | 28/11/2003    | 30 (N)*    | 0*                | <i>O. sonrai</i>                        |
| Touajil 2            | 22°02'N/12°49'W | 28/11/2003    |            |                   |                                         |
| Guelb el Dlim 1      | 22°59'N/12°00'W | 30/11/2003    | 36 (N)*    | 1 (3%)*           | <i>O. sonrai</i>                        |
| Guelb el Dlim 2      | 22°55'N/12°09'W | 30/11/2003    |            |                   |                                         |
| Araguib el Jahfa     | 19°47'N/12°14'W | 12/10/2004    | 13 (N)     | 0                 |                                         |
| Nouadhibou           | 21°16'N/16°50'W | 25/11/2005    | 6 (N)      | 2 (33%)           | <i>O. sonrai</i> ssp.                   |

|                         |                 |               |                    |                   |                  |
|-------------------------|-----------------|---------------|--------------------|-------------------|------------------|
| Azougui                 | 20°34'N/13°07'W | 03/12/2007    | 6 (N)              | 0                 |                  |
| Tiouilît 1              | 18°55'N/16°10'W | 26/11/2007    | 30 (N)*            | 0*                |                  |
| Tiouilît 2              | 18°52'N/16°09'W | 26/11/2007    |                    |                   |                  |
| Tiouilît 3              | 18°36'N/16°04'W | 26/11/2007    |                    |                   |                  |
| Tafolli                 | 18°45'N/15°34'W | 27/11/2007    | 8                  | 0                 |                  |
| Nouakchott              | 18°00'N/16°01'W | 20-21/04/2007 | 30 (N)             | 0                 |                  |
| Ganeb 1                 | 18°29'N/10°59'W | 07/12/2007    | 30 (N)*            | 0*                |                  |
| Ganeb 2                 | 18°27'N/10°50'W | 07/12/2007    |                    |                   |                  |
| Makhrouga Ouest         | 18°21'N/08°58'W | 09/12/2007    | 30 (N)             | 0                 |                  |
| Enji 1                  | 18°03'N/08°01'W | 10/12/2007    | 30 (N)*            | 0*                |                  |
| Enji 2                  | 17°59'N/08°01'W | 10/12/2007    |                    |                   |                  |
| Ibibi Oglat             | 17°00'N/16°05'W | 19-20/04/2007 | 30 (N)             | 8 (27%)           | <i>O. sonrai</i> |
| Amridjiel               | 17°00'N/10°59'W | 03-04/12/2006 | 30 (N)             | 15 (50%)          | <i>O. sonrai</i> |
| Agerkaya-2              | 16°10'N/13°00'W | 16/12/2006    | 30 (N)             | 11 (37%)          | <i>O. sonrai</i> |
| Sallem 1                | 16°05'N/11°00'W | 06/12/2006    | 30 (N)*            | 1 (3%)*           | <i>O. sonrai</i> |
| Sallem 2                | 16°04'N/11°00'W | 06/12/2006    |                    |                   |                  |
| Sallem 3                | 16°04'N/11°02'W | 06/12/2006    |                    |                   |                  |
| El Beyyed 1             | 16°53'N/09°59'W | 14-15/03/2007 | 30 (HD/PD/N)*      | 0*                |                  |
| El Beyyed 2             | 16°53'N/10°00'W | 14-15/03/2007 |                    |                   |                  |
| Te-Nguembou             | 16°03'N/09°55'W | 16/03/2007    | 30 (N)             | 0                 |                  |
| Banète 1                | 15°51'N/09°06'W | 17-18/03/2007 | 30 (N)*            | 0*                |                  |
| Banète 2                | 15°50'N/09°06'W | 17-18/03/2007 |                    |                   |                  |
| Aïn-Biré 1              | 16°08'N/08°06'W | 19-20/03/2007 | 30 (N/PD)*         | 0*                |                  |
| Aïn-Biré 2              | 16°09'N/08°06'W | 20/03/2007    |                    |                   |                  |
| Archane 1               | 16°00'N/07°28'W | 29-30/03/2007 | 30<br>(HD/PD/N/F)* | 0*                |                  |
| Archane 2               | 16°00'N/07°29'W | 29-30/03/2007 |                    |                   |                  |
| Chgueig 1               | 16°01'N/07°06'W | 21/03/2007    | 30 (PD/HD/N)*      | 0*                |                  |
| Chgueig 2               | 16°01'N/07°05'W | 21-22/03/2007 |                    |                   |                  |
| Chgueig 3               | 16°02'N/07°05'W | 21-22/03/2007 |                    |                   |                  |
| Chgueig 4               | 16°02'N/07°06'W | 21-22/03/2007 |                    |                   |                  |
| Chgueig 5               | 16°04'N/07°07'W | 22/03/2007    |                    |                   |                  |
| Emmat Lakarich 1        | 15°59'N/06°30'W | 23-24/03/2007 | 30 (N/HD/PD)*      | 0*                |                  |
| Emmat Lakarich 2        | 15°59'N/06°29'W | 23-24/03/2007 |                    |                   |                  |
| Lambasite               | 15°51'N/06°07'W | 25-26/03/2007 | 30 (N)             | 0                 |                  |
| Lekrysse 1              | 15°30'N/07°01'W | 27-28/03/2007 | 30 (N/HD/PD)*      | 0*                |                  |
| Lekrysse 2              | 15°30'N/07°00'W | 27-28/03/2007 |                    |                   |                  |
| <b>Total Mauritania</b> |                 |               | <b>905</b>         | <b>96 (10.6%)</b> |                  |
| <b>Senegal</b>          |                 |               |                    |                   |                  |
| Keur Ngor               | 13°58'N/16°01'W | 10/05/2003    | 30 (F/HD)          | 6 (20%)           | <i>O. sonrai</i> |
| Maka Yop                | 14°01'N/15°01'W | 15-16/09/2005 | 30 (HD)            | 17 (57%)          | <i>O. sonrai</i> |

|                       |                 |               |                 |           |                       |
|-----------------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------|-----------------------|
| Kalbirom 1            | 13°59'N/14°01'W | 08/05/2003    | 60 (N)*         | 0*        |                       |
| Kalbirom 2            | 13°59'N/14°00'W | 08/05/2003    |                 |           |                       |
| Kalbirom 3            | 13°53'N/14°06'W | 09/05/2003    |                 |           |                       |
| Kalbirom 4            | 13°53'N/14°07'W | 09/05/2003    |                 |           |                       |
| Kéniéba 1             | 14°05'N/12°03'W | 06/05/2003    | 30 (N/HD)*      | 13 (53%)* | <i>O. sonrai</i>      |
| Kéniéba 2             | 14°06'N/12°03'W | 07/05/2003    |                 |           |                       |
| Kouthia               | 14°04'N/13°08'W | 17/09/2005    | 30 (HD)         | 12 (40%)  | <i>O. sonrai</i>      |
| Khor (NW Rosso)       | 16°30'N/15°55'W | 18-19/06/2003 | 60 (N)          | 0         |                       |
| Taouey (Richard-Toll) | 16°27'N/15°42'W | 20-21/06/2003 | 30 (HD)         | 11 (37%)  | <i>O. sonrai</i> ssp. |
| Keur Momar Sarr 1     | 15°55'N/15°57'W | 01/07/2002    | 36 (N/F)*       | 6 (17%)*  | <i>O. sonrai</i>      |
| Keur Momar Sarr 2     | 16°10'N-16°08'W | 01/08/2002    |                 |           | <i>O. sonrai</i>      |
| Keur Momar Sarr 3     | 15°58'N/15°55'W | 30/06/2002    |                 |           |                       |
| Khanène Khar          | 15°30'N/16°01'W | 15-16/06/2003 | 30 (N/HD)       | 27 (90%)  | <i>O. sonrai</i>      |
| Thianène 1            | 15°04'N/16°00'W | 28/06/2002    | 35 (N/F)*       | 9 (26%)*  | <i>O. sonrai</i>      |
| Thianène 2            | 15°06'N/16°00'W | 28/06/2002    |                 |           |                       |
| Ina                   | 14°30'N/16°01'W | 13-14/06/2003 | 30 (HD/PD/N)    | 23 (77%)  | <i>O. sonrai</i>      |
| Colobane 1            | 14°38'N/15°42'W | 26/06/2002    | 40 (N/PD)*      | 6 (15%)*  | <i>O. sonrai</i>      |
| Colobane 2            | 14°36'N/15°41'W | 27/06/2002    |                 |           |                       |
| Kossanto 1            | 13°08'N/11°57'W | 18-20/0/2004  | 60 (HD/PD/N/F)* | 0*        |                       |
| Kossanto 2            | 13°08'N/11°58'W | 19/0/2004     |                 |           |                       |
| Dielmo 2002           | 13°43'N/16°24'W | 04/10/2002    | 342 (HD/PD)     | 54 (16%)  | <i>O. sonrai</i>      |
| Dielmo 2003           | 13°43'N/16°24'W | 17-19/05/2003 | 100 (N/F)       | 8 (8%)    | <i>O. sonrai</i>      |
| Dielmo 2012           | 13°43'N/16°24'W | 23/01/2012    | 25 (HD)         | 10 (40%)  | <i>O. sonrai</i>      |
| NDiop 2002            | 13°41'N/16°22'W | 30-31/08/2002 | 50 (HD)         | 0         |                       |
| NDiop 2003            | 13°41'N/16°22'W | 12-13/05/2003 | 50 (F)          | 1 (2%)    | <i>O. sonrai</i>      |
| NDiop 2012            | 13°41'N/16°22'W | 22/01/2012    | 30 (HD)         | 9 (30%)   | <i>O. sonrai</i>      |
| Keur Aliou Gueye      | 13°47'N/16°24'W | 23-24/06/2003 | 75 (HD/PD/F)    | 3 (4%)    | <i>O. sonrai</i>      |
| Keur Mama Lamine      | 13°46'N/16°23'W | 25-26/06/2003 | 50 (HD/PD)      | 1 (2%)    | <i>O. sonrai</i>      |
| Nioro Alassane Tall   | 13°46'N/16°20'W | 27-28/06/2003 | 47 (HD/PD)      | 5 (11%)   | <i>O. sonrai</i>      |
| Bani                  | 13°45'N/16°28'W | 25-27/10/2002 | 50 (HD/PD)      | 27 (54%)  | <i>O. sonrai</i>      |
| Firdaossi             | 13°45'N/16°27'W | 23-24/10/2002 | 44 (HD/PD)      | 19 (43%)  | <i>O. sonrai</i>      |
| Néma Ba               | 13°44'N/16°28'W | 20-22/10/2002 | 50 (HD/PD)      | 29 (58%)  | <i>O. sonrai</i>      |
| Santamba              | 13°44'N/16°25'W | 17-18/10/2002 | 50 (HD/PD)      | 2 (4%)    | <i>O. sonrai</i>      |
| Keur Lahine Socé 2002 | 13°44'N/16°25'W | 19-20/10/2002 | 41 (HD/PD)      | 5 (12%)   | <i>O. sonrai</i>      |
| Keur Lahine Socé 2003 | 13°44'N/16°25'W | 20-1/05/2003  | 50 (N/F)        | 11 (22%)  | <i>O. sonrai</i>      |
| Keur Lahine Fatim     | 13°44'N/16°24'W | 24-25/08/2002 | 50 (HD/PD)      | 0         |                       |
| Sabouya               | 13°43'N/16°25'W | 15-16/10/2002 | 50 (HD/PD)      | 19 (38%)  | <i>O. sonrai</i>      |
| Touba-Nding           | 13°43'N/16°25'W | 13-14/10/2002 | 50 (HD/PD)      | 10 (20%)  | <i>O. sonrai</i>      |
| Néma-Nding            | 13°42'N/16°25'W | 11-13/10/2002 | 50 (HD/PD)      | 1 (2%)    | <i>O. sonrai</i>      |

|                       |                 |               |              |           |                       |
|-----------------------|-----------------|---------------|--------------|-----------|-----------------------|
| Médina Santhie 2002   | 13°42'N/16°24'W | 26-27/08/2002 | 44 (HD/PD)   | 1 (2%)    | <i>O. sonrai</i>      |
| Médina Santhie 2003   | 13°42'N/16°24'W | 13-15/05/2003 | 51 (N/F)     | 1 (2%)    | <i>O. sonrai</i>      |
| Passi Nenderling 2002 | 13°42'N/16°23'W | 28-29/08/2002 | 50 (HD/PD)   | 1 (2%)    | <i>O. sonrai</i>      |
| Passi Nenderling 2003 | 13°42'N/16°23'W | 13-15/05/2003 | 50 (N/F)     | 3 (6%)    | <i>O. sonrai</i>      |
| Same                  | 13°37'N/16°25'W | 08-09/07/2003 | 50 (HD/PD)   | 0         |                       |
| Sirmang               | 13°37'N/16°23'W | 10-11/08/2003 | 50 HD/PD)    | 0         |                       |
| Keur Moussa Sèni      | 13°37'N/16°21'W | 12-15/07/2003 | 50 (HD/PD)   | 0         |                       |
| Madina Djikoye        | 13°37'N/16°17'W | 13-15/09/2002 | 50 (HD/PD)   | 0         |                       |
| Keur Lamine Diame     | 13°37'N/16°15'W | 16-19/09/2002 | 22 (HD/PD)   | 0         |                       |
| Santhie Ram           | 13°37'N/16°14'W | 20-22/09/2002 | 50 (HD/PD)   | 0         |                       |
| Tiolé (Dagana)        | 16°29'N/15°00'W | 08/11/2007    | 10 (HD/PD)   | 5 (50%)   | <i>O. sonrai</i> ssp. |
| Mbouba (Podor)        | 16°11'N/14°00'W | 10/11/2007    | 10 (F)       | 10 (100%) | <i>O. sonrai</i>      |
| Amadi Ounaré          | 15°21'N/13°01'W | 11/11/2007    | 10 (F)       | 4 (40%)   | <i>O. sonrai</i>      |
| Soulkhoul Thissé      | 14°03'N/15°31'W | 28-29/08/2008 | 30 (HD/PD)   | 2 (6.6%)  | <i>O. sonrai</i>      |
| Maka Gouye            | 13°48'N/14°56'W | 30-31/08/2008 | 24 (HD/PD)   | 5 (21%)   | <i>O. sonrai</i>      |
| Diokoul 1             | 14°02'N/14°33'W | 01/09/2008    | 30 (HD/PD)*  | 0*        |                       |
| Diokoul 2             | 14°01'N/14°33'W | 01/09/2008    |              |           |                       |
| Kouloul 1             | 13°58'N/13°24'W | 05-06/09/2008 | 30 (HD)*     | 0*        |                       |
| Kouloul 2             | 14°06'N/13°24'W | 05/09/2008    |              |           |                       |
| Kouloul 3             | 14°00'N/13°24'W | 05/09/2008    |              |           |                       |
| Didé                  | 13°58'N/12°20'W | 06-07/09/2008 | 30 (HD)      | 22 (73%)  | <i>O. sonrai</i>      |
| Dar Salam             | 13°15'N/13°12'W | 12/11/2007    | 30 (HD/PD)   | 0         |                       |
| Saboya 1              | 13°37'N/16°03'W | 14/09/2008    | 30 (HD/PD)*  | 0*        |                       |
| Saboya 2              | 13°37'N/16°04'W | 14/09/2008    |              |           |                       |
| Silamé                | 13°38'N/14°27'W | 02-03/09/2008 | 30 (HD/PD/N) | 0         |                       |
| Douta Passi           | 13°37'N/14°01'W | 04/09/2008    | 30 (HD/PD)   | 0         |                       |
| Keur Ayip             | 13°35'N/15°37'W | 01/03/2008    | 15 (N)       | 12 (80%)  | <i>O. sonrai</i>      |
| Diana                 | 13°32'N/12°51'W | 09-10/09/2008 | 30 (HD)      | 25 (83%)  | <i>O. sonrai</i>      |
| Sinthiou Djidé        | 13°28'N/15°00'W | 03/03/2008    | 30 (HD/PD/N) | 0         |                       |
| Saré Rawnadjidéré     | 13°01'N/15°00'W | 04/03/2008    | 30 (HD/PD)   | 0         |                       |
| Mballocounda 1        | 13°00'N/14°01'W | 05/03/2008    | 30 (HD)*     | 0*        |                       |
| Mballocounda 2        | 13°01'N/14°02'W | 05/03/2008    |              |           |                       |
| Mballocounda 3        | 13°00'N/14°02'W | 05/03/2008    |              |           |                       |
| Missira 1             | 13°31'N/13°30'W | 06/03/2008    | 30 (HD/PD)*  | 0*        |                       |
| Missira 2             | 13°31'N/13°31'W | 06/03/2008    |              |           |                       |
| Bokolako              | 13°36'N/12°32'W | 10-11/09/2008 | 30 (HD)      | 0         |                       |
| Sadatou               | 13°38'N/12°14'W | 10-11/09/2008 | 30 (HD/PD)   | 0         |                       |
| Djiro Mantoro 1       | 13°02'N/16°02'W | 08-09/03/2003 | 30 (N/F)*    | 0*        |                       |
| Djiro Mantoro 2       | 13°01'N/16°02'W | 08-09/03/2003 |              |           |                       |

|                      |                 |               |               |                    |                  |
|----------------------|-----------------|---------------|---------------|--------------------|------------------|
| Abéné                | 12°59'N/16°44'W | 10-11/03/2003 | 30 (N)        | 0                  |                  |
| Tiel (Linguère)      | 15°00'N/15°01'W | 13/03/2008    | 10 (N)        | 8 (80%)            | <i>O. sonrai</i> |
| Ranérou              | 15°09'N/14°10'W | 13/03/2008    | 10 (N)        | 5 (50%)            | <i>O. sonrai</i> |
| Noto (Thiès)         | 15°00'N/17°01'W | 14/03/2008    | 10 (N)        | 3 (30%)            | <i>O. sonrai</i> |
| Hann Centre IRD      | 14°43'N/17°35'W | 17/10/2008    | 12 (PD)       | 10 (83%)           | <i>O. sonrai</i> |
| Hann Parc Zoologique | 14°43'N/17°35'W | 17/10/2008    | 18 (N)        | 13 (72%)           | <i>O. sonrai</i> |
| <b>Total Senegal</b> |                 |               | <b>2, 861</b> | <b>474 (16.5%)</b> |                  |
| <b>Mali</b>          |                 |               |               |                    |                  |
| Diougounté           | 14°07'N/09°58'W | 13/12/2003    | 30 (HD/PD)    | 11 (37%)           | <i>O. sonrai</i> |
| Niamou 1             | 14°01'N/08°02'W | 14-15/12/2003 | 60 (HD/PD/N)* | 0*                 |                  |
| Niamou 2             | 13°58'N/08°04'W | 15/12/2003    |               |                    |                  |
| Laminibougou 1       | 14°04'N/06°02'W | 17/12/2003    | 60 (HD/PD/N)* | 0*                 |                  |
| Laminibougou 2       | 14°09'N/06°05'W | 15-16/12/2003 |               |                    |                  |
| Sofara / Ouo 1       | 14°00'N/04°00'W | 03/02/2004    | 60 (HD/N/F)*  | 0*                 |                  |
| Sofara / Ouo 2       | 14°03'N/03°51'W | 03/02/2004    |               |                    |                  |
| Sofara / Ouo 3       | 14°01'N/03°46'W | 03/02/2004    |               |                    |                  |
| Sofara / Ouo 4       | 14°09'N/04°06'W | 04/02/2004    |               |                    |                  |
| Tin-Bidène 1         | 19°01'N/01°50'E | 06-07/02/2004 | 60 (N)*       | 0*                 |                  |
| Tin-Bidène 2         | 19°00'N/01°46'E | 06-07/02/2004 |               |                    |                  |
| In-Tebezas           | 18°01'N/01°49'E | 08-09/02/2004 | 60 (N)*       | 0*                 |                  |
| In-Tebezas           | 17°56'N/01°46'E | 08-09/02/2004 |               |                    |                  |
| Massif Amastaouas 1  | 17°01'N/02°06'E | 10-12/02/2004 | 60 (N)*       | 0*                 |                  |
| Massif Amastaouas 2  | 17°02'N/02°09'E | 10-12/02/2004 |               |                    |                  |
| NW Ménaka            | 16°05'N/02°09'E | 12-13/02/2004 | 60 (N)        | 0                  |                  |
| Gaoudel 1            | 16°00'N/04°05'W | 19/01/2005    | 60 (N/F)*     | 0*                 |                  |
| Gaoudel 2            | 15°54'N/04°08'W | 18/01/2005    |               |                    |                  |
| Gaoudel 3            | 15°59'N/04°05'W | 18/01/2005    |               |                    |                  |
| Gaoudel 4            | 16°04'N/03°53'W | 19/01/2005    |               |                    |                  |
| Gaoudel 5            | 16°04'N/03°56'W | 19/01/2005    |               |                    |                  |
| Haoussa-Foulane 1    | 15°59'N/00°08'E | 22/01/2005    | 30 (N/F)*     | 13 (43%)*          | <i>O. sonrai</i> |
| Haoussa-Foulane 2    | 16°10'N/00°03'E | 22-23/01/2005 |               |                    |                  |
| Haoussa-Foulane 3    | 16°11'N/00°02'E | 23/01/2005    |               |                    |                  |
| Sama (Konna)         | 14°55'N/03°53'W | 24/01/2005    | 10 (N/F)      | 1 (10%)            | <i>O. sonrai</i> |
| Molibana             | 14°00'N/04°14'W | 25/01/2005    | 5 (N)         | 2 (40%)            | <i>O. sonrai</i> |
| San 1                | 13°18'N/04°51'W | 14-15/03/2005 | 30 (N/F)*     | 0*                 |                  |
| San 2                | 13°17'N/04°56'W | 14-15/03/2005 |               |                    |                  |
| Kénenko 1            | 13°05'N/07°15'W | 12-13/03/2005 | 30 (N/F)*     | 0*                 |                  |
| Kénenko 2            | 13°07'N/07°13'W | 12-13/03/2005 |               |                    |                  |
| Bamako Sud 1         | 12°30'N/08°08'W | 28-30/01/2005 | 60 (N/F)*     | 0*                 |                  |
| Bamako Sud2          | 12°33'N/08°07'W | 28-30/01/2005 |               |                    |                  |

|                     |                 |               |               |           |                  |
|---------------------|-----------------|---------------|---------------|-----------|------------------|
| Makania             | 14°04'N/11°09'W | 29/10/2005    | 15 (HD/PD)    | 4 (27%)   | <i>O. sonrai</i> |
| Guétala 1           | 13°59'N/09°33'W | 08/02/2007    | 33 (HD/PD/N)* | 0*        |                  |
| Guétala 2           | 13°59'N/09°35'W | 08/02/2007    |               |           |                  |
| Guétala 3           | 13°56'N/09°32'W | 31/12/2006    |               |           |                  |
| Kourougué 1         | 14°09'N/09°08'W | 30-31/12/2006 | 30 (HD/PD/N)* | 0*        |                  |
| Kourougué 2         | 14°10'N/09°08'W | 30-31/12/2006 |               |           |                  |
| Kourougué 3         | 14°11'N/09°08'W | 30-31/12/2006 |               |           |                  |
| Kourougué 4         | 14°10'N/09°11'W | 30-31/12/2006 |               |           |                  |
| Kourougué 5         | 14°11'N/09°09'W | 31/12/2006    |               |           |                  |
| Sikoro              | 14°00'N/07°01'W | 24-25/02/2005 | 30 (HD)       | 0         |                  |
| Sogoli              | 13°58'N/05°28'W | 16-17/10/2007 | 30 (HD)       | 28 (93%)  | <i>O. sonrai</i> |
| Soumana             | 13°54'N/04°58'W | 18/10/2007    | 30 (HD/PD/N)  | 0         |                  |
| Douagui (Bourem) 1  | 16°54'N/00°20'W | 25/01/2008    | 30 (HD/PD/N)* | 1 (3%)*   | <i>O. sonrai</i> |
| Douagui (Bourem) 2  | 16°54'N/00°19'W | 25/01/2008    |               |           |                  |
| Douagui (Bourem) 3  | 16°53'N/00°19'W | 25/01/2008    |               |           |                  |
| Téméra              | 16°59'N/00°57'W | 27/01/2008    | 15 (N)        | 6 (40%)   | <i>O. sonrai</i> |
| Gourma-Rharous 1    | 16°53'N/01°55'W | 07/10/2005    | 14 (N)*       | 3 (21%)*  | <i>O. sonrai</i> |
| Gourma-Rharous 2    | 16°53'N/01°56'W | 27/01/2008    |               |           |                  |
| Wondoboumo          | 16°40'N/02°58'W | 28/01/2008    | 12 (N)        | 3 (25%)   | <i>O. sonrai</i> |
| Yona 1              | 16°16'N/03°19'W | 29-30/01/2008 | 30 (N)*       | 0*        |                  |
| Yona 2              | 16°16'N/03°20'W | 29-30/01/2008 |               |           |                  |
| Niafouké 1          | 15°56'N/03°58'W | 31/01/2008    | 30 (N)*       | 0*        |                  |
| Niafouké 2          | 15°52'N/04°00'W | 31/01/2008    |               |           |                  |
| Brélingui 1         | 15°21'N/09°58'W | 27-29/09/2007 | 30 (HD/PD/N)* | 5 (17%)*  | <i>O. sonrai</i> |
| Brélingui 2         | 15°22'N/09°55'W | 27-29/09/2007 |               |           |                  |
| Brélingui 3         | 15°23'N/09°54'W | 27-29/09/2007 |               |           |                  |
| Kouroukéré (Chkata) | 15°24'N/09°29'W | 29-30/09/2007 | 30 (HD/PD/N)  | 22 (73%)  | <i>O. sonrai</i> |
| Binéou-Niakaté      | 15°27'N/08°54'W | 01/10/2007    | 30 (HD/PD)    | 12 (40%)  | <i>O. sonrai</i> |
| Mounta              | 15°20'N/08°30'W | 02/10/2007    | 30 (HD/PD)    | 12 (40%)  | <i>O. sonrai</i> |
| Birou-Niakaté 1     | 15°27'N/08°04'W | 03/10/2007    | 30 (HD/PD)*   | 0*        |                  |
| Birou-Niakaté 2     | 15°25'N/08°06'W | 03/10/2007    |               |           |                  |
| Mantyonga           | 15°20'N/07°27'W | 04/10/2007    | 30 (HD/PD)    | 0         |                  |
| Arhor               | 15°24'N/06°55'W | 05-06/10/2007 | 12 (HD/PD)    | 0         |                  |
| Dar Es Salam 1      | 15°23'N/06°33'W | 07/10/2007    | 30 (PD/N)*    | 0*        |                  |
| Dar Es Salam 2      | 15°22'N/06°33'W | 07/10/2007    |               |           |                  |
| Dar Es Salam 3      | 15°24'N/06°32'W | 07/10/2007    |               |           |                  |
| Bourgou-Siratigui   | 15°23'N/05°28'W | 15/10/2007    | 30 (HD/PD/N)  | 0         |                  |
| Kounssoum 1         | 15°30'N/00°34'E | 22-23/06/2005 | 30 (N/F)*     | 21 (70%)* | <i>O. sonrai</i> |
| Kounssoum 2         | 15°30'N/00°33'E | 22-23/06/2005 |               |           |                  |
| Kounssoum 3         | 15°37'N/00°30'E | 24/06/2005    |               |           |                  |



|                |                 |               |                    |             |                  |
|----------------|-----------------|---------------|--------------------|-------------|------------------|
| Labbézanga 1   | 15°00'N/00°30'E | 24-26/06/2005 | 42 (N/F)*          | 0*          |                  |
| Labbézanga 2   | 14°59'N/00°39'E | 24-26/06/2005 |                    |             |                  |
| Labbézanga 3   | 15°09'N/00°41'E | 26/06/2005    |                    |             |                  |
| Soukounala 1   | 15°01'N/10°58'W | 18/05/2006    | 30 (N/F/HD)*       | 13 (43%)*   | <i>O. sonrai</i> |
| Soukounala 2   | 15°02'N/10°58'W | 19/05/2006    |                    |             |                  |
| Monsombougou 1 | 15°00'N/10°00'W | 21/01/2006    | 30 (N/HD/PD)*      | 22 (73%)*   | <i>O. sonrai</i> |
| Monsombougou 2 | 14°58'N/10°01'W | 22/01/2006    |                    |             |                  |
| Lanbangoubo    | 15°07'N/09°06'W | 23/01/2006    | 30 (HD/PD/N/F)     | 19 (63%)    | <i>O. sonrai</i> |
| Ziguim         | 14°58'N/08°30'W | 16/02/2007    | 30 (HD/PD)         | 0           |                  |
| Bama 1         | 15°07'N/08°00'W | 25-26/01/2006 | 60<br>(HD/PD/N/F)* | 0*          |                  |
| Bama 2         | 15°08'N/08°01'W | 25-26/01/2006 |                    |             |                  |
| Bama 3         | 15°06'N/07°59'W | 25/01/2006    |                    |             |                  |
| Bama 4         | 15°07'N/08°01'W | 25-26/01/2006 |                    |             |                  |
| Bama 5         | 15°05'N/07°57'W | 26/01/2006    |                    |             |                  |
| Demba Sala     | 14°59'N/07°31'W | 20/02/2007    | 30 (HD)            | 27 (90%)    | <i>O. sonrai</i> |
| Akor 1         | 15°03'N/07°08'W | 27-28/01/2006 | 60 (N/HD/PD)*      | 0*          |                  |
| Akor 2         | 14°52'N/06°59'W | 27-28/01/2006 |                    |             |                  |
| Akor 3         | 14°52'N/06°58'W | 28/01/2006    |                    |             |                  |
| Akor 4         | 14°55'N/07°02'W | 29/01/2006    |                    |             |                  |
| Akor 5         | 14°54'N/07°01'W | 29/01/2006    |                    |             |                  |
| Driss 1        | 14°56'N/06°33'W | 08-9/10/2007  | 30 (N/HD/PD)*      | 0*          |                  |
| Driss 2        | 14°55'N/06°31'W | 08-9/10/2007  |                    |             |                  |
| Kourmangoubé 1 | 14°54'N/06°03'W | 30/01/2006    | 60 (N/HD/PD)*      | 0*          |                  |
| Kourmangoubé 2 | 14°53'N/06°07'W | 31/01/2006    |                    |             |                  |
| Toulé          | 15°08'N/05°34'W | 13-14/10/2007 | 30 (HD/PD)         | 0           |                  |
| Dianguirdé 1   | 14°30'N/09°01'W | 06/02/2007    | 30 (HD/N)*         | 15 (50%)*   | <i>O. sonrai</i> |
| Dianguirdé 2   | 14°29'N/09°00'W | 07/02/2007    |                    |             |                  |
| Tonkasimi 1    | 14°30'N/08°31'W | 14/02/2007    | 30 (N/HD/PD)*      | 16 (53.3%)* | <i>O. sonrai</i> |
| Tonkasimi 2    | 14°29'N/08°32'W | 15/02/2007    |                    |             |                  |
| Kolomina 1     | 14°29'N/08°01'W | 17/02/2007    | 30 (N/HD/PD)*      | 15 (50%)*   | <i>O. sonrai</i> |
| Kolomina 2     | 14°28'N/08°01'W | 18/02/2007    |                    |             |                  |
| Seymana        | 14°30'N/07°31'W | 19/02/2007    | 30 (HD/PD)         | 0           |                  |
| Naouléna       | 14°29'N/07°08'W | 23-24/02/2007 | 30 (HD)            | 0           |                  |
| Nyoko          | 14°34'N/06°25'W | 09-10/10/2007 | 30 (HD/PD)         | 0           |                  |
| Kandyourou     | 14°36'N/06°08'W | 11/10/2007    | 30 (HD)            | 0           |                  |
| Malémana       | 14°33'N/05°25'W | 12-13/10/2007 | 30 (HD)            | 0           |                  |
| Piétaga 1      | 14°34'N/04°10'W | 02/02/2008    | 12 (N)*            | 2 (17%)*    | <i>O. sonrai</i> |
| Piétaga 2      | 14°31'N/04°11'W | 02/02/2008    |                    |             |                  |
| Djimékourou 1  | 13°30'N/11°00'W | 06/05/2006    | 60 (N/HD/PD)*      | 0*          |                  |
| Djimékourou 2  | 13°32'N/11°01'W | 07/05/2006    |                    |             |                  |

|                      |                 |               |               |                    |  |
|----------------------|-----------------|---------------|---------------|--------------------|--|
| Kassama 1            | 13°03'N/11°06'W | 03/05/2006    | 60 (N/HD/PD)* | 0*                 |  |
| Kassama 2            | 13°03'N/11°07'W | 04/05/2006    |               |                    |  |
| Kassama 3            | 13°03'N/11°10'W | 05/05/2006    |               |                    |  |
| Billy 1              | 13°34'N/10°01'W | 09/02/2007    | 30 (HD/N)*    | 0*                 |  |
| Billy 2              | 13°34'N/10°02'W | 10/02/2007    |               |                    |  |
| Talikola 1           | 13°30'N/09°30'W | 11/02/2007    | 30 (N/HD/PD)* | 0*                 |  |
| Talikola 2           | 13°28'N/09°30'W | 12/02/2007    |               |                    |  |
| Kolé 1               | 13°29'N/08°59'W | 13/02/2007    | 30 (N/HD/PD)* | 0*                 |  |
| Kolé 2               | 13°28'N/08°59'W | 13/02/2007    |               |                    |  |
| Djinagué 1           | 12°59'N/09°52'W | 09/05/2006    | 60 (N/HD)*    | 0*                 |  |
| Djinagué 2           | 13°00'N/09°52'W | 10/05/2006    |               |                    |  |
| Yacoubabougou 1      | 13°00'N/08°55'W | 11/05/2006    | 60 (N/HD/PD)* | 0*                 |  |
| Yacoubabougou 2      | 13°00'N/08°54'W | 12/05/2006    |               |                    |  |
| Yacoubabougou 3      | 13°01'N/08°53'W | 1305/2006     |               |                    |  |
| Gouakoulou           | 13°30'N/08°03'W | 16-17/05/2006 | 60 (N/HD)     | 0                  |  |
| Kodian 1             | 13°03'N/07°56'W | 14/05/2006    | 60 (F/N/HD)*  | 0*                 |  |
| Kodian 2             | 13°04'N/07°57'W | 14/05/2006    |               |                    |  |
| Kodian 3             | 13°02'N/07°57'W | 15/05/2006    |               |                    |  |
| Kodian 4             | 13°03'N/07°57'W | 15/05/2006    |               |                    |  |
| Markala 1            | 13°42'N/06°04'W | 01/02//2006   | 8 (N)*        | 0*                 |  |
| Markala 2            | 13°42'N/06°04'W | 25/02//2007   |               |                    |  |
| Dona                 | 13°12'N/05°54'W | 04/02/2008    | 30 (N)        | 0                  |  |
| Wesso                | 13°27'N/04°49'W | 20/10/2007    | 30 (HD)       | 0                  |  |
| <b>Total Mali</b>    |                 |               | <b>2,458</b>  | <b>273 (11.1%)</b> |  |
| <b>Guinea</b>        |                 |               |               |                    |  |
| Dima (Pont Gambie) 1 | 12°00'N/11°49'W | 14/02/2006    | 60 (HD/N/F)*  | 0*                 |  |
| Dima (Pont Gambie) 2 | 12°01'N/11°49'W | 14-15/02/2006 |               |                    |  |
| Dima (Pont Gambie) 3 | 12°02'N/11°49'W | 15/02/2006    |               |                    |  |
| Dima (Pont Gambie) 4 | 11°57'N/11°50'W | 16/02/2006    |               |                    |  |
| Siréya 1             | 11°02'N/11°56'W | 17/02/2006    | 60 (HD/PD)*   | 0*                 |  |
| Siréya 2             | 11°02'N/11°58'W | 18/02/2006    |               |                    |  |
| Kindia               | 10°05'N/12°50'W | 26/04/2008    | 30 (N)        | 0                  |  |
| Kalankalan           | 10°06'N/08°53'W | 18/04/2008    | 30 (HD/PD)    | 0                  |  |
| Oueye                | 08°02'N/08°56'W | 20/04/2008    | 30 (HD/PD)    | 0                  |  |
| Yatia                | 10°01'N/10°58'W | 28/10/2012    | 30 (HD/PD)    | 0                  |  |
| Kunda                | 10°50'N/13°48'W | 01/11/2012    | 30 (HD/PD)    | 0                  |  |
| <b>Total Guinea</b>  |                 |               | <b>270</b>    | <b>0 (0%)</b>      |  |
| <b>Togo</b>          |                 |               |               |                    |  |

|                       |                 |               |              |               |  |
|-----------------------|-----------------|---------------|--------------|---------------|--|
| Konkoré 1             | 10°33'N/00°12'E | 07/01/2008    | 30 (N/HD)*   | 0*            |  |
| Konkoré 2             | 10°44'N/00°11'E | 08/01/2008    |              |               |  |
| Alédjo 1              | 09°15'N/01°13'E | 09/01/2008    | 30 (HD/PD)*  | 0*            |  |
| Alédjo 2              | 09°15'N/01°13'E | 10/01/2008    |              |               |  |
| Diguengué             | 08°05'N/00°38'E | 11-12/01/2008 | 30 (HD/PD)   | 0             |  |
| Sodo-Zion             | 07°19'N/00°50'E | 13/01/2008    | 30(HD/PD)    | 0             |  |
| Sagonou               | 06°16'N/01°18'E | 15/01/2008    | 30 (HD/PD)   | 0             |  |
| <b>Total Togo</b>     |                 |               | <b>150</b>   | <b>0 (0%)</b> |  |
| <b>Chad</b>           |                 |               |              |               |  |
| Dile Tchiloumdom      | 14°01'N/14°09'E | 19/02/2003    | 60 (N)       | 0%            |  |
| Méchiméré             | 13°49'N/15°54'E | 15-17/01/2003 | 60 (HD/F/N)  | 0%            |  |
| Djedaa                | 14°01'N/18°01'E | 23-24/01/2003 | 60 (N)       | 0             |  |
| Al Miamine            | 13°46'N/19°44'E | 21-22/01/2003 | 60 (N/F)     | 0             |  |
| Sounoute (Saguéré)    | 14°09'N/21°50'E | 19-20/01/2003 | 60 (HD/F)    | 0             |  |
| Doué 1                | 09°15'N/14°42'E | 10/02/2003    | 60 (HD/F)*   | 0*            |  |
| Doué 2                | 09°16'N/14°41'E | 08-09/02/2003 |              |               |  |
| Mataya                | 11°59'N/18°02'E | 25/01/2003    | 35 (N/HD)*   | 0*            |  |
| Ati                   | 13°00'N/18°06'E | 24/01/2003    |              |               |  |
| Ndjaména              | 12°01'N/15°06'E | 17/02/2003    | 63 (F/HD)*   | 0*            |  |
| Toukra-Arabe          | 12°05'N/15°06'E | 16/02/2003    |              |               |  |
| <b>Total Chad</b>     |                 |               | <b>458</b>   | <b>0 (0%)</b> |  |
| <b>Cameroon</b>       |                 |               |              |               |  |
| Yik 1                 | 12°30'N/14°35'E | 05-07/02/2003 | 60 (HD/F)*   | 0*            |  |
| Yik 2                 | 12°25'N/14°52'E | 06/02/2003    |              |               |  |
| Yik 3                 | 12°30'N/14°36'E | 05-07/02/2003 |              |               |  |
| Kossa 1               | 11°07'N/14°19'E | 02/02//2003   | 79 (HD/F/N)* | 0*            |  |
| Kossa 2               | 11°09'N/14°22'E | 01/02//2003   |              |               |  |
| Kossa 3               | 11°05'N/14°21'E | 03/02//2003   |              |               |  |
| Mogom 1               | 10°30'N/14°25'E | 29-30/01/2003 | 79 (HD/F/N)* | 0*            |  |
| Mogom 2               | 10°20'N/14°27'E | 30/01/2003    |              |               |  |
| Diéra                 | 08°31'N/13°30'E | 12/02/2003    | 60 (HD/N/F)  | 0             |  |
| <b>Total Cameroon</b> |                 |               | <b>278</b>   | <b>0 (0%)</b> |  |
| <b>Niger</b>          |                 |               |              |               |  |
| Simiri 1              | 14°08'N/02°08'E | 11-12/01/2004 | 60 (HD/N/F)* | 0*            |  |
| Simiri 2              | 14°02'N/02°05'E | 11-12/01/2004 |              |               |  |
| Kolifo 1              | 13°59'N/04°00'E | 24-25/01/2004 | 60 (N/F/HD)* | 0*            |  |
| Kolifo 2              | 13°58'N/03°56'E | 25/01/2004    |              |               |  |
| Tékhé                 | 14°01'N/06°01'E | 13-14/01/2004 | 60 (HD/PD)   | 0             |  |
| Mazadaoua 1           | 14°00'N/07°59'E | 16-17/01/2004 | 60 (HD/F/N)* | 0*            |  |
| Mazadaoua 2           | 14°00'N/08°00'E | 16-17/01/2004 |              |               |  |

|                            |                 |               |               |                 |                  |
|----------------------------|-----------------|---------------|---------------|-----------------|------------------|
| Gidyo 1                    | 14°00'N/10°02'E | 18-19/01/2004 | 60 (HD/N/PD)* | 0*              |                  |
| Gidyo 2                    | 13°59'N/10°02'E | 19/01/2004    |               |                 |                  |
| Puits artésien de Mir      | 14°00'N/12°00'E | 21-22/01/2004 | 60 (HD/PD/N)  | 0               |                  |
| Tilola                     | 15°09'N/02°04'E | 14-15/02/2004 | 60 (N/F)      | 0               |                  |
| Piliki                     | 13°08'N/01°57'E | 17-18/02/2004 | 60 (HD/PD)    | 0               |                  |
| Farié 1                    | 14°01'N/01°32'E | 23-24/02/2005 | 30 (N, F)*    | 0*              |                  |
| Farié 2                    | 14°07'N/01°31'E | 23-24/02/2005 |               |                 |                  |
| Ayorou                     | 14°42'N/00°55'E | 23/01/2008    | 30 (N)        | 0               |                  |
| Niamey 1                   | 13°32'N/02°01'E | 24-25/02/2005 | 30 (N/F)*     | 0*              |                  |
| Niamey 2                   | 13°28'N/02°08'E | 24-25/02/2005 |               |                 |                  |
| Tchintoulous 1             | 18°35'N/08°46'E | 01/03/2005    | 30 (N)*       | 0*              |                  |
| Tchintoulous 2             | 18°34'N/08°47'E | 01/03/2005    |               |                 |                  |
| Taggout                    | 18°43'N/08°30'E | 01/03/2005    |               |                 |                  |
| Tchi-n-Taghoda             | 18°54'N/08°33'E | 01/03/2005    |               |                 |                  |
| Tessa-n-Jakanar            | 18°38'N/09°05'E | 02/03/2005    |               |                 |                  |
| Iférouane                  | 19°04'N/08°26'E | 28/02/2005    | 31 (N)*       | 0*              |                  |
| Taghmert                   | 19°06'N/09°02'E | 03/03/2005    |               |                 |                  |
| Adrar Tamgak               | 19°09'N/08°56'E | 03/03/2005    |               |                 |                  |
| Adrar Chiriet              | 19°17'N/09°14'E | 04/03/2005    |               |                 |                  |
| <b>Total Niger</b>         |                 |               | <b>631</b>    | <b>0 (0%)</b>   |                  |
| <b>Benin</b>               |                 |               |               |                 |                  |
| Boutéré                    | 10°51'N/02°08'E | 20-21/02/2004 | 60 (HD/PD/N)  | 0%              |                  |
| Kpêré 1                    | 09°59'N/01°53'E | 22-23/02/2004 | 60 (HD/PD/N)* | 0*              |                  |
| Kpêré 2                    | 10°00'N/01°54'E | 23/02/2004    |               |                 |                  |
| Igbéré 1                   | 08°59'N/01°57'E | 24-25/02/2004 | 60 (HD/PD/N)* | 0*              |                  |
| Igbéré 2                   | 09°00'N/01°59'E | 24/02/2004    |               |                 |                  |
| Doyissa 1                  | 07°59'N/01°59'E | 26-27/02/2004 | 60 (HD/F/N)*  | 0*              |                  |
| Doyissa 2                  | 07°59'N/01°58'E | 27/02/2004    |               |                 |                  |
| Lanta                      | 07°06'N/01°52'E | 28/02/2004    | 60 (N/F)      | 0               |                  |
| <b>Total Benin</b>         |                 |               | <b>300</b>    | <b>0 (0%)</b>   |                  |
| <b>Gambia</b>              |                 |               |               |                 |                  |
| Lansar                     | 13°35'N/15°37'W | 02/03/2008    | 24 (HD/PD)    | 14 (58%)        | <i>O. sonrai</i> |
| Joben                      | 13°46'N/14°58'W | 31/08/2008    | 6 (PD)        | 1 (17%)         | <i>O. sonrai</i> |
| <b>Total Gambia</b>        |                 |               | <b>30</b>     | <b>15 (50%)</b> |                  |
| <b>Guinea Bissau</b>       |                 |               |               |                 |                  |
| Erkunda                    | 12°01'N/14°57'W | 08/02/2011    | 30 (N)        | 0               |                  |
| <b>Total Guinea Bissau</b> |                 |               | <b>30</b>     | <b>0 (0%)</b>   |                  |
| <b>Liberia</b>             |                 |               |               |                 |                  |
| Bopolu                     | 07°04'N/10°29'W | 25/03/2009    | 30 (HD/PD)    | 0%              |                  |
| Zwedru                     | 05°35'N/08°32'W | 28/03/2009    | 30 (HD/PD)    | 0%              |                  |

|                           |                 |                      |              |                      |                        |
|---------------------------|-----------------|----------------------|--------------|----------------------|------------------------|
| <b>Total Liberia</b>      |                 |                      | <b>60</b>    | <b>0 (0%)</b>        |                        |
| <b>Spain</b>              |                 |                      |              |                      |                        |
| Torremolinos              | 36°38'N/04°30'W | 18/07/2010           | 7 (N)        | 2 (29%)              | <i>O. occidentalis</i> |
| Colmenar                  | 36°55'N/04°19'W | 18/07/2010           | 10 (F)       | 0                    | <i>O. occidentalis</i> |
| <b>Total Spain</b>        |                 |                      | <b>17</b>    | <b>2 (11.7%)</b>     |                        |
| <b>Ivory Coast</b>        |                 |                      |              |                      |                        |
| Pakobo 1                  | 06°07'N/04°55'W | 18/10/2012           | 30 (HD/PD)*  | <b>0</b>             |                        |
| Pakobo 2                  | 06°05'N/04°55'W | 18/10/2012           |              |                      |                        |
| Pakobo 3                  | 06°12'N/04°57'W | 18/10/2012           |              |                      |                        |
| Allakro                   | 07°56'N/05°03'W | 19/10/2012           | 30 (HD)      | 0                    |                        |
| Detikaha                  | 09°55'N/05°10'W | 20/10/2012           | 30 (HD/PD)   | 0                    |                        |
| <b>Total Ivory Coast</b>  |                 |                      | <b>90</b>    | <b>0%</b>            |                        |
| <b>Burkina Faso</b>       |                 |                      |              |                      |                        |
| Toulfé 1                  | 13°56'N/02°00'W | 31/01-<br>01/02/2004 | 60 (N/HD)*   | <b>0*</b>            |                        |
| Toulfé 2                  | 13°53'N/01°57'W | 01/02/2004           |              |                      |                        |
| Ndjiongba 1               | 14°00'N/00°00'W | 29-30/01/2004        | 60 (N)*      | 0*                   |                        |
| Ndjiongba 2               | 13°54'N/00°05'W | 29-30/01/2004        |              |                      |                        |
| Ndjiongba 3               | 14°04'N/00°02'W | 30/01/2004           |              |                      |                        |
| Mangou                    | 12°04'N/01°52'E | 27-28/01/2004        | 60 (HD/PD/N) | 0                    |                        |
| Noumoukina                | 11°50'N/04°52'W | 21/10/2012           | 30 (HD)      | 0                    |                        |
| <b>Total Burkina Faso</b> |                 |                      | <b>210</b>   | <b>0 (0%)</b>        |                        |
|                           |                 |                      |              |                      |                        |
| <b>TOTAL</b>              |                 |                      | <b>9,858</b> | <b>1,224 (12.4%)</b> |                        |

\*: Compiled site stations data

F: Fields

N: Natural habitat

PD: Peridomestic

HD: Human dwellings

**Supplementary Table S2.** Detailed results of small mammals surveys\*

| Study area           | Coordinate of sampling sites | Date          | No. of trap-nights | Habitat sampled | Mammals species (No, I/T)**              |  |
|----------------------|------------------------------|---------------|--------------------|-----------------|------------------------------------------|--|
| <b>Senegal</b>       |                              |               |                    |                 |                                          |  |
| Dielmo               | 13°43'N/16°24'W              | 17-24/04/2002 | 990                | HD              | <i>Mastomys erythroleucus</i> (30, 6/23) |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Crociodura olivieri</i> (13, 8/11)    |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Mus musculus</i> (10, 1/7)            |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Arvicanthis niloticus</i> (5, 0/5)    |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Rattus rattus</i> (3, 2/3)            |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Cricetomys gambianus</i> (2, 0/1)     |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Praomys daltoni</i> (2, 0/2)          |  |
| Ndiop                | 13°41'N/16°22'W              | 6-13/03/2002  | 857                | HD              | <i>Crociodura olivieri</i> (28, 1/22)    |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Mastomys erythroleucus</i> (25, 2/15) |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Mus musculus</i> (4, 0/0)             |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Rattus rattus</i> (3, 0/2)            |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Arvicanthis niloticus</i> (1, 1/1)    |  |
| <b>Total Senegal</b> |                              |               | <b>1,847</b>       |                 | <b>Total specimens: 126, 21/92</b>       |  |
| <b>Mauritania</b>    |                              |               |                    |                 |                                          |  |
| Soufa                | 15°56'N/12°01'W              | 13/11/2003    | 568                | N, HD           | <i>Gerbillus nanus</i> (3, 0/3)          |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Taterillus</i> sp. (1, 0/1)           |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Mastomys erythroleucus</i> (6, 0/6)   |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Atelerix albiventris</i> (1, 0/1)     |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Desmodilliscus braueri</i> (2, 0/0)   |  |
| Nbeika               | 17°59'N/12°14'W              | 18-19/11/2003 | 277                | N, HD           | <i>Gerbillus</i> sp. (1, 0/0)            |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Gerbillus nanus</i> (1, 0/1)          |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Gerbillus campestris</i> (4, 0/4)     |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Jaculus jaculus</i> (21, 0/21)        |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Gerbillus gerbillus</i> (1, 0/1)      |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Gerbillus tarabuli</i> (1, 0/1)       |  |
| Rachid               | 18°47'N/11° 41 'W            | 20-21/11/2003 | 262                | N, HD           | <i>Acomys airensis</i> (34, 0/24)        |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Gerbillus</i> sp. (3, 0/2)            |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Gerbillus campestris</i> (2, 0/2)     |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Gerbillus henleyi</i> (1, 0/1)        |  |
| Oujeft               | 20°00'N/13°03'W              | 21/11/2003    | 247                | N, HD           | <i>Gerbillus tarabuli</i> (17, 0/12)     |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Gerbillus nanus</i> (2, 0/2)          |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Gerbillus campestris</i> (1, 0/1)     |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Acomys airensis</i> (1, 0/1)          |  |
|                      |                              |               |                    |                 | <i>Mus musculus</i> (9, 0/8)             |  |

|                         |                  |                 |                |      |                                         |
|-------------------------|------------------|-----------------|----------------|------|-----------------------------------------|
|                         |                  |                 |                |      | <i>Felovia vae</i> (1, 0/1)             |
| Touajil                 | 22°07'N/12°41'W  | 29/11/2003      | 191            | F    | <i>Gerbillus gerbillus</i> (10, 0/7)    |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Gerbillus tarabuli</i> (1, 0/1)      |
| Guelb el Dlim           | 22°59'N/12°00'W  | 30/11/2003      | 163            | N    | <i>Gerbillus</i> sp. (2, 0/2)           |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Jaculus jaculus</i> (2, 0/2)         |
| Aïn El Taya             | 20°16'N/13°07'W  | 20-24/10/2006   | 549            | N    | <i>Acomys chudeau</i> (17, 0/14)        |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Jaculus jaculus</i> . (2, 0/2)       |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Gerbillus tarabuli</i> (4,0/3)       |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Ictonyx striatus</i> (1, 0/1)        |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Gerbillus pyramidum</i> (3, 0/3)     |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Gerbillus campestris</i> (2, 0/2)    |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Gerbillus gerbillus</i> (1, 0/1)     |
|                         |                  |                 | Manual catches |      | <i>Gerbillus</i> sp (21, 0/0)           |
| Tiguent                 | 17°12'N/16°04'W  | 28-30/10/2006   | 280            | N    | <i>Gerbillus gerbillus</i> (2, 0/2)     |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Gerbillus tarabuli</i> (35, 0/26)    |
| Akjoujt                 | 19°44'N/14°22'W  | 17-20/10/2006   | 518            | N, F | <i>Gerbillus nanus</i> (1, 0/0)         |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Gerbillus tarabuli</i> (1, 0/1)      |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Gerbillus pyramidum</i> (15, 0/15)   |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Gerbillus</i> sp. (1, 0/1)           |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Hemiechinus aethiopicus</i> (1, 0/1) |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Jaculus jaculus</i> (1, 0/0)         |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Pachyuromys duprasi</i> (1, 0/0)     |
| Oumou Tounsi            | 18°43'N/15°36'W  | 24-25/10/2006   | 140            | N    | <i>Gerbillus</i> sp. (2, 0/2)           |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Gerbillus nanus</i> (1, 0/1)         |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Hemiechinus aethiopicus</i> (1, 0/1) |
| Lemcid                  | 18°39'N/16°06'W  | 25-27/10/2006   | 280            | N    | <i>Gerbillus tarabuli</i> (6, 2/5)      |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Gerbillus gerbillus</i> (17, 1/15)   |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Gerbillus nanus</i> (2, 0/1)         |
| South of Nouakchott     | 17°23'N/16°03'W  | 27-28/10/2006   | 140            | N    | <i>Xerus erythropus</i> (1, 0/0)        |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Gerbillus</i> sp. (1, 0/1)           |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Gerbillus tarabuli</i> (5, 0/4)      |
| Keur Massène            | 16°34'N/16°17'W  | 30/10-1/11/2006 | 225            | N    | <i>Xerus erythropus</i> (1, 0/1)        |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Taterillus arenarius</i> (7, 0/5)    |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Gerbillus gerbillus</i> (1, 0/1),    |
| <b>Total Mauritania</b> |                  |                 | <b>5,357</b>   |      | <b>Total specimens : 282, 3/214</b>     |
| <b>Mali</b>             |                  |                 |                |      |                                         |
| Diougounté              | 14°07'N/09°58'W  | 13/12/2003      |                | HD   | <i>Mastomys erythroleucus</i> (1, 1/1)  |
| Tin-Bidène              | 19°01 'N/01°50'E | 5-8/02/2004     | 368            | N    | <i>Gerbillus tarabuli</i> (19, 0/19)    |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Gerbillus nanus</i> (7, 0/7)         |
|                         |                  |                 |                |      | <i>Gerbillus pyramidum</i> (7, 0/7)     |

|                   |                 |               |     |          |                                        |
|-------------------|-----------------|---------------|-----|----------|----------------------------------------|
|                   |                 |               |     |          | <i>Gerbillus campestris</i> (1, 0/1)   |
|                   |                 |               |     |          | <i>Arvicanthis niloticus</i> (1, 0/1)  |
|                   |                 |               |     |          | <i>Jaculus jaculus</i> (3, 0/3)        |
| In- Tebezas       | 18°01'N/01°49'E | 8-10/02/2004  | 175 | N        | <i>Gerbillus tarabuli</i> (5, 0/5)     |
|                   |                 |               |     |          | <i>Gerbillus nanus</i> (2, 0/2)        |
|                   |                 |               |     |          | <i>Gerbillus pyramidum</i> (3, 0/3)    |
|                   |                 |               |     |          | <i>Arvicanthis niloticus</i> (1, 0/1)  |
|                   |                 |               |     |          | <i>Jaculus jaculus</i> (2, 0/2)        |
| Massif Amastaouas | 17°01'N/02°06'E | 10-12/02/2004 | 219 | N        | <i>Arvicanthis niloticus</i> (7, 0/7)  |
|                   |                 |               |     |          | <i>Gerbillus nanus</i> (5, 0/4)        |
|                   |                 |               |     |          | <i>Taterillus petteri</i> (2, 0/2)     |
|                   |                 |               |     |          | <i>Gerbillus tarabuli</i> (2, 0/2)     |
|                   |                 |               |     |          | <i>Jaculus jaculus</i> (6, 0/6)        |
| Batamani-Daga     | 14°52'N/04°03'W | 20-21/10/2007 | 200 | N        | <i>Mastomys huberti</i> (76, 1/76)     |
|                   |                 |               |     |          | <i>Mastomys natalensis</i> (12, 0/12)  |
|                   |                 |               |     |          | <i>Mastomys erythroleucus</i> (3, 0/3) |
|                   |                 |               |     |          | <i>Arvicanthis ansorgei</i> (3, 0/3)   |
|                   |                 |               |     |          | <i>Arvicanthis niloticus</i> (7, 0/7)  |
|                   |                 |               |     |          | <i>Crocidura viaria</i> (9, 0/9)       |
| Niamou            | 14°01'N/08°02'W | 26-27/10/2007 | 109 | HD       | <i>Mastomys natalensis</i> (36, 0/31)  |
|                   |                 |               |     |          | <i>Praomys daltoni</i> (1, 0/1)        |
| Médine            | 14°22'N/11°21'W | 9-10/10/2007  | 195 | N, F     | <i>Taterillus</i> sp. (2, 0/2)         |
|                   |                 |               |     |          | <i>Gerbilliscus gambianus</i> (5, 0/4) |
|                   |                 |               |     |          | <i>Mastomys erythroleucus</i> (1, 0/1) |
| Kolomina          | 14°28'N/08°01'W | 22-23/10/2007 | 110 | HD       | <i>Mastomys natalensis</i> (20, 6/19)  |
|                   |                 |               |     |          | <i>Praomys daltoni</i> (3, 1/3)        |
| Argueta           | 14°57'N/11°02'W | 11/10/2007    | 1   | HD       | <i>Praomys daltoni</i> (2, 0/2)        |
| Topokoné          | 15°02'N/10°34'W | 13-14/10/2007 | 80  | F, HD    | <i>Praomys daltoni</i> (23, 3/22)      |
| Monsombougou      | 14°58'N/10°01'W | 15-17/10/2007 | 214 | N, HD    | <i>Taterillus</i> sp. (1, 0/1)         |
|                   |                 |               |     |          | <i>Praomys daltoni</i> (41, 6/41)      |
|                   |                 |               |     |          | <i>Arvicanthis niloticus</i> (1, 0/1)  |
|                   |                 |               |     |          | <i>Crocidura</i> sp. (1, 0/1)          |
| Hassilbarké-Maure | 14°54'N/09°24'W | 18-19/10/2007 | 141 | N, HD    | <i>Atelerix albiventris</i> (2, 0/1)   |
|                   |                 |               |     |          | <i>Gerbillus nigeriae</i> (1, 0/1)     |
|                   |                 |               |     |          | <i>Praomys daltoni</i> (57, 1/54)      |
|                   |                 |               |     |          | <i>Arvicanthis niloticus</i> (2, 0/2)  |
|                   |                 |               |     |          | <i>Desmodilliscus braueri</i> (1, 0/1) |
|                   |                 |               |     |          | <i>Mastomys natalensis</i> (1, 1/1)    |
| Sambé             | 15°07'N/07°57'W | 24-25/10/2007 | 135 | N, HD, F | <i>Taterillus</i> sp. (3, 0/3)         |
|                   |                 |               |     |          | <i>Xerus erythropus</i> (1, 0/1)       |



|                    |                 |               |                |       |                                         |
|--------------------|-----------------|---------------|----------------|-------|-----------------------------------------|
|                    |                 |               |                |       | <i>Praomys daltoni</i> (44, 0/43)       |
| <b>Total Mali</b>  |                 |               | <b>1,747</b>   |       | <b>Total specimens: 433, 20/419</b>     |
| <b>Niger</b>       |                 |               |                |       |                                         |
| Tilola             | 15°09'N/02°04'E | 13-15/02/2004 | 186            | F, N  | <i>Gerbillus nigeriae</i> (21, 0/20)    |
|                    |                 |               |                |       | <i>Acomys airensis</i> (3, 0/3)         |
|                    |                 |               |                |       | <i>Gerbillus tarabuli</i> (11, 0/11)    |
|                    |                 |               |                |       | <i>Arvicanthis niloticus</i> (1, 0/1)   |
|                    |                 |               |                |       | <i>Mastomys erythroleucus</i> (6, 0/5)  |
|                    |                 |               |                |       | <i>Hemiechinus aethiopicus</i> (1, 0/0) |
| Tékhé              | 14°01'N/06°01'E | 13-16/01/2004 | Manual catches | N     | <i>Gerbillus nigeriae</i> (2, 0/2)      |
|                    |                 |               |                |       | <i>Desmodilliscus braueri</i> (1, 0/0)  |
| Mazadaoua          | 14°00'N/07°59'E |               | Manual catches | NH    | <i>Gerbillus nigeriae</i> (4, 0/3)      |
|                    |                 |               |                |       | <i>Gerbillus nanus</i> (1, 0/0)         |
| Piliki             | 13°08'N/01°57'E | 17-18/02/2004 | 203            | HD, N | <i>Arvicanthis</i> sp. (6, 0/0)         |
|                    |                 |               |                |       | <i>Mastomys natalensis</i> (31, 0/28)   |
|                    |                 |               |                |       | <i>M. erythroleucus</i> (35, 0/32)      |
|                    |                 |               |                |       | <i>Gerbilliscus</i> sp. (7, 0/4)        |
|                    |                 |               |                |       | <i>Taterillus gracilis</i> (8, 0/6)     |
| <b>Total Niger</b> |                 |               | <b>389</b>     |       | <b>Total specimens: 138, 0/115</b>      |
| <b>Benin</b>       |                 |               |                |       |                                         |
| Boutéré            | 10°51'N/02°08'E | 20-22/02/2004 | 428            | HD, N | <i>Gerbilliscus kempfi</i> (1, 0/0)     |
|                    |                 |               |                |       | <i>Gerbilliscus</i> sp. (4, 0/2)        |
|                    |                 |               |                |       | <i>Mastomys erythroleucus</i> (8, 0/6)  |
|                    |                 |               |                |       | <i>Lemniscomys</i> sp. (1, 0/1)         |
|                    |                 |               |                |       | <i>Praomys daltoni</i> (1, 0/1)         |
|                    |                 |               |                |       | <i>Heliosciurus gambianus</i> (1, 0/1)  |
|                    |                 |               |                |       | <i>Atelerix albiventris</i> (1, 0/0)    |
|                    |                 |               |                |       | <i>Taterillus</i> sp. (1, 0/1)          |
|                    |                 |               |                |       | <i>Mastomys natalensis</i> (38, 0/20)   |
| Igbéré             | 08°59'N/01°57'E | 24-25/02/2004 | 243            | N, HD | <i>M. erythroleucus</i> (20, 0/18)      |
|                    |                 |               |                |       | <i>Mastomys</i> sp. (13, 0/9)           |
|                    |                 |               |                |       | <i>Lemniscomys bellieri</i> (2, 0/0)    |
|                    |                 |               |                |       | <i>Lemniscomys</i> sp. (13, 0/13)       |
|                    |                 |               |                |       | <i>Uranomys ruddi</i> (12, 0/12)        |
|                    |                 |               |                |       | <i>Crocidura</i> sp. (2, 0/2)           |
|                    |                 |               |                |       | <i>Gerbilliscus kempfi</i> (2, 0/0)     |
|                    |                 |               |                |       | <i>Gerbilliscus</i> sp. (5, 0/4)        |
|                    |                 |               |                |       | <i>Praomys daltoni</i> (6, 0/6)         |
|                    |                 |               |                |       | <i>Mastomys natalensis</i> (22, 0/10)   |
|                    |                 |               |                |       | <i>Praomys derooi</i> (9, 0/8)          |

|                    |                 |               |                |       |                                        |
|--------------------|-----------------|---------------|----------------|-------|----------------------------------------|
|                    |                 |               |                |       | <i>Arvicanthis</i> sp. (1, 0/0)        |
|                    |                 |               |                |       |                                        |
| Doyissa            | 07°59'N/01°59'E | 26-27/02/2004 | 206            | N, HD | <i>Mastomys</i> sp. (6, 0/5)           |
|                    |                 |               |                |       | <i>Crocidura</i> sp. (2, 0/2)          |
|                    |                 |               |                |       | <i>M. erythroleucus</i> (17, 0/16)     |
|                    |                 |               |                |       | <i>Uranomys ruddi</i> (2, 0/2)         |
|                    |                 |               |                |       | <i>Mastomys natalensis</i> (23, 0/10)  |
|                    |                 |               |                |       | <i>Praomys derooi</i> (6, 0/4)         |
|                    |                 |               |                |       | <i>Rattus rattus</i> (4, 0/3)          |
| Lanta              | 07°06'N/01°52'E | 29/02/2004    | Manual catches | N, HD | <i>Mastomys natalensis</i> (9, 0/7)    |
|                    |                 |               |                |       | <i>Rattus rattus</i> (7, 0/6)          |
|                    |                 |               |                |       | <i>Cricetomys gambianus</i> (5, 0/3)   |
|                    |                 |               |                |       | <i>Arvicathis rufinus</i> (5, 0/0)     |
|                    |                 |               |                |       | <i>Gerbilliscus kempfi</i> (1, 0/0)    |
| <b>Total Benin</b> |                 |               | <b>877</b>     |       | <b>Total specimens: 249, 0/172</b>     |
| <b>Chad</b>        |                 |               |                |       |                                        |
| Sounoute (Saguéré) | 14°09'N/21°50'E | 19-20/01/2003 | 100            | N     | <i>Atelerix albiventris</i> (1, 0/0)   |
| Doué               | 09°16'N/14°41'E | 8-10/02/2003  | 338            | N, HD | <i>Mastomys natalensis</i> (2, 0/2)    |
|                    |                 |               |                |       | <i>Crocidura</i> sp. (1, 0/1)          |
|                    |                 |               |                |       | <i>M. erythroleucus</i> (29, 0/29)     |
|                    |                 |               |                |       | <i>M. kollmannspergeri</i> (16, 0/16)  |
|                    |                 |               |                |       | <i>Gerbilliscus</i> sp. (1, 0/1)       |
|                    |                 |               |                |       | <i>Uranomys ruddi</i> (1, 0/0)         |
| Mataya             | 11°59'N/18°02'E | 26/01/2003    | Manual catches | HD    | <i>Mastomys natalensis</i> (3, 0/3)    |
| <b>Total Chad</b>  |                 |               | <b>438</b>     |       | <b>Total specimens: 54, 0/52</b>       |
| <b>Cameroon</b>    |                 |               |                |       |                                        |
| Yik                | 12°30'N/14°35'E | 4-6/02/2003   | 263            | HD, N | <i>Crocidura</i> sp. (4, 0/4)          |
|                    |                 |               |                |       | <i>Mastomys natalensis</i> (3, 0/3)    |
|                    |                 |               |                |       | <i>Gerbilliscus</i> sp. (13, 0/12)     |
|                    |                 |               |                |       | <i>M. kollmannspergeri</i> (4, 0/4)    |
|                    |                 |               |                |       | <i>Mastomys</i> sp. (7, 0/4)           |
|                    |                 |               |                |       | <i>Taterillus lacustris</i> (7, 0/5)   |
|                    |                 |               |                |       | <i>Atelerix albiventris</i> (2, 0/0)   |
|                    |                 |               | Manual catches | N     | <i>Desmodilliscus braueri</i> (5, 0/5) |
| Kossa              | 11°07'N/14°19'E | 1-3/02/2003   | 338            | HD, N | <i>Arvicanthis</i> sp. (6, 0/4)        |
|                    |                 |               |                |       | <i>Mastomys erythroleucus</i> (8, 0/8) |
|                    |                 |               |                |       | <i>Mastomys natalensis</i> (3, 0/3)    |
|                    |                 |               |                |       | <i>Arvicanthis</i> sp. (21, 0/19)      |
|                    |                 |               |                |       | <i>Gerbilliscus</i> sp. (8, 0/7)       |
|                    |                 |               |                |       | <i>Mastomys erythroleucus</i> (2, 0/2) |

|                       |                 |               |                |       |                                          |
|-----------------------|-----------------|---------------|----------------|-------|------------------------------------------|
|                       |                 |               |                |       | <i>Lemniscomys zebra</i> (3, 0/3)        |
|                       |                 |               |                |       | <i>Xerus erythropus</i> (3, 0/1)         |
|                       |                 |               |                |       | <i>Gerbilliscus</i> sp. (16, 0/15)       |
|                       |                 |               |                |       | <i>Taterillus</i> sp. (5, 0/2)           |
|                       |                 |               |                |       | <i>Atelerix albiventris</i> (1, 0/0)     |
| Mogom                 | 10°30'N/14°25'E | 29-31/01/2003 | 313            | HD, N | <i>Crocidura</i> sp. (8, 0/8)            |
|                       |                 |               |                |       | <i>Mastomys natalensis</i> (3, 0/3)      |
|                       |                 |               |                |       | <i>Arvicanthis</i> sp. (1, 0/1)          |
|                       |                 |               |                |       | <i>Crocidura</i> sp. (2, 0/2)            |
|                       |                 |               |                |       | <i>Arvicanthis</i> sp. (14, 0/12)        |
|                       |                 |               |                |       | <i>Mastomys erythroleucus</i> (12, 0/12) |
|                       |                 |               |                |       | <i>M. kollmannspergeri</i> (15, 0/15)    |
|                       |                 |               | Manual catches | N     | <i>Desmodilliscus braueri</i> (2, 0/2)   |
|                       |                 |               |                |       | <i>M. kollmannspergeri</i> (1, 0/1)      |
| Diéra                 | 08°31'N/13°30'E | 11-12/02/2003 | 195            | HD, N | <i>Mastomys natalensis</i> (14, 0/12)    |
|                       |                 |               |                |       | <i>Rattus rattus</i> (1, 0/1)            |
|                       |                 |               |                |       | <i>Lemniscomys zebra</i> (7, 0/5)        |
|                       |                 |               |                |       | <i>Arvicanthis</i> sp. (2, 0/2)          |
|                       |                 |               |                |       | <i>M. kollmannspergeri</i> (2, 0/2)      |
|                       |                 |               |                |       | <i>Taterillus congicus</i> (2, 0/2)      |
| <b>Total Cameroon</b> |                 |               | <b>1,109</b>   |       | <b>Total specimens: 207, 0/182</b>       |

\* Detailed data for Morocco available in ref. 60

\*\* No: number of specimens captured, I: number infected, T: number tested

F: Fields

N: Natural habitat

HD: Human dwellings

## Article 2

Haitham Elbir, Aurélien FotsoFotso, **Georges Diatta**, Jean François Trape, Céline Arnathau, François Renaud, and Patrick Durand. **Ubiquitous bacteria *Borrelia crocidurae* in Western African ticks *Ornithodoros sonrai*. Parasites & Vectors**

SHORT REPORT

Open Access



# Ubiquitous bacteria *Borrelia crocidurae* in Western African ticks *Ornithodoros sonrai*

Haitham Elbir<sup>1†</sup>, Aurélien FotsoFotso<sup>1†</sup>, Georges Diatta<sup>1,3</sup>, Jean François Trape<sup>2,3</sup>, Céline Arnathau<sup>2</sup>, François Renaud<sup>2</sup> and Patrick Durand<sup>2\*</sup>

## Abstract

**Background:** In West Africa, tick-borne relapsing fever is a neglected arthropod-borne infection caused by *Borrelia crocidurae* transmitted by the argasid tick *Ornithodoros sonrai*. From an epidemiological point of view, it is of interest to know whether some genotypes of the vector are specialized in carrying certain genotypes of the pathogen.

**Findings:** Thirty-five *O. sonrai* ticks collected in Mali, Senegal, Mauritania and Morocco confirmed to be *B. crocidurae*-infected, were genotyped by 16S rRNA gene sequencing. *B. crocidurae* was genotyped by Multispace Sequence Typing. The 35 *O. sonrai* ticks grouped into 12 genotypes with strong geographical structuration. MST resolved the 35 *B. crocidurae* isolates into 29 genotypes with pairwise divergence of 0.09 - 1.56 % without strict geographical structuration as genotype ST22 was found in Mali, Senegal and Mauritania. There was no evidence of tick-borrelia specialization as one *O. sonrai* genotype carried several *B. crocidurae* genotypes and one *B. crocidurae* genotype was found in different *O. sonrai* genotypes.

**Conclusions:** This report illustrates a non-specialized circulation of *B. crocidurae* borreliae within *O. sonrai* ticks in West Africa.

**Keywords:** Argasid ticks, *Borrelia*, Multiple spacer sequence typing

## Background

*Borrelia crocidurae* is one of the spirochetes responsible for tick-borne relapsing fever in North and West Africa [1]. In these countries, borreliae are maintained between *Ornithodoros sonrai* argasid ticks and rodents while the humans get infected accidentally [2, 3]. Accordingly, *B. crocidurae* has been detected in *O. sonrai* ticks collected in Tunisia, Morocco, Mauritania, Senegal [4] and Mali [3]. In Morocco, borreliae infection was found in 10.2 % of ticks and 8.6 % of tested rodents and insectivores [5]. In Mali, *B. crocidurae* was found in 17.3 % of *O. sonrai* ticks and its diversity was established and characterized in 15 samples by multi-locus sequence typing (MLST) [3]. In patients, an average incidence of 11 per 100 person-years was reported in humans at Senegal [2].

It has already been reported that multiple strains of *B. crocidurae* were probably transmitted by ticks collected from the same geographical area and their progeny [6]. This observation however, was made before tools were available for a fine discrimination between both ticks and borreliae groups. Recently, such sequencing-based tools allowed refining the diversity of *O. sonrai* ticks into nine subgroups [7]. Likewise, MLST [3] and multiple spacer sequence typing (MST) [8] discriminated groups among *B. crocidurae*. Genotyping found a strong geographical structuration of the *O. sonrai* tick population [7], however, it remains unknown whether certain *O. sonrai* genetic variants are specialized in certain genetic variants of *B. crocidurae*. The aim of the present work was to investigate this question using modern molecular tools for genotyping *O. sonrai* ticks infected by *B. crocidurae*.

## Findings

The National Ethics Committee of Senegal approved the protocol used for human samples. The study protocol was also approved by the Steering Committee of the Institut de Recherche pour le Développement (IRD)

\* Correspondence: patrick.durand@ird.fr

<sup>†</sup>Equal contributors

<sup>2</sup>MIVEGEC, UMR-CNRS 5290, IRD 224, Parasitologie-Mycologie, CHRU Site Balmès, Montpellier, France

Full list of author information is available at the end of the article

Special Programme Evolution Climatique et Santé (IRD, Montpellier, France), reference project ATI-ECS-07-H/2002.

*O. sonrai* ticks here studied are not registered as endangered species. Ticks were collected using a flexible tube and a portable aspirator, inside houses and private lands after the owner of the house and land gave permission to conduct the study on the site. Collected ticks were immediately preserved in ethanol 70 %, before total DNA (tick and *Borrelia*) was extracted and purified by using the DNeasy Tissue extraction kit (Qiagen, Hilden, Germany) according to the manufacturer's instructions and stored at -20 °C until used as a template for the PCR-based amplification of tick or *Borrelia* genes.

The presence of *B. crocidurae* was confirmed in ticks by flagellin gene PCR-sequencing as previously described [4]. Genotyping of *B. crocidurae* was then done by using MST as previously [8]. The nucleotide sequences were edited using ChromasPro software ([www.technelysium.com.au/chromas.html](http://www.technelysium.com.au/chromas.html)). Similarities between MST types were determined after multiple alignments using the

Muscle software implemented in MEGA5 package [9]. The five-spacer sequences analyzed herein were concatenated. Relationships among *B. crocidurae* genotypes detected in ticks plus previously published 7 spacer types (STs) of human *B. crocidurae* isolates [8] were inferred using the Bayesian phylogenetic analyses in MrBayes v3.1.2 using default parameters [10]. Each particular combination of the five spacer sequences was assigned to a spacer type (ST) number.

In parallel, tick genotyping was done by 16S rRNA gene sequencing as previously described [7]. Modeltest 3.4 [11] was used to select the appropriate model of molecular evolution. The best-fitting ML model was HKY85 [12] for 16S rRNA sequences. The highest-likelihood DNA and corresponding bootstrap support values were obtained by PhyML (freely available at <http://mobyle.pasteur.fr/cgi-bin/portal.py#welcome>) using NNI (Nearest Neighbor Interchange) branch swapping and 1000 bootstrap replicates.

A total of 35 ticks - *Borrelia crocidurae* complexes collected in four countries (14 sites) and 13 infected patients were used in this study. All the new spacer nucleotide

**Table 1** Geographical sites and 16 s rRNA genotypes for *Ornithodoros sonrai* ticks used in this study from Trape and colleagues [7]

| Country    | Location                | Coordinates     | Code of ticks | Code of 16S rRNA group of ticks |
|------------|-------------------------|-----------------|---------------|---------------------------------|
| Morocco    | Boudnib                 | 31°59'N-03°59'W | BOUD1310      | Os01                            |
| Mauritania | Amridjuel (Oum El Khez) | 17°00'N-10°59'W | OUM1047       | Os06                            |
|            |                         |                 | OUM1044       | Os05                            |
|            |                         |                 | OUM 1063      | Os01                            |
| Senegal    | Dielmo                  | 13°43'N-16°24'W | DL1646 DL1650 | Os11                            |
|            |                         |                 | DL1669 DL1675 |                                 |
|            |                         |                 | DL1676 DL1706 |                                 |
|            |                         |                 | DL1657 DL1661 | Os12                            |
|            |                         |                 | DL1662 DL1674 |                                 |
|            |                         |                 | DL1677 DL1680 |                                 |
|            |                         |                 | DL1709        |                                 |
|            | Thianène (Darou Mousti) | 15°04'N-16°00'W | DM129 DM136   | Os03                            |
|            |                         |                 | DM148 DM150   |                                 |
|            |                         |                 | DM155 DM160   |                                 |
|            | Néma-Nding              | 13°42'N-16°25'W | NNT919        | Os10                            |
|            | Keur Aliou Gueye        | 13°47'N-16°24'W | KAG349 KAG351 | Os12                            |
|            | Kanène Khar             | 15°30'N-16°01'W | KKH113        | Os03                            |
|            | Keur Lamine Socé        | 13°44'N-16°25'W | KLS363 KLS364 | Os12                            |
| Mali       | Kéniéba                 | 14°05'N-12°03'W | KNB305        | Os07                            |
|            | Taouey (Richard-Toll)   | 16°27'N-15°42'W | RT12          | Os02                            |
|            | Makania (Diamou)        | 14°04'N-11°09'W | DIA999        | Os03                            |
|            | Dianguirdé (Diéma)      | 14°30'N-09°01'W | DIEM1207      | Os04                            |
|            | Kolomina (Doubala)      | 14°28'N-08°01'W | DOUB1237      | Os09                            |
|            | Sogoli (Ké-Macina)      | 13°58'N-05°28'W | KEM1410       | Os08                            |

sequences of *Borrelia crocidurae* have been deposited in the GenBank database under accession numbers KF843734–KF843765 and described previously, including sequences of *B. crocidurae* from patients (JQ398819–JQ398841) [1]. The 16S rRNA sequences of *Ornithodoros sonrai* were also deposited in GenBank KP644211–KP644222).

## Results

In all PCR-based experiments, negative controls remained negative. The *B. crocidurae*-infected ticks here investigated comprised one tick from Morocco (1 site), three ticks from Mauritania (1 site), twenty-seven ticks from Senegal (8 sites) and four ticks from Mali (4 sites) (Table 1).

As for tick genotyping, all positions containing gaps and missing data were eliminated from the 441-bp aligned fragment of 16S rRNA gene sequences of *O. sonrai*. There was a total of 435 positions with 36 variable sites and 20 parsimony-informative sites in the final dataset. The 35 *O. sonrai* ticks used for the genetic analysis yielded 12 different genotypes (Table 1, Fig. 1). All ticks in the same clade (i.e. Os) had identical 16S rRNA sequences (Fig. 1).

One tick (Boud1310) collected in Morocco yielded one genotype (Os01) common with a tick (Oum1063) from Mauritania, the two other ticks collected in Mauritania yielded two genotypes. The twenty-seven ticks collected in Senegal (8 sites) yielded six genotypes and the four ticks collected in Mali yielded four genotypes (Fig. 1). More specifically, the Os04, Os09 and Os10 genotypes were

found only in Mali whereas the Os03 genotype was found both in Mali and Senegal; the Os05 and Os06 genotypes were found only in Mauritania whereas the genotype Os01 was found both in Morocco and Mauritania; the genotypes Os02, Os07, Os10, Os11, Os12 were found only in Senegal (Fig. 1).

As for *B. crocidurae* genotyping, the analysis of the spacer sequences derived from the 35 *B. crocidurae* isolates from ticks yielded 29 spacer types (STs) named ST14–ST42 and 13 *B. crocidurae* isolates from patients yielded 7 spacer types (STs) previously named ST6–ST12 [8] (Fig. 2). Pairwise divergence between *B. crocidurae* ranged from 0.09 to 1.56 %. ST22 was detected in ticks collected in Mali, Senegal and Mauritania. The ST35 in Dielmo (Senegal) was found in tick genotype Os11 and Os12 and five STs (STs 14, 15, 38, 39 and 40) were found in Darou Mousti (Senegal). Three STs named ST38–ST40 were found in Senegal and carried by genotype Os03 (Figs. 1 and 2). Tick genotypes Os01, Os03, Os11 and Os12 carried more than one genotype of *B. crocidurae*. The phylogenetic tree constructed from 35 spacer sequences of *B. crocidurae* separated the strains into two clades. A first clade comprised of 32 *B. crocidurae* genotypes and a second clade comprised of three *B. crocidurae* genotypes (STs 38–40). A phylogenetic tree combining the STs found here in ticks, with the STs previously reported in patients [8], yielded a geographical clustering of *B. crocidurae* in patients and ticks from Dielmo, Senegal (Fig. 2).

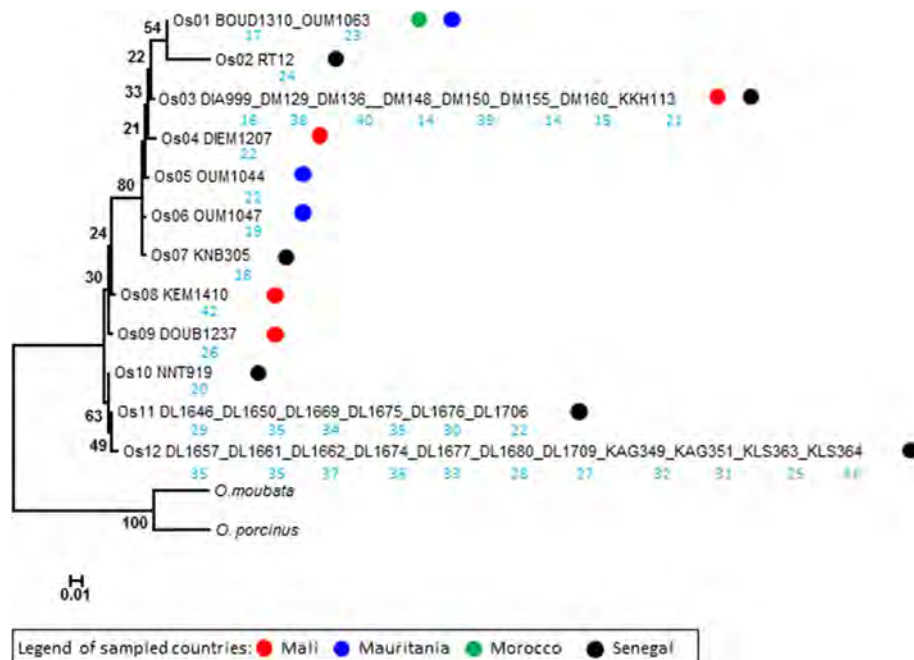
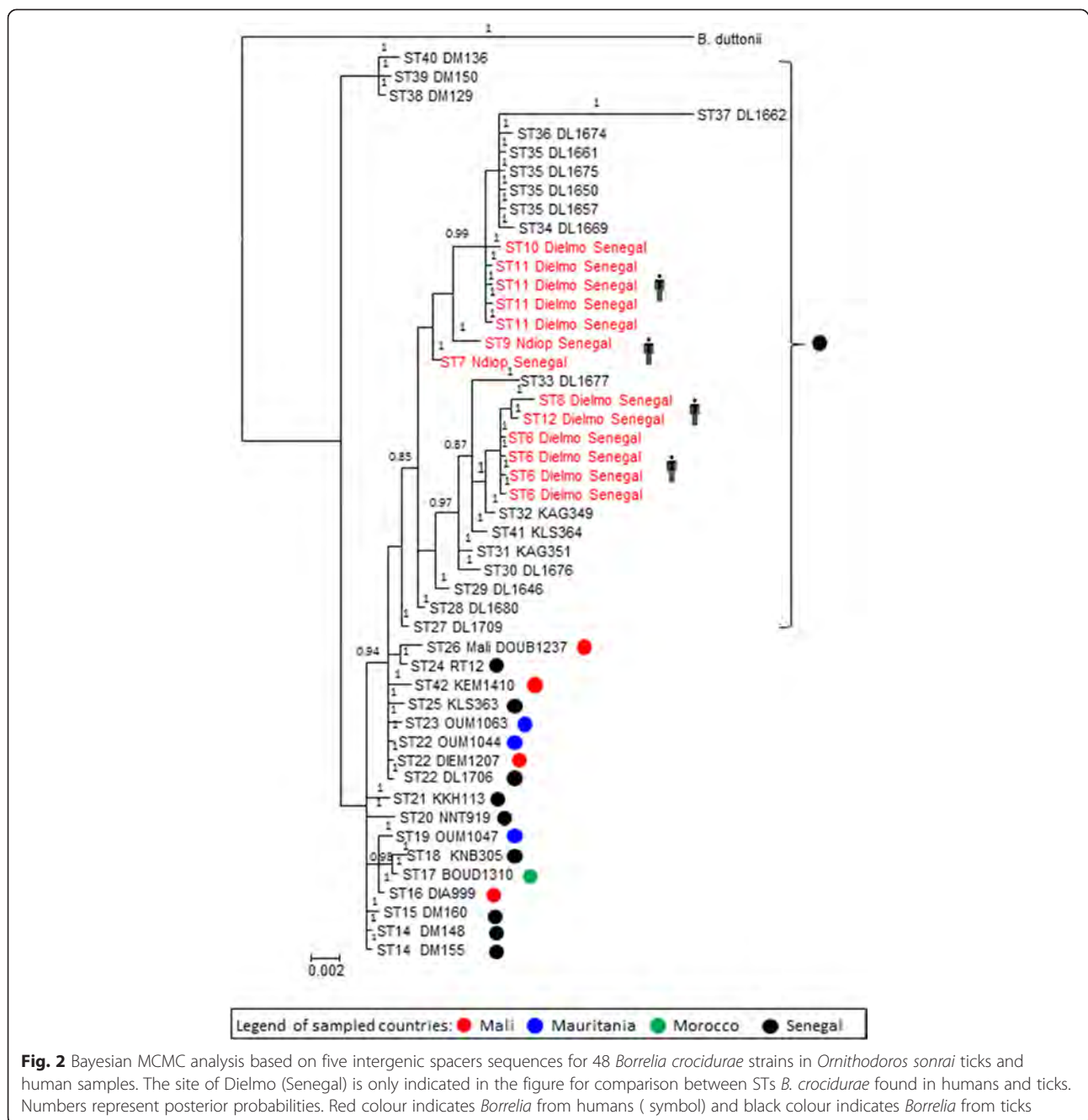


**Fig. 1** Phylogram (PhyML 1000 bootstraps) of partial 16S rRNA gene sequence data (441 nucleotides) of *Ornithodoros sonrai* sequences (35 sequences were grouped in 12 Os). Bootstrap values are shown in black (scale bar, 0.01 substitutions per site). Two 16S rRNA gene sequences of *Ornithodoros moubata* (GenBank accession number AB073679) and *Ornithodoros porcinus* (GenBank accession number AB105451), were treated as outgroups. Os: code of 16S rRNA groups. Number in blue: Spacer-Type of *Borrelia crocidurae*



## Discussion

The presence of several genetic variants of *B. crocidurae* has recently been reported in Mali [3]. In Mali, plasmidogram found six profiles among 15 isolates which yielded four MLST groups after sequencing the 16S rRNA, *flaB* and *glpQ* genes and the IGS [3]. Here, we further observed a high diversity of *B. crocidurae* in West Africa, in observing 27 genetic variants determined by MST, among 35 *B. crocidurae* samples. While plasmidogram and MLST required cultured borreliae [3], we applied MST directly to infected

ticks as we previously did on the blood collected from infected patients in Senegal [1, 8].

Previous study showed differences in the infection rate of *O. sonrai* from different regions, compatible with differences in vector competence [4]. Our study does not verify this hypothesis. Indeed, the diversity of tick-borne *B. crocidurae* was not superimposed on that of *O. sonrai*. We found that one *B. crocidurae* ST was carried by different genotypes of *O. sonrai*. In addition, one *O. sonrai* genotype was carrying different *B. crocidurae* STs. Accordingly, we



observed that one *B. crocidurae* ST22 was circulating in Mali, Mauritania and Senegal with different tick genotypes (Os04, Os05 and Os11). The ST35 (4 bacterial samples) was also circulating in two tick genotypes (Os11, Os12). Figure 2 also shows the *B. crocidurae* ST14 detected in two ticks of one sampled site (Darou Mousti, Senegal). These findings indicate that, within *O. sonrai*, there is no specialization of certain tick genetic variants for their capacity to host *B. crocidurae*.

Also, we were able to compare *B. crocidurae* MST genotypes in patients and ticks of the same village of Dielmo, rural Senegal. In this village, the *B. crocidurae* genotypes previously reported in patients unsurprisingly form a subset of the strains circulating in the tick vectors, confirming *O. sonrai* as the vector of *B. crocidurae* in this village.

This analysis indicates that MST is well adapted to study the diversity of borreliae on a small, kilometer geographical size; other tools may be more suitable on a larger scale.

#### Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

#### Authors' contribution

Conceived and Performed the experiments: EH AFF CA PD. Analyzed the data: AFF EH FR PD. Contributed reagents/materials/analysis tools: JFT GD CA. Wrote the manuscript: AFF EH FR PD. All authors read and approved the final version of the manuscript.

#### Acknowledgments

This work is a part of an Agence Nationale de la Recherche program, France, and the IRD special programme "Evolution Climatique et Santé" (ref: IRD-ATI-ECS). Haitham Elbir and Aurélien Fotso Fotso benefited from grants by Méditerranée Infection Fondation, Marseille, France.

#### Author details

<sup>1</sup>Aix Marseille, Université, Unité de Recherche sur les Maladies Infectieuses et Tropicales Emergentes (URMITE), UMR CNRS 7278, IRD 198, INSERM 1095, Marseille, France. <sup>2</sup>MIVEGEC, UMR-CNRS 5290, IRD 224, Parasitologie-Mycologie, CHRU Site Balmès, Montpellier, France. <sup>3</sup>Campus commun UCAD-IRD d'Hann, Dakar, Senegal.

Received: 7 July 2015 Accepted: 9 September 2015

Published online: 17 September 2015

#### References

1. Elbir H, Raoult D, Drancourt M. Relapsing fever Borreliae in Africa. *Am J Trop Med Hyg*. 2013;89:288–92.
2. Trape JF, Duplantier JM, Bouganali H, Godeluck B, Legros F, Cornet JP, et al. Tick-borne borreliosis in West Africa. *Lancet*. 1991;337:473–5.
3. Schwan TG, Anderson JM, Lopez JE, Fischer RJ, Raffel SJ, McCoy BN, et al. Endemic foci of the tick-borne relapsing fever spirochete *Borrelia crocidurae* in Mali, West Africa, and the potential for human infection. *PLoS Negl Trop Dis*. 2012;6:e1924.
4. Vial L, Durand P, Arnathau C, Halos L, Diatta G, Trape JF, et al. Molecular divergences of the *Ornithodoros sonrai* soft tick species, a vector of human relapsing fever in West Africa. *Microbes Infect*. 2006;8:2605–11.
5. Diatta G, Souidi Y, Granjon L, Arnathau C, Durand P, Chauvancy G, et al. Epidemiology of tick-borne borreliosis in Morocco. *PLoS Negl Trop Dis*. 2012;6:e1810.
6. Baltazard M. Sur le classement des spirochètes récurrents. *Ann Parasitol Hum Comp*. 1954;29:12–32.
7. Trape JF, Diatta G, Arnathau C, Bitam I, Sari H, Belghyti D, et al. The epidemiology and geographic distribution of relapsing fever borreliosis in West and North Africa, with a review of the *Ornithodoros* complex (Acari: Ixodida). *PLoS One*. 2013;8:e78473.

8. Elbir H, Gimenez G, Sokhna C, Bilcha K, Ali J, Barker SC, et al. Multispace Sequence typing relapsing fever borreliae in Africa. *PLoS Negl Trop Dis*. 2012;6:e1652.
9. Tamura K, Peterson D, Peterson N, Stecher G, Nei M, Kumar S. MEGA5: Molecular Evolutionary Genetics Analysis using maximum likelihood, evolutionary distance, and maximum parsimony methods. *Mol. Biol. Evol*. 2011;28:2731–9.
10. Ronquist F, Huelsenbeck JP. MrBayes 3: Bayesian phylogenetic inference under mixed models. *Bioinformatics*. 2003;19:1572–4.
11. Posada D, Crandall KA. MODELTEST: Testing the model of DNA substitution. *Bioinformatics*. 1998;14:817–8.
12. Hasegawa M, Kishino H, Yano T. Dating of human-ape splitting by a molecular clock of mitochondrial DNA. *J Mol Evol*. 1985;22:160–74.

**Submit your next manuscript to BioMed Central and take full advantage of:**

- Convenient online submission
- Thorough peer review
- No space constraints or color figure charges
- Immediate publication on acceptance
- Inclusion in PubMed, CAS, Scopus and Google Scholar
- Research which is freely available for redistribution

Submit your manuscript at  
www.biomedcentral.com/submit



### Article 3

**Georges Diatta**, Jean-Marc Duplantier, Laurent Granjon, Khalilou Bâ, Gilles Chauvancy, Mady Ndiaye, Jean-François Trape. ***Borrelia* infection in small mammals in West Africa and its relationship with tick occurrence inside burrows.** Acta Tropica



## Review

# Borrelia infection in small mammals in West Africa and its relationship with tick occurrence inside burrows



Georges Diatta<sup>a,\*</sup>, Jean-Marc Duplantier<sup>b</sup>, Laurent Granjon<sup>b,c</sup>, Khalilou Bâ<sup>c</sup>, Gilles Chauvancy<sup>a</sup>, Mady Ndiaye<sup>d</sup>, Jean-François Trape<sup>e</sup>

<sup>a</sup> Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Campus International de Recherche IRD-Université Cheikh Anta Diop (UCAD) de Dakar, Hann Mariste, BP 1386, CP 18524 Dakar, Senegal

<sup>b</sup> Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Centre de Biologie pour la Gestion des Populations, UMR 22, Campus de Baillarguet, CS 30016, 34988 Montpellier sur Lez cedex, France

<sup>c</sup> Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Centre de Biologie pour la Gestion des Populations, UMR 22, Campus ISRA-IRD de Bel Air, BP 1386, Dakar, Senegal

<sup>d</sup> Département de Biologie Animale, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop (UCAD) de Dakar, BP 5005, Senegal

<sup>e</sup> Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Laboratoire de Paludologie et de Zoologie Médicale, UMR MIVEGEC, Campus International de Recherche IRD-Université Cheikh Anta Diop (UCAD) de Dakar, Hann Mariste, BP 1386, CP 18524 Dakar, Senegal

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 10 June 2015

Received in revised form 19 August 2015

Accepted 27 August 2015

## Keywords:

Small mammals

*Ornithodoros sonrai*

*Borrelia crocidurae*

Borreliosis

Relapsing fever

Africa

## ABSTRACT

Tick-borne relapsing fever (TBRF) is a zoonotic disease caused by several *Borrelia* species transmitted to humans by *Ornithodoros* tick vectors. In West Africa, *Borrelia crocidurae* is a common cause of disease in many rural populations. Small mammals act as reservoirs of infection. We report here the results of surveys that investigated the occurrence of *B. crocidurae* infection in rodents and insectivores from eight countries of West and Central Africa. Animals were identified at the species level and tested for *Borrelia* either by examination of thick blood film, intra-peritoneal inoculation of blood or brain tissues into laboratory mice, or by molecular techniques. A total of 4358 small mammals belonging to 38 species and 7 families were collected, including 3225 specimens collected in areas where the occurrence of *Ornithodoros sonrai* tick in rodent burrows was documented, and 1133 in areas where this tick was absent. In areas with *O. sonrai*, *Borrelia* infection was demonstrated in 287 of 3109 (9.2%) small mammals tested, and none was documented in 1004 animals tested from other areas. There was no relationship between the occurrence of *Rhipicephalus*, *Hyalomma* and *Argas* ticks in burrows and the distribution of *Borrelia* infection in small mammals. The 287 specimens infected by *Borrelia* belonged to 15 rodent and shrew species, including three Saharo-Saharan species – *Gerbillus gerbillus*, *Gerbillus occiduus* and *Gerbillus tarabuli* – identified as reservoirs for TBRF with a distribution restricted to this area. In Sudan and Sudano-Saharan areas, *Arvicanthis niloticus*, *Mastomys erythroleucus* and *Mastomys huberti* were the main reservoir of infection. Although most small mammals species collected had a large distribution in West and Central Africa, the fact that only animals collected in areas with *O. sonrai* were found infected suggest that this tick is the only vector of TBRF in rodents and insectivores in this part of Africa.

© 2015 Elsevier B.V. All rights reserved.

## Contents

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Introduction .....                                               | 132 |
| 2. Materials and methods .....                                      | 132 |
| 2.1. <i>Ornithodoros</i> tick surveys in small mammal burrows ..... | 132 |
| 2.2. Sampling of small mammals .....                                | 132 |
| 2.3. Detection of <i>Borrelia</i> infections in small mammals ..... | 133 |
| 2.4. Statistical analysis .....                                     | 133 |
| 2.5. Ethics statement .....                                         | 135 |

\* Corresponding author.

E-mail address: [georges.diatta@ird.fr](mailto:georges.diatta@ird.fr) (G. Diatta).

|      |                                                                                                              |     |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.   | Results .....                                                                                                | 135 |
| 3.1. | Small mammal diversity and <i>Borrelia</i> infections .....                                                  | 135 |
| 3.2. | Prevalence of <i>Borrelia</i> infections according to ecosystems and rainfall .....                          | 135 |
| 3.3. | Prevalence of <i>Borrelia</i> infections according to <i>Ornithodoros</i> and other ticks distribution ..... | 135 |
| 3.4. | Prevalence of infected small mammals according to species .....                                              | 138 |
| 4.   | Discussion .....                                                                                             | 138 |
|      | Conflict of interest .....                                                                                   | 140 |
|      | Acknowledgments .....                                                                                        | 140 |
|      | References .....                                                                                             | 140 |

## 1. Introduction

Rodents and insectivores are among the most diverse groups of mammals (Musser and Carleton, 2005). Due to their wide distribution, high reproductive potential and often peri-domestic affinities, they play an important role as natural reservoirs for zoonotic diseases (Mills, 1999). Among these, tick-borne relapsing fever (TBRF) due to different species of spirochaete bacteria of the genus *Borrelia* occurs in Africa. Small mammals may be naturally infected by TBRF *Borrelia* and each *Borrelia* species is transmitted by one or several *Ornithodoros* tick species of the family Argasidae (Trape et al., 2013). Classically, three main different *Ornithodoros/Borrelia* systems exist in Africa (Cutler et al., 2009; Rodhain, 1976): *Borrelia duttoni* in Eastern and Southern Africa with *Ornithodoros moubata* and *Ornithodoros porcinus* as vectors, *Borrelia crocidurae* in West Africa and the most arid parts of North Africa with *Ornithodoros sonrai* as vector, and *Borrelia hispanica* in coastal areas of North Africa with ticks of the *Ornithodoros maroccanus* and *O. erraticus* complexes as vectors (Trape et al., 2013). In the case of TBRF due to *B. duttoni*, no mammal species has been identified as reservoir for this pathogen, and *O. moubata* and *O. porcinus* ticks act both as vector and reservoir for infection (Rodhain, 1976). Conversely, in West and North Africa, small mammals have been proven to act as reservoirs for *Borrelia* infections (Boiron, 1949; Diatta et al., 2012; Mathis et al., 1934; Schwan et al., 2012; Trape et al., 1996). However, the *O. sonrai* tick like other *Ornithodoros* ticks constitute also reservoirs of *Borrelia* providing, thus, conditions of bacterial persistence within *Ornithodoros* tick populations, due to the longevity of *Ornithodoros* ticks studied in *O. tholozani*, the long survival of *Borrelia* in ticks organism without losing their pathogenicity and the transovarial and trans-stadial transmission of *B. crocidurae* demonstrated in *O. sonrai* (Gaber et al., 1984; Parola and Raoult, 2001; Pavlovsky and Shrynnik, 1952; Rodhain and Perez, 1985). *Ornithodoros* tick vectors are temporary ecto-parasites that live inside rodent and other mammal burrows. Humans are usually contaminated when burrows open inside or near houses, which allows the tick vector to bite humans, in particular at night, causing an acute illness with fever relapses whose average annual incidence may reach up to 11 per 100 person-years in West African rural populations (Vial et al., 2006).

Few studies have investigated the role of rodents and insectivores as natural reservoirs for TBRF *Borrelia* in West Africa. In Senegal, where TBRF has been the most extensively studied, one dozen rodent species have been shown to be frequently infected (Diatta et al., 1994; Godeluck et al., 1994; Trape et al., 1996). Recent work in Mali has shown a high prevalence of *B. crocidurae* infection in 8 species of small mammals, with 35% of animals seropositive and 10% infected in an endemic focus of TBRF (Schwan et al., 2012). However, it is not known to what extent the occurrence of *Borrelia* infection in small mammals is correlated to *Ornithodoros* and/or other ticks distribution and if additional environmental parameters are involved.

As part of studies conducted in Senegal since the late 1980s (Trape et al., 1996; Diatta et al., unpublished data) and in further

West and Central African countries in the 2000s (Trape et al., 2013), 11,067 burrows were sampled for the occurrence of ticks, and a large number of small mammals were collected and tested for *Borrelia*. In this paper, we analyze species composition and distribution of animals collected, and their *Borrelia* infection rate according to bioclimatic parameters and the presence or absence of ticks in burrows of the areas where they were collected.

## 2. Materials and methods

### 2.1. *Ornithodoros* tick surveys in small mammal burrows

Over a 26-year period (1987–2012), we have conducted numerous investigations in Senegal (since 1987) and in 14 other West and Central African countries (since 2003) to investigate the geographic distribution of TBRF and its potential vectors (Trape et al., 2013, 1996, 1991). *Ornithodoros* ticks were caught inside small mammal burrows using a petrol-powered aspirator as previously described (Trape et al., 1996), what we would like to detail and precise in the description hereafter. Indeed, the flexible plastic tube of 1.5 m long introduced inside burrows to aspirate their contents is fixed to a sieve in iron-filter of 33 cm long and 6.5 cm of diameter built with double iron netting correctly soldered and entered into the PVC modification in order to keep/sort large particles of filter and ticks as well. After examination of a burrow, the content of the sieve in iron-filter and the PVC extension is laid out in two big white trays exposed to sun to make *Ornithodoros* ticks moving and leaving sand (argasid ticks are photophobic and do not support warm temperatures). The sieve in iron-filter and the PVC extension are strongly shaken in one of big empty white tray to ensure that no *Ornithodoros* tick remains attached from an examined burrow to another. This practice has been inspected and validated as reliable by the quality management team of IRD certified to the ISO 9001 Version 2008. Based on these data, we established a distribution map of *O. sonrai*, the only *Ornithodoros* tick species that we collected south of 22°N.

In addition to *O. sonrai*, some other tick species were occasionally collected inside burrows in various areas of Senegal, Mali, Guinea, Niger and Benin, including Argasid and Ixodides ticks. We also examined the geographic distribution of these ticks in relation to the presence or absence of *Borrelia* infection in small mammals.

### 2.2. Sampling of small mammals

Small mammals were captured alive using Sherman® and locally made wire-mesh traps baited with peanut butter and/or onions. Traps were installed outside (usually with 20 traps per line and an interval of 10 m between traps) and inside houses (2 traps per room). Sampling was carried out in numerous localities of Senegal, Mauritania, Mali, Niger, Benin, Chad and Cameroon as listed in Supplementary Tables S1 and S2. Trapped animals were killed by means of cervical dislocation and necropsied in the field. For most animals, a thick blood film was immediately prepared in the field. Blood and brain tissues of rodents and insectivores captured in 2003 and 2004 in Mauritania, Mali, Niger, Benin, Chad and Cameroon

**Table 1**

Type of samples and analysis carried out on small mammals captured.

| Country of collection | Collection year                   | Type of samples                                   | Borrelia analysis method |                                    |                   |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|-------------------|
|                       |                                   |                                                   | Thick blood smear (TBS)  | Inoculation                        | PCR amplification |
| Morocco               | Autumn 2008                       | Blood; Brain tissue in alcohol 95°                | TBS                      | –                                  | Brain tissue PCR  |
| Mauritania            | Autumn 2003                       | Blood and brain tissue in nitrogen then at -80 °C | TBS                      | Blood and brain tissue inoculation | –                 |
|                       | Autumn 2006                       | Brain tissue in alcohol 95°                       | TBS                      | –                                  | –                 |
| Senegal               | Between 1990 and 1993             | Blood                                             | TBS                      | –                                  | –                 |
|                       | March 2002                        | Blood and fresh brain tissue                      | TBS                      | Blood and brain tissue inoculation | –                 |
|                       | February 2013                     | Fresh brain tissue                                | –                        | –                                  | Brain tissue PCR  |
| Mali                  | Between January and February 2004 | Blood and brain tissue in nitrogen then at -80 °C | TBS                      | Brain tissue inoculation           | –                 |
|                       | Autumn 2007                       | Blood; Brain tissue in alcohol 95°                | TBS                      | –                                  | –                 |
| Niger                 | Between January and February 2004 | Blood and brain tissue in nitrogen then at -80 °C | TBS                      | Brain tissue inoculation           | –                 |
| Benin                 | Between January and February 2004 | Blood and brain tissue in nitrogen then at -80 °C | TBS                      | Brain tissue inoculation           | –                 |
| Chad                  | Between January and February 2003 | Blood and brain tissue in nitrogen then at -80 °C | TBS                      | Brain tissue inoculation           | –                 |
| Cameroon              | Between January and February 2003 | Blood and brain tissue in nitrogen then at -80 °C | TBS                      | Brain tissue inoculation           | –                 |

were also preserved in the field in liquid nitrogen (Table 1) then stored at -80 °C in Dakar until further transfer experiments to laboratory mice. Brain tissue samples collected from animals captured in Mauritania and Mali in 2006 and 2007 were stored in 95% ethanol. Conversely, the brain tissue of all small mammals captured in 2013 in Dielmo and Ndiop (Sine-Saloum region, Senegal) were aseptically removed and immediately used for molecular studies. Most of the species of rodents and insectivores caught were identified using either morphological, karyological (standard karyotypes obtained from bone marrow or cell cultures) or molecular (cytochrome b gene sequence data analyses) methods, as described in detail previously (Dobigny et al., 2011; Galan et al., 2012; Granjon and Duplantier, 2009; Granjon and Dobigny, 2003; Lecompte et al., 2005; Ndiaye et al., 2012; Nicolas et al., 2012).

Supplementary material related to this article can be found, in the online version, at <http://dx.doi.org/10.1016/j.actatropica.2015.08.016>.

All these small mammal captures were performed in localities where burrows were also sampled for ticks (Trape et al., 2013, 1996).

### 2.3. Detection of *Borrelia* infections in small mammals

Rodents and insectivores trapped were tested for *Borrelia* using two methods (Diatta et al., 1994): (i) direct examination of the blood of these animals by thick blood film stained with Giemsa, and (ii) intra-peritoneal inoculation of samples of brain and/or blood into laboratory mice, followed by examination of Giemsa stained thick blood film from these mice taken three, six and/or ten days after the blood or brain tissue inoculation. In all instances 200 oil-immersion fields (1000×) were systematically examined (equivalent to about 0.5 µL of blood) for detection of *Borrelia* spirochaetes.

A PCR-based method was developed and used for all animals captured in 2013 from Dielmo and Ndiop (Senegal). Here, DNA extraction was performed from each brain tissue of small mammals removed aseptically. We used primers (Bor16S3F, 5'-AGCCTTTAAAGCTTCGCTTGTAG-3', Bor16S3R, 5'-GCCTCCCGTAGGAGTCTGG-3') and a Taqman probe (Bor16S3P, 5'-6FAM-CCGGCCTGAGAGGGTGAACGG-TAMRA) that were designed for the amplification of a 148-bp fragment of the 16S RNA-encoding gene of *Borrelia*. The specificity of the primers for *Borrelia* spp. detection had been tested on DNA samples from 347 bacterial species as previously described (Parola et al., 2011). Each real-time PCR reaction was performed by using Light Cycler 2.0 equipment and software (Roche Diagnostics GmbH, Mannheim, Germany). Negative controls (sterile water and DNA from a sterile biopsy specimen) were included for each assay. A positive control (*B. crocidurae* DNA) was used for *Borrelia* detection in all samples. All positive samples for *Borrelia* 16S RNA gene were tested with *B. crocidurae*-specific PCR using primers specific for the *flab* gene (Parola et al., 2011).

### 2.4. Statistical analysis

All analyses were performed using OpenEpi.com (Version 3.01) updated 2013/04/06, accessed 2014/07/28 (Dean et al., 2013). Thus, using the Wilson distribution, a 95% confidence interval (CI) for each studied species was calculated and serves as a descriptive element to define probable rate infection or negative (accurate when the sample size is large or random when it is small). Variations in the prevalence of *Borrelia* infections in small mammals were evaluated among species and according to average annual rainfall using the following classes: less than 50 mm; between 50 and 250 mm, 250–500 mm and 500–750 mm (period 1970–1999), data from Mahé et al. (1999). For comparisons between samples,

**Table 2**Small mammals tested for *Borrelia* in areas where the occurrence of *Ornithodoros sonrai* ticks was documented and prevalence of infection among species.

| Species studied                    | No. of animals tested |                   |                   |                   |            | Animals infected with <i>Borrelia</i> |                                 |                        |                      |                       |                       |
|------------------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------|---------------------------------------|---------------------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                    | Any method            | Direct blood film | Blood inoculation | Brain inoculation | Brain PCR  | Any method                            | 95% confidence interval (95%CI) | Direct blood film      | Blood inoculation    | Brain inoculation     | Brain PCR             |
| <i>Arvicanthis niloticus</i>       | 804                   | 800               | 23                | 24                | 4          | 116/804 (14.4%)                       | 12.2–17                         | 108/800 (13.5%)        | 2/23 (8.7%)          | 5/24 (20.8%)          | 3/4 (75%)             |
| <i>Mastomys erythroleucus</i>      | 781                   | 735               | 222               | 120               | 46         | 68/781 (8.7%)                         | 6.9–10.9                        | 29/735 (4%)            | 9/222 (4%)           | 23/117 (19.6%)        | 16/46 (34.8%)         |
| <i>Mastomys huberti</i>            | 357                   | 357               | 0                 | 0                 | 0          | 38/357 (10.6%)                        | 7.8–14.3                        | 38/357 (10.6%)         | 0                    | 0                     | 0                     |
| <i>Mus musculus</i>                | 340                   | 333               | 5                 | 7                 | 5          | 6/340 (1.7%)                          | 0.8–3.8                         | 5/333 (1.5%)           | 0/5                  | 1/7 (14.3%)           | 0/5                   |
| <i>Praomys daltoni</i>             | 182                   | 181               | 2                 | 2                 | 1          | 11/182 (6%)                           | 3.4–10.5                        | 11/181 (6%)            | 0/2                  | 0/2                   | 0/1                   |
| <i>Gerbilliscus gambianus</i>      | 85                    | 31                | 6                 | 3                 | 54         | 10/85 (11.7%)                         | 6.5–20.3                        | 3/30 (10%)             | 0/6                  | 0/6                   | 7/54 (13%)            |
| <i>Mastomys natalensis</i>         | 79                    | 79                | 63                | 63                | 0          | 7/79 (8.8%)                           | 4.3–17.2                        | 7/79 (8.8%)            | 0/63                 | 0/63                  | 0                     |
| <i>Crocidura</i> spp.              | 62                    | 62                | 0                 | 0                 | 0          | 4/62 (6.4%)                           | 2.5–15.4                        | 4/62 (6.4%)            | 0                    | 0                     | 0                     |
| <i>Taterillus gracilis</i> complex | 53                    | 53                | 0                 | 0                 | 0          | 8/53 (15%)                            | 7.8–27                          | 8/53 (15%)             | 0                    | 0                     | 0                     |
| <i>Gerbillus tarabuli</i> *        | 53                    | 53                | 53                | 53                | 0          | 2/53 (3.8%)                           | 1–12.7                          | 2/53 (3.8%)            | 0/53                 | 0/53                  | 0                     |
| <i>Rattus rattus</i> *             | 41                    | 35                | 6                 | 6                 | 0          | 2/41 (4.8%)                           | 1.3–16.1                        | 0/35                   | 0/6                  | 2/6 (33.3%)           | 0                     |
| <i>Crocidura olivieri</i>          | 36                    | 28                | 28                | 33                | 3          | 10/36 (27.8%)                         | 15.8–44                         | 0/28                   | 1/28 6 (3.6%)        | 9/33 (27.3%)          | 1/3 (33.3%)           |
| <i>Cricetomys gambianus</i> *      | 27                    | 22                | 4                 | 5                 | 0          | 3/27 (11.1%)                          | 3.8–28                          | 3/27 (11.1%)           | 0/4                  | 0/3                   | 0                     |
| <i>Gerbillus gerbillus</i> *       | 27                    | 27                | 0                 | 0                 | 0          | 1/27 (3.7%)                           | 0.6–18.3                        | 1/27 (3.7%)            | 0                    | 0                     | 0                     |
| <i>Acomys airensis</i>             | 25                    | 25                | 25                | 25                | 0          | 0/25 (0%)                             | 0.0–13.3                        | 0/25                   | 0/25                 | 0/25                  | 0                     |
| <i>Jaculus jaculus</i>             | 25                    | 25                | 25                | 25                | 0          | 0/25 (0%)                             | 0.0–13.3                        | 0/25                   | 0/25                 | 0/25                  | 0                     |
| <i>Atelerix albiventris</i>        | 19                    | 19                | 2                 | 2                 | 2          | 0/19 (0%)                             | 0.0–16.80                       | 0/17                   | 0/2                  | 0/2                   | 0/2                   |
| <i>Gerbillus pyramidum</i>         | 18                    | 18                | 0                 | 0                 | 0          | 0/18 (0%)                             | 0.0–17.6                        | 0/18                   | 0                    | 0                     | 0                     |
| <i>Acomys chudeaui</i>             | 14                    | 14                | 0                 | 0                 | 0          | 0/14 (0%)                             | 0.0–21.5                        | 0/14                   | 0                    | 0                     | 0                     |
| <i>Gerbillus occiduus</i> *        | 14                    | 14                | 0                 | 0                 | 14         | 1/14 (7.1%)                           | 1.3–31.5                        | 0/14                   | 0                    | 0                     | 1/14 (7.1%)           |
| <i>Desmodilliscus braueri</i>      | 11                    | 11                | 0                 | 0                 | 0          | 0/11 (0%)                             | 0.0–25.8                        | 0/11                   | 0                    | 0                     | 0                     |
| <i>Gerbillus</i> spp.              | 9                     | 9                 | 8                 | 8                 | 0          | 0/9 (0%)                              | 0.0–29.9                        | 0/9                    | 0/8                  | 0/8                   | 0                     |
| <i>Gerbillus campestris</i>        | 9                     | 9                 | 0                 | 0                 | 0          | 0/9 (0%)                              | 0.0–29.9                        | 0/9                    | 0                    | 0                     | 0                     |
| <i>Crocidura viaria</i>            | 9                     | 9                 | 9                 | 9                 | 0          | 0/9 (0%)                              | 0.0–29.9                        | 0/9                    | 0/9                  | 0/9                   | 0                     |
| <i>Gerbillus nanus</i>             | 8                     | 8                 | 0                 | 0                 | 0          | 0/8 (0%)                              | 0.0–32.4                        | 0/8                    | 0                    | 0                     | 0                     |
| <i>Taterillus arenarius</i>        | 5                     | 5                 | 0                 | 0                 | 0          | 0/5 (0%)                              | 0.0–43.4                        | 0/5                    | 0                    | 0                     | 0                     |
| <i>Dasymys rufulus</i>             | 4                     | 4                 | 0                 | 0                 | 0          | 0/4 (0%)                              | 0.0–48.9                        | 0/4                    | 0                    | 0                     | 0                     |
| <i>Arvicanthis ansorgei</i>        | 3                     | 3                 | 3                 | 3                 | 0          | 0/3 (0%)                              | 0.0–56.1                        | 0/3                    | 0/3                  | 0/3                   | 0                     |
| <i>Heliosciurus gambianus</i>      | 2                     | 2                 | 1                 | 0                 | 0          | 0/2 (0%)                              | 0.0–65.7                        | 0/2                    | 0/1                  | 0                     | 0                     |
| <i>Xerus erythropus</i>            | 2                     | 2                 | 0                 | 0                 | 0          | 0/2 (0%)                              | 0.0–65.7                        | 0/2                    | 0                    | 0                     | 0                     |
| <i>Hemiechinus aethiopicus</i>     | 2                     | 2                 | 0                 | 0                 | 0          | 0/2 (0%)                              | 0.0–65.7                        | 0/2                    | 0                    | 0                     | 0                     |
| <i>Gerbillus henleyi</i>           | 1                     | 1                 | 1                 | 1                 | 0          | 0/1 (0%)                              | 0.0–79.3                        | 0/1                    | 0/1                  | 0/1                   | 0                     |
| <i>Felovia vae</i>                 | 1                     | 1                 | 1                 | 1                 | 0          | 0/1 (0%)                              | 0.0–79.3                        | 0/1                    | 0/1                  | 0/1                   | 0                     |
| <i>Gerbillus nigeriae</i>          | 1                     | 1                 | 1                 | 1                 | 0          | 0/1 (0%)                              | 0.0–79.3                        | 0/1                    | 0/1                  | 0/1                   | 0                     |
| <b>Total</b>                       | <b>3109</b>           | <b>2980</b>       | <b>488</b>        | <b>388</b>        | <b>129</b> | <b>287/3109 (9.2%)</b>                | <b>8.2–10.3</b>                 | <b>219/2987 (7.3%)</b> | <b>12/488 (2.4%)</b> | <b>40/388 (10.3%)</b> | <b>28/129 (21.7%)</b> |

Underlined species = species compared for difference in prevalence of *Borrelia* infection via chi-squared (see text).

Underlined species with\* = species that were pooled in chi-squared.



**Table 3**Small mammal species tested for *Borrelia* in areas where we failed to demonstrate the presence of *O. sonrai* ticks.

| Species studied                  | No. of animals tested |                   |                          | Animals infected with <i>Borrelia</i> |               |                   |
|----------------------------------|-----------------------|-------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------|-------------------|
|                                  | Any method            | Direct blood film | Brain inoculation method | Brain PCR                             | Any method    | Direct blood film |
| <i>Mastomys erythroleucus</i>    | 294                   | 166               | 128                      | 0                                     | 0/416 (0%)    | 0/163             |
| <i>Mastomys natalensis</i>       | 117                   | 117               | 97                       | 0                                     | 0/120 (%)     | 0/117             |
| <i>Rattus rattus</i>             | 96                    | 96                | 9                        | 0                                     | 0/96 (0%)     | 0/96              |
| <i>Mastomys huberti</i>          | 89                    | 89                | 89                       | 0                                     | 0/89 (0%)     | 0/89              |
| <i>Gerbilliscus</i> sp.          | 45                    | 45                | 45                       | 0                                     | 0/45 (0%)     | 0/45              |
| <i>Mastomys kollmannspergeri</i> | 38                    | 38                | 0                        | 0                                     | 0/38 (0%)     | 0/38              |
| <i>Arvicanthis</i> sp.           | 38                    | 38                | 38                       | 0                                     | 0/38 (01%)    | 0/38              |
| <i>Gerbillus tarabuli</i>        | 37                    | 37                | 37                       | 0                                     | 0/37 (0%)     | 0/37              |
| <i>Gerbilliscus gambianus</i>    | 35                    | 35                | 35                       | 0                                     | 0/35 (0%)     | 0/35              |
| <i>Gerbillus nigeriae</i>        | 25                    | 25                | 25                       | 0                                     | 0/25 (0%)     | 0/25              |
| <i>Praomys daltoni</i>           | 24                    | 17                | 7                        | 0                                     | 0/24 (0%)     | 0/24              |
| <i>Crocidura</i> sp.             | 22                    | 22                | 19                       | 0                                     | 0/22 (0%)     | 0/22              |
| <i>Mastomys</i> sp.              | 18                    | 18                | 18                       | 0                                     | 0/18 (0%)     | 0/18              |
| <i>Uranomys ruddi</i>            | 14                    | 14                | 14                       | 0                                     | 0/14 (0%)     | 0/14              |
| <i>Lemniscomys</i> sp.           | 14                    | 14                | 14                       | 0                                     | 0/14 (0%)     | 0/14              |
| <i>Gerbillus nanus</i>           | 13                    | 13                | 13                       | 0                                     | 0/13 (0%)     | 0/13              |
| <i>Praomys derooi</i>            | 12                    | 12                | 12                       | 0                                     | 0/12 (0%)     | 0/12              |
| <i>Jaculus jaculus</i>           | 11                    | 11                | 11                       | 0                                     | 0/11 (0%)     | 0/11              |
| <i>Arvicanthis niloticus</i>     | 10                    | 10                | 9                        | 0                                     | 0/10 (0%)     | 0/10              |
| <i>Gerbillus pyramidum</i>       | 10                    | 10                | 10                       | 0                                     | 0/10 (0%)     | 0/10              |
| <i>Lemniscomys zebra</i>         | 8                     | 8                 | 8                        | 0                                     | 0/8 (0%)      | 0/8               |
| <i>Desmodilliscus braueri</i>    | 7                     | 7                 | 7                        | 0                                     | 0/7 (0%)      | 0/7               |
| <i>Taterillus gracilis</i>       | 6                     | 6                 | 6                        | 0                                     | 0/6 (0%)      | 0/6               |
| <i>Taterillus lacustris</i>      | 5                     | 5                 | 5                        | 0                                     | 0/5 (0%)      | 0/5               |
| <i>Acomys airensis</i>           | 3                     | 3                 | 3                        | 0                                     | 0/3 (0%)      | 0/3               |
| <i>Taterillus</i> sp.            | 3                     | 3                 | 3                        | 0                                     | 0/3 (0%)      | 0/3               |
| <i>Cricetomys gambianus</i>      | 3                     | 3                 | 3                        | 0                                     | 0/3 (0%)      | 0/3               |
| <i>Taterillus petteri</i>        | 2                     | 2                 | 2                        | 0                                     | 0/2 (0%)      | 0/2               |
| <i>Taterillus congicus</i>       | 2                     | 2                 | 2                        | 0                                     | 0/2 (0%)      | 0/2               |
| <i>Gerbillus campestris</i>      | 1                     | 1                 | 1                        | 0                                     | 0/1 (0%)      | 0/1               |
| <i>Heliosciurus gambianus</i>    | 1                     | 1                 | 1                        | 0                                     | 0/1 (0%)      | 0/1               |
| <i>Xerus erythropus</i>          | 1                     | 1                 | 1                        | 0                                     | 0/1 (0%)      | 0/1               |
| <b>Total</b>                     | <b>1004</b>           | <b>869</b>        | <b>672</b>               | <b>0</b>                              | <b>0/1004</b> | <b>0/869</b>      |

Chi-squared (on contingency tables), Fisher exact, and Student's tests were used when indicated. For inter-specific comparisons, only species that were found positive for TBRF were compared and species with fewer than four positive individuals were pooled.

### 2.5. Ethics statement

The study protocol was approved by the Steering Committee of the IRD Special Programme "Evolution Climatique et Santé" (IRD, Montpellier, France, project reference ATI-ECS-07-H/2002). Animals were treated in a humane manner, and in accordance with guidelines of the American Society of Mammalogists (Animal Care and Use Committee 2011). Captures of rodents and insectivores excluded national parks and protected areas, did not include endangered or protected species (CITES, UICN, National guidelines), and were carried out with authorization of national institutions, national ministries of health and/or scientific research. Trapping inside houses and private lands was conducted after the owner of the house and land was informed about the aim of the study and gave permission to conduct the study on his/her property.

## 3. Results

### 3.1. Small mammal diversity and *Borrelia* infections

Overall, 4358 small mammal specimens of 45 different species belonging to 7 families (Soricidae, Muridae, Erinaceidae, Nesomyidae, Sciuridae, Dipodidae, and Ctenodactylidae) were caught in 87 localities from 8 countries (Supplementary Tables S1 and S2): Senegal, Mauritania, Mali, Niger, Benin, Chad, Cameroon, Morocco (Western Sahara). Among them, 4113 rodents and insectivores (Tables 2 and 3) belonging to 44 species were tested for *Borrelia*

by one or several methods and 287 (7.0%) belonging to 15 species were found infected (Table 2).

### 3.2. Prevalence of *Borrelia* infections according to ecosystems and rainfall

The small rodents and insectivores found infected with *Borrelia* were caught in various ecosystems/habitats belonging to different climatic areas. They were distributed from Western Sahara (23°54'N/15°48'W) in Morocco to the Sine-Saloum region (13°41'N/16°22'W) in Senegal and to Doubala, Kayes region, (14°28'N/08°01'W) in Mali (Fig. 1). In these areas, three main ecosystems were represented: Sahara desert, Sahel, and Sudan savanna, with annual average rainfall ranging from <50 mm to 750 mm. In Guinean savanna areas, where average annual rainfall ranged from 750 to 1500 mm, no animal was found infected among 1004 tested. No animal was found infected east of 1°E, although 593 rodent and insectivores were tested, including 411 collected in Saharan and Sahelo-Sudanian areas. On average, the prevalence of infected animals was 2.4% (1/41), 10.1% (139/1380), 7.4% (67/900), 10.1% (80/788) and 0% (0/1004), in areas where average rainfall was <50, 50–250, 250–500, 500–750, and >750 mm respectively (Table 4).

### 3.3. Prevalence of *Borrelia* infections according to *Ornithodoros* and other ticks distribution

Overall, 3225 small mammals including 3063 rodents and 162 insectivores belonging to 35 different species were captured in 52 localities from Senegal, Mauritania and Mali where *O. sonrai* ticks were also collected inside small mammal burrows (Supplementary Table S1). In addition, 1133 small mammals including 1105 rodents and 28 insectivores belonging to 37 different species

**Table 4**  
Variations in prevalence of *Borrelia* infections in small mammal species according to average rainfall from 1970–1999 (areas where *Ornithodoros* ticks were distributed).

| Average rainfall data in area sampled | Infected species in average rainfall  | No. animals tested | No. animals infected with <i>Borrelia</i> | Proportion of infection (%) | 95% confidence interval (95% CI) |
|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|-------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| < 50 mm                               | <i>Gebillus occiduus</i>              | 14                 | 1                                         | 7.1%                        | 1.3–31.5                         |
|                                       | Other species found negative          | 27                 | 0                                         | 0%                          | 0.0–12.4                         |
|                                       | <b>Total</b>                          | <b>41</b>          | <b>1</b>                                  | <b>2.4%</b>                 | <b>0.4–12.6</b>                  |
|                                       |                                       |                    |                                           |                             |                                  |
| 50–250 mm                             | <i>Arvicanthis niloticus</i>          | 630                | 88                                        | 13.9%                       | 11.5–16.9                        |
|                                       | <i>Mastomys huberti</i>               | 235                | 37                                        | 15.7%                       | 11.6–20.9                        |
|                                       | <i>Mus musculus</i>                   | 177                | 5                                         | 2.8%                        | 1.2–6.4                          |
|                                       | <i>Mastomys erythroleucus</i>         | 93                 | 1                                         | 1.1%                        | 0.2–5.8                          |
|                                       | <i>Crocidura</i> spp.                 | 55                 | 4                                         | 7.3%                        | 2.8–17.2                         |
|                                       | <i>Gerbillus gerbillus</i>            | 24                 | 1                                         | 4.1%                        | 0.7–20.2                         |
|                                       | <i>Gerbillus tarabuli</i>             | 51                 | 2                                         | 3.9%                        | 1.1–13.2                         |
|                                       | <i>Taterillus gracilis</i> complex    | 11                 | 1                                         | 9.1%                        | 1.6–37.7                         |
|                                       | Other species found negative          | 104                | 0                                         | 0%                          | 0.0–3.5                          |
|                                       | <b>Total</b>                          | <b>1380</b>        | <b>139</b>                                | <b>10.1%</b>                | <b>8.6–11.8</b>                  |
|                                       |                                       |                    |                                           |                             |                                  |
| 250–500 mm                            | <i>Mastomys erythroleucus</i>         | 158                | 24                                        | 15.2%                       | 10.4–21.6                        |
|                                       | <i>Praomys daltoni</i>                | 178                | 10                                        | 5.6%                        | 3.1–10.0                         |
|                                       | <i>Arvicanthis niloticus</i>          | 128                | 19                                        | 14.8%                       | 9.7–22                           |
|                                       | <i>Mastomys huberti</i>               | 101                | 1                                         | 0.9%                        | 0.2–5.4                          |
|                                       | <i>Mastomys natalensis</i>            | 29                 | 1                                         | 3.4%                        | 0.6–17.2                         |
|                                       | <i>Taterillus gracilis</i>            | 39                 | 6                                         | 15.4%                       | 7.2–29.7                         |
|                                       | <i>Cricetomys gambianus</i>           | 17                 | 3                                         | 17.6%                       | 6.2–41                           |
|                                       | <b>Other species &lt;10 specimens</b> |                    |                                           |                             |                                  |
|                                       | <i>Gerbilliscus gambianus</i> *       | 8                  | 3                                         | 37.5%                       | 13.7–69.4                        |
|                                       | Other species found negative          | 242                | 0                                         | 0%                          | 0.0–1.5                          |
|                                       | <b>Total</b>                          | <b>900</b>         | <b>67</b>                                 | <b>7.4%</b>                 | <b>5.9–9.3</b>                   |
|                                       |                                       |                    |                                           |                             |                                  |
|                                       |                                       |                    |                                           |                             |                                  |
| 500–750 mm                            | <i>Mastomys erythroleucus</i>         | 530                | 43                                        | 8.1%                        | 6.1–10.7                         |
|                                       | <i>Mastomys natalensis</i>            | 50                 | 6                                         | 12%                         | 5.6–23.8                         |
|                                       | <i>Arvicanthis niloticus</i>          | 46                 | 9                                         | 19.5%                       | 10.6–33.2                        |
|                                       | <i>Crocidura olivieri</i>             | 36                 | 10                                        | 27.8%                       | 15.8–43.9                        |
|                                       | <i>Rattus rattus</i>                  | 22                 | 2                                         | 9.1%                        | 2.5–27.8                         |
|                                       | <i>Mus musculus</i>                   | 12                 | 1                                         | 8.3%                        | 1.5–35.4                         |
|                                       | <i>Gerbilliscus gambianus</i>         | 65                 | 7                                         | 10.7%                       | 5.3–20.6                         |
|                                       | <b>Other species &lt;10 specimens</b> |                    |                                           |                             |                                  |
|                                       | <i>Praomys daltoni</i> *              | 6                  | 1                                         | 16.6%                       | 3.0–56.3                         |
|                                       | <i>Taterillus gracilis</i> *          | 3                  | 1                                         | 33.3%                       | 6.1–79.2                         |
|                                       | Other species found negative          | 18                 | 0                                         | 0%                          | 0.0–17.6                         |
|                                       | <b>Total</b>                          | <b>788</b>         | <b>80</b>                                 | <b>10.1%</b>                | <b>8.2–12.4</b>                  |
|                                       |                                       |                    |                                           |                             |                                  |
|                                       |                                       |                    |                                           |                             |                                  |
| >750 mm                               | <b>No infected small mammals</b>      |                    |                                           |                             |                                  |

\* Sample size less than 10.

(Supplementary Table S2) were caught in 33 localities from southern Senegal, eastern Mali, Niger, Benin, Chad and Cameroon where we failed to demonstrate the occurrence of *O. sonrai* tick inside burrows.

Out of the 3225 animals captured in areas where *Ornithodoros* ticks were collected, 3109 were tested for *Borrelia*, and 287 (9.2%) were found infected (Table 2). The infected individuals comprised 116 *Arvicanthis niloticus*, 68 *Mastomys erythroleucus*, 38 *M. huberti*, 11 *Praomys daltoni*, 10 *Crocidura olivieri*, 10 *Gerbilliscus gambianus*, 8 *Taterillus* sp. (most probably *T. gracilis* or *T. pygargus*), 7 *Mastomys natalensis*, 6 *Mus musculus*, 4 *Crocidura* sp., 3 *Cricetomys gambianus*, 2 *Rattus rattus*, 2 *Gerbillus tarabuli*, 1 *Gerbillus gerbillus* and 1 *Gerbillus occiduus*.

At the same time, 1004 of 1133 rodents and insectivores collected in areas where we failed to demonstrate the presence of the tick *O. sonrai* were examined for *Borrelia* and none of them was found infected with *Borrelia* (Table 3). They were

distributed from eastern Mali to Togo, Cameroon and Chad (Fig. 1).

Additional argasid and ixodid tick species sampled inside small mammals burrows included *Argas persicus* (in Ndiop village, Senegal), *Rhipicephalus eversi* (in dry wady near Tiloa, Niger), *Rhipicephalus* sp. (in natural habitat near: Kossanto, Saré-Rawnadjiré, Mballo Counda-Woudou, Djirio-Mantoro, Abéné Senegal; Dogoféré, Gouakoulou, Bougoukoura, Kodian-Kora, Daniabatacoda, Yacoubabougou, Bama, Batama, Kassama, Kolé, Kolomina, Bourgo-Siritigui and Nara, south of Bamako, Mali; Doyissa and Lanta, Benin; Pastoria, Guinea; Koundougou, Gourma-Rharous, Niafouké, Konna and San, along the Niger River, Mali; Niamey, Niger) and *Hyalomma* sp. (in natural habitat near Daniabatacoda and along the Niger River in Koundouga and San, Mali). These tick species were collected either in areas where we also documented the occurrence of *O. sonrai*, or in areas where no small mammal was found infected by *Borrelia* (Table 5).



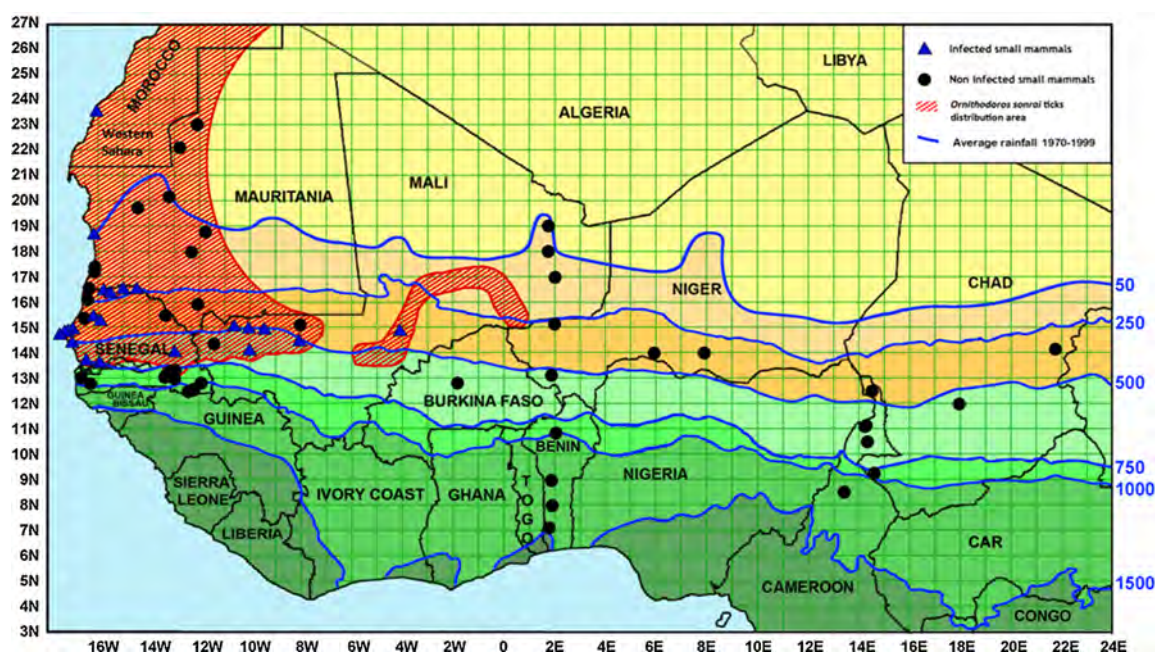


**Fig. 1.** Spatial distribution of *Borrelia* infections in small mammals linked to the presence of *Ornithodoros sonrai* tick vectors and according to annual average rainfall less than 50 mm or included between 50–250 mm, 250–500 mm and 500–750 mm from 1970 to 1999 (Mahé et al., 1999).

**Table 5**

Detailed list of Argasid and Ixodides ticks collected additionally inside small mammal burrows when *Ornithodoros sonrai* was investigated in localities from Senegal, Mali, Guinea, Niger and Benin.

| Species collected           | Family    | Sampling locality/country     | Coordinate of sampling burrow | <i>Ornithodoros sonrai</i> sampled in locality | Date       | Habitat sampled             |
|-----------------------------|-----------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|------------|-----------------------------|
| <i>Argas persicus</i>       | Argasidae | Ndiop, Senegal                | 13°41'N/16°22'W               | <i>O. sonrai</i>                               | 22/01/2012 | Human dwellings             |
| <i>Rhipicephalus eversi</i> | Ixodidae  | Near Ouallam, Niger           | 15°09'N/02°04'E               | None                                           | 14/02/2004 | Dry wady                    |
| <i>Rhipicephalus</i> sp.    | Ixodidae  | Kossanto, Senegal             | 13°08'N/11°57'W               | None                                           | 18/05/2004 | Natural habitat             |
|                             |           | Saré-Rawnadjidéré, Senegal    | 13°01'N/15°00'W               | None                                           | 04/01/2008 | Natural habitat             |
|                             |           | Mballo Counda-Woudou, Senegal | 13°00'N/14°01'W               | None                                           | 05/03/2008 | Natural habitat             |
|                             |           | Djiro-Mantoro, Senegal        | 13°02'N/16°02'W               | None                                           | 08/03/2008 | Natural habitat             |
|                             |           | Abéné, Senegal                | 12°59'N/16°44'W               | None                                           | 10/03/2008 | Natural habitat             |
| <i>Rhipicephalus</i> sp.    | Ixodidae  | Near Dogoféré, Mali           | 15°01'N/10°55'W               | <i>O. sonrai</i>                               | 19/05/2006 | Natural habitat, crops area |
|                             |           | Gouakoulou, Mali              | 13°30'N/08°03'W               | None                                           | 16/05/2006 | Natural habitat             |
|                             |           | Kodian-Koro, Mali             | 13°03'N/07°56'W               | None                                           | 15/05/2006 | Natural habitat             |
|                             |           | Bougoukoura, Mali             | 13°02'N/07°57'W               | None                                           | 15/05/2006 | Natural habitat             |
|                             |           | Daniabatacoda, Mali           | 13°00'N/09°52'W               | None                                           | 10/05/2006 | Natural habitat             |
|                             |           | Yacoubabougou, Mali           | 13°00'N/08°55'W               | None                                           | 11/05/2006 | Natural habitat             |
|                             |           | Bama, Mali                    | 15°07'N/08°00'N               | None                                           | 25/01/2006 | Natural habitat             |
|                             |           | Bama, Mali                    | 15°06'N/07°59'N               | None                                           | 25/01/2006 | Crops area                  |
|                             |           | Batama, Mali                  | 13°03'N/11°09'W               | None                                           | 04/05/2006 | Natural habitat             |
|                             |           | Kassama, Mali                 | 13°03'N/11°06'W               | None                                           | 04/05/2006 | Natural habitat             |
|                             |           | Kolé, Mali                    | 13°29'N/08°59'W               | None                                           | 13/02/2007 | Natural habitat             |
|                             |           | Near Kolomina, Mali           | 14°29'N/08°01'W               | <i>O. sonrai</i>                               | 17/02/2007 | Natural habitat             |
|                             |           | Bourgou-Siritigui, Mali       | 15°22'N/05°28'W               | None                                           | 15/10/2007 | Natural habitat             |
|                             |           | South of Bamako, Mali         | 12°32'N/08°07'W               | None                                           | 30/01/2005 | Natural habitat             |
|                             |           | Near Nara, Mali               | 15°03'N/07°08'W               | None                                           | 27/01/2006 | Natural habitat             |
|                             |           | Near Nara, Mali               | 14°52'N/06°59'W               | None                                           | 27/01/2006 | Crops area                  |
|                             |           | San, Mali                     | 13°17'N/04°56'W               | None                                           | 14/03/2005 | Along the Niger River       |
|                             |           | San, Mali                     | 13°18'N/04°51'W               | None                                           | 14/03/2005 | Along the Niger River       |
|                             |           | Koundouga, Mali               | 16°54'N/00°19'W               | <i>O. sonrai</i>                               | 25/01/2008 | Along the Niger River       |
|                             |           | Konna, Mali                   | 14°55'N/03°53'W               | <i>O. sonrai</i>                               | 24/01/2005 | Along the Niger River       |
|                             |           | Gourma-Rharous, Mali          | 16°53'N/01°56'E               | <i>O. sonrai</i>                               | 27/01/2008 | Along the Niger River       |
|                             |           | Niafounké, Mali               | 15°56'N/03°58'W               | None                                           | 31/01/2008 | Along the Niger River       |
|                             |           | Markala, Mali                 | 13°42'N/06°04'W               | None                                           | 01/02/2006 | Along the Niger River       |
| <i>Rhipicephalus</i> sp.    | Ixodidae  | Pastoria in kindia, Guinea    | 10°05'N/12°50'W               | None                                           | 10/03/2008 | Natural habitat             |
|                             |           | Near Farié, Niger             | 14°03'N/01°32'E               | None                                           | 23/02/2005 | Along the Niger River       |
|                             |           | Niamey, Niger                 | 13°31'N/02°02'E               | None                                           | 24/02/2005 | Along the Niger River       |
|                             |           | Niamey, Niger                 | 13°32'N/02°01'E               | None                                           | 25/02/2005 | Along the Niger River       |
|                             |           | Doyissa, Benin                | 08°00'N/01°59'E               | None                                           | 26/02/2004 | Natural habitat             |
|                             |           | Lanta, Benin                  | 07°06'N/01°52'E               | None                                           | 28/02/2004 | Natural habitat             |
| <i>Hyalomma</i> sp.         | Ixodidae  | Daniabatacoda, Mali           | 13°00'N/09°52'W               | None                                           | 10/05/2006 | Natural habitat             |
|                             |           | Koundouga, Mali               | 16°54'N/00°19'W               | <i>O. sonrai</i>                               | 25/01/2008 | Along the Niger River       |
|                             |           | San, Mali                     | 13°17'N/04°56'W               | None                                           | 14/03/2005 | Along the Niger River       |

**Table 6**

Observed and expected (between brackets) numbers of *Borrelia*-infected specimens in small mammal species under the hypothesis of an equivalent distribution of *Borrelia* infection among species. In bold: species for which observed and expected values differ the most.

| Species                             | No. tested | No. infected    | No. non-infected |
|-------------------------------------|------------|-----------------|------------------|
| <b><i>Arvicanthis niloticus</i></b> | <b>804</b> | <b>116 (78)</b> | <b>688 (726)</b> |
| <i>Mastomys erythroleucus</i>       | 781        | 68 (76)         | 713 (705)        |
| <i>Mastomys huberti</i>             | 357        | 38 (35)         | 319 (322)        |
| <b><i>Mus musculus</i></b>          | <b>340</b> | <b>6 (33)</b>   | <b>334 (307)</b> |
| <i>Praomys daltoni</i>              | 182        | 11 (18)         | 171 (164)        |
| <i>Gerbilliscus gambianus</i>       | 85         | 10 (8)          | 75 (77)          |
| <i>Mastomys natalensis</i>          | 79         | 7 (8)           | 72 (71)          |
| <i>Crociodura</i> spp.              | 62         | 4 (6)           | 58 (56)          |
| <i>Taterillus</i> spp.              | 53         | 8 (5)           | 45 (48)          |
| <b><i>Crociodura olivieri</i></b>   | <b>36</b>  | <b>10 (4)</b>   | <b>26 (32)</b>   |
| Other species                       | 162        | 9 (16)          | 153 (146)        |
| Total                               | 2941       | 287             | 2654             |

### 3.4. Prevalence of infected small mammals according to species

In Table 6 we compared the prevalence of *Borrelia* infections according to mammal species for specimens collected in areas where *Ornithodoros* ticks were present. Interspecific variations in the prevalence of *Borrelia* infections were significant (chi-squared test = 68.19;  $p < 10^{-3}$ ). *C. olivieri* and *A. niloticus* were found to be more infected (27.8%, 10/30, and 14.4%, 116/804, respectively), and *M. musculus* much less infected (1.8%, 6/340) than expected under the hypothesis of an equivalent distribution of *Borrelia* infection among species (Table 6). We also compared infections rates according to bioclimatic areas for *A. niloticus* and *M. erythroleucus*, the only two species widely distributed between 50–250 mm, 250–500 mm and 500–750 mm. Table 7 shows that no significant difference in the prevalence of *Borrelia* infection was observed in *A. niloticus* (chi-squared test = 0.45;  $p > 0.9$ ), whereas in *M. erythroleucus* the difference was significant (chi-squared test = 15.42;  $p < 0.01$ ) among these rainfall areas, with the highest prevalence (15.2%) between 250 and 500 mm and the lowest (1%) between 50 and 250 mm.

## 4. Discussion

In the present study, 15 small mammal species were found to harbour *Borrelia* infections. Our data coupled with data from other authors indicate that 17 species of rodents and 4 of insectivores may act as reservoirs of TBRF in West Africa (Boiron, 1949; Mathis, 1928; Schwan et al., 2012), while 21 species of small rodents and 6 of insectivores have been identified as main reservoirs of the disease throughout West and North Africa (Table 8).

In West Africa, only *B. crocidurae* is known to infect small mammals, a species initially described from a shrew collected in Dakar (Léger, 1917). Although *Borrelia* strains isolated from small mammals in West Africa have never been sequenced, contrary to those isolated from *O. sonrai* ticks or humans, all are presumed to belong to the species *B. crocidurae* since that attributed infections have been documented by sequence data from ticks and from humans of this area (Parola et al., 2011; Tordini et al., 2006; Trape et al., 2013). In our study, the only strain sequenced belonged to *B. merionesi*, but it has been isolated from a *Gerbillus occiduus* collected in Western Sahara, an area where both *B. crocidurae* and *B. merionesi* have been reported from ticks (Trape et al., 2013).

Among the mammal species presumed to constitute the reservoir of *B. crocidurae* in West Africa, three species, namely *Gerbillus gerbillus*, *G. tarabuli* and *G. occiduus*, are identified here as potential reservoirs restricted to the Saharo-Saharan zone distribution. The other species found infected are widely distributed in the Sahel and/or the Sudan savannah. *A. niloticus*, *M. huberti* and *T. gracilis* are

mostly Sahelian species. *M. erythroleucus*, *M. natalensis*, *Praomys daltoni*, *C. olivieri*, *Gerbilliscus gambianus* and *Cricetomys gambianus* are characteristic Sudanian species (Granjon and Duplantier, 2009). *M. musculus* and *R. rattus* also occur in these biogeographic areas, but they live exclusively inside houses. *A. niloticus*, *M. erythroleucus*, *M. huberti* and *M. musculus* were the most frequently caught species. They represent the main natural reservoirs of *Borrelia* infection due to their high infection rate and their abundance within communities of small mammals. *Praomys daltoni*, *G. gambianus*, *M. natalensis*, *C. olivieri*, *T. gracilis*, *R. rattus*, and *C. gambianus*, which follow in abundance ranking, constitute secondary reservoirs of *Borrelia* infections.

To explain why a species of small mammal is more likely infected than another in areas of *O. sonrai* distribution, one may propose various hypotheses related to its lifestyle, burrow structure, ecology, social behaviour, and/or pelage characteristics. Interestingly, the age structure of small mammal populations may also have influenced the proportion found infected: we have previously reported that the proportion of *A. niloticus* specimens found *Borrelia* infected in northern Senegal decreased from 50% among juveniles to less than 3% among older individuals, suggesting the role of immune factors (Godeluck et al., 1994). By contrast, the proportion of *M. huberti* specimens found *Borrelia* infected in the same area increased progressively with age, from 8% in juveniles to 23% in older adults (Godeluck et al., 1994). Indeed, it is interesting to note that *A. niloticus*, the most frequently infected rodent in the wild, (i) is the largest species among the main hosts and has a rough coat, what would represent a suitable way for ticks during their attachment on the skin integument, (ii) digs shallow burrows with – contrary to other species – the presence of a grass straw nest, which constitutes an excellent microhabitat both for larvae, nymphs and adult ticks, and (iii) lives in colonies often at high density, i.e. with frequent contact between individuals, thus increasing the possibilities of spatial dissemination of *Ornithodoros* ticks and *Borrelia* transmission. This rodent is encountered both in natural habitats, crop areas and around human habitations, but its burrows are never found inside houses. *M. erythroleucus*, another frequently infected species, may have its burrows located inside houses, and for this reason may have an even greater epidemiological role than *A. niloticus* for the contamination of humans. The shrew *C. olivieri* is less common than *M. erythroleucus* in areas of *Borrelia* occurrence. However, as it is also frequent in houses and presents the highest infection rate among small mammals, it can represent a significant reservoir of the parasite.

Prevalence of *Borrelia* infections in small mammals ranged from 1.7% to 28%, and variation in the prevalence of infection among species was statistically significant. In addition, *A. niloticus* and *M. erythroleucus*, the most ubiquitous of Sahelo-Saharan rodents (Granjon and Duplantier, 2009), were found to be infected in each of the three bioclimatic areas between 50–250 mm, 250–500 mm and 750 mm. The variation in the prevalence of *Borrelia* infection in these small rodents according to average rainfall was significantly different only in *M. erythroleucus*. Such results appear difficult to interpret, and additional data are needed to confirm their potential biological significance.

All animals found infected originated from localities situated inside the distribution limits of *O. sonrai* (Fig. 1). This tick is well known to constitute an excellent vector of *B. crocidurae* in West and North Africa (Mathis et al., 1934; Rodhain, 1976; Schwan et al., 2012; Trape et al., 2013). Few other tick species were collected inside burrows. *Rhipicephalus eversi* and *Rhipicephalus* spp. were collected in 38 localities from Senegal, Mali, Guinea, Benin and Niger, including 5 localities, all from Mali, where *O. sonrai* was also documented. Rodent were found infected in two localities where both *Rhipicephalus* spp. and *O. sonrai* ticks were collected, and no small mammal was found infected in localities where *Rhipicephalus*

**Table 7**

Observed and expected (between brackets) numbers of *Borrelia*-infected specimens in *Arvicanthis niloticus* and *Mastomys erythroleucus* under the hypothesis of an equivalent distribution of *Borrelia* infection according to average rainfall from 1970–1999.

| Species                       | Annual average (mm) | No. tested | No. infected | No. non-infected |
|-------------------------------|---------------------|------------|--------------|------------------|
| <i>Arvicanthis niloticus</i>  | 50–250              | 630        | 88 (90)      | 542 (540)        |
|                               | 250–500             | 128        | 19 (18)      | 109 (110)        |
|                               | 500–750             | 46         | 8 (7)        | 38 (39)          |
|                               | Total               | 804        | 115          | 689              |
| <i>Mastomys erythroleucus</i> | 50–250              | 93         | 1 (8)        | 92 (85)          |
|                               | 250–500             | 158        | 24 (14)      | 134 (144)        |
|                               | 500–750             | 530        | 43 (46)      | 487 (484)        |
|                               | Total               | 781        | 68           | 713              |

**Table 8**

Small mammal species infected with *Borrelia* in West Africa and Morocco.

| Species found infected              | Originated country      | Order       | Referenced data    |
|-------------------------------------|-------------------------|-------------|--------------------|
| <i>Mastomys erythroleucus</i> ,     | Senegal, Mali           | Rodent      | (1), (2), (3), (4) |
| <i>Arvicanthis niloticus</i>        | Senegal,                | Rodent      | (1), (3), (4)      |
| <i>Mastomys huberti</i>             | Senegal, Mali           | Rodent      | (3), (4)           |
| <i>Mastomys natalensis</i>          | Senegal, Mali           | Rodent      | (2), (3), (4)      |
| <i>Heliosciurus gambianus</i>       | Senegal                 | Rodent      | (3)                |
| <i>Gerbilliscus gambianus</i>       | Senegal                 | Rodent      | (3)                |
| <i>Mus musculus</i>                 | Senegal                 | Rodent      | (3), (4)           |
| <i>Rattus rattus</i>                | Senegal                 | Rodent      | (3), (4)           |
| <i>Praomys daltoni</i>              | Senegal, Mali           | Rodent      | (2), (4)           |
| <i>Taterillus gracilis/pygargus</i> | Senegal                 | Rodent      | (3)                |
| <i>Desmodilliscus braueri</i>       | Senegal                 | Rodent      | (3)                |
| <i>Cricetomys gambianus</i>         | Senegal                 | Rodent      | (3)                |
| <i>Xerus erythropus</i>             | Senegal, Mauritania     | Rodent      | (5)                |
| <i>Rattus norvegicus</i>            | Senegal                 | Rodent      | (6), (3)           |
| <i>Dasymys rufulus</i>              | Senegal                 | Rodent      | (3)                |
| <i>Gerbillus occiduus</i>           | Western Sahara, Morocco | Rodent      | (7), (4)           |
| <i>Dipodillus campestris</i>        | Morocco                 | Rodent      | (7), (4)           |
| <i>Gerbillus hoogstrali</i>         | Morocco                 | Rodent      | (7), (4)           |
| <i>Meriones shawi</i>               | Morocco                 | Rodent      | (8), (7), (4)      |
| <i>Gerbillus gerbillus</i>          | Mauritania, Mali        | Rodent      | (4)                |
| <i>Gerbillus tarabuli</i>           | Mauritania, Mali        | Rodent      | (4)                |
| <i>Crocidura olivieri</i>           | Senegal, Mali           | Insectivore | (2), (4)           |
| <i>Crocidura</i> sp.                | Senegal                 | Insectivore | (3)                |
| <i>Crocidura fulvastra</i>          | Mali                    | Insectivore | (2)                |
| <i>Atelerix albiventris</i>         | Senegal                 | Insectivore | (5), (3)           |
| <i>Atelerix algirus</i>             | Morocco                 | Insectivore | (7), (4)           |

1. Diatta et al. (1994).
2. Schwan et al. (2012).
3. Trape et al. (1996).
4. Trape et al. (2013).
5. Morel (1965).
6. Boiron (1949).
7. Diatta et al. (2012).
8. Blanc and Maurice (1948).

spp. ticks alone were collected. Clearly, there was no relationship between the occurrence of *Borrelia* infections in small mammals and the distribution of *Rhipicephalus* spp. ticks. Other tick species collected inside burrows included *Argas persicus* (one locality in Senegal where both *O. sonrai* and *Borrelia* infections in small mammals were documented) and *Hyalomma* sp. (three localities in Mali, including one where *O. sonrai* was also documented, but none where small mammals were sampled). Thus, our data do not support the idea that tick species other than *O. sonrai* represent a potential vector of *Borrelia* infections in small mammals in West Africa. This would explain why all *Borrelia* infections were observed north of isohyet 750 mm and West of 0°34'E.

The large number of small mammal species – 13 rodents and 2 shrews – found infected, following the analysis of more than 3000 animals trapped in 46 study sites, confirm the observations of Klompen et al. (1996) of the need for an adequate sampling (both for the number of hosts and the number of study sites) before

asserting that there is a narrow host-parasite specificity between a tick and a host. It is also interesting to note that *M. erythroleucus* and *M. huberti*, two species highly infected (8.7% and 10.6%, respectively) in areas where *O. sonrai* was distributed, were also very common (294 and 117 animals tested, respectively) but never infected in areas where we failed to find *O. sonrai*.

The results of this study show that most species of small mammals acting as reservoirs of *Borrelia* have a wide geographic distribution. For several species, the occurrence of their burrows inside houses or immediately around houses in rural areas maintains *Ornithodoros* tick populations very close to humans. Even when burrows are abandoned, these ticks may survive many years, looking for alternative hosts outside burrows for feeding and often biting humans at night in villages (Trape et al., 1996; Vial et al., 2006). Combating TBRF is certainly out of scope in natural habitats and crops areas, but strategies for reducing the frequency of human contact with vector ticks may be developed inside houses



and around households. Insecticides may be used for killing ticks inside burrows, but most insecticides used by villagers in Africa are highly toxic for humans and encouraging their use indoor would cause major risks of toxic contamination, particularly in young children. A strategy of rat-proofing inside and around houses could be the best alternative tool for preventing TBRF.

### Conflict of interest

No competing financial interests exist.

### Acknowledgments

We are grateful to I. Ag Aboumahamad, S. Ag Atteynine, A. Doukary and C. Baldé for their assistance during field work and H. Bouganali for examination of the thick blood films of small mammals. This work was supported by grants from the Project Gestion and Impact des Changements Climatiques (GICC) du Ministère français de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD), the Agence Nationale de la Recherche (ANR) and the special programme Evolution Climatique et Santé of the Institut de Recherche pour le Développement (IRD).

### References

- Blanc, G., Maurice, A.J., 1948. Contribution à l'étude du spirochète de Goulime (Maroc méridional). *Bull. Soc. Pathol. Exot.* 41, 139–141.
- Boiron, H., 1949. Considérations sur la fièvre récurrente à tiques au Sénégal L'importance du rat comme réservoir de virus. *Bull. Soc. Pathol. Exot.* 42, 62–70.
- Cutler, S.J., Abdissa, A., Trape, J.F., 2009. New concepts for the old challenge of African relapsing fever borreliosis. *Clin. Microbiol. Infect.* 15, 400–406.
- Dean, A.G., Sullivan, K.M., Soe, M.M., 2013. OpenEpi: Open Epidemiologic Statistics for public Health 2013, Version 2.3.1, [www.OpenEpi.com](http://www.OpenEpi.com) (accessed 08.20.14; updated 19.09.10).
- Diatta, G., Souidi, Y., Granjon, L., Arnathau, C., Durand, P., Chauvancy, G., Mané, Y., Sarihi, M., Belghyti, D., Renaud, F., Trape, J.F., 2012. Epidemiology of tick-borne borreliosis in Morocco. *PLoS Negl. Trop. Dis.* 6 (9), e1810, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pntd.0001810>.
- Diatta, G., Trape, J.F., Legros, F., Rogier, C., Duplantier, J.M., 1994. A comparative study of three methods of detection of *Borrelia crocidurae* in wild rodents in Senegal. *Trans. R. Soc. Trop. Med. Hyg.* 88, 423–424.
- Dobigny, G., Tatar, C., Kane, M., Gauthier, P., Brouat, C., Bâ, K., Duplantier, J.M., 2011. A cytotoxic and DNA-based survey of rodents from Northern Cameroon and Western Chad. *Mamm. Biol.* 76, 417–427.
- Gaber, M.S., Khalil, G.M., Hoogstraal, H., Aboul-nasr, A.E., 1984. *Borrelia crocidurae* localization and transmission in *Ornithodoros erraticus* and *O. savignyi*. *Parasitology* 88, 403–413.
- Galan, M., Pages, M., Cosson, J.F., 2012. Next-generation sequencing for rodent barcoding: species identification from fresh, degraded and environmental samples. *PLoS ONE* 7 (11), e48374, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0048374>.
- Godeluck, B., Duplantier, J.M., Ba, K., Trape, J.F., 1994. A longitudinal survey of *Borrelia crocidurae* prevalence in rodents and insectivores in Senegal. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 50, 165–168.
- Granjon, L., Duplantier, J.M., 2009. Les Rongeurs de l'Afrique sahélo-soudanienne. IRD/MNHN éditions; Collection Faune et Flore tropicale, no. 43, Marseille, pp. 215.
- Granjon, L., Dobigny, G., 2003. The importance of cytotoxicity in understanding the biogeography of African rodents: Lake Chad murids as an example. *Mammal Rev.* 33, 77–91.
- Klompen, J.S.H., Black, W.C., Keirans, J.E., Oliver Jr., J.H., 1996. Evolution of Ticks. *Annu. Rev. Entomol.* 41, 141–161, <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.en.41.010196.001041>.
- Lecompte, E., Brouat, C., Duplantier, J.M., Galan, G., Granjon, L., Loiseau, A., Mouline, K., Cosson, J.F., 2005. Molecular identification of four cryptic species of *Mastomys* (Rodentia Murinae). *Biochem. Syst. Ecol.* 33, 681–689.
- Léger, A., 1917. Spirochète de la musaraigne (*Crocidura stamphii*, Jentink). *Bull. Soc. Path. Exot.* 10, 280–281.
- Mahé, G., Rouché, N., Dieulin, C., Boyer, J.F., Ibrahim, B., Crès, A., Servat, E., Valton, C., Paturel, J.E., 1999. Shifting of the isohyetal lines: averages from 1940–1969 and 1970–1999. Annual rainfall map of Africa. IRD, Hydrosciences, Montpellier.
- Mathis, C., Durieux, C., Advier, M., 1934. Transmission naturelle et expérimentale à l'homme du spirochète infectant dans la nature. à Dakar, la tique: *Ornithodoros erraticus* var. *maroccanus*. *Ann. Inst. Pasteur.* 52, 166–178.
- Mathis, C., 1928. Identité à Dakar, du spirochète des rats, du spirochète de la musaraigne et du spirochète récurrent humain. *Bull. Soc. Pathol. Exot.* 20, 472–485.
- Mills, J.N., 1999. The role of rodents in emerging human disease: examples from the hanta-viruses and arena-viruses. In: Singleton, G., Hinds, H., Leirs, H., Zhang, Z. (Eds.), *Ecologically-based Rodent Management of Rodent Pests*. ACIAR Monographs, No. 59, p. 494.
- Morel, P.C., 1965. Les tiques d'Afrique et du Bassin méditerranéen. IEMVT, Maisons-Alfort, pp. 2003.
- Musser, G.G., Carleton, M.D., 2005. Superfamily Muroidea. In: Wilson D.E., Reeder, D.M. (Eds.), *Mammal Species of the World. A Taxonomic and Geographic Reference*, vol. 2. John Hopkins University Press, Baltimore, MD, pp. 894–1531.
- Ndiaye, A., Bâ, K., Aniskin, V., Benazzou, T., Chevre, P., Konecny, A., Sembène, M., Tatar, C., Kergoat, G.J., Granjon, L., 2012. Evolutionary systematics and biogeography of endemic gerbils from Morocco: an integrative taxonomy approach. *Zool. Scr.* 41 (1), 11–28.
- Nicolas, V., Schaeffer, B., Missou, A.D., Kennis, J., Colyn, M., Denys, C., Tatar, C., Cruaud, C., Laredo, C., 2012. Assessment of three mitochondrial genes (16S, Cytb CO1) for identifying species in the Praomysini Tribe (Rodentia: Muridae). *PLoS ONE* 7 (5), e36586, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0036586>.
- Parola, P., Diatta, G., Socolovschi, C., Mediannikov, O., Tall, A., Bassène, H., Trape, J.F., Raoult, D., 2011. Tick-borne relapsing fever borreliosis, rural Senegal. *Emerg. Infect. Dis.* 17 (5), 883–885.
- Parola, P., Raoult, D., 2001. Fièvres récurrentes. In: *Encyclopédie Médico-Chirurgicale*. Elsevier, Paris, 8-039-p-10.
- Pavlovsky, E.N., Shrynnik, A.N., 1952. An experimental analysis of the significance of the various phases of metamorphosis in *Ornithodoros pallipes* in the transmission of the spirochetes of tick-borne relapsing fever. *Parasitol. Sborn. Zool. Inst. Akad. Nauk. SSR.* 14, 47–55.
- Rodhain, F., Perez, C., 1985. Précis d'entomologie médicale et vétérinaire Notion d'épidémiologie des maladies à vecteurs. MALOINE S.A. édit. 1, 305–383.
- Rodhain, F., 1976. *Borrelia* et fièvres récurrentes: aspects épidémiologiques actuels. *Bull. Inst. Pasteur.* 74, 173–218.
- Schwan, T.G., Anderson, J.M., Lopez, J.E., Fischer, J.R., Raffal, S.J., McCoy, B.N., Safronetz, D., Sogoba, N., Maïga, O., Traoré, S.F., 2012. Endemic foci of tick-borne relapsing fever spirochete *Borrelia crocidurae* in Mali West Africa, and the potential for human infection. *PLoS Negl. Trop. Dis.* 6 (11), e1924, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pntd.0001924>.
- Tordini, G., Giaccherini, R., Corbisiero, R., Zanelli, G., 2006. Relapsing fever in a traveller from Senegal: determination of *Borrelia* species using molecular methods. *Trans. R. Soc. Trop. Med. Hyg.* 100 (10), 992–994, <http://dx.doi.org/10.1016/j.trstmh.2005.11.002>.
- Trape, J.F., Diatta, G., Arnathau, C., Bitam, I., Sarihi, M., Belghyti, D., Bouattour, A., Elguero, E., Vial, L., Mané, Y., Baldé, C., Pugnolle, F., Chauvancy, G., Mahé, G., Granjon, L., Duplantier, J.M., Durand, P., Renaud, F., 2013. The epidemiology and geographical distribution of relapsing fever borreliosis in West and North Africa, with a review of the *Ornithodoros erraticus* complex (Acari: Ixodida). *PLoS ONE* 8 (11), e78473, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0078473>.
- Trape, J.F., Godeluck, B., Diatta, G., Rogier, C., Legros, F., Albergel, J., Pepin, Y., Duplantier, J.M., 1996. The spread of tick-borne borreliosis in West Africa and its relation to sub-Saharan drought. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 54, 289–296.
- Trape, J.F., Duplantier, J.M., Bouganali, H., Godeluck, B., Legros, F., Cornet, J.P., Camicas, J.L., 1991. Tick-borne borreliosis in West Africa. *Lancet* (337), 473–475.
- Vial, L., Diatta, G., Tall, A., Ba, E.H., Bouganali, H., Durand, P., Sokhna, C., Rogier, C., Renaud, F., Trape, J.F., 2006. Incidence of tick-borne relapsing fever in West Africa: longitudinal study. *Lancet* 368, 37–44.

Supplementary Table-S 1. Localities of capture of small mammal species in areas where the occurrence of *Ornithodoros sonrai* ticks were documented. Average rainfall: A = < 50 mm; B = 50-250 mm; C = 250-500 mm; D = 500-750 mm

| Study area      | Coordinate of sampling localities | Average infall ♣ (mm) | Habitat sampled | Small mammals species (No. of specimens, I/T) <sup>☆</sup> | Family      |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------|------------------------------------------------------------|-------------|
| Dielmo-p3 (Sen) | 13°43'N/16°24'W                   | D                     | HD, NH          | <i>Crocidura olivieri</i> (2, 0/2)                         | Soricidae   |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Mastomys erythroleucus</i> (33, 11/33)                  | Muridae     |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Gerbilliscus gambianus</i> (29, 5/29)                   |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Arvicanthis niloticus</i> (3, 3/3),                     |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Praomys daltoni</i> (1, 0/1),                           |             |
| Dielmo-2 (Sen)  | 13°43'N/16°24'W                   | D                     | HD              | <i>Atelerix albiventris</i> (1, 0/1)                       | Erinaceidae |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Mastomys erythroleucus</i> (30, 6/23)                   | Muridae     |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Praomys daltoni</i> (2, 0/2)                            |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Mus musculus</i> (10, 1/7)                              |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Arvicanthis niloticus</i> (5, 0/5)                      |             |
| Ndiop-2 (Sen)   | 13°41'N/16°22'W                   | D                     | NH, HD          | <i>Rattus rattus</i> (3, 2/3)                              |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Crocidura olivieri</i> (13, 8/11)                       | Soricidae   |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Cricetomys gambianus</i> (2, 0/1)                       | Nesomyidae  |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Crocidura olivieri</i> (1, 1/1)                         | Soricidae   |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Mastomys erythroleucus</i> (13, 5/13)                   | Muridae     |
| Ndiop-1 (Sen)   | 13°41'N/16°22'W                   | D                     | HD              | <i>Gerbilliscus gambianus</i> (25, 2/25)                   |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Arvicanthis niloticus</i> (1, 0/1)                      |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Musculus musculus</i> (5, 0/5),                         |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Atelerix albiventris</i> (1, 0/1)                       | Erinaceidae |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Crocidura olivieri</i> (28, 1/22)                       | Soricidae   |
| Barkédji (Sen)  | 15°16'N/15°51'W                   | C                     | NH, HD          | <i>Mastomys erythroleucus</i> (25, 2/15)                   | Muridae     |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Musculus musculus</i> (4, 0/0)                          |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Rattus rattus</i> (3, 0/2)                              |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Arvicanthis niloticus</i> (1, 1/1)                      |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Desmodilliscus braueri</i> (10, 0/10)                   |             |
| Bala (Sen)      | 14°01'N/13°09'W                   | D                     | NH, HD          | <i>Arvicanthis niloticus</i> (14, 3/14)                    |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Mastomys erythroleucus</i> (2, 0/2)                     |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Taterillus</i> sp. (30, 6/30)                           |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Mastomys erythroleucus</i> (3, 0/3)                     |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Taterillus</i> sp. (1, 1/1)                             |             |
| Baniaye (Sen)   | 14°49'N/16°48'W                   | C                     | NH, HD          | <i>Gerbilliscus gambianus</i> (1, 0/1)                     |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Rattus rattus</i> (16, 0/16)                            |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Mastomys erythroleucus</i> (1, 0/1)                     |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Mastomys natalensis</i> (16, 0/16)                      |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Praomys daltoni</i> (1, 0/1)                            |             |
| Bandia (Sen)    | 14°36'N/17°01'W                   | C                     | HD, NH          | <i>Arvicanthis niloticus</i> (26, 4/26)                    |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Mastomys erythroleucus</i> (9, 0/9)                     |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Mus musculus</i> (1, 0/1),                              |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Arvicanthis niloticus</i> (7, 1/7)                      |             |
|                 |                                   |                       |                 | <i>Mus musculus</i> (23, 0/23)                             |             |
| Dahra (Sen)     | 15°38'N/15°28'W                   | C                     | NH              |                                                            |             |

|                       |                 |   |        |                                             |             |
|-----------------------|-----------------|---|--------|---------------------------------------------|-------------|
| Dakar (Sen)           | 14°43'N/17°26'W | C | HD     | <i>Cricetomys gambianus</i> (15, 3/15)      | Nesomyidae  |
| Diomandou-Diéri (Sen) | 16°29'N/14°22'W | B | NH     | <i>Arvicanthis niloticus</i> (4, 0/4)       | Muridae     |
|                       |                 |   |        | <i>Mastomys erythroleucus</i> (25, 0/25)    |             |
| Diello-p1 (Sen)       | 13°43'N/16°24'W | D | HD, NH | <i>Cricetomys gambianus</i> (9, 0/9)        | Nesomyidae  |
|                       |                 |   |        | <i>Arvicanthis niloticus</i> (36, 5/36)     | Muridae     |
|                       |                 |   |        | <i>Mastomys erythroleucus</i> (442, 18/442) |             |
|                       |                 |   |        | <i>Praomys daltoni</i> (1, 0/1)             |             |
|                       |                 |   |        | <i>Gerbilliscus gambianus</i> (6, 0/6)      |             |
|                       |                 |   |        | <i>Rattus rattus</i> (1, 0/1)               |             |
|                       |                 |   |        | <i>Heliosciurus gambianus</i> (2, 0/2)      | Sciuridae   |
|                       |                 |   |        | <i>Crocidura</i> sp. (1, 0/1)               | Soricidae   |
| Diamy-Mbaila (Sen)    | 15°29'N/13°16'W | C | NH     | <i>Arvicanthis niloticus</i> (24, 0/24)     | Muridae     |
| Diomandou (Sen)       | 16°30'N/14°25'W | B | NH, HD | <i>Arvicanthis niloticus</i> (128, 0/128)   |             |
|                       |                 |   |        | <i>Mastomys erythroleucus</i> (10, 0/10)    |             |
|                       |                 |   |        | <i>Mastomys huberti</i> (1, 0/1)            |             |
|                       |                 |   |        | <i>Taterillus</i> sp. (1, 1/1)              |             |
|                       |                 |   |        | <i>Atelerix albiventris</i> (3, 0/3)        | Erinaceidae |
| Diomandou-Walo (Sen)  | 16°30'N/14°25'W | B | NH     | <i>Arvicanthis niloticus</i> (1, 0/1)       | Muridae     |
|                       |                 |   |        | <i>Mastomys erythroleucus</i> (4, 0/4)      |             |
| Dodel (Sen)           | 16°29'N/14°25'W | B | NH     | <i>Arvicanthis niloticus</i> (2, 0/2)       |             |
|                       |                 |   |        | <i>Mastomys erythroleucus</i> (19, 0/19)    |             |
| Kébémér (Sen)         | 15°22'N/16°26'W | C | HD, NH | <i>Arvicanthis niloticus</i> (3, 0/3)       |             |
|                       |                 |   |        | <i>Mus musculus</i> (38, 0/38)              |             |
| Keur Moussa (Sen)     | 14°45'N/17°06'W | C | NH, HD | <i>Arvicanthis niloticus</i> (25, 3/25)     |             |
|                       |                 |   |        | <i>Mastomys erythroleucus</i> (89, 15/89)   |             |
|                       |                 |   |        | <i>Mus musculus</i> (1, 0/1),               |             |
|                       |                 |   |        | <i>Praomys daltoni</i> (11, 0/11)           |             |
|                       |                 |   |        | <i>Taterillus</i> sp. (1, 0/1)              |             |
|                       |                 |   |        | <i>Gerbilliscus gambianus</i> (1, 0/1)      |             |
|                       |                 |   |        | <i>Rattus rattus</i> (3, 0/3)               |             |
|                       |                 |   |        | <i>Atelerix albiventris</i> (12, 0/12)      | Erinaceidae |
|                       |                 |   |        | <i>Cricetomys gambianus</i> (1, 0/1)        | Nesomyidae  |
| Lampsar (Sen)         | 16°06'N/16°20'W | B | NH, HD | <i>Arvicanthis niloticus</i> (6, 0/6)       | Muridae     |
|                       |                 |   |        | <i>Mus musculus</i> (148, 0/148)            |             |
| Louga (Sen)           | 15°24'N/15°13'W | C | HD, NH | <i>Cricetomys gambianus</i> (1, 0/1)        | Nesomyidae  |
|                       |                 |   |        | <i>Arvicanthis niloticus</i> (5, 0/5)       | Muridae     |
|                       |                 |   |        | <i>Mus musculus</i> (35, 0/35)              |             |
| Mbaouane (Sen)        | 14°52'N/17°07'W | C | NH, HD | <i>Dasymys rufulus</i> (4, 0/4)             |             |
|                       |                 |   |        | <i>Arvicanthis niloticus</i> (8, 1/8)       |             |
|                       |                 |   |        | <i>Mastomys erythroleucus</i> (31, 8/31)    |             |
|                       |                 |   |        | <i>Mastomys huberti</i> (23, 0/23)          |             |
|                       |                 |   |        | <i>Taterillus</i> sp. (1, 0/1)              |             |
|                       |                 |   |        | <i>Gerbilliscus gambianus</i> (4, 1/4)      |             |
|                       |                 |   |        | <i>Crocidura</i> sp. (26, 0/26)             | Soricidae   |
| Mbour (Sen)           | 14°25'N/16°57'W | C | NH     | <i>Arvicanthis niloticus</i> (5, 3/5)       | Muridae     |
|                       |                 |   |        | <i>Mastomys erythroleucus</i> (2, 1/2)      |             |

|                              |                 |   |        |                                                                                                                                                                                                                            |                      |
|------------------------------|-----------------|---|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Niayes Kayar-Tivaouane (Sen) | 14°58'N/16°33'W | C | HD     | <i>Gerbilliscus gambianus</i> (2, 2/2)<br><i>Mastomys erythroleucus</i> (4, 0/4)<br><i>Mus musculus</i> (54, 0/54)<br><i>Rattus rattus</i> (14, 0/14)                                                                      |                      |
| Ngaparou (Sen)               | 14°27'N/17°03'W | C | NH     | <i>Gerbilliscus gambianus</i> (1, 0/1)                                                                                                                                                                                     |                      |
| Richard-Toll (Sen)           | 16°27'N/15°41'W | B | NH, HD | <i>Arvicanthis niloticus</i> (476, 88/476)<br><i>Mastomys huberti</i> (234, 37/234)<br><i>Mus musculus</i> (21, 5/21)<br><i>Taterillus</i> sp. (9, 0/9)<br><i>Crocidura</i> sp. (55, 4/55)                                 | Soricidae            |
| Retba (Sen)                  | 14°50'N/17°14'W | C | NH, HD | <i>Arvicanthis niloticus</i> (18, 4/18)<br><i>Mastomys erythroleucus</i> (3, 0/3)<br><i>Mastomys huberti</i> (2, 0/2)<br><i>Taterillus</i> sp. (3, 0/3)<br><i>Rattus rattus</i> (1, 0/1)<br><i>Crocidura</i> sp. (4, 0/4)  | Muridae              |
| Thialaga (Sen)               | 16°29'N/14°27'W | B | NH     | <i>Arvicanthis niloticus</i> (13, 0/13)<br><i>Mastomys erythroleucus</i> (35, 1/35)                                                                                                                                        | Soricidae<br>Muridae |
| Dakhla (Mor), western Sahara | 23°54'N/15°48'W | A | NH     | <i>Gerbillus occiduus</i> (14, 1/14)                                                                                                                                                                                       |                      |
| Soufa (Mau)                  | 15°56'N/12°01'W | C | NH, HD | <i>Gerbillus nanus</i> (3, 0/3)<br><i>Taterillus</i> sp. (1, 0/1)<br><i>Mastomys erythroleucus</i> (6, 0/6)<br><i>Desmodilliscus braueri</i> (2, 0/0)<br><i>Atelerix albiventris</i> (1, 0/1)                              | Erinaceidae          |
| Nbeika (Mau)                 | 17°59'N/12°14'W | B | NH, HD | <i>Gerbillus</i> sp. (1, 0/1)<br><i>Gerbillus nanus</i> (1, 0/1)<br><i>Gerbillus campestris</i> (4, 0/2)<br><i>Gerbillus gerbillus</i> (1, 0/1)<br><i>Gerbillus tarabuli</i> (1, 0/1)<br><i>Jaculus jaculus</i> (21, 0/21) | Muridae              |
| Rachid (Mau)                 | 18°47'N/11°41'W | B | NH, HD | <i>Acomys airensis</i> (34, 0/24)<br><i>Gerbillus</i> sp. (3, 0/2)<br><i>Gerbillus campestris</i> (2, 0/2)<br><i>Gerbillus henleyi</i> (1, 0/1)                                                                            | Dipodidae<br>Muridae |
| Oujeft (Mau)                 | 20°00'N/13°03'W | B | NH, HD | <i>Gerbillus tarabuli</i> (17, 0/12)<br><i>Gerbillus nanus</i> (2, 0/2)<br><i>Gerbillus campestris</i> (1, 0/1)<br><i>Acomys airensis</i> (1, 0/1)<br><i>Mus musculus</i> (9, 0/8)<br><i>Felovia vae</i> (1, 0/1)          | Ctenodactylidae      |
| Toujil (Mau)                 | 22°07'N/12°41'W | A | F      | <i>Gerbillus gerbillus</i> (10, 0/7)<br><i>Gerbillus tarabuli</i> (1, 0/1)                                                                                                                                                 | Muridae              |
| Guelb el Dim (Mau)           | 22°59'N/12°00'W | A | NH     | <i>Gerbillus</i> sp. (2, 0/2)<br><i>Jaculus jaculus</i> (2, 0/2)                                                                                                                                                           | Dipodidae            |
| Aïn El Taya (Mau)            | 20°16'N/13°07'W | B | NH, DW | <i>Acomys chudeaui</i> (17, 0/14)<br><i>Gerbillus</i> sp. (21, 0/0)                                                                                                                                                        | Muridae              |

|                           |                 |   |           |                                         |             |
|---------------------------|-----------------|---|-----------|-----------------------------------------|-------------|
|                           |                 |   |           | <i>Gerbillus gerbillus</i> (1, 0/1)     |             |
|                           |                 |   |           | <i>Gerbillus pyramidum</i> (3, 0/3)     |             |
|                           |                 |   |           | <i>Gerbillus campestris</i> (2, 0/2)    |             |
|                           |                 |   |           | <i>Gerbillus tarabuli</i> (4, 0/3)      |             |
|                           |                 |   |           | <i>Jaculus jaculus</i> (2, 0/2)         | Dipodidae   |
| Tiguent (Mau)             | 17°12'N/16°04'W | B | NH        | <i>Gerbillus gerbillus</i> (2, 0/2)     | Muridae     |
|                           |                 |   |           | <i>Gerbillus tarabuli</i> (35, 0/26)    |             |
| Akjoujt (Mau)             | 19°44'N/14°22'W | B | NH, F, DW | <i>Gerbillus nanus</i> (1, 0/0)         |             |
|                           |                 |   |           | <i>Gerbillus tarabuli</i> (1, 0/1)      |             |
|                           |                 |   |           | <i>Gerbillus pyramidum</i> (15, 0/15)   |             |
|                           |                 |   |           | <i>Gerbillus</i> sp. (1, 0/1)           |             |
|                           |                 |   |           | <i>Pachyuromys duprasi</i> (1, 0/0)     |             |
|                           |                 |   |           | <i>Jaculus jaculus</i> (1, 0/0)         | Dipodidae   |
|                           |                 |   |           | <i>Hemiechinus aethiopicus</i> (1, 0/1) | Erinaceidae |
| Oumou Tounsi (Mau)        | 18°43'N/15°36'W | B | NH        | <i>Gerbillus</i> sp. (2, 0/2)           | Muridae     |
|                           |                 |   |           | <i>Gerbillus nanus</i> (1, 0/1)         |             |
|                           |                 |   |           | <i>Hemiechinus aethiopicus</i> (1, 0/1) | Erinaceidae |
| Lemcid (Mau)              | 18°39'N/16°06'W | B | NH        | <i>Gerbillus gerbillus</i> (17, 1/15)   | Muridae     |
|                           |                 |   |           | <i>Gerbillus tarabuli</i> (6, 2/5)      |             |
|                           |                 |   |           | <i>Gerbillus nanus</i> (2, 0/1)         |             |
| South of Nouakchott (Mau) | 17°23'N/16°03'W | B | NH        | <i>Xerus erythropus</i> (1, 0/0)        | Sciuridae   |
|                           |                 |   |           | <i>Gerbillus</i> sp. (1, 0/1)           | Muridae     |
|                           |                 |   |           | <i>Gerbillus tarabuli</i> (5, 0/4)      |             |
| Keur Massène (Mau)        | 16°34'N/16°17'W | B | NH        | <i>Xerus erythropus</i> (1, 0/1)        | Sciuridae   |
|                           |                 |   |           | <i>Taterillus arenarius</i> (7, 0/5)    | Muridae     |
|                           |                 |   |           | <i>Gerbillus gerbillus</i> (1, 0/1)     |             |
| Diougounté (Mal)          | 14°07'N/09°58'W | D | HD        | <i>Mastomys erythroleucus</i> (1, 1/1)  |             |
| Batamani-Daga (Mal)       | 14°52'N/04°03'W | C | NH        | <i>Mastomys huberti</i> (76, 1/76)      |             |
|                           |                 |   |           | <i>Mastomys natalensis</i> (12, 0/12)   |             |
|                           |                 |   |           | <i>Mastomys erythroleucus</i> (3, 0/3)  |             |
|                           |                 |   |           | <i>Arvicanthis ansorgei</i> (3, 0/3)    |             |
|                           |                 |   |           | <i>Arvicanthis niloticus</i> (7, 0/7)   |             |
|                           |                 |   |           | <i>Crociodura viaria</i> (9, 0/9)       | Soricidae   |
| Niamou (Mal)              | 14°01'N/08°02'W | D | HD        | <i>Mastomys natalensis</i> (36, 0/31)   | Muridae     |
|                           |                 |   |           | <i>Praomys daltoni</i> (1, 0/1)         |             |
| Médine (Mal)              | 14°22'N/11°21'W | D | NH, F     | <i>Taterillus</i> sp. (2, 0/2)          |             |
|                           |                 |   |           | <i>Gerbilliscus gambianus</i> (5, 0/4)  |             |
|                           |                 |   |           | <i>Mastomys erythroleucus</i> (1, 0/1)  |             |
| Kolomina (Mal)            | 14°28'N/08°01'W | D | HD        | <i>Mastomys natalensis</i> (20, 6/19)   |             |
|                           |                 |   |           | <i>Praomys daltoni</i> (3, 1/3)         |             |
| Argueta (Mal)             | 14°57'N/11°02'W | C | HD        | <i>Praomys daltoni</i> (2, 0/2)         |             |
| Topokoné (Mal)            | 15°02'N/10°34'W | C | F, HD     | <i>Praomys daltoni</i> (23, 3/22)       |             |
| Monsombougou (Mal)        | 14°58'N/10°01'W | C | NH, HD    | <i>Taterillus</i> sp. (1, 0/1)          |             |
|                           |                 |   |           | <i>Praomys daltoni</i> (41, 6/41)       |             |
|                           |                 |   |           | <i>Arvicanthis niloticus</i> (1, 0/1)   |             |
|                           |                 |   |           | <i>Crociodura</i> sp. (1, 0/1)          | Soricidae   |



|                                   |                 |   |           |                                                                                                                                                                                                                                           |                        |
|-----------------------------------|-----------------|---|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Hassilbarké-Maure<br>(Mal)        | 14°54'N/09°24'W | C | NH, HD    | <i>Atelerix albiventris</i> (2, 0/1)<br><i>Gerbillus nigeriae</i> (1, 0/1)<br><i>Praomys daltoni</i> (57, 1/54)<br><i>Arvicanthis niloticus</i> (2, 0/2)<br><i>Desmodilliscus braueri</i> (1, 0/1)<br><i>Mastomys natalensis</i> (1, 1/1) | Erinaceidae<br>Muridae |
| Sambé (Mal)                       | 15°07'N/07°57'W | C | NH, HD, F | <i>Taterillus</i> sp. (3, 0/3)<br><i>Praomys daltoni</i> (44, 0/43)<br><i>Xerus erythropus</i> (1, 0/1),                                                                                                                                  | Sciuridae              |
| <b>Total collected and tested</b> |                 |   |           | <b>Specimens: 3,225, 287/3,109</b>                                                                                                                                                                                                        |                        |

HD = Human dwellings

NH = Natural habitat

F = Fields

DW = Dry wadi

Dielmo-p2 = Rodent trapping 2002 in Dielmo

Dielmo-p1 = Rodent trapping 1990-1993 in Dielmo

Ndiop-p1 = Rodent trapping 2002 in Ndiop

Sen = Senegal

Mor = Morocco

Mau = Mauritania

Mal = Mali

♣ = Annual average rainfall from 1970 to 1999 : < 50 mm (A); 50-250 mm (B); 250-500 mm (C); 500-750 mm (D); 750-1000 mm (E); ≥ 1000 mm (F)

☼ = Number :captured (No), Infected (I)/Tested (T)

Supplementary Table-S2. Localities of capture of small mammal species in areas where we failed to demonstrate the presence of *Ornithodoros sonrai* ticks. Average rainfall: B = 50-250 mm; C = 250-500 mm; D = 500-750 mm; E = 750-1000 mm; F = > 1000 mm

| Study area          | Coordinate of sampling localities | Average rainfall ♣ (mm) | Habitat sampled | Small mammals species (No. of specimens, I/T) <sup>✱</sup>                                                                                               | Family    |
|---------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Diouloulou (Sen)    | 13°02'N/16°36'W                   | E                       | NH, HD          | <i>Mastomys erythroleucus</i> (30, 0/30)<br><i>Praomys daltoni</i> (2, 0/2)<br><i>Gerbilliscus gambianus</i> (2, 0/2)<br><i>Rattus rattus</i> (15, 0/15) | Muridae   |
| Badi-Niériko (Sen)  | 13°08'N/13°13'W                   | E                       | HD, NH          | <i>Mastomys erythroleucus</i> (5, 0/5)<br><i>Praomys daltoni</i> (1, 0/1)<br><i>Rattus rattus</i> (1, 0/1)                                               |           |
| Diakhaba (Sen)      | 13°18'N/13°05'W                   | E                       | HD, NH          | <i>Mastomys erythroleucus</i> (9, 0/9)<br><i>Mastomys huberti</i> (1, 0/1)<br><i>Mastomys natalensis</i> (8, 0/8)<br><i>Praomys daltoni</i> (1, 0/1)     |           |
| Gamon (Sen)         | 13°20'N/12°54'W                   | E                       | HD, NH          | <i>Mastomys erythroleucus</i> (9, 0/9)<br><i>Praomys daltoni</i> (2, 0/2)<br><i>Rattus rattus</i> (1, 0/1)                                               |           |
| Kédougou (Sen)      | 12°33'N/12°10'W                   | F                       | NH, HD          | <i>Mastomys erythroleucus</i> (18, 0/18)<br><i>Mastomys huberti</i> (25, 0/25)<br><i>Mastomys natalensis</i> (4, 0/4)<br><i>Praomys daltoni</i> (2, 0/2) |           |
| Téréma island (Sen) | 13°40'N/16°38'W                   | E                       | NH              | <i>Mastomys huberti</i> (20, 0/20)                                                                                                                       |           |
| Bétanti (Sen)       | 13°41'N/16°37'W                   | E                       | NH, HD          | <i>Mastomys huberti</i> (21, 0/21)<br><i>Gerbilliscus gambianus</i> (30, 0/30)                                                                           |           |
| Bignogna (Sen)      | 12°48'N/16°14'W                   | E                       | NH, HD          | <i>Mastomys erythroleucus</i> (27, 0/27)<br><i>Praomys daltoni</i> (5, 0/5)<br><i>Rattus rattus</i> (32, 0/32)<br><i>Crocidura</i> sp. (2, 0/2)          | Soricidae |
| Bembou (Sen)        | 12°49'N/11°52'W                   | E                       | HD              | <i>Mastomys natalensis</i> (3, 0/3)                                                                                                                      | Muridae   |
| Fadiga (Sen)        | 12°33'N/12°10'W                   | F                       | NH, HD          | <i>Mastomys erythroleucus</i> (17, 0/17)<br><i>Mastomys huberti</i> (22, 0/22)<br><i>Matomys natalensis</i> (2, 0/2)                                     |           |
| Ibel (Sen)          | 12°30'N/12°22'W                   | F                       | HD              | <i>Mastomys natalensis</i> (2, 0/2)<br><i>Mastomys erythroleucus</i> (6, 0/6)<br><i>Crocidura</i> sp. (1, 0/1)                                           | Soricidae |
| Niokolo-koba (Sen)  | 12°59'N/12°54'W                   | E                       | NH, HD          | <i>Mastomys erythroleucus</i> (2, 0/2)<br><i>Praomys daltoni</i> (6, 0/6)<br><i>Rattus rattus</i> (1, 0/1)                                               | Muridae   |
| Saraya (Sen)        | 12°49'N/11°45'W                   | F                       | NH              | <i>Mastomys erythroleucus</i> (5, 0/5)                                                                                                                   |           |
| Sénoba (Sen)        | 13°22'N/15°30'W                   | E                       | NH, HD          | <i>Mastomys erythroleucus</i> (18, 0/18)<br><i>Gerbilliscus gambianus</i> (3, 0/3)                                                                       |           |

|                            |                 |   |           |                                          |             |
|----------------------------|-----------------|---|-----------|------------------------------------------|-------------|
| Simenti (Sen)              | 13°02'N/13°17'W | E | HD        | <i>Rattus rattus</i> (35, 0/35)          |             |
|                            |                 |   |           | <i>Mastomys erythroleucus</i> (14, 0/14) |             |
| In-Tebezas (Mal)           | 18°01'N/01°49'E | B | NH        | <i>Rattus rattus</i> (1, 0/1)            |             |
|                            |                 |   |           | <i>Gerbillus tarabuli</i> (5, 0/5)       |             |
|                            |                 |   |           | <i>Gerbillus nanus</i> (2, 0/2)          |             |
|                            |                 |   |           | <i>Gerbillus pyramidum</i> (3, 0/3)      |             |
|                            |                 |   |           | <i>Arvicanthis niloticus</i> (1, 0/1)    |             |
| Tin-Bidène (Mal)           | 19°01'N/01°50'E | B | NH, DW    | <i>Jaculus jaculus</i> (2, 0/2)          | Dipodidae   |
|                            |                 |   |           | <i>Gerbillus tarabuli</i> (19, 0/19)     | Muridae     |
|                            |                 |   |           | <i>Gerbillus nanus</i> (7, 0/7)          |             |
|                            |                 |   |           | <i>Gerbillus pyramidum</i> (7, 0/7)      |             |
|                            |                 |   |           | <i>Gerbillus campestris</i> (1, 0/1)     |             |
|                            |                 |   |           | <i>Arvicanthis niloticus</i> (1, 0/1)    |             |
|                            |                 |   |           | <i>Jaculus jaculus</i> (3, 0/3)          | Dipodidae   |
| Massif of Amastaouas (Mal) | 17°01'N/02°06'E | B | NH, DW    | <i>Arvicanthis niloticus</i> (7, 0/7)    | Muridae     |
|                            |                 |   |           | <i>Gerbillus nanus</i> (5, 0/4)          |             |
|                            |                 |   |           | <i>Taterillus petteri</i> (2, 0/2)       |             |
|                            |                 |   |           | <i>Gerbillus tarabuli</i> (2, 0/2)       |             |
|                            |                 |   |           | <i>Jaculus jaculus</i> (6, 0/6)          | Dipodidae   |
| Tilola (Nig)               | 15°09'N/02°04'E | C | F, NH, DW | <i>Gerbillus nigeriae</i> (21, 0/20)     | Muridae     |
|                            |                 |   |           | <i>Acomys airensis</i> (3, 0/3)          |             |
|                            |                 |   |           | <i>Gerbillus tarabuli</i> (11, 0/11)     |             |
|                            |                 |   |           | <i>Arvicanthis niloticus</i> (1, 0/1)    |             |
|                            |                 |   |           | <i>Mastomys erythroleucus</i> (6, 0/5)   |             |
|                            |                 |   |           | <i>Hemiechinus aethiopicus</i> (1, 0/1)  | Erinaceidae |
| Tékhé (Nig)                | 14°01'N/06°01'E | C | NH        | <i>Gerbillus nigeriae</i> (2, 0/2)       | Muridae     |
| Mazadaoua (Nig)            | 14°00'N/07°59'E | C | NH        | <i>Desmodilliscus braueri</i> (1, 0/0)   |             |
|                            |                 |   |           | <i>Gerbillus nigeriae</i> (4, 0/3)       |             |
| Piliki (Nig)               | 13°08'N/01°57'E | D | HD, NH    | <i>Gerbillus nanus</i> (1, 0/0)          |             |
|                            |                 |   |           | <i>Arvicanthis</i> sp. (6, 0/0)          |             |
| Boutéré (Ben)              | 10°51'N/02°08'E | E | HD, NH    | <i>Mastomys natalensis</i> (31, 0/28)    |             |
|                            |                 |   |           | <i>Mastomys erythroleucus</i> (35, 0/32) |             |
|                            |                 |   |           | <i>Gerbilliscus</i> sp. (7, 0/4)         |             |
|                            |                 |   |           | <i>Taterillus gracilis</i> (8, 0/6)      |             |
|                            |                 |   |           | <i>Gerbilliscus kemp</i> (1, 0/0)        |             |
|                            |                 |   |           | <i>Gerbilliscus</i> sp. (4, 0/2)         |             |
|                            |                 |   |           | <i>Mastomys erythroleucus</i> (8, 0/6)   |             |
|                            |                 |   |           | <i>Lemniscomys</i> sp. (1, 0/1)          |             |
|                            |                 |   |           | <i>Praomys daltoni</i> (1, 0/1)          |             |
|                            |                 |   |           | <i>Heliosciurus gambianus</i> (1, 0/1)   | Sciuridae   |
| Igbéré (Ben)               | 08°59'N/01°57'E | F | NH, HD    | <i>Atelerix albiventris</i> (1, 0/0)     | Erinaceidae |
|                            |                 |   |           | <i>Taterillus</i> sp. (1, 0/1)           | Muridae     |
|                            |                 |   |           | <i>Mastomys natalensis</i> (38, 0/20)    |             |
|                            |                 |   |           | <i>Mastomys erythroleucus</i> (20, 0/18) |             |
|                            |                 |   |           | <i>Mastomys</i> sp. (13, 0/9)            |             |
|                            |                 |   |           | <i>Lemniscomys bellieri</i> (2, 0/0)     |             |

|                            |                 |   |        |                                             |             |
|----------------------------|-----------------|---|--------|---------------------------------------------|-------------|
|                            |                 |   |        | <i>Lemniscomys</i> sp. (13, 0/13)           |             |
|                            |                 |   |        | <i>Uranomys ruddi</i> (12, 0/12)            |             |
|                            |                 |   |        | <i>Crocidura</i> sp. (2, 0/2)               | Soricidae   |
|                            |                 |   |        | <i>Gerbilliscus kemp</i> (2, 0/0),          | Muridae     |
|                            |                 |   |        | <i>Gerbilliscus</i> sp. (5, 0/4)            |             |
|                            |                 |   |        | <i>Praomys daltoni</i> (6, 0/6)             |             |
|                            |                 |   |        | <i>Mastomys natalensis</i> (22, 0/10)       |             |
|                            |                 |   |        | <i>Praomys derooi</i> (9, 0/8)              |             |
|                            |                 |   |        | <i>Arvicanthis</i> sp. (1, 0/0)             |             |
| Doyissa (Ben)              | 07°59'N/01°59'E | F | NH, HD | <i>Mastomys</i> sp. (6, 0/5)                |             |
|                            |                 |   |        | <i>Crocidura</i> sp. (2, 0/2)               | Soricidae   |
|                            |                 |   |        | <i>Mastomys erythroleucus</i> (17, 0/16)    | Muridae     |
|                            |                 |   |        | <i>Uranomys ruddi</i> (2, 0/2)              |             |
|                            |                 |   |        | <i>Mastomys natalensis</i> (23, 0/10)       |             |
|                            |                 |   |        | <i>Praomys derooi</i> (6, 0/4)              |             |
|                            |                 |   |        | <i>Rattus rattus</i> (4, 0/3)               |             |
| Lanta (Ben)                | 07°06'N/01°52'E | F | NH, HD | <i>Mastomys natalensis</i> (9, 0/7)         |             |
|                            |                 |   |        | <i>Rattus rattus</i> (7, 0/6)               |             |
|                            |                 |   |        | <i>Cricetomys gambianus</i> (5, 0/3)        | Nesomyidae  |
|                            |                 |   |        | <i>Arvicanthis rufinus</i> (5, 0/0)         | Muridae     |
|                            |                 |   |        | <i>Gerbilliscus kemp</i> (1, 0/0)           |             |
| Sounoute (Saguéré,<br>Cha) | 14°09'N/21°50'E | C | NH     | <i>Atelerix albiventris</i> (1, 0/0)        | Erinaceidae |
| Doué (Cha)                 | 09°16'N/14°41'E | C | NH, HD | <i>Mastomys natalensis</i> (2, 0/2)         |             |
|                            |                 |   |        | <i>Crocidura</i> sp. (1, 0/1)               | Soricidae   |
|                            |                 |   |        | <i>Mastomys erythroleucus</i> (29, 0/29)    | Muridae     |
|                            |                 |   |        | <i>Mastomys kollmannspergeri</i> (16, 0/16) |             |
|                            |                 |   |        | <i>Gerbilliscus</i> sp. (1, 0/1)            |             |
|                            |                 |   |        | <i>Uranomys ruddi</i> (1, 0/0)              |             |
| Mataya (Cha)               | 11°59'N/18°02'E | D | HD     | <i>Mastomys natalensis</i> (3, 0/3)         |             |
| Yik and Abouki 2<br>(Cam)  | 12°30'N/14°35'E | C | HD, NH | <i>Crocidura</i> sp. (4, 0/4)               | Soricidae   |
|                            | 12°30'N/14°36'E |   |        | <i>Mastomys natalensis</i> (3, 0/3)         | Muridae     |
|                            |                 |   |        | <i>Gerbilliscus</i> sp. (13, 0/12)          |             |
|                            |                 |   |        | <i>Mastomys kollmannspergeri</i> (4, 0/4)   |             |
|                            |                 |   |        | <i>Mastomys</i> sp. (7, 0/4)                |             |
|                            |                 |   |        | <i>Taterillus lacustris</i> (7, 0/5)        |             |
|                            |                 |   |        | <i>Atelerix albiventris</i> (2, 0/0)        | Erinaceidae |
|                            |                 |   | NH     | <i>Desmodilliscus braueri</i> (5, 0/5)      | Muridae     |
| Kossa and Madjina<br>(Cam) | 11°07'N/14°19'E | D | HD, NH | <i>Arvicanthis</i> sp. (6, 0/4)             |             |
|                            | 11°09'N/14°22'E |   |        | <i>Mastomys erythroleucus</i> (8, 0/8)      |             |
|                            |                 |   |        | <i>Mastomys natalensis</i> (3, 0/3)         |             |
|                            |                 |   |        | <i>Arvicanthis</i> sp. (21, 0/19)           |             |
|                            |                 |   |        | <i>Gerbilliscus</i> sp. (8, 0/7)            |             |
|                            |                 |   |        | <i>Mastomys erythroleucus</i> (2, 0/2)      |             |
|                            |                 |   |        | <i>Lemniscomys zebra</i> (3, 0/3)           |             |
|                            |                 |   |        | <i>Xerus erythropus</i> (3, 0/1)            | Sciuridae   |
|                            |                 |   |        | <i>Gerbilliscus</i> sp. (16, 0/15)          | Muridae     |

|             |                 |   |        |                                             |                                        |
|-------------|-----------------|---|--------|---------------------------------------------|----------------------------------------|
| Mogom (Cam) | 10°30'N/14°25'E | E | HD, NH | <i>Taterillus</i> sp. (5, 0/2)              |                                        |
|             |                 |   |        | <i>Atelerix albiventris</i> (1, 0/0)        | Erinaceidae                            |
|             |                 |   |        | <i>Crocidura</i> sp. (8, 0/8)               | Soricidae                              |
|             |                 |   |        | <i>Mastomys natalensis</i> (3, 0/3)         | Muridae                                |
|             |                 |   |        | <i>Arvicanthis</i> sp. (1, 0/1)             |                                        |
|             |                 |   |        | <i>Crocidura</i> sp. (2, 0/2)               | Soricidae                              |
|             |                 |   |        | <i>Arvicanthis</i> sp. (14, 0/12)           | Muridae                                |
|             |                 |   |        | <i>Mastomys erythroleucus</i> (12, 0/12)    |                                        |
|             |                 |   |        | <i>Mastomys kollmannspergeri</i> (15, 0/15) |                                        |
|             |                 |   |        | NH                                          | <i>Desmodilliscus braueri</i> (2, 0/2) |
| Diéra (Cam) | 08°31'N/13°30'E | F | HD, NH | <i>Mastomys kollmannspergeri</i> (1, 0/1)   |                                        |
|             |                 |   |        | <i>Mastomys natalensis</i> (14, 0/12)       |                                        |
|             |                 |   |        | <i>Rattus rattus</i> (1, 0/1)               |                                        |
|             |                 |   |        | <i>Lemniscomys zebra</i> (7, 0/5)           |                                        |
|             |                 |   |        | <i>Arvicanthis</i> sp. (2, 0/2)             |                                        |
|             |                 |   |        | <i>Mastomys kollmannspergeri</i> (2, 0/2)   |                                        |
|             |                 |   |        | <i>Taterillus congicus</i> (2, 0/2)         |                                        |

***Total collected and tested***

***Specimens: 1,133, 0/1,004***

Sen = Senegal

Mal = Mali

Nig = Niger

Ben = Benin

Cha = Chad

Cam = Cameroon

♣ = Annual average rainfall from 1970 to 1999 : < 50 mm (A); 50-250 mm (B); 250-500 mm (C); 500-750 mm (D); 750-1000 mm (E); ≥ 1000 mm (F)

☼ = Number captured (No), Infected (I)/Tested (T)

## Article 4

**Georges DIATTA, Oleg MEDIANNIKOV, Sylvie BOYER, Cheikh SOKHNA, Hubert BASSENE, Florence FENOLLAR, Gilles CHAUVANCY, Abdoul Aziz NDIAYE, Fatoumata DIENE, Philippe PAROLA, and Didier RAOULT. An Alternative Strategy of Preventive Control of Tick-borne Relapsing Fever in Rural areas of Sine-Saloum, Senegal. American Journal of Tropical Medicine and Hygiene**

## An Alternative Strategy of Preventive Control of Tick-borne Relapsing Fever in Rural Areas of Sine-Saloum, Senegal

Georges Diatta,<sup>1</sup> Oleg Mediannikov,<sup>1,2</sup> Sylvie Boyer,<sup>3</sup> Cheikh Sokhna,<sup>1</sup> Hubert Bassène,<sup>1</sup> Florence Fenollar,<sup>2</sup> Gilles Chauvancy,<sup>1</sup> Abdoul Aziz Ndiaye,<sup>4,5</sup> Fatoumata Diene,<sup>6</sup> Philippe Parola,<sup>2</sup> and Didier Raoult<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Institut de Recherche pour le Développement, Unité de Recherche sur les Maladies Infectieuses et Tropicales Émergentes (UMR 198 IRD), Campus International de Recherche IRD/UCAD de Hann, Dakar, Senegal; <sup>2</sup>Unité de Recherche sur les Maladies Infectieuses et Tropicales Émergentes (URMITE), Unité Mixte (UM63), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS 7278), Institut de Recherche pour le Développement (IRD 198), Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (INSERM 1095), Aix Marseille Université, Marseille, France; <sup>3</sup>Sciences Economiques et Sociales de la Santé and Traitement de l'Information Médicale (SESTIM/INSERM), Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale, Aix Marseille Université, Marseille, France; <sup>4</sup>Département Santé Communautaire, Université Alioune Diop de Bambey, Bambey, Senegal; <sup>5</sup>Service de Santé des Armées, Camp Dial Diop, Dakar, Senegal; <sup>6</sup>Institut Pasteur de Dakar, Dakar, Senegal

**Abstract.** In Senegal, tick-borne relapsing fever (TBRF) is a major cause of morbidity and a neglected public health problem. Borreliosis cases commonly detected in two villages led us to implement a borreliosis preventive control including cementing of floors in bedrooms and outbuildings attended by inhabitants to avoid human contacts with tick vectors. Epidemiological and medical monitoring of the TBRF incidence was carried out at Dielmo and Ndiop by testing the blood of febrile patients since 1990 and 1993, respectively. Intra-domiciliary habitat conditions were improved by cementing, coupled with accompanying measures, from March 2013 to September 2015. Application of this strategy was associated with a significant reduction of borreliosis incidence. This was more evident in Dielmo, dropping from 10.55 to 2.63 cases per 100 person-years ( $P < 0.001$ ), than in Ndiop where it changed from 3.79 to 1.39 cases per 100 person-years ( $P < 0.001$ ). Thirty-six cases of TBRF were estimated to be prevented at a cost of €526 per infection. The preventive control strategy was successful in Dielmo and Ndiop, being associated with decreased incidence by 89.8% and 81.5%, respectively, suggesting that TBRF may be widely decreased when the population is involved. Public health authorities or any development stakeholders should adopt this effective tool for promoting rural health through national prevention programs.

### INTRODUCTION

In Africa, tick-borne relapsing fever (TBRF) due to *Borrelia* infections is contracted through bites of argasid ticks of the genus *Ornithodoros*. TBRF is a major cause of disease in several African regions. Untreated TBRF patients experience relapsing illness characteristic of the disease, and severe meningoencephalitic complications,<sup>1–3</sup> as well as spontaneous abortion in pregnant women,<sup>4</sup> can ensue.

TBRF persists in endemic foci around the world, where each *Borrelia* species that cause relapsing fever appear to be specific to its tick vector.<sup>4</sup> TBRF is endemic to sub-Saharan Africa. In eastern and southern Africa, TBRF occurs mainly due to *Borrelia duttonii*, which is transmitted by the tick vectors *Ornithodoros moubata* and *Ornithodoros porcinus* belonging to the *O. moubata* group.<sup>5</sup> In west Africa and the most arid parts of north Africa, TBRF is caused mainly by *Borrelia crocidurae*, which is transmitted by *Ornithodoros sonrai* ticks.<sup>6</sup> In coastal areas of north Africa, TBRF is caused by *Borrelia hispanica*, and is transmitted by ticks of the *Ornithodoros maroccanus* group, whereas in Western Sahara and in Morocco potentially pathogenic “*Borrelia merionesi*” is hosted by *Ornithodoros merionesi* and *Ornithodoros costalis* ticks.<sup>6</sup> TBRF is rarely detected in northern Africa and Mediterranean countries.<sup>1,7,8</sup> In several African nations, TBRF remains a significant public health problem. For example, in Tanzania, TBRF due to *B. duttonii* is one of the main causes of mortality in children under 5 years of age, with an alarming perinatal mortality rate of 463/1,000 in endemic regions.<sup>9,10</sup>

The epidemiology and geographic distribution of TBRF borreliosis in west and north Africa with regard to the main foci of transmission were recently reviewed.<sup>6</sup> Small mammals act as reservoir hosts for *Borrelia* infections,<sup>2,11</sup> but the *Ornithodoros* ticks are also potential reservoirs of most *Borrelia* spp. because of their longevity,<sup>12</sup> and the vertical transmission of *Borrelia* in tick vectors.<sup>12</sup>

In Senegal, the spirochete *B. crocidurae* was first described after isolation from the blood of a shrew from Dakar,<sup>13</sup> and was later identified as the cause of relapsing fever borreliosis in Senegal<sup>14</sup> and other countries of west Africa.<sup>3,15</sup> *Borrelia crocidurae* infection is a common cause of fever in rural Senegal.<sup>3,16</sup> The only known vectors of *B. crocidurae* are *O. sonrai* ticks.<sup>6</sup> These ticks live in burrows and crevices, and human contact with *O. sonrai* occurs when burrows colonized by the tick vector open inside bedrooms.<sup>16</sup>

In natural habitats and crops areas, it is difficult to combat TBRF, but a strategy for reducing the frequency of human contact with *O. sonrai* ticks combined with rodent captures may be performed inside houses, as using insecticides to kill ticks inside burrows would expose villagers to risks of toxic contamination, especially young children.<sup>17</sup>

Epidemiological data reported from Senegal showed that since 1934,<sup>14</sup> only 12 cases of borreliosis were detected in 1962,<sup>18</sup> and 23 more cases were diagnosed in Dakar between 1979 and 1982.<sup>19</sup> A prevalence of 4.2% was observed in children 10–14 years of age living in the Thies region, located 70-km east of Dakar.<sup>3</sup> In the village of Dielmo (Sine-Saloum), the average incidence of TBRF was 5% in the early 1990s.<sup>15</sup> A longitudinal study conducted in the same village reported that an average incidence of 11 per 100 person-years from the population develop TBRF each year<sup>16</sup>; however, this incidence has fluctuated between 3% and 27%.<sup>16</sup> In 2010, using specific quantitative polymerase chain reaction (qPCR), a prevalence of 13% was observed in samples obtained from

\*Address correspondence to Didier Raoult, Unité de Recherche sur les Maladies Infectieuses et Tropicales Émergentes, UMR CNRS 7278, IRD 198, INSERM U1095, Faculté de Médecine, Aix Marseille Université, 27 Boulevard Jean Moulin, 13385 Marseille Cedex 5, France. E-mail: didier.raoult@gmail.com

febrile patients who were followed for 7 months.<sup>20</sup> The proportion of burrows harboring *O. sonrai* inside homes and fields of Dielmo was observed to be 8–14% in 2005 (G. Diatta, unpublished data), and 7.1–8.5% in 1992.<sup>2</sup> Since 1998, imported or sporadic human cases of TBRF have been diagnosed in Ndiop, which is located south of Dielmo; however in 2011, a large number of TBRF cases were detected in Ndiop.<sup>21</sup>

These recent epidemiologic data indicate that TBRF occurs commonly in both populations, but no measures have been taken to avoid the occurrence of borreliosis cases within the community. This situation, along with our long-term relations with the population of two Senegalese villages, Dielmo and Ndiop,<sup>22</sup> led us to implement a borreliosis control trial plan including 1) cementing (i.e., covering the floor with a 5-cm layer of clay mixed in equal proportions with cement) of all bedrooms and attics attended by inhabitants, then tracking the emergence of new burrows and crevices coupled with the catching of small mammals, and measures of sanitary hygiene including sweeping of bedrooms and attics to prevent the risk and reduce the frequency of human contacts with tick vectors; 2) evaluation of *O. sonrai* tick infestations inside homes at Ndiop and Dielmo, followed by detection of *Borrelia* infection in *O. sonrai* ticks; 3) to compare borreliosis morbidity before and during the period of intervention based on the data from point-of-care (POC) laboratory serving all inhabitants of Dielmo and Ndiop villages. The rodent capture approach will reduce massively the presence of rodents and their role in dispersing the tick vector *O. sonrai* inside homes, and the frequency of rodent burrows. This measure of the intervention strategy may highly contribute to the reduction of TBRF incidence in both villages. All these measures related to the intervention strategy and prevention of borreliosis aim to address the question of whether by combating *O. sonrai* tick vectors

and small mammal reservoirs inside human dwellings, coupled with intra-domiciliary cleanliness, would widely reduce the frequency and incidence of TBRF disease?

## MATERIALS AND METHODS

**Study sites.** Recent data from Pasteur institute of Dakar surveys (J. F. Faye, unpublished data) indicated that Ndiop (13°41'N, 16°23'W) and Dielmo (13°43'N, 16°24'W) are two villages with 510 and 481 inhabitants, respectively, located in the Sine-Saloum area of Senegal (Figure 1). Ndiop is south of Dielmo, which is located 280-km southeast of Dakar. The vegetation and climate associated with both villages correspond to the Sudanese savanna area. Rainfall occurs over a 4-month period, from late June to mid-October. The village of Ndiop is populated by the Wolof people, whereas Dielmo is populated by the Serers. The houses are usually built in bricks consolidated with or without cement rendering, and the soil is noncemented dirt in most homes. In both villages, farming is a family activity. Agriculture is the main activity during the rainy season and extends through the dry season at which point gardening becomes more common.

**Population monitoring.** Before the beginning of the study, all the population, including each participant of each household, provided written individual informed consent for enrolling their residences. The National Ethics Committee of Senegal approved the project as part of program of identification and prevention of emergent pathogens, no. 00.87 MSP/DS/CNERS.

Medical and epidemiologic monitoring of the population began in 1990 in Dielmo and 1993 in Ndiop, when a dispensary was provided in each village. Two nurses and two technicians were replaced every 15 days, and four continuous field investigators were present every day (7 days/week). All febrile

**A** Aerial view of the village of Dielmo (C. ROGIER)



**B** Aerial view of the village of Ndiop (C. ROGIER)

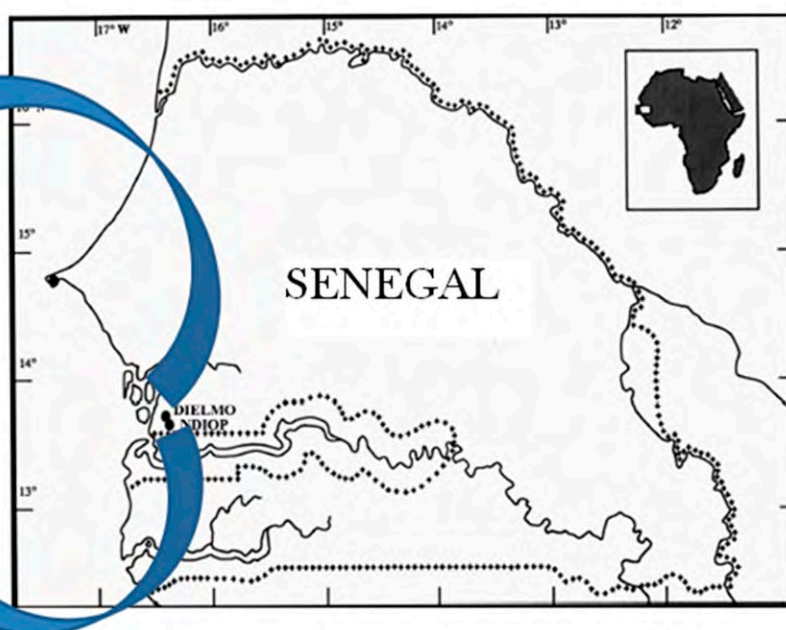


FIGURE 1. Locations of collection sites for tick samples studied in January 2012, Sine-Saloum, Senegal. (A) Aerial view of the village of Dielmo, Sine-Saloum, Senegal (Christophe Rogier); (B) Aerial view of the village of Ndiop, Sine-Saloum, Senegal (C. Rogier).



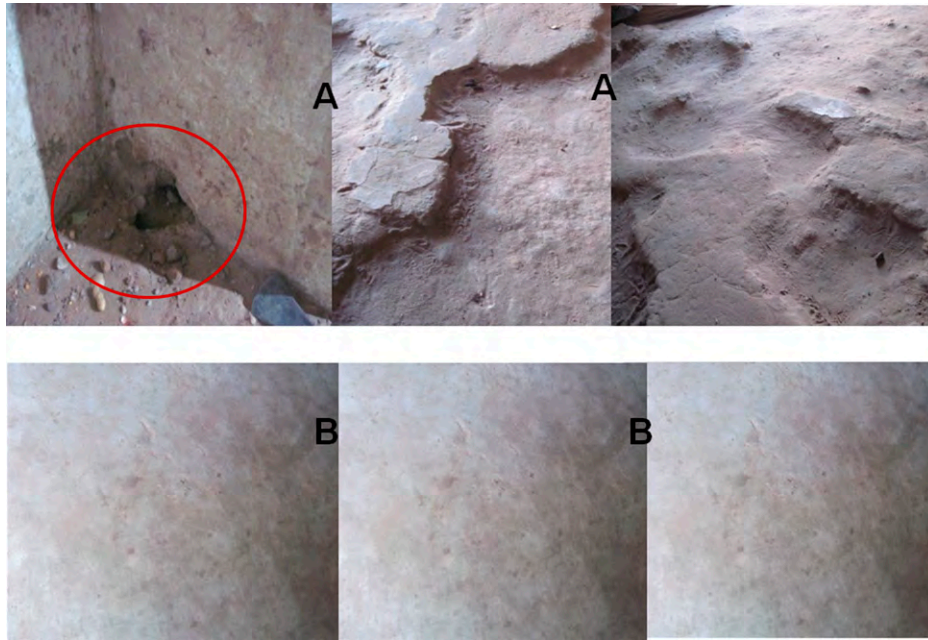


FIGURE 2. Presence of intra-domiciliary rodent burrow and crevices in Dielmo and Ndiop homes (A) before and (B) after the intervention of cementing.

(defined as axillary temperature  $> 37.5^{\circ}\text{C}$ ) patients were examined by a nurse of the village dispensaries of Dielmo or Ndiop. This staffing provision at the dispensaries is really necessary to ensure all medical and epidemiological monitoring within Dielmo and Ndiop populations because of presence of malaria, borreliosis, rickettsioses, influenza, and so forth. Each agent had a specific function. All bedrooms of households from each village were visited by the field investigators. From 1990 to 2010, the thick blood smear technique was used to detect mainly malaria and *Borrelia* in all cases of fever monitored in the two villages. Since 2011, however, this technique has been reinforced with a functional POC diagnostic laboratory implemented in Dielmo (and serving both villages) to search for infections with *Borrelia*, *Plasmodium falciparum*, rickettsiae, and other fever-causing pathogenic agents using molecular diagnostics, thus enabling the rapid treatment of patients.<sup>23</sup>

**Preventive control strategy of TBRF implemented and accompanying measures.** We initiated the present borreliosis control project in March 2013, when we began to cement the floors (or rodent burrows if cement floors already existed) of all bedrooms and outbuildings with a high human use, to pre-

vent the risk of human contacts with tick vectors. Before cementing, risk factors were identified and counted in priority bedrooms of each household to understand the risk of human exposure to the *O. sonrai* tick. Risk factors included the presence of burrows and crevices that can harbor *O. sonrai* ticks (Figure 2A). The cement was purchased from a local dealer, along with granulated rat poison. Cementing and action monitoring were performed by workers recruited in each village, who also tracked down the burrows and crevices reappearing to prevent any emergence. Meetings were held in each village to ask each head of household to be involved during the work by providing enough sand, gravel, and water, while the cement was provided by the project. Accompanying measures consisted of 1) captures of small rodents and insectivores inside homes with a nontoxic liquid glue (Trapcoll; Kenda Farben, Ferrara Erbognone, Italy); 2) placement of granulated rat poison inside open burrows (Figure 3); 3) treatment of any termite tunnels destroyed during the work with insecticide powder; 4) systematic tracking of the state of cemented floors for the reappearance of rodent burrows and refilling them with cement; and 5) lectures and training of women



FIGURE 3. Liquid glue (nontoxic) used to capture small mammals; granulated rat poison used for backfilling rodent burrows.

from both villages on hygienic measures aimed to reduce borreliosis cases, encouraging them to embrace the intervention strategy.

**Evaluation of the cost of the implemented strategy.** We measured costs for the complete period of intervention implementation, that is, from March 2013 to September 2015. The costing perspective taken was that of the government. We considered the following costs: cement costs, bricklayers' salary, liquid glue and granulated rat poison costs, as well as costs for monitoring and field supervision including manager's salary, transportation, and phone costs. Thus, we calculated the total cost as the sum of all individual health-care resources used by participants, multiplied by the unit cost of these resources as well as the cost per avoided infection.

**Sampling of *O. sonrai* ticks in burrows from Ndiop and Dielmo.** In January 2012, *Ornithodoros* ticks were collected exclusively from burrows inside homes in Ndiop and then Dielmo (Figure 4)<sup>6</sup> to evaluate the level of tick infestation. In Ndiop, sampling was conducted first of all in the homes of patients diagnosed with borreliosis in 2011 and then in other housings.<sup>24,25</sup> Ticks were collected using a portable petrol-powered aspirator as previously described.<sup>25</sup> All ticks specimens were kept in 125-mL pots with perforated caps at room temperature during collection (Elvetec, Meyzieu, France). After collection, live ticks were stored in a desiccator containing a potassium hydroxide solution at a relative humidity of 68–70%. Collected *Ornithodoros* ticks were identified according to standard morphological criteria.<sup>26</sup> After security guarantees were provided to the carrier by the World Health Organization (WHO) Collaborative Center of Marseille, all tick samples were sent to Unité de Recherche sur les Maladies Infectieuses et Tropicales Émergentes in Marseille, France, for molecular analysis. Beyond the security guarantees provided by the WHO Collaborative Center of Marseille, all specimens of ticks sampled were stored into a guarantee box established for precautionary measures of vector-borne infection transportation. The ticks sampled from four burrows in one household in Ndiop village and two other burrows from two households in Dielmo were used for blood feeding to demonstrate *Borrelia* transmission in Ndiop. It is epidemiologically important to know a like situation for a future intervention project through rural endemic foci from Senegal or west Africa.

**DNA extraction and detection of *Borrelia* infections from ticks.** Individual dead and live ticks from Ndiop and Dielmo villages were used for DNA extraction. All tick samples were

washed twice with sterile water, then preserved in sterile microcentrifuge tubes. DNA was extracted from half or a quarter of each tick sample using the EZ1 DNA Tissue kit (QIAGEN, Courtaboeuf, France) according to the manufacturer's instructions. Genomic DNA was stored at 4°C until used as a template in PCR assays. The remaining portion of the tick was kept at –80°C for future analyses. *Borrelia* DNA was detected by real-time PCR using the primers Bor16S3F, 5'-AGCCTTTAAAGCTTCGCTTGTA-3' and Bor16S3R, 5'-GCCTCCCGTAGGAGTCTGG-3', along with a probe (Bor16S3P, 5'-6FAM-CCGGCCTGAGAGGGTGAACGG-TAMRA) designed to amplify a 148-bp fragment of the 16S RNA-encoding gene.<sup>21</sup> Each real-time PCR reaction was performed with Light Cycler 2.0 equipment and software (Roche Diagnostics GmbH, Mannheim, Germany). Negative controls (sterile water and DNA from a sterile biopsy specimen) were included in each assay. All positive samples were tested with *B. crocidurae*-specific PCR using primers specific for the *glpQ* gene.<sup>27</sup>

**Case definition.** We considered borreliosis cases as those with 1) a fever (axillary temperature > 37.5°C), whether accompanied or not by other clinical signs, and 2) carrying *Borrelia* infection identified in the blood either microscopically (before 2010) or by molecular methods. Molecular identification criteria included two positive qPCR (*Borrelia* genus specific and *B. crocidurae* specific).

**Statistical analysis.** Daily monitoring of Dielmo inhabitants for the occurrence of febrile episodes from 1990 showed that borreliosis cases were detected at the beginning, while in Ndiop, indigenous cases seemed to appear in October 2010. The statistical unit used for the survey was the person-year. The incidence (expressed in person-time) was calculated each year using the number of diagnosed borreliosis cases multiplied by the number days-year (365.25) divided by the number of person-days of surveillance. Borreliosis cases diagnosed were identified before cementing, and the corresponding average incidence was calculated for each village. The average number of borreliosis cases before and during intervention was also calculated. For comparison between the average incidence observed before and during the intervention period,  $\chi^2$  test (on contingency tables) adapted to data expressed in person-time was used. The relative risk (RR) of developing TBRF was estimated in each village according to calculated person-time data, and the corresponding 95% confidence interval (CI) was determined. The preventive risk



FIGURE 4. Sampling of *Ornithodoros* ticks from rodent burrows inside homes in Ndiop village.

fraction in each village was so evaluated from the estimated RR value.

## RESULTS

**TBRF preventive control strategy implemented and accompanying measures.** In both villages, 90 households were taken into account during this intervention, including 48 in Dielmo and 42 in Ndiop. The risk factors identified before cementing consisted of 733 burrows and crevices, of which 239 and 198 burrows, totaling 437, were found inside houses of Dielmo and Ndiop, respectively, while 296 crevices were listed inside targeted dwellings of Dielmo and Ndiop, including 157 in Dielmo and 139 in Ndiop. Overall, 150 bedrooms and attics were cemented, 90 small rooms in Dielmo and 60 larger ones in Ndiop, using 9.55 tons of cement (Figure 2B). In some bedrooms and attics, burrows were opened and filled, and 81 pouches of granulated rat poison were inserted into the nests of all deep burrows. Small rodents and insectivores inside houses were captured using 1,877 tubes of 135 g of nontoxic liquid glue representing 253,395 g of glue distributed to inhabitants. Hygiene training courses for women carried out in the two villages were accepted timidly.

**Measure of effectiveness of implemented strategy and cost assessment.** In Dielmo, during 2,399,045 person-days of surveillance, 693 *Borrelia* infections were detected from 1990

to 2012, whereas in Ndiop there were 366,158 person-days of surveillance with 38 cases of *Borrelia* infection diagnosed from 2009 to 2012. During the intervention period, we noted that in Dielmo, 360,511 person-days of surveillance comprise 118,040 person-days in 2013, 140,179 in 2014, and 102,292 in 2015, whereas in Ndiop 366,140 person-days of surveillance included 112,514 person-days in 2013, 140,399 in 2014, and 113,227 in 2015.

On average, 31 cases of TBRF were recorded annually in Dielmo between June 1990 and 2012, and the average incidence of infection was 10.55 cases per 100 person-years and up to nine separate episodes of borreliosis in the same person were observed during the study period. In Ndiop, however, where the first autochthonous cases were reported in October 2010,<sup>19</sup> 10 cases were recorded (2010–2012) with an average incidence of 3.79 cases per 100 person-years (Table 1). During the period of intervention—from March 2013 to September 2015—26 cases of TBRF were detected in Dielmo and 14 in Ndiop, with respective average incidences of 2.63 cases per 100 person-years in Dielmo and 1.39 cases per 100 person-years in Ndiop (Table 1). Average risk factor density was high in TBRF-endemic households from both villages (Figure 5A and B). A respective incidence of 3.64 cases per 100 person-years and 3.04 cases per 100 person-years was recorded in the villages of Dielmo and Ndiop in 2013, respectively, whereas in 2014 and 2015, this

TABLE 1

Positive cases of tick-borne relapsing fever in Dielmo and Ndiop occurred before and during the preventive control strategy of borreliosis

| Annual monitoring                                                   | Diagnostic method          | No. of borreliosis cases/village |          | Incidence/100 person-year |       |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------|---------------------------|-------|
|                                                                     | TBS and/or PCR             | Dielmo                           | Ndiop    | Dielmo                    | Ndiop |
| 1990 (June in Dielmo)                                               | TBS                        | 5                                |          | 3.57                      |       |
| 1991                                                                | TBS                        | 8                                |          | 3.63                      |       |
| 1992                                                                | TBS                        | 9                                |          | 4.03                      |       |
| 1993 (July in Ndiop)                                                | TBS                        | 9                                | 0        | 3.69                      | 0     |
| 1994                                                                | TBS                        | 9                                | 0        | 3.7                       | 0     |
| 1995                                                                | TBS                        | 11                               | 0        | 4.53                      | 0     |
| 1996                                                                | TBS                        | 44                               | 0        | 16.06                     | 0     |
| 1997                                                                | TBS                        | 65                               | 0        | 24.92                     | 0     |
| 1998                                                                | TBS                        | 56                               | 0        | 20.35                     | 0     |
| 1999                                                                | TBS                        | 52                               | 0        | 19.24                     | 0     |
| 2000                                                                | TBS                        | 55                               | 0        | 19.15                     | 0     |
| 2001                                                                | TBS                        | 37                               | 0        | 13.14                     | 0     |
| 2002                                                                | TBS                        | 25                               | 0        | 8.93                      | 0     |
| 2003                                                                | TBS                        | 10                               | 0        | 3.56                      | 0     |
| 2004                                                                | TBS                        | 21                               | 0        | 6.96                      | 0     |
| 2005                                                                | TBS                        | 28                               | 0        | 10.22                     | 0     |
| 2006                                                                | TBS                        | 53                               | 0        | 18.73                     | 0     |
| 2007                                                                | TBS                        | 39                               | 0        | 12.06                     | 0     |
| 2008                                                                | TBS/PCR QIAGEN (December)* | 17                               | 0        | 4.77                      | 0     |
| 2009                                                                | TBS/PCR QIAGEN             | 35                               | 0        | 8.58                      | 0     |
| 2010                                                                | TBS/PCR POC (November)†    | 36                               | 5        | 9.78                      | 6.04  |
| 2011                                                                | PCR                        | 35                               | 19       | 9.57                      | 5.95  |
| 2012                                                                | PCR                        | 34                               | 14       | 9.08                      | 4.08  |
| Total cases of any method                                           |                            | 693                              | 38       | 10.55                     | 3.79  |
| Average annual                                                      |                            | 31 (30.8)                        | 10 (9.5) | 10.55                     | 3.79  |
| January and February 2013 (before intervention)                     |                            | 4                                | 3        |                           |       |
| Intervention period March 2013 (10 months)                          |                            | 10                               | 8        | 2.58                      | 2.16  |
| 2013 (for all cases detected)                                       |                            | 14                               | 11       | 3.64                      | 3.04  |
| 2014 (intervention, monitoring, and tracking of risk factors)       |                            | 12                               | 3        | 3.13                      | 0.78  |
| January to September 2015 (9 months)                                |                            | 4                                | 3        | 1.07                      | 0.72  |
| Cases during the intervention period (March 2013 to September 2015) |                            | 26                               | 14       | 2.63                      | 1.39  |
| Average cases in course of intervention‡                            |                            | 10 (10.07)                       | 5 (5.42) | 2.63                      | 1.39  |

PCR = polymerase chain reaction, POC = point-of-care, TBS = thick blood smear.

\*DNA extraction from patients with fever using QIAGEN columns.

†PCR in Dielmo POC laboratory.

‡Cases occurred in the intervention period of 2 years 7 months.



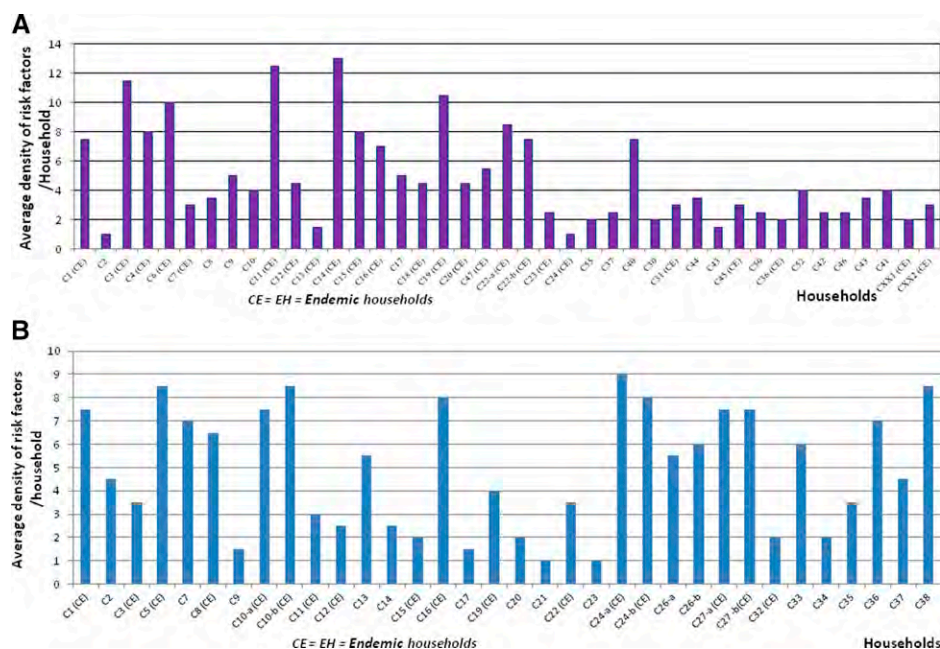


FIGURE 5. (A) Average density of risk factors (rodent burrows and crevices) in Dielmo; (B) average density of risk factors (rodent burrows and crevices) in Ndiop.

incidence decreased from 3.13 to 1.07 cases per 100 person-years in Dielmo and from 0.78 to 0.72 cases per 100 person-years in Ndiop (Table 1, Figure 6). The progression of tick-borne borreliosis in Dielmo was marked by six distinct periods, of which the first three have been previously described<sup>16</sup>: 1) from 1990 to 1995, TBRF incidence was relatively low and stable; 2) from 1996 to 2002, there was a rise in TBRF, with a fast increase in incidence in 1997 and decreasing from 1998 to 2002; 3) in 2003, the incidence was at the low level of 1990; 4) from 2004 to 2007, there was a new increase of the disease, with a high incidence in 2006 that was however lower than in 1997, decreasing slowly from 2007 to 2008 at a level higher than the standard of 1990; then, 5) from 2009 to 2012, the incidence rate rose to reach a high stationary level; and 6) finally dropping significantly

due to the intervention of the preventive strategy from 2013 to 2015.

The RR of developing borreliosis in Dielmo, despite the implementation of the strategy, was  $RRDL = 0.1014 = 10.14\%$  with a 95% CI of 0.17–0.37. The proportion of cases that would have occurred if the preventive control strategy had not been implemented, or the preventive fraction of risk, was  $1 - RRDL = 1 - 0.1014 = 0.8986 = 89.8\%$ , and the number of cases that were avoided due to the implementation of the strategy was  $31 \times 0.8986 = 28$  cases. There is a significant difference between the average incidence of borreliosis before and during the cementing work ( $\chi^2 = 56.51$ ;  $P < 0.001$ ). By contrast, in Ndiop, RR was  $RRNDP = 0.1847 = 18.47\%$  with 95% CI of 0.12–0.68. The preventive fraction of risk was  $1 - RRNDP = 1 - 0.1847 = 0.8153 = 81.5\%$ , and the number of

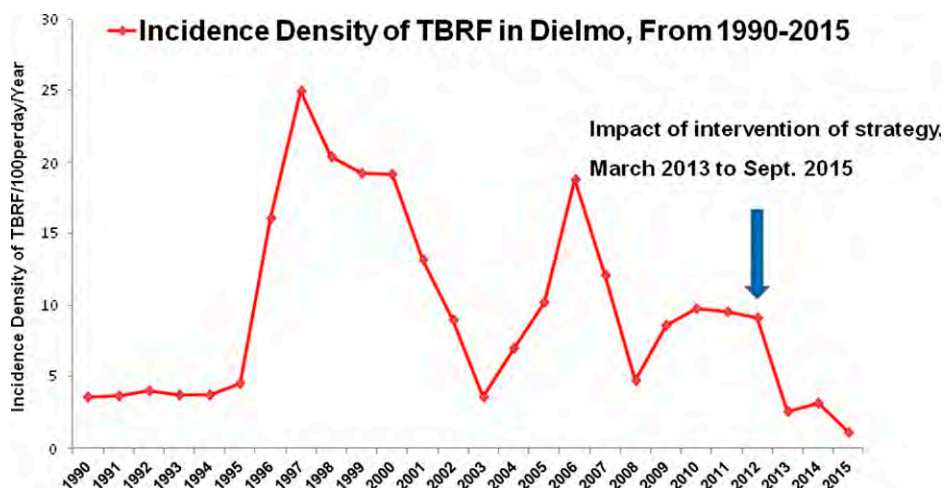


FIGURE 6. Evolution of incidence density of borreliosis in Dielmo from 1990 to 2012, and impact of preventive control of borreliosis from March 2013 to September 2015.

cases avoided due to the implementation of the strategy was  $10 \times 0.8153 = 8$  cases. A significant difference was observed between average incidence of borreliosis before and after the intervention ( $\chi^2 = 11.07$ ;  $P < 0.001$ ). The total cost of the intervention leading to a successful preventive control strategy of tick-borne borreliosis was estimated at €19,050, including €9,472 in Dielmo and €9,577 in Ndiop. The cost per avoided infection was estimated at €526.

**Sampling of *Ornithodoros* ticks in burrows from Ndiop and Dielmo.** Overall, in January 2012, 10 and seven households were visited in Ndiop and Dielmo, respectively. A total of 60 burrows were investigated in homes from Ndiop and Dielmo (Table 2). Of the 60 burrows sampled (Table 2), 9/30 (30%) were infested with *Ornithodoros* ticks in Ndiop and 10/30 (33.3%) in Dielmo. All *Ornithodoros* ticks collected from both villages were identified as *O. sonrai* tick vector. In total, 180 *Ornithodoros* ticks were collected, 118 were used for molecular identification of *Borrelia* infection: 24 ticks collected from Ndiop and 94 from Dielmo, whereas the remaining 62 ticks were used for *Borrelia* isolation in a mouse model (data not shown). In Ndiop, the infested burrows were located in one household in the village (13°41' 09"N and 16°23' 04.02"W) and one other household southwest of the village (13°41' 06.06"N and 16°23' 09.03"W). However, among the 51 neighboring villages investigated, 33 were positive for the presence of *O. sonrai* ticks. All positive villages comprised between 13°46'N and 13°37'N have infested burrows with *Ornithodoros* ticks inside houses or around human dwellings with mostly of soil indoors without cementing and/or cement deteriorated where populations may be frequently exposed to tick vectors bites (G. Diatta, unpublished data).

**Detection of *Borrelia* infection by qPCR in Ndiop and Dielmo.** Of the 118 *Ornithodoros* ticks tested (57 dead and 61 alive) by qPCR, 15/118 (13%) were infected with *Borrelia*, including 8/24 (33.3%) ticks from Ndiop and 7/94 (7.4%) from Dielmo (Table 2). All *Borrelia* spp. infections identified by genus-specific 16S rDNA-based qPCR from tick samples tested positive by *B. crocidurae*-specific qPCR for the *glpQ* gene. Amplification and sequencing of the intergenic spacer gene 16S-23S from the *Borrelia*-positive specimens was performed on 13 *B. crocidurae*-positive samples 13/118 (11%), including 7/24 (29.1%) ticks from Ndiop and 6/94 (6.3%) from Dielmo (Table 2).

## DISCUSSION AND CONCLUSION

The present study shows that improving intra-domiciliary habitat conditions in Dielmo and Ndiop by cementing, coupled with accompanying measures including the capture of small mammals and sanitary hygiene, was associated with a significant reduction of the incidence of tick-borne borreliosis, dropping from 10.55 cases per 100 person-years to 2.63 cases per 100 person-years ( $P < 0.001$ ) in Dielmo and from 3.79 cases per 100 person-years to 1.39 cases per 100 person-years ( $P < 0.001$ ) in Ndiop. The observed decline in incidence of borreliosis resulted after the implementation of the intervention strategy and the accompanying measures, but we did not notice a decrease in the incidence without intervention. We speculate that this is coincidental. Some antimalarials were used to protect the populations of Dielmo and Ndiop, and sometimes only antibiotics such as doxycycline/erythromycin were given when borreliosis or rickettsioses cases and/or other pathogenic bacteria were detected. Before or during the period of the intervention strategy, there is no unrelated project that acted and used within both populations a massive distribution of antimicrobials. The rodent capture approach reduced massively the presence of rodents and their role in dispersing the tick vector *O. sonrai* inside homes, and the frequency of rodent burrows. This measure of the intervention strategy has highly contributed to the significant reduction of TBRF incidence in both villages. We think that this strategy, tested here for the first time, contributed to avoid the occurrence of 28 cases of borreliosis in Dielmo and eight cases in Ndiop. The RR of developing TBRF in Dielmo (RRDL =  $0.1014 = 10.14\%$ ) and in Ndiop (RRNDP =  $0.1847 = 18.47\%$ ) was  $< 1$ , which indicates that the preventive method of tick-borne borreliosis control is a protective factor that has considerably reduced TBRF in Dielmo, and has played an important role in preventing the spread of this disease in Ndiop, where it appeared only in October 2010.<sup>21</sup> The incidence rate of TBRF in Dielmo of 11 per 100 person-years and 9.7 cases per 100 person-years,<sup>16,21</sup> along with 2.4 cases per 100 person-years in Ndiop,<sup>21</sup> was considered as the highest in Africa. As part of the rise and fall of malaria in the Dielmo rural community of Sine-Saloum,<sup>28</sup> TBRF seems presently to be the first frequent infectious disease in Dielmo after malaria and rickettsioses.<sup>22</sup> The proposed strategy seems to be effective and appropriate

TABLE 2  
Collection site of *Ornithodoros sonrai* ticks and infected specimens with *Borrelia* in Ndiop and Dielmo villages, Sine-Saloum, Senegal

| Collection site |                                   | No. of burrows investigated | No. of ticks tested | Tick species collected | No. of burrows infested | Molecular detection qPCR 16S RNA <i>Borrelia</i> spp. | No. of ticks kept live in livestock | Total ticks collected |
|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| Study village   | Household ID                      |                             |                     |                        |                         | No. of infected ticks                                 |                                     |                       |
| Ndiop           | No. 3                             | 1                           | 2                   | <i>O. sonrai</i>       | 1/1                     | 0/2                                                   | 0                                   | 2                     |
|                 | No. 5                             | 8                           | 22                  | <i>O. sonrai</i>       | 8/8                     | 8/22                                                  | 32                                  | 54                    |
|                 | Nos. 1, 8, 10, 11, 12, 27, 32, 37 | 21                          | —                   | 0                      | 0/21                    | —                                                     | 0                                   | 0                     |
|                 | Total                             | 30                          | 24                  | 1                      | 9/30 (30%)              | 8/24 (33.3%)                                          | 32                                  | 56                    |
| Dielmo          | No. 13                            | 3                           | 9                   | <i>O. sonrai</i>       | 2/3                     | 1/9                                                   | 0                                   | 9                     |
|                 | No. 16                            | 6                           | 8                   | <i>O. sonrai</i>       | 1/6                     | 0/8                                                   | 10                                  | 18                    |
|                 | No. 19                            | 7                           | 73                  | <i>O. sonrai</i>       | 5/7                     | 6/73                                                  | 20                                  | 93                    |
|                 | No. 20                            | 4                           | 4                   | <i>O. sonrai</i>       | 2/4                     | 0/4                                                   | 0                                   | 4                     |
|                 | Nos. 6, 11, 18                    | 10                          | —                   | 0                      | 0/10                    | —                                                     | 0                                   | 0                     |
| Total           | 7                                 | 30                          | 94                  | 1                      | 10/30 (33.3%)           | 7/94 (7.4%)                                           | 30                                  | 124                   |
| Grand total     | 17                                | 60                          | 118                 |                        | 19/60 (31.6%)           | 15/118 (13%)                                          | 62                                  | 180                   |

qPCR = quantitative polymerase chain reaction.

for the control of borreliosis in endemic areas.<sup>3,15,20</sup> In addition, our results suggest that with an evaluated cost of €526 per avoided infection over the study period, the intervention is economically affordable for low-income countries. We also estimated that the cost per avoided infection would drop to €262 in 2016 considering recent data on TBRF cases in Dielmo and Ndiop. The intervention strategy and the accompanying measures have been transferred to the community level since January 2016. This is why we believe that the best way to make sustainable our intervention strategy is to ensure that populations use the techniques provided, that is, each inhabitant must track down burrows and attics reappearing in his house while we continue to provide cement and nontoxic liquid glue to capture rodents and insectivores. By transferring the strategy to the community level in 2016, we decided to continue providing the nontoxic liquid glue every 3 months for anticipating on the duration this protection in each village, as both rural populations living in poverty would not be able to take the charge.

All human cases detected in Dielmo were initially diagnosed by thick blood smear technique from June 1990 to November 2008, thick blood smear and qPCR from December 2008 to November 2010, and then, before and during the intervention period, by qPCR alone. On average, only nine cases of borreliosis were observed from 1990 to 1994. These data were probably lower than the real number of cases that may be explained by the lack of experienced microscopists at the beginning of the project and by the lower sensitivity of microscopy for the detection of *Borrelia* compared to PCR.<sup>20</sup> The average number of cases diagnosed annually during the intervention period was 10 in Dielmo and five in Ndiop, whereas before the intervention, there were 31 cases in Dielmo and 10 in Ndiop.

The high proportion of *Ornithodoros* tick-infested burrows in the village of Dielmo (33%) may indicate that the presence of burrows harboring *O. sonrai* inside bedrooms is the main factor in disease transmission.<sup>16</sup> In Ndiop, only 20% of households investigated were infested with *O. sonrai*, compared with 57% in Dielmo, confirming the clinical data<sup>21</sup> that the distribution of these tick vectors seems more recent in Ndiop village than in Dielmo, and it should also be noted that Ndiop is at the southern distribution limit and most infested burrows came from the same household. The high infestation of burrows inside bedrooms, of which many contained *Borrelia*-infected ticks allowed us to propose the following routes of transmission depending to the previous data<sup>24,25</sup>: 1) most likely, the villagers are infected inside their homes, especially when the burrows open into the bedroom and/or inhabitants sleep on mats or mattresses on the floor; 2) transmission may also occur during household work or in surrounding fields during various outdoor activities; and 3) infection may occur during a travel through high-risk areas outside the village.

The prevalence of infection with *O. sonrai* was higher in Ndiop (33.3%) than in Dielmo (7.4%), and there is no obvious explanation for this difference, though the fact that *O. sonrai* ticks were collected in Ndiop from the same endemic household may be suspected. This prevalence of infected ticks in Ndiop (33.3%) seems close to that recently reported in Senegal (26%) by Trape and others.<sup>6</sup> In Mali, 12.5% of *O. sonrai* ticks,<sup>6</sup> and 18% of other specimens,<sup>29</sup> were recently reported to carry *B. crocidurae*, while in Tunisia, 15% of *O. erraticus* "small variety,"<sup>30</sup> and 6.5% of *O. sonrai*<sup>6</sup> were

reported to carry *B. crocidurae*. In a recent study performed in Morocco, Diatta and others<sup>31</sup> found a 10% infection rate in *O. erraticus* s.l., including *B. hispanica* in 33% of *Borrelia*-positive ticks, *B. crocidurae* in 41% of *Borrelia*-positive ticks, and *B. merionesi* in 26% of *Borrelia*-positive ticks.

The results of this study indicate that the strategy to improve intra-domiciliary habitat conditions with accompanying measures was associated with the decrease in cases of borreliosis and significant reduction of the incidence of the disease in Dielmo and Ndiop. This preventive control of borreliosis, aimed at combating tick vectors by avoiding contact with humans, deserves to be considered as an effective tool in preventing disease transmission within main foci of western African countries where traditional housing is predominant. This strategy and the accompanying measures have been transferred to the community level in 2016 to durably sustain the satisfactory results obtained. A rapid tick-borne borreliosis screening technique must be implemented to strengthen the management of febrile patients in sanitary structures. Our findings support the hypothesis that, taking action inside houses against the factors that give rise to TBRF, such as tick vectors, small rodents, and insectivore reservoirs, connected with promoting hygienic conditions, can really help to reduce the frequency and incidence of borreliosis in humans.

Received October 26, 2015. Accepted for publication June 9, 2016.

Published online July 18, 2016.

**Acknowledgments:** We would like to thank the populations of Dielmo and Ndiop villages for allowing us to conduct our investigations in their homes, along with the staff of the Dielmo Point-of-Care laboratory, especially Khadim Mbacke Leye and Sawdiattou Djiba, the nurses at the Dielmo and Ndiop dispensaries, notably Domonique Manga, Abdoulaye Badiane, and Assane Camara. We are grateful to C. Nappez for his assistance during the laboratory experiments, J. M. Berenger for the photos taken during the tick blood feedings.

**Financial support:** This work was supported by grants from La Fondation Méditerranée Infection, Marseille, and l'Unité de Recherche sur les Maladies Infectieuses et Tropicales Émergentes (URMITE), UMR 198 of Institut de Recherche pour le Développement (IRD).

**Authors' addresses:** Georges Diatta, Cheikh Sokhna, Hubert Bassène, and Gilles Chauvancy, Institut de Recherche pour le Développement, Campus International de Recherche IRD/UCAD de Hann, Dakar, Senegal, E-mails: georges.diatta@ird.fr, cheikh.sokhna@ird.fr, hubert.bassene@ird.fr, and gilles.chauvancy@ird.fr. Oleg Mediannikov, Florence Fenollar, Philippe Parola, and Didier Raoult, Institut de Recherche pour le Développement, Campus International de Recherche IRD/UCAD de Hann, Dakar, Senegal, and Unité de Recherche sur les Maladies Infectieuses et Tropicales Émergentes, UM63, CNRS7278, IRD 198, INSERM 1095, Aix Marseille Université, Marseille, France, E-mails: oleg.mediannikov@ird.fr, florence.fenollar@univ-amu.fr, philippe.parola@univ-amu.fr, and didier.raoult@gmail.com. Sylvie Boyer, Sciences Economiques et Sociales de la Santé et Traitement de l'Information Médicale, Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale, Aix Marseille Université, Marseille, France, E-mail: boyersyl@gmail.com. Abdoul Aziz Ndiaye, Département Santé Communautaire, Université Alioune Diop de Bambey, Bambey, Senegal, and Service de Santé des Armées, Camp Dial Diop, Dakar, Senegal, E-mail: ndiaziz2000@yahoo.fr. Fatoumata Diene, Institut Pasteur de Dakar, Dakar, Senegal, E-mail: fdsarr@pasteur.sn.

## REFERENCES

1. Cutler SJ, Abdissa A, Trape JF, 2009. New concepts for the old challenge of African relapsing fever borreliosis. *Clin Microbiol Infect* 15: 400–406.
2. Trape JF, Godeluck B, Diatta G, Rogier C, Legros F, Albergel J, Pepin Y, Duplantier JM, 1996. The spread of tick-borne



- borreliosis in west Africa and its relationship to sub-Saharan drought. *Am J Trop Med Hyg* 54: 289–293.
3. Trape JF, Duplantier JM, Bouganali H, Godeluck B, Legros F, Cornet JP, Camicas JL, 1991. Tick-borne borreliosis in west Africa. *Lancet* 337: 473–475.
  4. Golvan YJ, 1983. *Élément de Parasitologie Médicale*. Paris, France: Flammarion Médecine-Sciences, 360–372.
  5. Walton GA, 1962. The *Ornithodoros moubata* superspecies problem in relation to human relapsing fever epidemiology. *Aspects of Disease Transmission by Ticks (Royal Zoological Society of London Symposium Series)*. London, United Kingdom: Royal Zoological Society, 83–153.
  6. Trape JF, Diatta G, Arnathau C, Bitam I, Sarih M, Belghyti D, Bouattour A, Elguero E, Vial L, Mané Y, Baldé C, Pugnolle F, Chauvancy G, Mahé G, Granjon L, Duplantier JM, Durand P, Renaud F, 2013. The epidemiology and geographic distribution of relapsing fever borreliosis in west and north Africa, with a review of the *Ornithodoros erraticus* complex (Acari: Ixodida). *PLoS One* 8: e78473.
  7. Assous MV, Wilamowski A, Bercovier H, Marva E, 2006. Molecular characterization of tickborne relapsing fever *Borrelia*, Israel. *Emerg Infect Dis* 12: 1740–1743.
  8. Wyplosz B, Mihaila-Amrouche L, Baixench MT, Bigel ML, Berardi-Grassias L, Fontaine C, Hornstein M, Izri A, Baranton G, Postic D, 2005. Imported tick-borne relapsing fever, France. *Emerg Infect Dis* 11: 1801–1803.
  9. McConnell J, 2003. Tick-borne relapsing fever under-reported. *Lancet Infect Dis* 3: 604.
  10. Barclay AJ, Coulter JB, 1990. Tick-borne relapsing fever in central Tanzania. *Trans R Soc Trop Med Hyg* 84: 852–856.
  11. Boiron H, 1949. Considérations sur la fièvre récurrente à tiques au Sénégal. L'importance du rat comme réservoir de virus. *Bull Soc Pathol Exot* 42: 62–70.
  12. Lecompte Y, Trape JF, 2003. La fièvre récurrente à tiques d'Afrique de l'Ouest. *Ann Biol Clin (Paris)* 61: 541–548.
  13. Léger A, 1917. Spirochète de la musaraigne (*Crocidura stampflii* Jentink). *Bull Soc Pathol Exot* 10: 280–281.
  14. Bergeret C, Raoult A, 1934. Notes sur les formes nerveuses de la fièvre récurrente. Fièvre récurrente à tiques en Afrique occidentale française. *Bul Med Afrique Occidentale Française* 27: 593–598.
  15. Trape JF, Godeluck B, Diatta G, Rogier C, Legros F, Albergel J, Pepin Y, Duplantier JM, 1996. Tick-borne borreliosis in west Africa: recent epidemiological studies. *Ann Acad Med Bialostociensis* 41: 136–141.
  16. Vial L, Diatta G, Tall A, Ba EH, Bouganali H, Durand P, Sokhna C, Rogier C, Renaud F, Trape JF, 2006. Incidence of tick-borne relapsing fever in west Africa: longitudinal study. *Lancet* 368: 37–43.
  17. Kishi M, 2002. *Acutely Toxic Pesticides*. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
  18. Reynaud R, Massat R, Picca M, Revil M, 1965. A propos de douze cas de fièvres récurrentes à tiques. *Bull Soc Med Afr Noire Lang Fr* 10: 1–4.
  19. Aubry P, Renambot J, Teyssier J, Buisson Y, Granic G, Brunetti G, Dano P, Bauer PH, 1983. Les borrélioses à tiques au Sénégal: à propos de 23 observations. *Dakar Méd* 28: 413–420.
  20. Parola P, Diatta G, Socolovschi C, Mediannikov O, Tall A, Bassène H, Trape JF, Raoult D, 2011. Tick-borne relapsing fever borreliosis, rural Senegal. *Emerg Infect Dis* 17: 883–885.
  21. Mediannikov O, Socolovschi C, Bassène H, Diatta G, Ratmanov P, Fenollar F, Sokhna C, Raoult D, 2014. High incidence of *Borrelia crocidurae* in acute febrile patients in Senegal. *Emerg Infect Dis* 20: 1335–1338.
  22. Trape JF, Rogier C, Konate L, Diagne N, Bouganali H, Canque B, Legros F, Badji A, Ndiaye G, Ndiaye P, Brahimi K, Faye O, Druilhe P, Da Sylva LP, 1994. The Dielmo project: a longitudinal study of natural malaria infection and the mechanisms of protective immunity in a community living in a holoendemic area of Senegal. *Am J Trop Med Hyg* 51: 123–137.
  23. Sokhna C, Mediannikov O, Fenollar F, Bassene H, Diatta G, Tall A, Trape JF, Drancourt M, Raoult D, 2013. Point-of-care laboratory of pathogen diagnosis in rural Senegal. *PLoS Negl Trop Dis* 7: e1999.
  24. Mathis C, Durieux C, Advier M, 1934. Transmission naturelle et expérimentale à l'homme du spirochète infectant dans la nature, à Dakar, la tique: *Ornithodoros erraticus* var. *maroccanus*. *Ann Inst Pasteur (Paris)* 52: 166–178.
  25. Diatta G, Duplantier JM, Granjon L, Ba K, Chauvancy G, Ndiaye M, Trape JF, 2015. *Borrelia* infection in small mammals in west Africa and its relationship with tick occurrence inside burrows. *Acta Tropica* 152: 131–140.
  26. Sautet J, Witkowski M, 1944. A propos d'un ornithodore trouvé à Gao. *Bull Soc Pathol Exot* 37: 182–188.
  27. Elbir H, Raoult D, Drancourt M, 2013. Relapsing fever *Borrelia* in Africa. *Am J Trop Med Hyg* 89: 288–292.
  28. Trape JF, Tall A, Sokhna C, Ly AB, Diagne N, Ndiath O, Mazenot C, Richard V, Badiane A, Dieye-Ba F, Faye J, Ndiaye G, Diene Sarr F, Roucher C, Bouganali C, Bassene H, Toure-Balde A, Roussillon C, Perraut R, Spiegel A, Sarthou JL, Da Silva LP, Mercereau-Puijalon O, Druilhe P, Rogier C, 2014. The rise and fall of malaria in a west African rural community, Dielmo, Senegal, from 1990 to 2012: a 22 year longitudinal study. *Lancet Infect Dis* 14: 476–488.
  29. Schwan TG, Anderson JM, Lopez JE, Fischer RJ, Raffel SJ, McCoy BN, Safronetz D, Sogoba N, Maïga O, Traoré SF, 2012. Endemic foci of the tick-borne relapsing fever spirochete *Borrelia crocidurae* in Mali, west Africa and the potential for human infection. *PLoS Negl Trop Dis* 6: e1924.
  30. Bouattour A, Garnier M, M'Ghirbi Y, Sarih M, Gern L, Ferquel E, Postic D, Cornet M, 2010. *Borrelia crocidurae* infection of *Ornithodoros erraticus* (Lucas, 1849) ticks in Tunisia. *Vector Borne Zoonotic Dis* 10: 825–830.
  31. Diatta G, Souidi Y, Granjon L, Arnathau C, Durand P, Chauvancy G, Mané Y, Sarih M, Belghyti D, Renaud F, Trape JF, 2012. Epidemiology of tick-borne borreliosis in Morocco. *PLoS Negl Trop Dis* 6: e1810.

**Summary:** Many investigations on geographical distribution of tick-borne relapsing fever (TBRF) borreliosis, added to those of 2003-2005, were performed and intensified in West and North Africa from 2006 to 2014 to better understand the epidemiology of this zoonotic disease. They represent the first longitudinal study to wide scale ever conducted on this disease, which involved six french teams and teams from eleven countries in West Africa (Senegal, Gambia, Mauritania, Mali, Guinea Bissau, Burkina Faso, Niger, Togo, Guinea Conakry, Liberia, Ivory Coast) and three Maghreb countries (Morocco, Algeria, Tunisia) and one in Europe (Spain). A total of 7346 rodent burrows has been explored in 421 stations of 245 studied sites of these fifteen countries for the presence of *Ornithodoros* ticks and highlight *Borrelia* infections. Captures of small mammals were conducted in 96 locations in 7 countries from West and Central Africa, and one of Maghreb countries (Morocco), and 4484 rodents and insectivores were collected, belonging to 57 species and 7 families. Climate and environmental parameters were tested to try to explain limits of *Ornithodoros* ticks distribution. Molecular biology methods have been applied to the study of genetic characterization of *Ornithodoros* ticks and *Borrelia*. A clinical study and daily medical and epidemiological monitoring of TBRF cases were carried out respectively in Kenitra (Morocco), then in Dielmo and Ndiop (Senegal) where a preventive control strategy of the disease has been established. The massive presence of *Ornithodoros* ticks was demonstrated in 14.3% (1060/7406) of studied burrows (Senegal, Gambia, Mauritania, Mali, Morocco, Algeria, Tunisia and Spain). Territorial continuity of *O. sonrai* ticks distribution between West Africa and Morocco, and *Ornithodoros* ticks between Morocco and Tunisia has been demonstrated. In West Africa, *O. sonrai* ticks are widely distributed in northern isohyet 750 mm throughout western half, and the hypothesis of general extension of borreliosis in Sudan region under the fact of the persistence of drought since 1970 has been supported by our results. Southern and eastern limits of *O. sonrai* ticks and *B. crocidurae* infection in tick vectors and small mammals reservoirs were latitude 13°N and longitude 01°E. In eastern half of West Africa (Burkina Faso, Niger, Togo), *O. sonrai* ticks are rare or absent. However, there appears in the Niger basin a transition area where *O. sonrai* ticks remain north of isohyet 750 mm close to the flood plain of the Niger River and its main tributaries. *O. sonrai* tick distribution in Senegal, Gambia, Mauritania and western Mali is, on the contrary, independent of the water system. Analysis of soil parameters showed that sandy soils associated with the large clay silt are particularly favorable to the installation of *Ornithodoros* ticks in nature. Presently, it is more plausible, given climate and environmental parameters tested to explain limits of *O. sonrai* ticks distribution, that greater humidity of dry season and more frequent rains season observed in Senegal, Gambia, Mauritania and western Mali, combined with favorable edaphic parameters, are the only factors identified that may explain the differences in *O. sonrai* ticks distribution in northern isohyet 750 mm in West and Central Africa. The dry season moisture associated with the presence of favorable soil parameters in the central Niger delta could explain localized maintenance of *O. sonrai* ticks in the central part of West Africa north 750 mm isohyet. Molecular analysis revealed the existence of 9 different species of *Ornithodoros* ticks, including 5 species are new for science. Six vector species were infected with *Borrelia*, including three by *B. hispanica*, two by *B. merionesi* and one by *B. crocidurae*. The three species of *Borrelia* are distributed in one or more regions of North Africa. Only *B. crocidurae* is present in West Africa. The *O. erraticus* tick s.s has a restricted distribution to coastal regions of north-eastern Algeria and northwest of Tunisia, and its vector role of *B. hispanica* was not confirmed and seems uncertain. *O. maroccanus*, *O. occidentalis* and *O. kairouanensis* are vectors of *B. hispanica*, while *O. merionesi* and *O. costalis* transmit *B. merionesi* and *O. sonrai* is the only vector *B. crocidurae*. Of 4239 animal tested for *Borrelia* infection, 299 specimens (7.05%) belonging to 19 species were found naturally infected where *Ornithodoros* ticks were present. No animals were infected in areas where these ticks were absent. Clinical study in Kenitra (Morocco) showed that an average of 17 persons developed borreliosis each year during the study period, and the prevalence of *Borrelia* infections could range from 0.11 to 20 % with a diagnostic method more sensitive like PCR. In Dielmo and Ndiop of Sine-Saloum (Senegal), respective annual average incidence of TBRF was considerably higher (10.5% and 4%). The preventive control strategy of borreliosis coupled with accompanying measures were associated with a significant reduction of TBRF incidence, dropping from 10.55 to 2.63 cases per 100 person-years in Dielmo ( $p < 0.001$ ), than from 3.79 to 1.39 cases per 100 person-years in Ndiop ( $p < 0.001$ ), representing a reduction of 89.8% and 81.5% respectively. Thanks to the provided strategy, 36 cases of borreliosis infection were avoided (28 cases in Dielmo and 8 other cases in Ndiop) with an economic cost of 345,033 F CFA (526 euros) per avoided infection.

---

### **Tick-borne relapsing fever borreliosis epidemiology in West and North Africa**

---

Discipline: Life Sciences and Healthcare

---

**Key-words:** Epidemiology - Tick-borne borreliosis - *Ornithodoros* ticks - *B. crocidurae* - *B. hispanica* - *B. merionesi* - Prevention - West and North Africa - Geographical distribution

---



**Résumé :** De nombreuses enquêtes sur la répartition géographique de la borréliose à tiques, ajoutées à celles de 2003-2005, ont été poursuivies et approfondies en Afrique de l'Ouest et du Nord de 2006 à 2014 pour mieux comprendre l'épidémiologie de cette maladie zoonotique. Elles représentent la première étude longitudinale à vaste échelle jamais réalisée sur cette maladie qui a associé six équipes françaises et des équipes de onze pays d'Afrique de l'Ouest (Sénégal, Gambie, Mauritanie, Mali, Guinée Bissao, Burkina Faso, Niger, Togo, Guinée Conakry, Libéria, Côte d'Ivoire) et trois pays du Maghreb (Maroc, Algérie, Tunisie) et un de l'Europe (Espagne). Un total de 7346 terriers de rongeurs a été exploré dans 421 stations de 245 sites d'études de ces quinze pays pour rechercher la présence de tiques *Ornithodoros* et mettre en évidence des infections à *Borrelia*. Des captures de petits mammifères ont été effectuées dans 96 localités de 7 pays d'Afrique de l'Ouest et du Centre, puis 1 pays du Maghreb (Maroc) et ont permis de collecter 4484 rongeurs et insectivores appartenant à 57 espèces et 7 familles. Des paramètres climatiques et environnementaux ont été testés pour tenter d'expliquer les limites de la répartition des tiques *Ornithodoros*. Des méthodes de biologie moléculaire ont été appliquées à l'étude de caractérisation génétique des tiques *Ornithodoros* et des *Borrelia*. Une étude clinique et un suivi médical quotidien et épidémiologique des cas de borréliose ont été effectués respectivement à Kénitra (Maroc), puis à Dielmo et Ndiop (Sénégal) où une stratégie de lutte préventive de la maladie a été mise en place. La présence massive des tiques *Ornithodoros* a été mise en évidence dans 14,3% (1060/7406) des terriers étudiés (Sénégal, Gambie, Mauritanie, Mali, Maroc, Algérie, Tunisie, Espagne). Une continuité territoriale de la répartition des tiques *O. sonrai* entre l'Afrique de l'Ouest et le Maroc, et du genre *Ornithodoros* entre le Maroc et la Tunisie a ainsi été démontrée. En Afrique occidentale, les tiques *O. sonrai* sont massivement distribuées au nord de l'isohyète 750 mm dans toute la moitié ouest, et l'hypothèse d'une extension généralisée de la borréliose en zone soudanienne sous l'effet de la persistance de la sécheresse depuis 1970 a été confortée par nos résultats. Les limites méridionale et orientale des tiques *O. sonrai* et des infections à *B. crocidurae* chez les tiques vectrices et petits mammifères réservoirs étaient la latitude 13°N et la longitude 01°E. Dans la moitié est de l'Afrique de l'Ouest (Burkina Faso, Niger, Togo), les tiques *O. sonrai* sont rares ou absentes. Mais, il semble exister au niveau du bassin du Niger une zone de transition où les tiques *O. sonrai* se maintiennent au nord de l'isohyète 750 mm à proximité du lit majeur du fleuve Niger et ses principaux affluents. La distribution des tiques *O. sonrai* au Sénégal, en Gambie, Mauritanie et dans l'ouest du Mali est au contraire indépendante du réseau hydrographique. L'analyse des paramètres pédologiques a montré que les sols à sable fin associé à de l'argileux à limon gros sont particulièrement plus favorables à l'installation des tiques *Ornithodoros* dans la nature. Actuellement, il est plus plausible, au regard des paramètres climatiques et environnementaux testés pour tenter d'expliquer la limite est de répartition des tiques *O. sonrai*, que la plus grande hygrométrie de saison sèche et la plus grande fréquence des pluies de contre saison qui sont observées au Sénégal, en Gambie, Mauritanie et dans l'ouest du Mali, conjuguées à des paramètres édaphiques favorables, soient les seuls facteurs identifiés susceptibles d'expliquer les différences de répartition des tiques *O. sonrai* au nord de l'isohyète 750 mm en Afrique occidentale et centrale. L'humidité de saison sèche associée à la présence de paramètres pédologiques favorables dans le delta central du Niger pourrait expliquer le maintien localisé des tiques *O. sonrai* dans la partie centrale de l'Afrique de l'Ouest au nord de l'isohyète 750 mm. Les analyses moléculaires ont révélé l'existence de 9 espèces différentes de tiques *Ornithodoros*, dont 5 espèces sont nouvelles pour la science. Six espèces vectrices étaient infectées par des *Borrelia*, dont trois par *B. hispanica*, deux par *B. merionesi* et une par *B. crocidurae*. Les trois espèces de *Borrelia* sont distribuées dans une ou plusieurs régions d'Afrique du Nord. Seule *B. crocidurae* est présente en Afrique occidentale. La tique *O. erraticus* stricto sensu présente une distribution restreinte aux régions côtières du nord-est de l'Algérie et nord-ouest de la Tunisie, et son rôle vecteur de *B. hispanica* n'a pas été confirmé et semble incertain. *O. maroccanus*, *O. occidentalis* et *O. kairouanensis* sont les vecteurs de *B. hispanica*, tandis que *O. merionesi* et *O. costalis* transmettent *B. merionesi* et *O. sonrai* est le seul vecteur de *B. crocidurae*. Sur 4239 animaux testés pour rechercher une infection à *Borrelia*, 299 spécimens (7,05%) appartenant à 19 espèces ont été trouvés infectés naturellement où des tiques *Ornithodoros* étaient présentes. Aucun animal n'a été infecté dans les régions où ces tiques étaient absentes. L'étude clinique réalisée à Kénitra (Maroc) a montré qu'en moyenne 17 personnes ont développé chaque année une borréliose au cours de la période d'étude, et la prévalence de l'infection à *Borrelia* aurait pu varier de 0,11-20% avec une méthode diagnostique plus sensible comme la PCR. A Dielmo et Ndiop, au Sine-Saloum (Sénégal), l'incidence annuelle moyenne respective de la borréliose était considérablement élevée (10,5% et 4%). La stratégie de lutte préventive de la borréliose couplée à des mesures d'accompagnement a significativement réduit l'incidence de la maladie, passant de 10,55 à 2,63 cas pour 100 personnes-années à Dielmo ( $p < 0,001$ ), puis de 3,79 à 1,39 cas pour 100 personnes-années à Ndiop ( $p < 0,001$ ), soit une réduction de 89,8% et 81,5% respectivement. Grâce à la stratégie mise en place, 36 cas d'infection de borréliose ont été évités (28 cas à Dielmo et 8 cas à Ndiop) pour un coût économique de 345033 F CFA (526 euros) par infection évitée.

---

#### Épidémiologie de la borréliose à tiques en Afrique de l'Ouest et du Nord

---

**Discipline :** Sciences de la Vie et de la Santé

**Mots clés :** Épidémiologie - Borréliose à tiques - Tiques *Ornithodoros* - *B. crocidurae* - *B. hispanica* - *B. merionesi* - Prévention - Afrique de l'Ouest et du Nord - Répartition géographique

---