



HAL
open science

Spatialisation du risque de transmission de Fièvre de la Vallée du Rift en milieu agropastoral sahélien du Sénégal septentrional

Raphaëlle Pin-Diop

► **To cite this version:**

Raphaëlle Pin-Diop. Spatialisation du risque de transmission de Fièvre de la Vallée du Rift en milieu agropastoral sahélien du Sénégal septentrional. Sciences du Vivant [q-bio]. Université d'Orléans, 2006. Français. NNT: . tel-00090785

HAL Id: tel-00090785

<https://theses.hal.science/tel-00090785>

Submitted on 3 Sep 2006

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

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



Thèse présentée à l'Université d'Orléans
pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université d'Orléans

Discipline : Géographie : espace, développement et santé

par Raphaëlle PIN-DIOP

Spatialisation du risque de transmission de la Fièvre de la Vallée du Rift en milieu agropastoral sahélien du Sénégal septentrional

Soutenue publiquement le 24 mai 2006

Membres du jury

| | | |
|---------------------------------|---|--------------------|
| M. Jean-Marie Fotsing | Professeur, Université d'Orléans | Directeur de thèse |
| M. Emmanuel Camus | Directeur de recherches, CIRAD Montpellier | Rapporteur |
| Mme Barbara Dufour | Maître de conférences-HDR, ENV Maisons-Alfort | Rapporteur |
| M. Stephane de La Rocque | Chargé de mission, FAO Rome | Examineur |
| M. Didier Fontenille | Directeur de recherches, IRD Montpellier | Examineur |
| Mme Yveline Poncet | Directeur de recherches, IRD Orléans | Examineur |
| M. Frédéric Huynh | Ingénieur de recherches, IRD Montpellier | Membre invité |

La cantate des vaches (extrait)¹

J'appelle : elles répondent. Les voici...
Elles foncent sur moi, elles chargent,
elles arrivent comme un fleuve en crue,
comme les rivières avides de mêler leurs eaux ;
le Konkouré, le fleuve Noir et le Dioloba ont conflué,
leurs flots coulent : mes vaches m'inondent, me submergent,
je suis noyé dans mon troupeau...

La corde me manque pour lier mes veaux.
Mes vaches arrivent :
elles entrent, piétinement ; elles sortent, bousculade ;
elles paissent et broutent ; elles soufflent à l'ombre ;
elles se relèvent et s'étirent, s'ébrouent ;
elles vont boire l'eau calme : ô paix !
Elles passent le jour dans les montagnes,
elles descendent dans les vallées,
et elles rentrent, ô les bienvenues...

Elles s'accouplent :
les voilà qui sont pleines, qui s'arrondissent.
Elles vèlent et mugissent de tendresse,
le lait suinte de leurs mamelles trop pleines,
goutte à goutte : le lait est traité à grand bruit.

Le sol résonne sous le pas de mes vaches,
la brousse retentit, les vallées mugissent de leurs mugissements...
Mon troupeau se lève, part, ébranle la terre,
secoue les futaies, défonce les marais, détourne les ruisseaux,
éclaircit les forêts, trace les sentiers ;
le bruit de mes troupeaux fait trembler la terre, le sol vibre ;
devant eux s'enfuient les babouins et les antilopes,
la poussière monte, les babouins aboient,
les fauves s'écartent ; la misère s'éloigne...

J'ai des vaches.
Comme la richesse de Dieu.
Comme la falaise a des singes,
comme la montagne a des sources,
comme la lande a des antilopes,
comme la rivière a des poissons,
comme la forêt a des oiseaux,
comme la grande brousse a des éléphants,
j'ai des vaches...



¹ Cette incantation, recueillie et transcrite par Gilbert Vieillard (1939), est récitée par les peuls du Fouta-Djallon en Guinée, lorsqu'ils distribuent le sel à leurs bovins (Toure et Arpaillange, 1986).
Cliché : Aubert 1998 (<http://www.1d-photo.org>)



Peuls du Fouta
(Clichés : Rioufol 2004 ; <http://www.1d-photo.org>)

Avant-propos

L'étude des pathologies infectieuses tropicales est souvent menée de front par des équipes de chercheurs du nord et du sud, agissant en coopération, le plus souvent directement sur le terrain. C'est de l'un de ces projets, basé à Dakar, Sénégal, qu'est née cette thèse.

Tout a commencé en 2002 par un stage de DEA, suivi d'un contrat de Volontaire Civil International à l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA). A l'époque, le projet EMERCASE, impliquant le Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), l'ISRA, l'Institut de Recherches pour le Développement (IRD), ainsi que différents partenaires locaux, vivait ses derniers jours. Son objectif était de mieux comprendre les mécanismes de transmission de la fièvre de la vallée du Rift (FVR) au Sénégal et d'aider à la mise en place d'un réseau national de surveillance. Il avait alors été relayé par deux projets complémentaires :

- l'Action Concertée Incitative (ACI) « Contraintes sanitaires liées à l'exploitation des mares temporaires dans un écosystème sahélien. Analyse et modélisation du risque de schistosomose et de Fièvre de la Vallée du Rift dans la région pastorale du Ferlo (Sénégal) »
- le projet CORUS (n°02 317 057) « Analyse et modélisation des interactions entre l'environnement, la dynamique des populations de vecteurs d'arboviroses et le contact entre hôtes et vecteurs. Exemples d'*Aedes vexans* et de *Culex poicilipes* (Culicidae) dans le système des mares temporaires du Ferlo, Sénégal ».

Les chercheurs impliqués dans ces deux projets, constituant l'équipe « Santé-Environnement » de l'ISRA, sont originaires d'institutions et de disciplines diverses. Je tiens à les nommer ici et à leur faire part de mes remerciements pour leurs conseils d'experts : Véronique Chevalier (vétérinaire et épidémiologiste), Amadou Diaite (vétérinaire et entomologiste), Oumar Talla Diaw (vétérinaire et parasitologue), Renaud Lancelot (vétérinaire et modélisateur), Stephane de La Rocque (vétérinaire et géographe), Bernard Mondet (entomologiste), Magatte Ndiaye (vétérinaire), Yaya Thiongane (virologiste) et Ibra Toure (géographe). C'est dans le cadre de l'ACI que j'ai effectué mon Volontariat Civil et ma première année de thèse. Intégrée à l'équipe en tant que vétérinaire et géographe, j'étais en charge du volet spatialisation dans le cadre des recherches sur la FVR. C'est ainsi que j'ai effectué mes premiers traitements d'images, à partir d'une image LandSat. J'ai également

participé à plusieurs reprises aux enquêtes sur le terrain et intégré les données spatialisées dans un Système d'Information Géographique (SIG), réalisant des cartes selon les besoins des membres de l'équipe.

A la fin de cette année de volontariat, je n'ai pu continuer à bénéficier de financements dans le cadre du projet. Encouragée par mon directeur, Mr Fotsing, j'ai persévéré et eu la chance de rencontrer Mr Lacoste, qui soutient régulièrement des doctorants par le mécénat. Pendant deux années, il m'a financée grâce au fonds Inckerman de la Fondation de France, me permettant de poursuivre et d'achever ce travail de recherche. Je suis restée encore à l'ISRA pendant une année, bénéficiant des opportunités logistiques du projet ACI pour partir sur le terrain ; puis je suis rentrée en France afin de me consacrer pleinement à la rédaction de la thèse. Depuis début 2005, c'est le projet EDEN (*Emerging Diseases in a changing European Environment*), financé par l'Union Européenne, qui a succédé aux projets ACI et CORUS. La zone d'étude s'est étendue à la région du fleuve Sénégal, mais l'équipe continue à travailler dans le Ferlo, me permettant d'espérer que mes résultats alimenteront les recherches futures sur la FVR en zone sahélienne du Sénégal.

Travaillant à l'interface entre plusieurs disciplines – épidémiologie et géographie bien sûr, mais également entomologie, statistiques et virologie – j'ai recours dans cette thèse à des termes spécifiques à chacune d'entre elles. Ces termes peuvent être définis soit directement en note infra-paginale, soit dans un glossaire en fin de document. Dans ce dernier cas, ils sont mentionnés dans le texte par des astérisques. Par ailleurs, pour accroître la lisibilité et la clarté du document, j'ai choisi d'insérer les figures et les tableaux au fur et à mesure, dans le corps du texte. Les sigles et acronymes utilisés sont également explicités en fin de document.

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu celui qui m'a rattrapée au moment où j'allais abandonner cette thèse, qui m'a transmis son expérience et donné les conseils nécessaires à l'achèvement de mon travail : mon directeur, Jean-Marie Fotsing.

J'adresse toute ma reconnaissance à mon mécène, Monsieur François Lacoste. Il a cru en mon projet et m'a apporté le soutien financier sans lequel je n'aurais pu continuer, sous la forme d'une bourse Inckerman de la Fondation de France, que je remercie également. Un autre grand merci à Frédéric Simard qui m'a permis de rencontrer Monsieur Lacoste !

Je tiens à remercier Renaud Lancelot, qui a initié le projet ACI et qui a remué ciel et terre pour obtenir mon contrat de volontaire civil, ainsi que tous les membres du jury, qui ont contribué à l'évaluation de ce travail : Emmanuel Camus et Barbara Dufour qui ont accepté de consacrer du temps à rapporter cette thèse ; Yveline Poncet, Stéphane de La Rocque et Didier Fontenille qui ont montré tout l'intérêt qu'ils portaient à ma problématique en faisant partie du jury. Merci au directeur de l'Unité ESPACE, Frédéric Huynh, pour ses encouragements et son accueil à la Maison de la Télédétection de Montpellier.

Je tiens à remercier chaleureusement Jacques André Ndione, Medias-France (Toulouse, France), le Centre de Suivi Ecologique (Dakar, Sénégal) et le Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan Simeon Fongang (Dakar, Sénégal) pour la mise à disposition de ma base de travail : les images LandSat et Spot de la région de Barkedji.

Merci au docteur Safietou Fall, directrice du Laboratoire Nationale d'Elevage et de Recherche Vétérinaire de l'ISRA qui m'a accueillie chaleureusement même lorsque mon statut était un peu « bancal ».

Merci à toute l'équipe Santé-Environnement de Dakar pour les réflexions en commun et leur compagnie au quotidien. C'est grâce à eux que ce travail pluridisciplinaire a pu être mené à bien.

Une mention spéciale à Diam Sow, Rémy Maboudou et Mbargou Ndiaye pour les cours de wolof et de pulaar, le super *thiebu jën* de Djenaba et les discussions animées autour d'un bon *ataaya*, dans la chaleur souvent suffocante de Barkedji.

Merci à toute l'équipe du Pôle Pastoral Zones Sèches, en particulier Ibra Toure pour m'avoir fait faire mes premiers pas en télédétection. Merci aux *waa* ISRA, Fatou, Yacine, Cissé et co, qui ont éclairé mes journées de travail par leurs sourires et leur bonne humeur. Un grand merci aux gens de Barkedji et de ses environs pour la *teranga* et le *thiacri* local, avec du lait en provenance directe de la vache...

Merci à Philippe Rohmer pour son travail acharné sur la classification orientée-objet des images Spot.

Merci aux thésards de l'Unité ESPACE pour leurs conseils éclairés (et éclairants) et la bonne ambiance qui règne au labo : Helen, Gervais, Pascal, Maureen et tous les autres.

Merci à Isa et Jocelyne pour m'avoir toujours fait des ordres de mission en bonne et due forme, bien que je ne donne que rarement mes dates avant mon arrivée !

Enfin, je remercie toutes les personnes qui me sont proches, famille et amis de France et du Sénégal, pour leur soutien et leur amitié tout au long de ces quatre interminables années de thèse. Vous avez eu la délicatesse d'éviter la fâcheuse question qui a le don d'énerver tout thésard : « Et alors... tu soutiens quand ??? ». Comme vous êtes nombreux (surtout la famille sénégalaise), je ne peux nommer tout le monde, mais je sais que vous vous reconnaitrez. Merci à tous !

Je dédie cette thèse à mes parents pour leur aide et leurs encouragements pendant ces longues années d'études. Un merci tout particulier à ma super maman qui a eu la patience de relire ma prose scientifique, m'a fait part de ses conseils toujours pertinents et a gardé son petit-fils (sans trop se faire prier) pour me permettre de me reposer. Merci aussi à mes deux sœurs pour leur gentillesse et les intermèdes « shopping entre filles ».

Enfin, une dédicace spéciale aux deux hommes de ma vie : le grand, mon mari Georges qui a su gérer mes périodes de doute et de découragement, et le petit, notre bébé Ismaël, né entre deux cartes de risque ☺, dont les éclats de rire sont la plus belle des motivations !

Sommaire

| | |
|--|------------|
| Introduction générale..... | 9 |
| Première partie. Cadrage scientifique..... | 14 |
| Chapitre 1. Considérations générales sur la Fièvre de la Vallée du Rift..... | 15 |
| Chapitre 2. Cadres conceptuel et géographique..... | 42 |
| Chapitre 3. Outils et méthodes de spatialisation du risque..... | 73 |
| Deuxième partie. Spatialisation du risque de FVR à Barkedji...101 | |
| Chapitre 4. Organisation spatiale des hôtes de la FVR..... | 102 |
| Chapitre 5. Caractérisation des mares temporaires et spatialisation de l'abondance relative des vecteurs | 141 |
| Chapitre 6. Modélisation du risque relatif de transmission de la FVR..... | 169 |
| Conclusion générale..... | 185 |

Introduction générale

En ce XXI^{ème} siècle, à l'heure où certains privilégiés s'apprêtent à faire du tourisme dans l'espace, un enfant africain meurt toutes les 30 secondes du paludisme... Les maladies vectorielles, dont les plus marquantes sont la malaria, la trypanosomose et les fièvres hémorragiques, sont très inégalement réparties sur la planète (Figure 1). La compréhension de ces maladies et la lutte contre leur transmission constituent un enjeu fort du développement des zones tropicales, car ce sont elles qui y paient le plus lourd tribut, ainsi que le note l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S) : « *Dans les régions en développement, la mortalité est essentiellement liée à la très forte incidence des maladies infectieuses, parasitaires et respiratoires. Ces maladies frappent plus sévèrement les jeunes sujets, et il est particulièrement affligeant de constater, sur le plan des disparités dans le niveau de santé atteint par les divers pays, que les enfants des pays en développement ont bien moins profité de la diminution générale de la mortalité que leurs contemporains nés dans des pays développés... Cette différence tient à une série de facteurs mal compris, et peut-être mal connus, notamment les risques sanitaires propres aux régions tropicales* » (Anonyme, 1980).

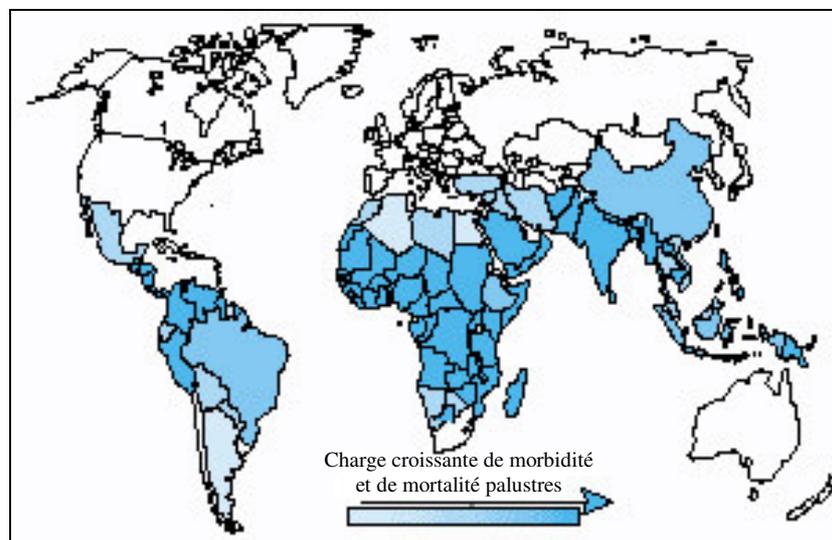


Figure 1 : Estimation de la charge mondiale de morbidité et de mortalité palustre (Source : OMS, <http://www.who.int>)

L'auteur insiste ici sur la notion de risques sanitaires propres aux régions tropicales et en effet, ce n'est que récemment que les scientifiques ont compris le lien étroit qui unit l'environnement et la santé. Comment se fait-il que certaines pathologies soient à ce point

limitées dans l'espace ? Quels sont les facteurs qui régissent leur répartition ? Comment prédire cette répartition ?... sont autant de questions auxquelles l'approche environnement-santé permet de répondre. Et c'est autour de ce lien entre médecine, épidémiologie et géographie que se tissent les nouvelles orientations de la recherche internationale. La télédétection, les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) et les géostatistiques sont sur toutes les lèvres et s'invitent à tous les grands congrès. Le recours aux outils et méthodes de la géomatique permet de spatialiser les biotopes des vecteurs ainsi que les processus qui mènent à l'apparition de la maladie, élargissant ainsi le champ de recherche et d'action des spécialistes – virologistes, parasitologistes et bactériologistes – auparavant centrés quasi-exclusivement sur les agents pathogènes.

Vétérinaire de formation, m'intéressant de près aux pathologies tropicales du bétail et me tenant au fait des avancées techniques et scientifiques, c'est tout naturellement que je me suis tournée vers la géographie, persuadée qu'elle pourrait m'apporter une autre vision des maladies que j'étudiais. Outre le potentiel strictement théorique de ces nouvelles approches, c'est également leur aspect esthétique et opérationnel qui m'a interpellée. En effet, l'insuffisance du transfert des résultats aux – soi-disant – bénéficiaires de certains projets de recherche pour le développement a toujours posé problème à l'idéaliste que je suis... La projection des phénomènes sur des cartes, images accessibles à tous et compréhensibles par tous, me semblait, et me semble toujours, une solution adéquate à cet épineux problème.

Aussi, lorsqu'on m'a proposé de gérer le volet spatialisation de la fièvre de la vallée du Rift (FVR) dans le projet ACI, j'ai tout de suite accepté de m'investir sur cette problématique d'environnement-santé, et ce d'autant plus qu'elle s'appliquait à une maladie émergente.

La notion de maladies « émergentes » rassemble d'une part les maladies réellement émergentes, qui n'avaient jamais été rapportées auparavant et d'autre part les maladies réémergentes, qui réapparaissent sous forme endémique ou épidémique dans des régions depuis longtemps indemnes. Parmi les premières, celle qui vient aussitôt à l'esprit est l'infection à VIH1 et VIH2, qui s'est étendue à l'ensemble de la planète et est devenue en une vingtaine d'années l'une des préoccupations majeures en santé publique. On peut également mentionner la maladie à virus Ebola, la fièvre hémorragique de Marburg ou encore le choléra à *Vibrio cholerae* O139. L'infection à VIH/SIDA conduit également à la réémergence de maladies anciennes opportunistes, dans des pays où on les croyait éradiquées : la pneumocystose, la syphilis, la tuberculose, etc. Par ailleurs, les catastrophes naturelles et les conflits armés s'avèrent être des terrains propices à ce phénomène de réémergence. Ainsi, la

trypanosomiase humaine africaine ou maladie du sommeil, oubliée depuis les années 70, est réapparue en Afrique centrale, faisant des ravages parmi les populations affaiblies par la guerre.

L'émergence s'effectue généralement chez l'homme en deux étapes : introduction surprise d'un nouvel agent pathogène (provenant de l'environnement, importé ou variant d'un pathogène connu), suivie d'une dissémination dans une population naïve* (cf. Glossaire), c'est-à-dire non immunologiquement préparée à ce nouvel agent.

Ces deux étapes ont toujours les mêmes causes:

- modifications de l'écosystème et rassemblements humains: travaux de déforestation ou d'irrigation ; constructions de routes, de voies ferrées ; créations de zones suburbaines mal contrôlées etc.,
- acquisition de mécanisme de résistance aux médicaments anti-infectieux (antibiotiques et antiparasitaires),
- baisse de la vigilance des systèmes de contrôle.

C'est la conjonction de tous ces facteurs qui explique l'émergence ou la réémergence des agents pathogènes et leur haute contagiosité. Trois autres éléments sont également à prendre en considération. Premièrement, les maladies émergentes sont pour la plupart des zoonoses² ou des anthroozoonoses : leur éclosion est donc la conséquence d'une intervention humaine rapprochant le réservoir animal de l'homme. Par exemple la maladie de Lyme aux Etats-Unis d'Amérique, en 1975, a été due à la pullulation et aux déplacements de daims accompagnés de leurs tiques dans les bois jouxtant les habitations. Deuxièmement, le tourisme vers les pays tropicaux et les flux migratoires s'intensifient, accroissant le risque d'importation de maladies. Par exemple, le virus du SRAS (Syndrome Respiratoire Aigu Sévère) a été largement disséminé par les touristes en provenance de pays infectés. Troisièmement, dans le contexte mondial actuel, les maladies infectieuses peuvent être utilisées à des fins terroristes, comme l'a montré la psychose due au charbon dans le courrier postal, en 2001 aux Etats-Unis (Aubry, 1996).

La fièvre de la vallée du Rit (FVR) se place dans les maladies vectorielles émergentes favorisées par la modification des écosystèmes. On suppose en effet que c'est la mise en eau du barrage d'Assouan qui a provoqué la première grande épidémie, survenue en Egypte en 1977-78 (Chevalier *et al*, 2004). Au Kenya, ce sont les modifications climatiques qui régissent l'apparition des épizooties*. Cette fièvre hémorragique, bien que considérée par

² Maladie ou infection transmissible naturellement des animaux vertébrés à l'homme et réciproquement.

l'Office International des Epizooties (OIE) comme une zoonose majeure à notification obligatoire, ne suscitait pas un grand intérêt dans la communauté internationale. Avec la médiatisation grandissante du réchauffement de la planète et de ses possibles conséquences, entre autres la réémergence de maladies vectorielles typiquement tropicales en Europe ou aux Etats-Unis, des financements sont désormais alloués aux instituts de recherche pour mettre en place sur le terrain des projets visant à mieux en comprendre l'épidémiologie.

L'ACI et CORUS font partie de ces projets menés par des scientifiques français en collaboration avec des chercheurs du sud. Le projet concerne en fait deux pathologies vectorielles : la FVR et la schistosomose. Bien que toutes deux transmises par des vecteurs liés aux mares (moustiques pour la FVR, gastéropodes d'eau douce pour la schistosomose), leurs mécanismes de transmission sont très différents et je me suis donc limitée à la première.

Alors que les mécanismes de transmission de la FVR sont bien connus en Afrique de l'Est et du Sud, au point que des modèles prédictifs sont déjà opérationnels, bien des choses restent encore à explorer en zone sahélienne. La FVR est une maladie qui touche principalement le bétail et secondairement l'homme. Les épizooties ont de graves conséquences en zone pastorale sahélienne où l'élevage est la base du système de production. Cependant, il est impossible de mettre en place de programmes de vaccination au niveau national car d'une part, les vaccins ont des effets secondaires et d'autre part, plusieurs années peuvent s'écouler entre deux épisodes de FVR.

Un réseau de surveillance fonctionne au Sénégal depuis quelques années, mais il est difficile de détecter tous les cas au niveau national, d'autant plus que la symptomatologie de la FVR est peu spécifique et que les éleveurs ne transmettent pas forcément les suspicions aux autorités. L'ampleur et la répétition des épisodes de FVR au Sénégal et dans le Sud mauritanien justifie que l'on tente de mieux comprendre les mécanismes de transmission et de modéliser le risque d'épizootie dans le temps et dans l'espace, afin d'améliorer les performances du réseau. Cette modélisation est l'un des objectifs des projet ACI/CORUS.

L'équipe a choisi de travailler dans le Ferlo, où la maladie est enzootique³. Située au nord du pays, la communauté rurale de Barkedji appartient au Ferlo et est représentative des systèmes pastoraux sahéliens, caractérisés par l'utilisation de mares temporaires en saison des pluies. Le choix d'une approche à grande échelle a été dicté par des observations de terrain faites par les équipes du réseau de surveillance. Ils ont remarqué que lorsque des foyers de FVR se

³ Une enzootie est la persistance habituelle, dans une région ou une collectivité donnée, d'une maladie animale particulière, qui s'y manifeste de façon constante ou à des époques déterminées.

déclaraient, certains villages distants de seulement quelques kilomètres n'étaient pas affectés par la maladie. Les mécanismes de transmission de la FVR ne devaient donc pas être abordés au niveau du pays ou d'une région, mais au niveau d'une communauté rurale.

Les différentes composantes du cycle de la FVR (virus, hôtes vertébrés et vecteurs, en interaction avec le milieu) justifient la formation d'une équipe pluridisciplinaire dont chaque membre joue un rôle précis et bien déterminé. Au sein du projet, je me suis positionnée par rapport à mes compétences de vétérinaire et de géographe pour tenter de spatialiser le risque relatif de transmission de la FVR au niveau de la zone de Barkedji. Dans cette problématique, la temporalité est limitée à une saison des pluies, période où le risque de transmission est maximale.

La spatialisation du risque de transmission de la maladie soulève cinq questions, auxquelles nous essayons, entre autres, de répondre dans cette thèse :

- Quelles sont les particularités du cycle de la FVR dans la zone sahéenne de Barkedji ?
- Comment définir le risque de transmission de la FVR ?
- Quels sont les indicateurs spatiaux de l'abondance des hôtes du virus ?
- Quels sont les indicateurs spatiaux de l'abondance des vecteurs du virus et comment les détecter ?
- Comment prédire la répartition spatiale du risque relatif de transmission de la FVR dans la communauté rurale de Barkedji ?

Afin de présenter et de résoudre au mieux la problématique de spatialisation de la FVR à Barkedji, ce travail est organisé en deux grandes parties, constituée chacune de trois chapitres. La première partie présente le cadre thématique, conceptuel, géographique et méthodologique de notre étude. Elle a pour but de familiariser le lecteur avec la maladie, les concepts fondateurs de l'étude ainsi que le terrain. A la fin de la première partie, les grands axes du protocole de recherche sont présentés. La seconde partie détaille l'application de ces réflexions au problème spécifique de la FVR à Barkedji. Les étapes du protocole sont détaillées puis les résultats sont présentés et discutés, aboutissant à la répartition spatiale du risque de transmission de la FVR dans la zone de Barkedji. A la fin de la seconde partie, un bilan de ce travail de recherche est dressé, puis les différentes perspectives et applications pratiques sont envisagées.

Première partie. Cadrage scientifique

Introduction à la première partie

Cette première partie a pour objectif de délimiter notre sujet sur le plan thématique, conceptuel, géographique et méthodologique, comme préalable à la seconde partie d'application. Nous avons choisi de la diviser en trois chapitres. Le premier présente la fièvre de la vallée du Rift, en ciblant les éléments nécessaires à la compréhension de notre problématique. Entre autres, nous revenons sur les épisodes passés de la FVR, afin de mettre en exergue le lien entre le milieu et l'occurrence de la maladie. Le second chapitre définit les concepts fondateurs de notre travail : le risque, la santé et le complexe pathogène. Ce dernier a pour principe de formaliser les relations entre les éléments du cycle d'une maladie et le milieu. Il sous-tend que le milieu auquel on s'intéresse soit connu, nous conduisant tout naturellement à présenter notre zone d'étude, la communauté rurale de Barkedji. Nous expliquons ensuite le fonctionnement du système pathogène de la FVR à Barkedji avant de définir le risque de transmission. Enfin, le troisième chapitre s'ouvre sur une revue bibliographique des principaux travaux menés en environnement-santé sur les maladies vectorielles. D'ordinaire, cet état de l'art intervient plus tôt dans un travail de thèse. Cependant, étant donné le caractère pluridisciplinaire de notre recherche, nous avons préféré cadrer d'abord notre sujet afin que chacun puisse en saisir toutes les implications. Suite à la revue bibliographique, nous présentons notre propre protocole de recherche, dont l'objectif est la spatialisation du risque de transmission de FVR à Barkedji.

Chapitre 1. Considérations générales sur la Fièvre de la Vallée du Rift

Introduction

La Fièvre de la vallée du Rift est une arbovirose* (de l'anglais *ARthropod-Borne-virose*), c'est à dire qu'elle est provoquée par un virus transmis d'hôte en hôte par certains arthropodes*. Dans ce premier chapitre, nous présentons les caractéristiques de la maladie nécessaires à la compréhension de la problématique, en particulier ses mécanismes de transmission et ses relations avec l'environnement géographique, afin de dégager les notions fondamentales et de déceler toutes les entrées possibles pour notre étude. Nous avons conscience que débiter une thèse par une monographie sur la fièvre de la vallée du Rift peut manquer d'élégance, mais il nous a semblé que c'était la solution la plus pertinente pour entrer dans le sujet. En effet, ce chapitre tente de mettre en exergue le lien entre l'environnement et l'épidémiologie de la FVR, permettant au lecteur de comprendre les concepts et la problématique présentés dans les chapitres suivants. Nous proposons en premier lieu une vue d'ensemble de la maladie, de l'étiologie aux méthodes de prévention, en passant par l'épidémiologie, la symptomatologie et les méthodes de diagnostic. Puis nous passons en revue les épisodes passés, afin de rechercher et décrire les milieux favorables à sa transmission.

1.1. Présentation de la FVR

1.1.1. Etiologie de la FVR

L'agent causal de la FVR est un arbovirus, dont nous présentons ici les principales caractéristiques : taxonomie, propriétés physico-chimiques, biosynthèse⁴ et morphogénèse⁵.

1.1.1.1. Classification du virus

Le virus de la FVR a posé problème aux taxonomistes pendant les trois décennies qui ont suivi son premier isolement par Daubney *et al.* en 1931 (Daubney *et al.*, 1931). Ne pouvant être rattaché à aucun autre genre connu et n'ayant aucune relation antigénique observable avec les autres arbovirus, il a longtemps été classé comme une espèce virale à part et unique.

⁴ Formation des composés organiques qui se trouvent dans les êtres vivants

⁵ Développement des formes d'un organisme

En 1973, Murphy *et al.* découvrent, grâce au microscope électronique, que le virus de la FVR présente de fortes similitudes morphologiques et morphogénétiques avec d'autres virus du sous-groupe Bunyamwera, et le classent parmi les virus « *bunya-like* » (Murphy *et al.*, 1973). Cependant, d'un point de vue antigénique, le virus n'est toujours pas relié à d'autres agents déjà classifiés. Ce n'est que dans les années 80 qu'il est finalement rattaché au groupe *phlebotomus*, comportant une trentaine de virus (Shope *et al.*, 1980). Des preuves sérologiques et biochimiques viennent confirmer cette hypothèse et depuis lors, le virus de la FVR est classé dans la famille des *Bunyaviridae* et le genre *Phlebovirus* (Shope *et al.*, 1981, cités par (Shimshony et Barzilai, 1983).

1.1.1.2. Propriétés physiques et chimiques du virion

Les scientifiques ont tenté d'estimer la taille du virion par différentes méthodes, qui se sont affinées au cours du temps. Après de nombreux tâtonnements, plusieurs références récentes rapportent un diamètre extracellulaire compris entre 90 et 110 nm. Ainsi que pour tous les membres de la famille des *Bunyaviridae*, le génome du virus de la FVR est constitué d'ARN (Acide Ribo-Nucléique*) simple brin, découpé en trois segments de poids moléculaires différents : le segment large (L) de $2,7 \times 10^6$, le segment moyen (M) de $1,7 \times 10^6$ et le petit segment (S) de $0,6 \times 10^6$ (Bishop *et al.*, 1980). Cette structure est similaire à celle des autres *phlebovirus*. Le virion contient trois protéines structurales majeures, composant l'enveloppe et la nucléocapside*.

Il se lyophilise facilement et est très stable dans le sérum liquide. Différentes études montrent que la virulence peut être conservée 8 mois à 4°C, dans du sang préservé par l'oxalate-carbol-glycérine et plusieurs années dans du plasma, selon les conditions de réfrigération (Findlay, 1932). Il est également stable dans les aérosols (Miller *et al.*, 1963), les produits d'excrétion et les tissus infectés tels que la rate, le foie, le cerveau (Yedloutschnig *et al.*, 1981).

1.1.1.3. Biosynthèse et morphogénèse du virus

Les connaissances sont réduites en ce qui concerne la biosynthèse des macromolécules induite par le virus de la FVR et les stades biochimiques de la réplication virale. Les principales découvertes sont dues à McGavran et Easterday (Shimshony, *op. cit.*). Selon leurs travaux, le virus se réplique dans le cytoplasme* des cellules et l'assemblage du virion a lieu dans un système limité par une membrane, étroitement associé à l'appareil de Golgi*.

Une particularité de la réplication est l'apparence de corps d'inclusion nucléaires dans les cellules infectées par le virus, en particulier les cellules hépatiques. Ce phénomène est observé au laboratoire, sur des souris infectées artificiellement, mais également sur le terrain, dans des

conditions naturelles. Lors de l'épisode sud-africain de FVR en 1975, ces corps d'inclusion ont été visualisés chez 49% des agneaux positifs (Coetzer, 1977). Van Velden *et al.* les ont rencontrés sur des sections histologiques de foie réalisées à partir de cas humains fatals (Van Velden *et al.*, 1977). Eisa et Obeid les ont observés dans des hépatocytes de moutons infectés pendant l'épizootie* soudanaise de 1973 (Eisa *et al.*, 1977). Actuellement, la présence de tels corps d'inclusions dans les coupes histologiques de tissus animaux constitue un critère de suspicion de la FVR.

1.1.2. Epidémiologie de la FVR

1.1.2.1. Hôtes potentiels du virus

Le virus de la FVR peut infecter les ruminants domestiques (ovins, caprins, bovins, camélidés), les ruminants sauvages (gnous, antilopes, buffles...), certains rongeurs, ainsi que l'homme, qui présente une grande sensibilité⁶ à l'infection (Tableau 1) (Shimshony, *ibidem*). Les singes d'Afrique, les porcs et les carnivores domestiques ne présentent qu'une virémie* passagère.

Tableau 1 : Hôtes potentiels du virus de la FVR, classés selon leur susceptibilité (d'après Shimshony et Barzilai, 1983)

| Fatal dans 100% des cas | Mortalité élevée | Sévère, mais non fatal dans la plupart des cas | Subclinique | Réfractaire à l'infection |
|-------------------------|-----------------------|--|-----------------------|---------------------------|
| Agneau | Mouton | Homme | Singe (africain) | Mangouste |
| Chevreau | Veau | Singe (indien et sud-américain) | Rongeurs sauvages | Hérisson |
| Souris blanche | Rat (selon les races) | Bétail (taurin ou zébu) | Lapin | Tortue |
| Hamster | Gerbille | Chameau | Porc | Grenouille |
| Mulot | Chiot | Chèvre | Chien | Gecko |
| Loir | Chaton | Mouton (certaines races) | Chat | Poule |
| Rat (selon les races) | | Buffle (africain et asiatique) | Cheval | Canari |
| Campagnol | | Ecureuil gris | Rat (selon les races) | Pigeon |
| | | Rongeurs sauvages | Cobaye | Singe araignée |
| | | | | Perruche |

1.1.2.2. Vecteurs et notions de transmission horizontale-verticale

Le cycle épidémiologique du virus de la FVR est caractéristique des arbovirus, c'est à dire que la transmission se fait principalement par l'intermédiaire d'un vecteur. Un vecteur peut être défini comme « un arthropode hématophage* qui assure la transmission biologique (ou mécanique) active d'un agent infectieux d'un vertébré à un autre vertébré » (Rodhain et Perez,

⁶ La sensibilité d'un hôte à un agent pathogène mesure son aptitude à exprimer cliniquement l'action d'un agent pathogène.

1985). Les agents infectieux peuvent être des virus, des bactéries, des protozoaires* ou des helminthes*. La « transmission biologique » implique la réalisation d'une phase du cycle évolutif du parasite ou la multiplication de la bactérie ou du virus. Elle s'oppose à la « transmission mécanique » qui traduit un simple transport de l'agent pathogène, d'un hôte à un autre, sans qu'il y ait évolution ou multiplication.

En Afrique de l'ouest, en Afrique centrale et au Kenya, des piégeages à grande échelle ont été menés pendant et après les épidémies. Le virus de la FVR a été isolé dans huit familles d'arthropodes, parmi lesquelles on compte six familles et plus de 30 espèces de moustiques (cf. Planche photo 1 et Tableau 2) (McIntosh et Jupp, 1981; Meegan et Bailey, 1989).

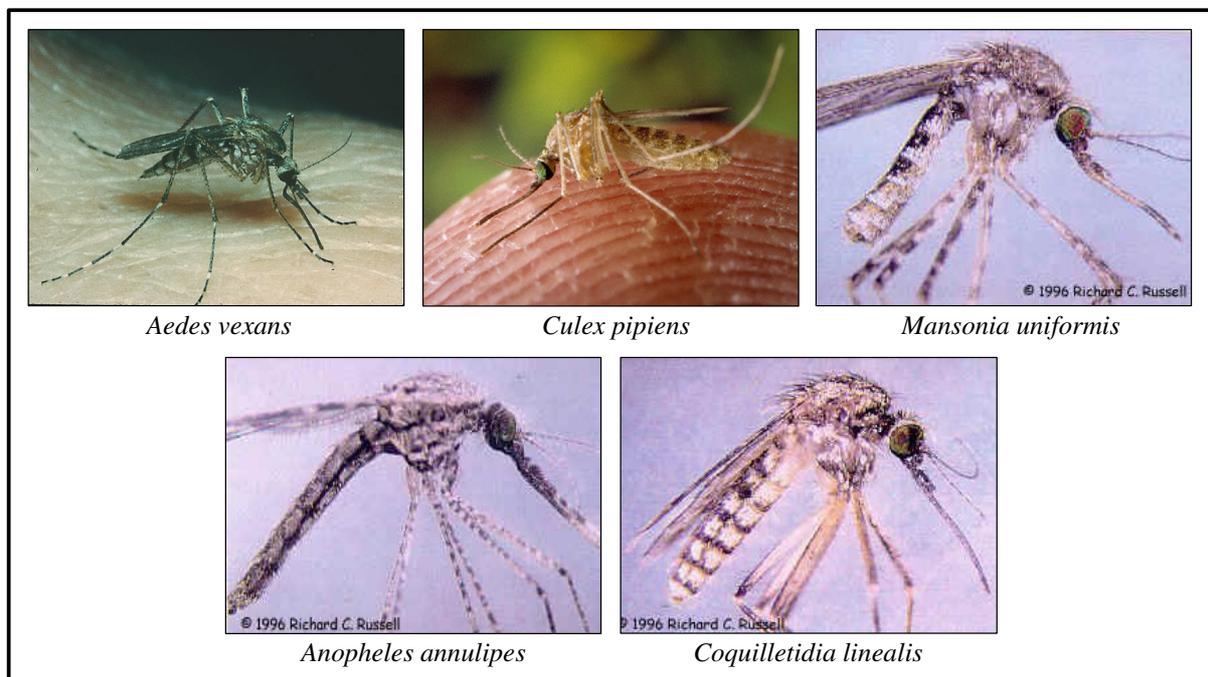


Planche photo 1 : Spécimens de moustiques vecteurs de la FVR

Les différentes espèces de vecteurs ne jouent pas le même rôle dans la transmission. Selon le cas, plusieurs vecteurs coexistent et jouent un rôle complémentaire, ou bien une espèce en particulier prédomine. Par exemple, en Egypte, lors de l'épidémie de 1977, il semble que *Culex pipiens* ait été le principal vecteur impliqué (Hoogstraal *et al.*, 1979; Meegan *et al.*, 1980), alors qu'au Kenya plusieurs genres se côtoient et ont leur importance propre dans la circulation du virus (Fontenille *et al.*, 1998).

Tableau 2 : Isolements de virus de la FVR sur des vecteurs arthropodes collectés sur le terrain, en Afrique (d'après Fontenille *et al.*, 1998, Linthicum *et al.*, 1985, Diallo *et al.*, 2000, Shimshony et Barzilai, 1983)

| Espèce | Nombre d'isolats | Localisation | Année |
|--------------------------------------|------------------|---------------------------|---------|
| <i>Aedes africanus</i> | ? | Ouganda | 1956 |
| <i>Aedes caballus</i> | ? | Afrique du Sud | 1953 |
| <i>Aedes cinereus</i> | ? | Afrique du Sud | 1974-75 |
| <i>Aedes circumluteolus</i> | ? | Afrique du Sud | 1956 |
| | ? | Ouganda | 1955 |
| <i>Aedes cumminsii</i> | 1 | Burkina Faso | 1983 |
| | 1 | Kenya | 1981-84 |
| <i>Aedes dalzieli</i> | 3 | Kédougou, Sénégal | 1974 |
| | 1 | Kédougou, Sénégal | 1983 |
| <i>Aedes dentatus</i> | ? | Zimbabwe | 1969 |
| <i>Aedes dendrophilus</i> | ? | Ouganda | 1948 |
| <i>Aedes fuscifer</i> | 1 | Burkina Faso | 1983 |
| <i>Aedes juppi</i> | ? | Afrique du Sud | 1974-75 |
| | ? | Zimbabwe | 1969 |
| <i>Aedes lineatopennis</i> | ? | Kenya | 1978 |
| | 9 | Kenya | 1981-84 |
| <i>Aedes ochraceus</i> | 3 | Barkedji, Sénégal | 1993 |
| <i>Aedes palpalis</i> | 1 | République Centrafricaine | 1969 |
| <i>Aedes tarsalis</i> | ? | Ouganda | 1948 |
| <i>Aedes vexans</i> | 10 | Barkedji, Sénégal | 1993 |
| | 7 | Arabie Saoudite | 2000 |
| <i>Anopheles cinereus</i> | ? | Afrique du Sud | 1974-75 |
| <i>Anopheles christyi</i> | 2 | Kenya | 1981-84 |
| <i>Anopheles coustani</i> | ? | Zimbabwe | 1969 |
| | ? | Kenya | 1978 |
| <i>Anopheles pharoensis</i> | 2 | Kenya | 1981-84 |
| <i>Coquillettidia fuscopennata</i> | ? | Ouganda | 1960 |
| <i>Culex antennatus</i> | 1 | Nigeria | 1967-70 |
| | 3 | Kenya | 1981-84 |
| <i>Culex pipiens</i> | 2 | Egypte | 1978 |
| <i>Culex poecilipes</i> | 36 | Diawara, Sénégal | 1998 |
| <i>Culex rubinotus</i> | 1 | Kenya | 1981-84 |
| | ? | Afrique du Sud | 1953 |
| | ? | Afrique du Sud | 1956 |
| | ? | Afrique du Sud | 1970 |
| | ? | Afrique du Sud | 1974-75 |
| <i>Culex theileri</i> | ? | Zimbabwe | 1969 |
| | 6 | Arabie Saoudite | 2000 |
| <i>Culex tritaeniorhynchus</i> | 6 | Arabie Saoudite | 2000 |
| <i>Culex vansomerini</i> | 1 | Kenya | 1981-84 |
| <i>Culex zombaensis</i> | 1 | Kenya | 1981-84 |
| <i>Culicoides sp.</i> | 2 | Nigeria | 1967-70 |
| | ? | Kenya | 1978 |
| <i>Eretmapodites spp.</i> | ? | Ouganda | 1948 |
| <i>Eretmapodites quinquevittatus</i> | ? | Afrique du Sud | 1971 |
| <i>Mansonia africana</i> | ? | Ouganda | 1959 |
| | 1 | République Centrafricaine | 1969 |
| <i>Mansonia uniformis</i> | ? | ? | ? |
| <i>Simulium spp.</i> | ? | Afrique du Sud | 1953 |

Pour bien différencier les rôles des espèces vectorielles, nous définissons au préalable les notions de transmission verticale et horizontale :

- la première correspond à la transmission d'un agent pathogène d'une femelle infectée à sa descendance, à travers le placenta pour les vertébrés ou de manière transovarienne pour les arthropodes ;
- la seconde traduit une transmission de l'agent entre deux hôtes (transmission horizontale directe) ou d'un vecteur à un hôte (transmission horizontale vectorielle).

La particularité de certaines espèces d'*Aedes* est de transmettre le virus de manière verticale, transovarienne (Linthicum *et al.*, 1985), c'est à dire que la femelle infectée pond des œufs infectés. Ces œufs possèdent par ailleurs la faculté de résister à la dessiccation. Pondus dans de la boue humide, ils entrent dans une phase dite de diapause lorsque le sol s'assèche et attendent ainsi plusieurs mois, voire plusieurs années, la survenue des pluies. En zone sahélienne, les œufs se maintiennent ainsi pendant toute la saison sèche, malgré les conditions extrêmes de température et d'hygrométrie, jusqu'à la saison des pluies suivante. Dès leur immersion, ils éclosent pour donner de nouveaux adultes potentiellement porteurs du virus et pouvant rester infectants pendant 17 jours.

Les autres familles de vecteurs ne transmettent le virus qu'horizontalement, c'est à dire d'un animal ayant une virémie suffisante à un autre. Au cours du repas sanguin, les femelles s'infectent, multiplient le virus et peuvent contaminer un animal sain 7 ou 8 jours après, au cours du repas suivant (McIntosh *et al.*, 1973; Meegan *et al.*, 1980). Ces deux modes de transmission, horizontale et verticale, contribuent indépendamment ou conjointement à la réalisation du cycle viral.

1.1.2.3. Mécanismes de transmission aux hôtes

Schématiser le cycle de transmission du virus de la FVR est malaisé, car les voies de contamination varient selon les vecteurs impliqués. La figure 2 (cf. page suivante) répond à une volonté de synthèse et de simplification, afin que les principaux mécanismes apparaissent distinctement au lecteur. Elle présente donc un cycle théorique, dont nous verrons par la suite les spécificités dans différents milieux.

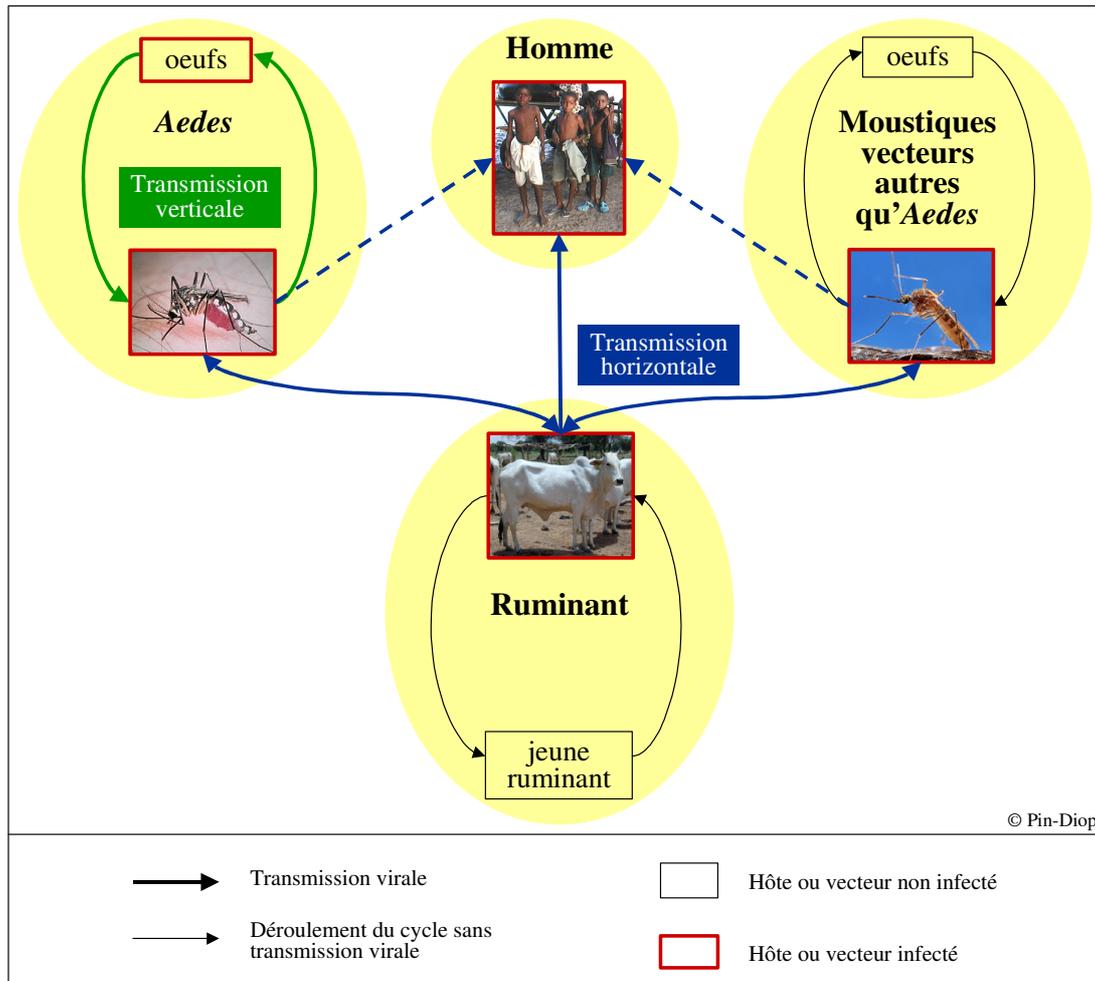


Figure 2 : Schéma simplifié du cycle épidémiologique du virus de la FVR

Nous pouvons distinguer quatre parties dans le cycle épidémiologique : le ruminant, l'homme, les vecteurs *Aedes* et les autres genres de moustiques vecteurs. Les flèches fines indiquent un cycle de développement, et les flèches épaisses une transmission virale. Chez de nombreuses espèces d'*Aedes*, le virus peut être transmis de la femelle infectée aux œufs (transmission verticale), lesquels donnent des adultes également infectés. Par ailleurs, un adulte non infecté peut se contaminer en faisant un repas de sang sur un ruminant infecté (transmission horizontale). Chez les autres genres de moustiques vecteurs, seule la seconde voie de contamination est possible ; le cycle de développement du moustique n'est donc pas superposé au cycle de transmission du virus. Enfin, les deux espèces de vecteurs ont, par définition, la capacité d'infecter un ruminant lors d'un repas de sang.

De même, la transmission verticale n'existe chez aucun hôte vertébré, c'est à dire que les jeunes nés de parents infectés n'hébergent pas le virus. Il est important de distinguer le cas des ruminants et des hommes en ce qui concerne la transmission horizontale. En effet, la

transmission du virus d'un ruminant à un autre a lieu uniquement par mode vectoriel : un vecteur s'infecte en piquant un ruminant virémique et contamine un autre ruminant lors d'un autre repas de sang. *A contrario*, l'homme peut être contaminé soit par contact avec un ruminant infecté, soit en étant piqué par un vecteur, le rôle respectif de chacun de ces modes de contamination variant selon les cas (Meegan *et al.*, 1980 ; Jouan *et al.*, 1989 ; Joubert *et al.*, 1951). Auparavant, on pensait que l'homme ne pouvait être contaminé que par contact avec des animaux malades. Toutefois, l'ampleur de certaines épidémies (environ 200 000 cas humains en Egypte, en 1977, par exemple) a conduit les scientifiques à nuancer ce propos et à envisager l'hypothèse d'une transmission de l'animal à l'homme par des vecteurs biologiques ou mécaniques dans des contextes particuliers, sans que ces hypothèses aient pu encore être confirmées ou infirmées (House *et al.*, 1992). Malgré tout, l'homme reste généralement considéré comme un « cul-de-sac épidémiologique », car la transmission d'homme à homme (ou de l'homme à une autre espèce réceptive) n'a jamais pu être observée, sans doute en raison de la faible virémie mesurée sur les sujets atteints. On suppose donc qu'il ne participe pas à l'extension des épidémies, contrairement aux ruminants domestiques, qui jouent le rôle d'hôtes amplificateurs (Easterday *et al.*, 1962a; Easterday *et al.*, 1962b).

Dans le cas de la transmission directe, l'homme se contamine essentiellement par contact avec des matières virulentes ou par inhalation d'aérosols infectés. Des cas cliniques ou des séroconversions ont été relevés chez des employés d'abattoir et des techniciens de laboratoire, corroborant cette hypothèse (Chambers et Swanepoel, 1980; Smithburn *et al.*, 1949; Zeller *et al.*, 1998). Par ailleurs, plusieurs études rétrospectives ont mis en évidence un lien significatif entre les cas cliniques humains et la manipulation d'animaux malades. Lors d'une épizootie, les éleveurs abattent les animaux malades, afin de pouvoir les consommer. Ce phénomène est très marqué en zone sahélienne, où les éleveurs peuls, de confession musulmane, ne peuvent consommer la viande d'un animal mort avant l'abattage et ont donc tendance à sacrifier les animaux malades (Wilson, 1994). Pendant le sacrifice de l'animal puis la préparation de la viande, l'homme est en contact avec les organes, le sang et les fluides corporels, qui sont des sources virales (Yedloutschnig *et al.*, 1981). De même les éleveurs ont tendance à manipuler les produits d'avortements, également à risque.

Au Kenya, une étude postérieure à l'épidémie de 1997-1998 a conclu que le facteur de risque le plus important était le contact avec des ovins et plus particulièrement l'hébergement

d'animaux dans la maison, la consommation de lait cru, la traite et l'abattage (Tableau 3) (Woods *et al.*, 2002). Dans cette étude, toutes les activités liées aux animaux apparaissent comme des facteurs de risque (à l'exception du contact avec un camelin), alors que le risque n'est pas significatif en l'absence d'exposition aux animaux. Hoogstraal *et al.* puis Wilson *et al.* sont parvenus à des conclusions similaires en Egypte (Hoogstraal *et al.*, 1979) et au Sénégal respectivement (Wilson *et al.*, 1994).

Tableau 3 : Enquête cas/témoins dans le district de Garissa au Kenya, suite à l'épizootie de 1997-98 : risques relatifs liés à l'exposition à différents facteurs de risque (d'après Woods *et al.*, 2002)

| Facteur de risque | Risque relatif | Intervalle de confiance ($\alpha=0.05$) |
|--|----------------|---|
| Exposition aux animaux | | |
| Hébergement du bétail à la maison après la pluie | 5.3 | 2.3-12.6 |
| Abattage d'un animal | 2.4 | 1.3-4.3 |
| Préparation d'un animal à la consommation | 2.0 | 1.1-3.6 |
| Dépeçage d'un animal | 2.4 | 1.6-3.5 |
| Cuisson de la viande | 2.3 | 1.1-4.9 |
| Traite d'un animal | 3.8 | 1.9-7.7 |
| Consommation de lait cru | 8.6 | 2.0-36.0 |
| Soins à un animal pendant la mise-bas | 2.6 | 1.4-4.9 |
| Manipulation d'un avorton | 2.8 | 1.5-5.5 |
| Contact avec un ovin ^a | 6.3 | 2.9-14.0 |
| Contact avec un caprin ^a | 3.1 | 1.6-6.4 |
| Contact avec un bovin ^a | 2.4 | 1.3-4.5 |
| Contact avec un camelin ^a | 1.3 | 0.5-3.8 |
| Pas d'exposition aux animaux | | |
| Maison inondée depuis novembre 1997 | 1.3 | 0.8-2.1 |
| Membre de la famille malade | 1.6 | 0.8-3.1 |
| Contact avec une personne décédée | 2.2 | 1.0-4.6 |
| Utilisation de moustiquaires | 0.7 | 0.3-1.4 |

^a Le contact inclut le gardiennage, la cuisson, l'abattage ou tout autre contact avec un fluide corporel (excepté la consommation), la consommation de lait cru.

1.1.2.4. Réservoirs naturels du virus

Le problème de l'existence de réservoirs naturels du virus de la FVR n'a pas encore été complètement résolu. De nombreux arbovirus se maintiennent dans la nature par l'intermédiaire d'un réservoir, c'est à dire d'un hôte réceptif⁷ mais peu sensible à l'infection (Toma *et al.*, 1996). En effet, l'espèce réservoir doit avoir une virémie suffisante pour transmettre la maladie, sans pour autant en mourir ou éliminer le virus. Dans le cas de la fièvre jaune, par exemple, certains singes tel le capucin constituent une espèce réservoir, tandis que d'autres, trop sensibles à la maladie (singes hurleurs ou singes araignées), sont

⁷ La réceptivité d'un hôte mesure son aptitude à héberger un agent pathogène, à en permettre le développement ou la multiplication, sans forcément en souffrir.

plutôt considérés comme des hôtes. Quant aux moustiques, ils sont à la fois vecteurs et réservoirs. Lorsqu'une femelle est infectée, le virus amaril se multiplie et envahit son organisme. Toutes les piqûres deviennent alors infectantes et ceci pendant toute la durée de vie de la femelle qui n'est pas affectée par le virus (Cordellier, 1978).

Dans le cas de la FVR, des études menées sur des rongeurs en République Centrafricaine (Gonzalez *et al.*, 1983), en Afrique du Sud (Pretorius *et al.*, 1997) et au Sénégal (Diop *et al.*, 2000) ont montré que certaines espèces de rongeurs telles que *Mastomys erythroleucus*, *Aethomys namaquensis* et *Arvicanthus niloticus* étaient réceptives. Cependant, elles semblent plus jouer le rôle d'hôtes intermédiaires amplificateurs que de réservoirs véritables.

1.1.3. Symptômes de la maladie

1.1.3.1. Chez les ruminants domestiques

Après infection, la période d'incubation dure de 1 à 4 jours. Chez les ruminants domestiques, les symptômes de l'infection varient selon l'âge et l'espèce. On observe dans tous les cas une hyperthermie et de l'abattement. L'infection est rarement mortelle pour les adultes, mais provoque des avortements chez les femelles gravides (85% chez les bovins, 100% chez les petits ruminants). La mortalité est par contre importante chez les jeunes animaux : elle varie de 10 à 70% chez les veaux et de 20 à 90% chez les agneaux ou chevreaux. Les ovins sont les plus sensibles, et c'est souvent une augmentation inexplicée des avortements et de la mortinatalité chez cette espèce qui constitue le premier signe d'appel d'une épizootie de FVR (Easterday, 1965; Shimshony et Barzilai, 1983).

1.1.3.2. Chez l'homme

Chez l'homme, la période d'incubation est de 3 à 6 jours et la symptomatologie est variable, pouvant aller d'une affection bénigne de type grippal à une fièvre hémorragique fatale. De manière générale, l'infection se manifeste simplement par une hyperthermie, des céphalées, des myalgies* et des nausées, et la guérison survient en 4 à 7 jours. Cependant, dans de rares cas, le syndrome grippal évolue vers la forme grave de la maladie, associée à un ou plusieurs syndromes aisément reconnaissables: pathologie oculaire, méningo-encéphalite ou syndrome hémorragique.

La proportion de malades développant la forme oculaire se situe entre 0.5 et 2%. Les lésions rétiniennes apparaissent de une à trois semaines après les premiers symptômes, et peuvent provoquer une baisse définitive de l'acuité visuelle. Cette forme n'est que rarement mortelle. La méningo-encéphalite apparaît dans les mêmes délais que la rétinopathie, avec une faible

létalité*, mais peut entraîner des lésions nerveuses irréversibles (Alrajhi *et al.*, 2004). Par contre, dans le cas de la fièvre hémorragique, les symptômes (ictère*, purpura*, saignement des gencives, sang dans les selles ou vomissements sanglants) apparaissent rapidement, quelques jours après le début de la maladie. La virémie dure une dizaine de jours chez ces patients et l'issue est fatale dans la moitié des cas (Peters et Meegan, 1981).

1.1.4. Méthodes de diagnostic

1.1.4.1. Diagnostic clinique et anatomo-pathologique

Le diagnostic clinique chez les ruminants est difficile à établir car les symptômes sont peu spécifiques. Une infection par le virus de la FVR peut être aisément confondue avec l'une des nombreuses pathologies abortives touchant les bovins et les petits ruminants, telles que les pestes, la fièvre catarrhale du mouton, la brucellose, l'avortement enzootique des brebis, les intoxications par les plantes etc. Des avortements en série chez les petits ruminants, associés à une forte mortalité des nouveaux-nés et à des syndromes fébriles observés chez les personnes ayant manipulé les animaux constituent cependant une forte présomption.

Les lésions hépatiques observées sur un animal mort ou un avorton peuvent également renforcer cette hypothèse. Le foie est en effet atteint de nécrose totale ou focale. Les îlots de nécrose se traduisent par des taches blanches et des hémorragies sous-capsulaires, que l'on retrouve dans l'épaisseur de l'organe (Curasson, 1934; Easterday, 1965). Ces différents signes doivent amener les services de santé à suspecter la FVR et à faire les prélèvements de sérum ou d'organes nécessaires aux examens de laboratoire. Le diagnostic ne pourra être confirmé que par l'isolement du virus ou par la mise en évidence d'anticorps chez les animaux malades.

1.1.4.2. Isolement viral

Les sources virales utilisées pour l'isolement sont soit le sang, le plasma ou le sérum des animaux malades, prélevés pendant la phase fébrile, soit différents organes (foie, rate, rein, tissus fœtaux) prélevés lors de l'autopsie. Ces différents matériaux sont inoculés à des souris par voie intra-cérébrale ou à des souris adultes par voie intra-péritonéale (Shimshony et Barzilai, 1983). Les souris meurent ou expriment les symptômes de la maladie entre 1 et 3 jours après inoculation. Cette technique a été utilisée avec succès lors d'épizooties au Soudan (Eisa *et al.*, 1977), en Afrique du Sud (Van Velden *et al.*, 1977) et en Egypte (Abdel-Wahab *et al.*, 1978). Elle apporte la preuve de la présence du virus dans l'organisme, au moment où le prélèvement a été effectué et donc de sa circulation active. Elle permet

également d'isoler le virus à partir de broyats de moustiques capturés sur le terrain et d'identifier ainsi les espèces vectrices.

1.1.4.3. Diagnostic sérologique

La mise en évidence d'anticorps spécifiques anti-virus de la FVR se base non pas sur la présence effective de virus dans le sang mais sur la réaction immunitaire de l'organisme face à l'agression virale. En effet, tout organisme soumis à une agression par un agent pathogène synthétise des immunoglobulines (Ig) ou anticorps, selon une cinétique bien précise. Dans le cas de la FVR, des Ig de type M apparaissent quelques jours après l'infection et persistent 2 à 3 mois dans le sang, puis le relais est pris par des Ig de type G qui perdureront toute la vie de l'individu (Figure 3). Ces IgG peuvent être transmis aux nouveaux-nés via le lait maternel et leur confèrent une immunité de quelques mois (Wilson, 1994).

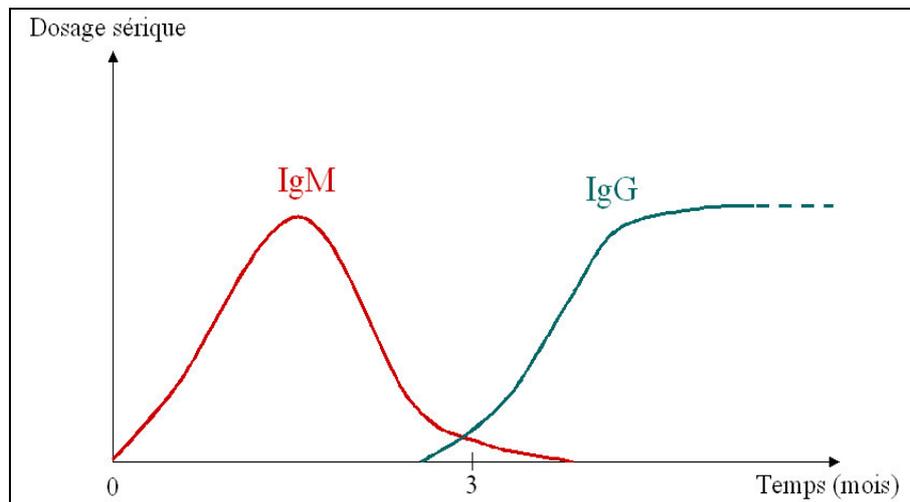


Figure 3 : Cinétique simplifiée de la réponse immunitaire après infection par le virus de la FVR

Après prélèvement de sérum, les Ig sont recherchées par différentes techniques, dont les plus courantes sont la fixation du complément (FC), la séroneutralisation (SN), l'immunofluorescence (IF), le test de réduction du nombre de plages (PRNT), l'inhibition de l'hémagglutination (HI) et enfin l'*Enzyme-Linked ImmunoSorbent Assay* (ELISA). L'HI et l'ELISA sont les méthodes les plus sensibles, c'est à dire dont les probabilités de détecter des anticorps chez un individu atteint sont les plus élevées (Abd El-Rahim *et al.*, 1999). Avec l'ELISA, on peut mettre en évidence rapidement et de manière très spécifique soit les IgG, soit les IgM anti-virus de la FVR (Ksiazek *et al.*, 1988; Meegan *et al.*, 1987). Généralement, les sérums prélevés sur le terrain sont d'abord testés en IgG, les seuls positifs étant par la suite testés en IgM.

Les méthodes de diagnostic sérologique ne donnent qu'une idée imprécise du moment auquel l'infection est advenue. Par exemple, dans le cas de la FVR et de la plupart des autres arboviroses, la détection d'IgM signe une infection récente, inférieure à 5 mois, celle d'IgG une infection plus ancienne (Monlun *et al.*, 1993). Cependant elles ont l'avantage d'être relativement simples et rapides. Le prélèvement de sérum, peu invasif, est également facile à mettre en œuvre, sur l'homme comme sur l'animal.

Le sérodiagnostic permet ainsi à la fois de confirmer la maladie dans des situations d'urgence et de mesurer des indicateurs épidémiologiques dans le cadre de programmes de surveillance à long terme (Jouan *et al.*, 1990). Les deux principaux indicateurs, la prévalence* et l'incidence*, aident à caractériser respectivement la situation et l'évolution d'une maladie :

- la prévalence mesure « le nombre total de cas ou de foyers d'une maladie, dans une population déterminée, au cours d'une période donnée ou à un instant donné » ;
- l'incidence d'une maladie est le « nombre de cas ou de foyers nouveaux, dans une population déterminée, au cours d'une période donnée ».

Alors que la prévalence en anticorps, mesurée au niveau national ou régional, donne un aperçu de la répartition spatiale de la maladie, l'incidence est une notion dynamique, et sa mesure implique donc plusieurs séries de prélèvements étalées dans le temps. Elle sert à estimer la forme épidémiologique prise par la maladie : lorsque l'incidence est stable, on peut parler d'une aire d'enzootie ou d'endémie ; lorsque l'incidence subit de fortes variations, partant d'un niveau faible et augmentant brutalement, on parle d'épizootie ou d'épidémie (Figure 4) (Toma *et al.*, 1996).

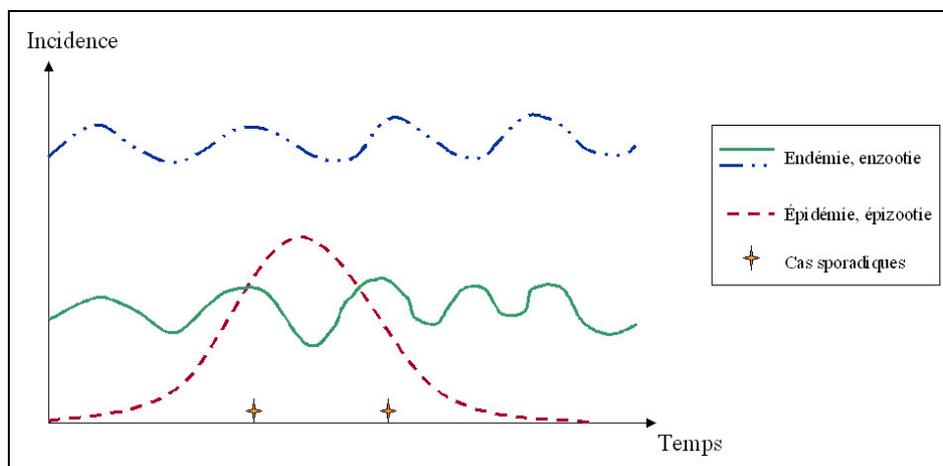


Figure 4 : Evolution de l'incidence selon la forme épidémiologique de la maladie (d'après Toma *et al.*, 1996)

Dans le cas de la FVR, des enquêtes de séroprévalence ont été menées dans différents pays, afin d'évaluer son ampleur et sa répartition. Les protocoles de mesure de l'incidence sont plus lourds et restent limités à des aires réduites. Ces enquêtes dispendieuses s'inscrivent la plupart du temps dans le cadre de programmes de recherches sur les arboviroses. Les services de santé nationaux s'attachent plutôt à détecter les foyers, afin de mettre en place des mesures de contrôle de l'activité virale. Ce sont les techniciens vétérinaires qui émettent les suspicions sur le terrain puis prélèvent et envoient les sérums ou les organes afin de confirmer le diagnostic. Si les sérums sont positifs, des équipes sont envoyées sur place afin de limiter l'extension de la maladie. Il arrive cependant que des foyers ne soient pas détectés, auquel cas les enquêtes sérologiques ne servent qu'à quantifier rétrospectivement l'ampleur de l'épisode. La précocité des interventions est un enjeu fort du contrôle de la FVR, car le traitement et la vaccination n'offrent pas encore de solutions satisfaisantes.

1.1.5. Traitement et prévention de la FVR

Il n'existe aucun traitement spécifique à la FVR. Chez l'homme, un traitement symptomatique est mis en place dans les cas sévères afin d'améliorer l'état général du patient. L'usage d'interférons ou de ribavirine est discutable, leur efficacité pour prévenir l'encéphalite n'ayant pas été démontrée.

Les vaccins existants sont divisés en deux grandes catégories : les vaccins vivants modifiés et les vaccins inactivés. Les premiers sont issus de souches virales vivantes ayant subi des modifications afin de réduire leur pouvoir pathogène. La souche la plus utilisée est la Smithburn (Smithburn, 1949), qui a l'avantage de conférer aux animaux une immunité de longue durée, après une seule inoculation. Sa pathogénicité résiduelle a par contre un effet abortif et tératogène* chez les femelles gestantes, ce qui la rend délicate à utiliser dans les zones qui ne sont pas régulièrement touchées par la maladie (Shimshony et Barzilai, 1983).

Le vaccin inactivé n'entraîne pas d'effets secondaires, mais sa faible immunogénicité* exige un protocole vaccinal très lourd : deux primo-vaccinations à quelques mois d'intervalle, puis un rappel annuel. Un candidat vaccin, mis au point par l'Institut Pasteur et combinant les avantages des deux souches précédemment citées, est actuellement à l'essai à l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (Thiongane Y., communication personnelle).

Le vaccin humain NDBR-103, utilisé chez les personnes à risque (techniciens de laboratoire, vétérinaires...), est quant à lui efficace et quasiment dénué d'effets secondaires. Il ne dispense cependant pas le personnel potentiellement en contact avec le virus de respecter les consignes de sécurité publiées en 1982 par l'Office International des Epizooties.

Par ailleurs, des mesures de prévention peuvent être prises ponctuellement, afin de circonscrire un foyer détecté et localisé par un réseau de surveillance. Des techniciens de la santé sont envoyés sur place, afin d'une part de vacciner les animaux à risque et d'autre part de sensibiliser les populations sur les dangers liés à la manipulation des avortons et à l'abattage, afin d'éviter les contaminations humaines.

La gravité des symptômes liés à la FVR sur le bétail domestique aide à comprendre l'importance des épisodes en Afrique sub-saharienne, où l'élevage représente une ressource majeure et où les conditions climatiques difficiles ne permettent que deux cycles de reproduction par an (Toure et Arpaillage, 1986). La mort des jeunes et les avortements massifs entraînent une perte économique importante pour les éleveurs. Par ailleurs, même si le faible taux de létalité chez l'homme ne fait pas de la FVR la première préoccupation des services de santé publique en Afrique, le risque d'infection massive est réel, comme nous allons le voir dans la deuxième partie de ce chapitre. L'absence de traitement spécifique et le potentiel mutagène du virus en font une maladie potentiellement dangereuse ; l'émergence de souches plus pathogènes serait ainsi tout à fait préoccupante, d'autant plus que la maladie peut s'adapter à différents milieux. La deuxième partie de ce chapitre de généralités sur la maladie porte sur sa répartition spatio-temporelle, et décrit les milieux favorables à son développement.

1.2. Les milieux favorables à la FVR

1.2.1. Historique de la maladie

Le virus de la fièvre de la vallée du Rift a été découvert en 1930 dans la vallée éponyme, au Kenya (Daubney *et al.*, 1931). L'affection due à ce virus est d'abord nommée « hépatite enzootique » chez les animaux domestiques, puis « hépatite nécrosante » chez l'homme, lorsque le virus est identifié chez celui-ci en 1934, en Afrique de l'Ouest (Curasson, 1934). Pendant de nombreuses années, le virus est responsable d'épizooties touchant principalement les ovins, en Afrique orientale et australe. Il arrive alors que l'homme en contact étroit avec les animaux morts ou malades soit contaminé, mais les cas restent sporadiques et rarement mortels (Saluzzo *et al.*, 2004).

La situation change radicalement avec la première épizoo-épidémie décrite en 1975 en Afrique du Sud, au cours de laquelle l'infection humaine est associée pour la première fois à des symptômes de fièvre hémorragique et d'encéphalite, avec une mortalité élevée (Barnard et Botha, 1977). De 1973 à 1976, le Soudan est également marqué par une épizootie (Eisa *et al.*, 1977 ; Saleh *et al.*, 1981), puis c'est au tour de l'Égypte en 1977. L'épidémie égyptienne, d'une ampleur considérable, fait de la FVR un sujet d'actualité et l'inscrit au rang des maladies émergentes prioritaires. En effet, outre les importantes pertes en bétail, on estime à 200 000 le nombre de personnes infectées, et 598 décès liés à la FVR sont confirmés (El-Akkad, 1978; Meegan, 1979).

Depuis lors, la maladie s'est étendue à la quasi-totalité de l'Afrique sub-saharienne et sévit dans de nombreux pays sous différentes formes (cf. Figure 5). Elle se manifeste sous forme épizoo-épidémique en 1987 et en 1998 à la frontière sénégal-mauritanienne (Digoutte et Peters, 1989; EMPRES, 2000), à nouveau en Égypte en 1993 (Arthur *et al.*, 1993) et en 1997 (Abd El-Rahim *et al.*, 1999), puis au Kenya en 1997-98 (Davies, 1975; Woods *et al.*, 2002).

Par ailleurs, des enquêtes sérologiques, menées dans des pays où aucune épidémie n'a encore été rapportée, révèlent une importante circulation du virus sous forme enzootique : au Niger (Akakpo *et al.*, 1991), à Madagascar (Mathiot *et al.*, 1884), au Tchad et au Cameroun (Durand *et al.*, 2003; Maurice, 1967), en République Centrafricaine (Gonzalez *et al.*, 1987; Gonzalez *et al.*, 1983; Meunier *et al.*, 1987), au Gabon (Findlay *et al.*, 1936), en Angola (Kokernot *et al.*, 1965a), au Botswana (Kokernot *et al.*, 1965b) ainsi que dans de nombreux pays ouest-africains (Akakpo *et al.*, 1989 ; Ksiazek *et al.*, 1989; Meegan *et al.*, 1983; Saluzzo *et al.*, 1987b).

En outre, le virus est récemment sorti de son aire de répartition originelle, gagnant l'Arabie Saoudite et le Yémen en 2000 (CDC, 2000; Miller *et al.*, 2002), où la naïveté des populations humaines et animales a favorisé l'apparition de l'épizoo-épidémie.

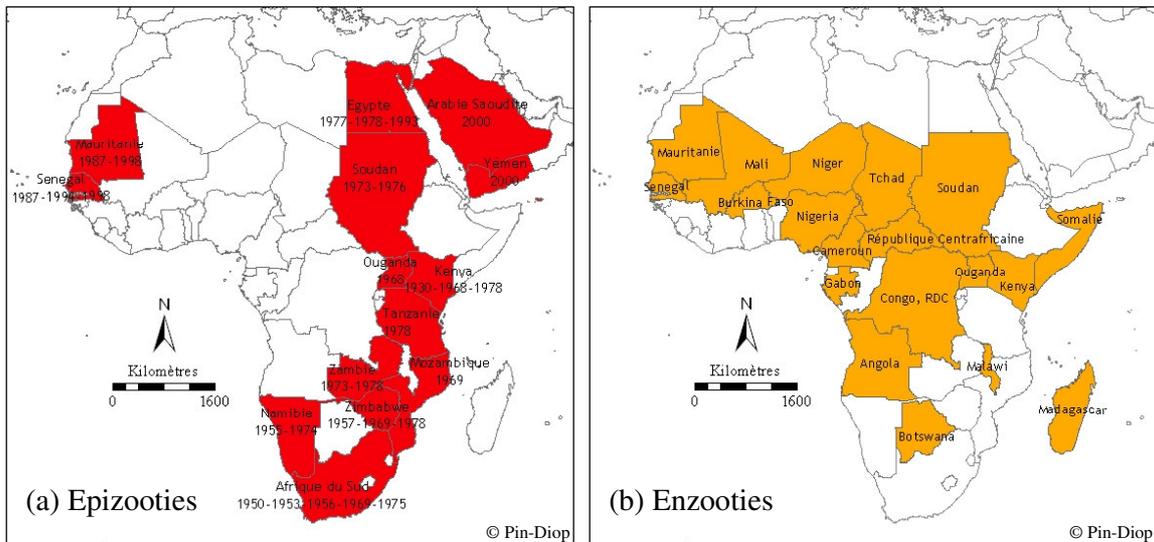


Figure 5 : Distribution spatio-temporelle des épizooties (a) et des enzooties (b) de FVR (sources : Shimshony et Barzilai, 1983 et bulletins de l'OIE)

Cette extension géographique montre que la FVR constitue un risque non négligeable pour des populations encore non immunes, dans des régions potentiellement favorables à sa transmission, telles que l'Afrique du Nord, l'Ouest de l'Asie ou encore le Sud de l'Europe et des Etats-Unis (Hoogstraal *et al.*, 1979). Il suffirait en effet que le virus soit introduit dans une zone où les conditions nécessaires à la réalisation du cycle (présence des hôtes et des vecteurs) sont réunies pour que la transmission ait lieu. On peut ici citer Kaschula : « *Si le virus était introduit aux Etats-Unis en été ou à l'automne, il se disperserait sûrement rapidement. Le type de paysage en Afrique du Sud, où la maladie est largement présente, ressemble fort à ceux rencontrés dans ce pays* » (Kaschula, 1957, cité par Shimshony et Barzilai, 1983).

Par ailleurs, l'immunité acquise par les populations humaines et animales après une épidémie ne garantit pas une protection à long terme dans les régions concernées, comme le montre la récurrence des épidémies ou des épizooties dans le bassin du fleuve Sénégal et en Egypte. Enfin, dans les pays où la maladie se maintient sous forme enzootique, le risque d'amplification est toujours présent. Ces constatations ont conduit certains pays, tels que le Sénégal et la Mauritanie, à mettre en place de réseaux de surveillance épidémiologique.

Les méthodes de lutte ou de prévention contre la FVR varient selon les pays, en fonction des formes prises par la maladie. En effet, la réalisation du cycle de la FVR dépend de l'écosystème dans lequel sévit le virus et conditionne l'allure épidémiologique des épisodes ainsi que les méthodes de prévention. La caractérisation des écosystèmes favorables à la FVR peut apporter un éclairage sur les différents mécanismes de transmission.

1.2.2. Les écosystèmes à « dambos »

1.2.2.1. Caractéristiques d'un « dambo »

Les épizooties de FVR au Kenya (Davies *et al.*, 1985), en Afrique du Sud (McIntosh et Jupp, 1981), en Zambie (Davies *et al.*, 1992) et au Zimbabwe (Swanepoel, 1981) ont toutes suivi des périodes de pluies exceptionnellement abondantes. L'activité du virus en Afrique orientale et méridionale a été rapportée à proximité de formations nommées *dambos*, connues pour être les habitats des moustiques du genre *Aedes* et *Culex*. Les *dambos* sont des dépressions situées en amont des réseaux de drainage, caractéristiques des écosystèmes est et sud-africains. Ils sont recouverts d'herbes dans des proportions variables et la végétation boisée environnante s'arrête généralement de manière abrupte à leurs abords.

L'existence et la forme d'un *dambo* dépendent du relief environnant, de la végétation et du type de sol, et leur longueur s'étend de quelques mètres à plusieurs kilomètres. Leur profil reste cependant semblable, quelle que soit leur taille (Figure 6).

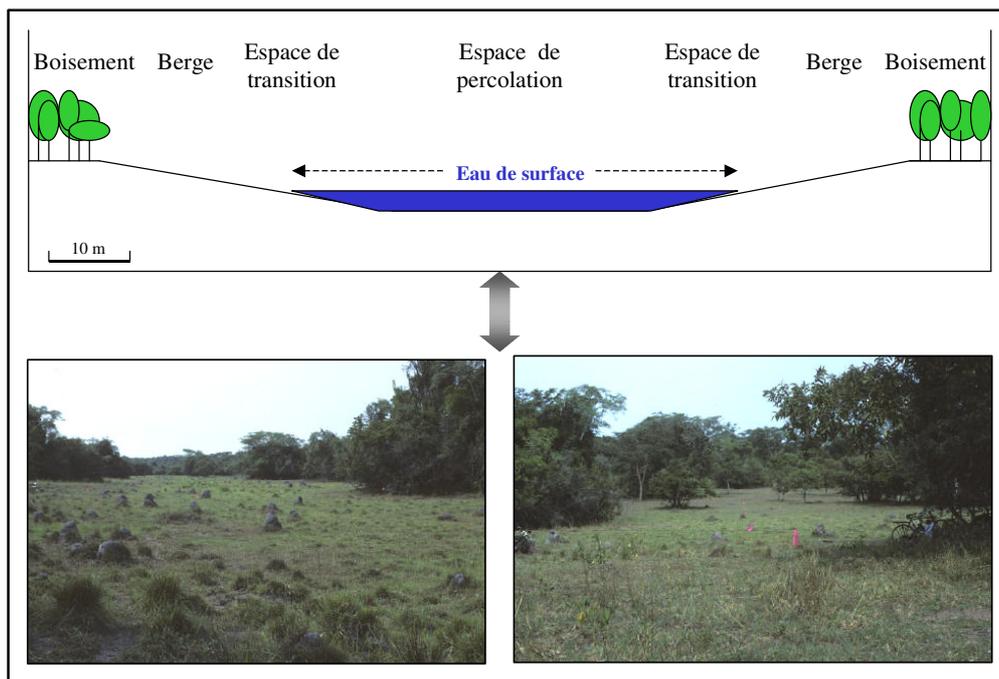


Figure 6 : Profil type d'un *dambo* (d'après Linthicum *et al.*, 1983)

Les berges, recouvertes de galets, descendent en pente douce de la zone boisée vers la zone de percolation*. La zone de transition est caractérisée par une diminution de la taille des galets et une augmentation de l'humidité du sol, et la végétation herbacée, discontinue sur la grève, se densifie au fur et à mesure que l'on s'approche du centre (Mackel, 1974).

Dans les régions soumises à l'alternance de saisons sèches et humides, les *dambos* sont régulièrement arrosés par les pluies, mais l'eau s'infiltré immédiatement dans la zone de percolation. Ils ne sont réellement inondés, avec apparition d'eau de surface, qu'après un épisode pluviométrique long et intense, phénomène relativement rare dans les écosystèmes décrits. L'intervalle entre deux inondations réelles atteint fréquemment plusieurs années. Dans ce cas, le *dambo* se remplit au début de la saison des pluies, puis s'assèche progressivement, par évaporation et percolation.

1.2.2.2. Dynamique des vecteurs autour d'un dambo et cycle de la FVR

La dynamique des vecteurs à proximité des *dambos* dans différentes zones écologiques du Kenya est particulièrement bien décrite par Linthicum *et al.* Dans ce pays, touché par de nombreuses épizooties de FVR, la quasi-totalité des cas cliniques et des séropositifs a été observée à proximité de *dambos* inondés, dans les zones écologiques II, III et IV (Davies, 1975). Cette classification des zones éco-climatiques est-africaines, due à Pratt *et al.* (Pratt *et al.*, 1966), se base principalement sur le climat et la végétation :

- la zone écologique II correspond à un climat équatorial humide à sub-humide et inclut les forêts côtières ou d'altitude, les prairies ou les savanes arbustives avec des clairières naturelles ou créées par l'homme ; ces prairies ont un excellent potentiel pour l'élevage intensif ;
- la zone écologique III correspond à des régions sub-humides à semi-arides, composées de bois humides et de prairies plus ou moins couvertes par des arbustes ; la végétation ligneuse est composée majoritairement de *Combretum sp.* ou d'autres arbres et arbustes permanents et le potentiel pour l'élevage y est élevé.
- la zone écologique IV correspond à des régions semi-arides, dominées par des arbustes du genre *Acacia* ou *Themada* ; ce type de paysages est favorable à l'élevage et à la faune sauvage.

Ces écosystèmes permettent la transmission du virus de la FVR pour plusieurs raisons. D'une part, ils sont fréquentés par les troupeaux de bétail et de petits ruminants, hôtes de la maladie. D'autre part, lorsque les pluies sont abondantes et durent longtemps, les *dambos* sont inondés et offrent un habitat de choix pour les vecteurs du genre *Aedes*, *Culex* et *Anopheles*. Selon les espèces, les dynamiques de population varient, mais on retrouve malgré tout des caractéristiques communes à l'intérieur de chaque genre.

Les premiers vecteurs à émerger d'un *dambo* inondé sont les *Aedes*, dont les œufs, pondus dans le sol lors de l'inondation précédente, sont restés en diapause. Un nombre très important

d'adultes potentiellement infectés apparaissent dans les 15-20 jours après l'inondation. Puis c'est au tour des *Culex* et des *Anopheles*, dont les adultes ont colonisé le milieu et pondus à la surface de l'eau, de se multiplier (Linthicum *et al.*, 1983; Linthicum *et al.*, 1984). Ils s'infectent en piquant les animaux déjà contaminés par les *Aedes*.

Les travaux menés au Kenya et en Afrique du Sud tendent à prouver que la transmission du virus de la FVR est intimement liée à l'importance de l'inondation des *dambos*. Le cycle implique les ruminants domestiques et les vecteurs, chacun de ces derniers jouant un rôle particulier (Davies, 1975). Les *Aedes* maintiennent l'enzootie dans une région, par le biais des œufs infectés en dormance dans le sol (Linthicum *et al.*, 1985). Puis, selon le régime pluviométrique, différents scénarios peuvent se produire (cf. Figure 7).

- Dans le premier cas (a), les pluies ne sont pas assez abondantes pour que les *dambos* soient mis en eau. Il n'y a alors ni émergence ni multiplication de vecteurs et le cycle est bloqué.
- Dans le deuxième cas (b), les pluies permettent la mise en eau des *dambos*, mais l'assèchement est rapide. Les œufs d'*Aedes* ont le temps d'éclore et de donner naissance à des adultes infectés, qui vont initier un cycle enzootique en piquant les animaux des environs. Cependant, comme les œufs d'*Aedes* ont besoin d'être asséchés pour éclore, il n'y a qu'une seule génération possible lors de la saison des pluies. Lorsque les *dambos* s'assèchent rapidement, les autres espèces de vecteurs n'ont pas le temps de se multiplier et la transmission du virus reste à bas-bruit.
- Dans le dernier cas (c), la pluviométrie est suffisamment importante et étalée dans le temps pour permettre à la fois l'émergence des *Aedes* et la multiplication des *Culex* et des anophèles. Les premiers initient alors le cycle en piquant les ruminants, et les derniers prennent le relais, amplifiant le phénomène. On assiste alors à une épizootie, avec des cas cliniques nombreux et manifestes (Pope *et al.*, 1992).

Dans les écosystèmes de *dambos*, c'est donc essentiellement le régime pluviométrique qui conditionne l'allure épidémiologique de la maladie. L'écologie particulière des vecteurs y est relativement simple, et leur activité est directement corrélée à la pluviométrie. Nous verrons au chapitre 3 (§3.1.2.3) comment ces caractéristiques ont été exploitées pour prédire les épisodes de FVR.

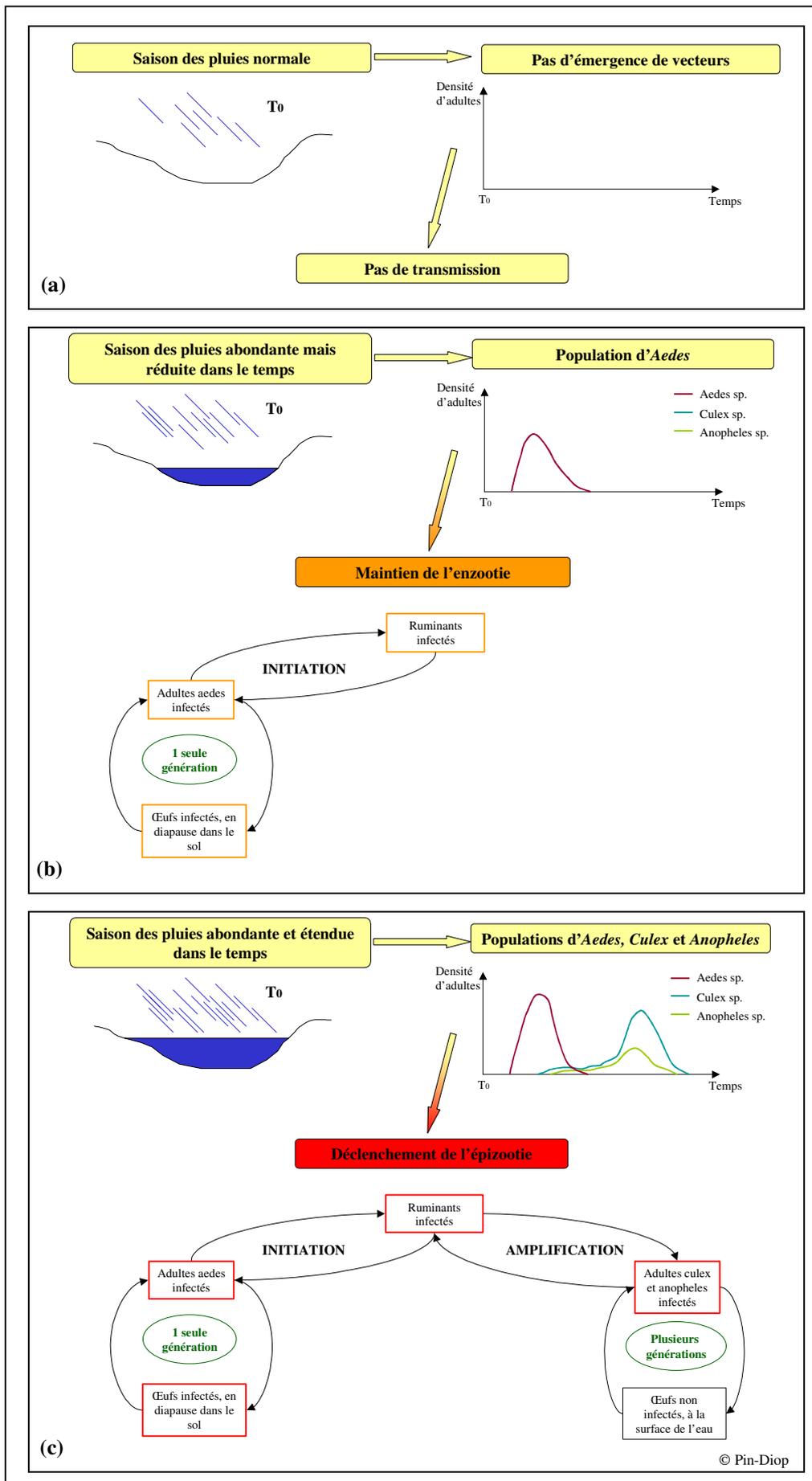


Figure 7 : Trois scénarios possibles de transmission de la FVR dans un écosystème à *dambo*s.

1.2.3. Les autres écosystèmes

1.2.3.1. Les vallées du Nil et du fleuve Sénégal

Dans les régions arides du Sahel et d'Afrique du Nord, les épisodes connus de FVR ont eu lieu dans des zones régulièrement irriguées ou inondées (Peters et Meegan, 1981; Wilson *et al.*, 1994). La première épizoo-épidémie relevée en Egypte, en octobre 1977, suit de près les épizooties soudaniennes de 1973 et 1976 (Eisa *et al.*, 1977). Le virus est alors introduit dans un écosystème nouveau, très différent de ceux qui avaient été décrits précédemment, faisant un nombre important de victimes humaines et animales (Meegan *et al.*, 1980).

Bien qu'il existe plusieurs subdivisions écologiques en Egypte, certains traits caractéristiques se retrouvent d'une région à l'autre. Le pays est dominé par le désert, à l'exception de la verdoyante vallée du Nil, dans laquelle est concentrée la majorité de la population. La pluie est négligeable mais l'eau d'irrigation est présente partout dans cette vallée dédiée aux cultures. Les différents canaux, fossés et réceptacles d'eaux usées constituent d'excellents gîtes pour les moustiques. Le bétail domestique et les chameaux sont omniprésents dans les champs, les villages et les hameaux.

L'introduction du virus en Egypte est jusqu'à présent sujet à controverse. Hoogstraal *et al.* évoquent l'importation de chameaux virémiques en provenance du Soudan, s'appuyant sur la séroprévalence élevée (30% environ) mesurée chez ces animaux après leur passage à la frontière. Sellers *et al.* envisagent une autre possibilité : l'arrivée d'insectes hématophages infectés, emportés par les vents depuis le Soudan, dans la zone de convergence intertropicale (Sellers *et al.*, 1982). Une fois le virus importé dans la vallée du Nil, le cycle de transmission s'est mis en place entre les vecteurs et les hôtes.

Contrairement à ce qui est observé au Kenya, le cycle en Egypte n'implique qu'une espèce de vecteur, *Culex pipiens*, qui domine de façon écrasante les autres espèces (cf. Tableau 4). Ce moustique pond à la surface de l'eau, indifféremment propre ou souillée, et trouve donc des gîtes de ponte parfaitement adaptés dans l'eau des barrages ou dans les zones de cultures irriguées de la vallée. Différentes modalités de dissémination du virus lors de l'épidémie de 1977 ont été envisagées, sans que les observations de terrain ne permettent de trancher définitivement en faveur de l'une ou de l'autre. En effet, il est difficile d'expliquer l'ampleur de la dissémination en se limitant strictement au schéma « classique », c'est-à-dire une transmission vectorielle entre animaux puis une contamination directe de l'homme lors de l'abattage.

Tableau 4 : Diptères collectés en Egypte dans les zones d'épidémies de FVR, d'octobre 1977 à novembre 1978 (d'après Hoogstraal *et al.*, 1979)

| Espèce | Nombre | Pourcentage |
|--------------------------|--------|-------------|
| <i>Culex pipiens</i> | 39150 | 92,61 |
| <i>Culex univittatus</i> | 1900 | 4,49 |
| <i>Culicoides sp.</i> | 200 | 1,42 |
| Autres espèces | 625 | 1,48 |
| Total | 41875 | 100 |

Certains auteurs suggèrent donc une transmission mécanique entre animaux, ou de l'animal à l'homme, par des arthropodes hématophages ; cette hypothèse est rendue plausible par les virémies très élevées mesurées chez les animaux domestiques (Hoogstraal *et al.*, 1979). La résurgence de la FVR en Egypte en 1978 puis en 1993 pourrait quant à elle être due à la survie pendant l'hiver de moustiques adultes infectés, à une transmission transovarienne chez certains vecteurs, à une persistance du virus chez des moustiques en hibernation, ou encore à une réintroduction à partir de foyers endémiques.

La vallée du fleuve Sénégal est également devenue une zone de circulation virale, depuis la première épizoo-épidémie de 1987. Cet épisode de grande ampleur a touché la basse et la moyenne vallée en octobre 1987, faisant plus de 200 morts dans la ville de Rosso (Ksiazek *et al.*, 1989). Soumise à un climat sahélien, la vallée est arrosée par des pluies d'intensités variables d'une année à l'autre ; la pluviométrie annuelle est comprise entre 150 et 450 mm. La saison des pluies dure habituellement de juillet à octobre puis laisse place à la saison sèche. Une partie de la population pratique un élevage traditionnel transhumant, représentant un cheptel estimé en 1992 à 355 690 bovins, 351 000 ovins et 378 300 caprins. De récents aménagements hydro-agricoles (le barrage anti-sel de Diama réalisé en 1985 et le barrage de Manantali réalisé en 1990) ont conduit à de profondes modifications des activités rurales, en particulier au développement des cultures irriguées dans le bassin du fleuve (Thiongane *et al.*, 1996).

Dans cette zone, le principal vecteur incriminé dans les foyers de FVR est à nouveau *Culex pipiens* (EMPRES, 2003). Le développement du vecteur dans les zones irriguées et le passage de densités importantes de bétail domestique, dont une partie provient de la zone d'enzootie mauritanienne, expliquent la ré-émergence régulière du virus. Il ne semble pas y avoir de phénomène enzootique dans cette région.

1.2.3.2. Les écosystèmes semi-arides et arides

1.2.3.2.1. Au Moyen-Orient

En 2000, le virus a atteint l'Arabie Saoudite et le Yémen, selon des modalités encore indéterminées, provoquant la première épizootie de FVR hors du continent africain. En Arabie Saoudite, tous les foyers ont été identifiés dans des zones particulièrement arides, caractérisées par un sol sec et rocailleux et des espèces ligneuses du genre *Acacia*, et où l'élevage est dominé par les petits ruminants (Miller *et al.*, 2002).

Bien que ces régions soient *a priori* hostiles au développement de moustiques vecteurs, ces derniers s'adaptent. Les gîtes larvaires sont établis au sein même des habitations : les *Culex* utilisent les réceptacles d'eaux usées et les *Aedes* pondent dans le sol de jardins individuels, irrigués naturellement ou artificiellement et rapidement asséchés. Les espèces potentiellement vectrices, capturées après l'épizootie, étaient *Aedes vexans arabiensis*, *Aedes unilineatus*, *Culex pipiens*, *Culex tritaeniorhynchus* et *Anopheles sp.*

Le virus n'ayant jamais été isolé auparavant dans ces deux pays, il semble qu'il ait été introduit à partir de l'Afrique de l'Est, soit par des moustiques infectés portés par les vents, soit par des ruminants virémiques importés. Quoiqu'il en soit, le virus a trouvé sur place des conditions favorables à sa transmission. Les scientifiques ignorent par contre si un cycle enzootique a été mis en place dans la péninsule arabique et les mécanismes de transmission restent encore obscurs.

1.2.3.2.2. En Afrique de l'Ouest

Saluzzo *et al.* ont prouvé dès 1987 l'existence d'un foyer de transmission du virus de la FVR au sud de la Mauritanie, le long de la frontière avec le Mali. Lors d'une enquête dans six pays ouest-africains (Sénégal, Mauritanie, Gambie, Guinée, Burkina Faso, Niger), les prévalences en anticorps mesurées sur les ruminants des régions de Sélibaby, Kiffa et Aïoun Al Atrous, dans le Sud mauritanien, étaient largement supérieures à celles de la sous-région. Ce résultat montre que le virus avait circulé dans une zone aride et pendant une période de sécheresse (1982-1985) (Saluzzo *et al.*, 1987b). Il est fort probable que ce foyer enzootique sud-mauritanien ait été à l'origine des épizoo-épidémies sévissant depuis 1987 dans la vallée du fleuve Sénégal, par le biais d'animaux infectés transhumants entre les deux régions (Saluzzo *et al.*, 1987a).

La zone est composée d'une mosaïque d'écosystèmes, différenciés essentiellement par la nature de l'eau libre : vallée du fleuve Sénégal, lacs et grands oueds, mares temporaires et zones humides sans eau libre.

La circulation virale est avérée dans chacun de ces écosystèmes, mais est significativement plus intense dans l'écosystème des lacs et des grands oueds (Lancelot *et al.*, 1989).

Au Burkina Faso, la séroprévalence des ruminants domestiques est significativement plus élevée dans la zone sahélienne, au nord du pays (Akakpo *et al.*, 1989; Gonzalez *et al.*, 1992).

Au Niger également, la séroprévalence est maximale dans le département de Zinder, où le climat sub-désertique semble pourtant peu favorable à la prolifération des vecteurs (Akakpo *et al.*, 1991).

Au Sénégal enfin, le réseau d'épidémiosurveillance ainsi que de nombreuses enquêtes au niveau du pays indiquent que le virus peut circuler dans des milieux très différents (Figure 8).

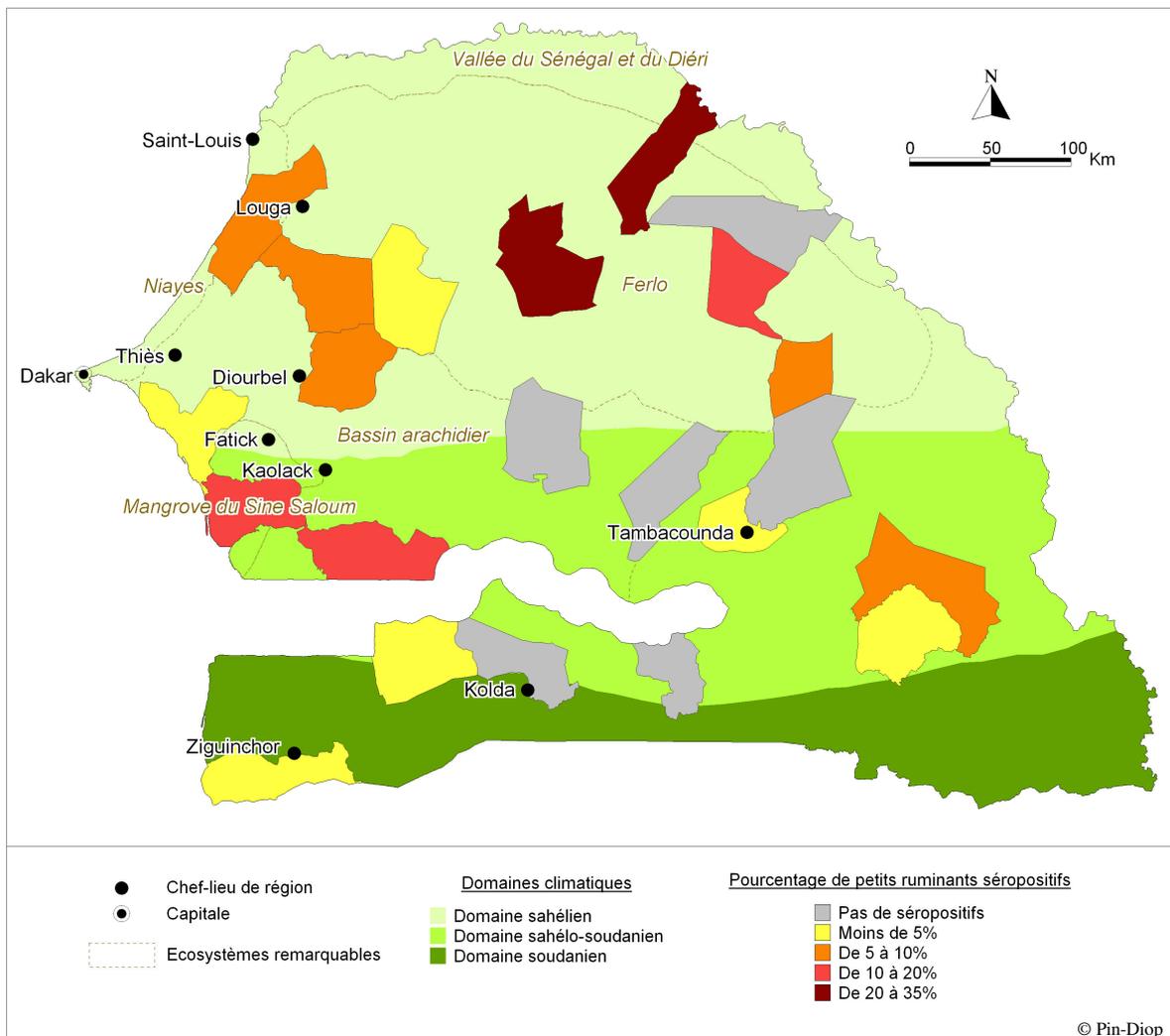


Figure 8 : Séroprévalence de la FVR chez les petits ruminants du Sénégal en 1988 (Source : Guillaud *et al.*, 1988)

Des enquêtes de séroprévalences, menées en 1988 au niveau du pays, montrent que le virus a circulé dans le Ferlo, dans les Niayes (zones de maraîchage), dans la mangrove du Sine-Saloum ou encore en milieu sahélo-soudanien au sud-est du pays (Guillaud *et al.*, 1988; Ksiazek *et al.*, 1989). A l'heure actuelle, l'aire réelle d'enzootie est le Ferlo, zone agrosylvopastorale soumise à un climat sahélien (Thiongane *et al.*, 1996). Dans cette région caractérisée par la présence de mares temporaires inondées en saison des pluies, deux genres de vecteurs potentiels (*Aedes* et *Culex*) cohabitent et pourraient jouer un rôle complémentaire, comme c'est le cas dans les écosystèmes à *dambos*.

Cependant, la corrélation entre pluviométrie et occurrence de la FVR observée en Afrique orientale et méridionale ne se retrouve pas en Afrique de l'Ouest, puisque les épisodes relevés au Sénégal ont eu lieu lors d'années à pluviométrie normale ou déficitaire. Cette observation suggère l'existence de mécanismes de maintenance et de transmission différents (Fontenille *et al.*, 1995; Zeller *et al.*, 1997; Ndione *et al.*, 2003).

Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les caractéristiques de la FVR, afin que les enjeux scientifiques et économiques de son étude apparaissent clairement. Il s'agit d'une maladie vectorielle qui, bien que rarement mortelle pour l'homme, l'affecte durement d'un point de vue économique. Les avortements en série des femelles de petits ruminants et la mortalité de leurs jeunes sont une lourde perte en milieu sahélien, où tout repose sur l'élevage. La revue des épisodes de FVR et des écosystèmes qui leur sont associés fait apparaître une dichotomie entre l'Afrique orientale ou méridionale et l'Afrique de l'Ouest. A l'Est et au Sud, la maladie se manifeste dans des écosystèmes à *dambos*, suite à des périodes de pluies abondantes, étalées dans le temps et dans l'espace. Le cycle de transmission étant relativement simple, c'est l'inondation des *dambos* qui détermine l'importance de la transmission. Ce phénomène a été utilisé par les scientifiques pour élaborer de modèles prédictifs opérationnels. A l'Ouest en revanche, la FVR sévit majoritairement dans des écosystèmes semi-arides. Malgré de nombreuses études sur le terrain, des zones d'ombre persistent sur les modalités de transmission et de maintenance du virus, en particulier en zone sahélienne. Or c'est justement dans cette région que le virus circule sous forme enzootique, avec le risque permanent d'une explosion épizootique ou épidémique. Les épisodes de FVR

sont étroitement dépendants du milieu dans lequel circule le virus, en milieu sahélien comme ailleurs, ce qui légitime notre démarche en environnement-santé. Cette approche nous contraint à nous baser sur des concepts fondateurs solides, issus de la géographie et de l'épidémiologie, ainsi que sur une connaissance approfondie du milieu dans lequel nous travaillons.

Chapitre 2. Cadres conceptuel et géographique

Introduction

Après avoir détaillé les caractéristiques de la FVR, nous avons été tentés d'adopter la démarche classique des géographes, qui consiste à présenter immédiatement la zone d'étude. Toutefois, notre approche n'étant pas strictement géographique, nous nous sommes permis d'aborder différemment ce second chapitre de cadrage. Travailler dans l'interdisciplinarité nécessite de définir correctement les objets traités et d'adopter un vocabulaire commun, compréhensible par tous. Nous commençons donc par définir les concepts fondateurs sur lesquels s'appuie notre travail : le risque, la santé et le complexe pathogène. Les deux premiers sont des notions abstraites et très subjectives, qui méritent d'être clarifiées. Le troisième permet de mettre en évidence les éléments qui influencent le cycle d'une maladie dans un milieu particulier, propriété qui nous intéresse au premier chef dans le contexte de la FVR. Cela nous conduit à présenter les caractéristiques géographiques et socio-économiques de notre zone d'étude, la communauté rurale sahélienne de Barkedji. Nous utilisons alors le concept de complexe pathogène pour détailler les interactions entre les éléments du système de la FVR à Barkedji et en souligner la complexité. Enfin, le chapitre s'achève sur notre définition du risque de transmission de la FVR à Barkedji, et sur l'énoncé des éléments que nous avons choisi de cibler pour estimer ce risque.

2.1. Les concepts fondateurs de l'étude

2.1.1. Le risque ou les risques

2.1.1.1. Le risque des géographes et des épidémiologistes

Les acceptions du risque sont aussi diverses que les disciplines scientifiques qui s'intéressent à lui. Plutôt que dresser une liste exhaustive et rébarbative du sens que chaque discipline donne au risque, nous rapportons ici seulement les acceptions qui nous concernent directement : celles du géographe et celle de l'épidémiologiste.

Pour les géographes, le risque est « *la perception d'un danger possible, plus ou moins prévisible par un groupe social ou un individu qui y est exposé* » (Veyret *et al.*, 2003). Dans cette définition, la notion de perception est fondamentale : un même événement peut ne pas

être considéré comme dangereux par certaines populations et être envisagé comme très dangereux par d'autres groupes. Par exemple à Barkedji, la schistosomose humaine urinaire, due au parasite *Schistosma haematobium*, n'est pas considérée comme une maladie. Des enquêtes ont montré que dans certaines localités, 98% des enfants de moins de 10 ans sont atteints, ayant été infestés par le parasite au cours de leurs baignades dans les mares temporaires. Pour les habitants, les urines striées de sang, caractéristiques de l'infestation par le parasite, sont normales. Pour les occidentaux, la schistosomose urinaire est une pathologie importante, qu'il est nécessaire de traiter. La perception du risque est donc très relative !

Le risque est composé de deux éléments fondateurs : l'aléa et la vulnérabilité.

L'aléa est un « événement possible qui peut être un processus naturel, technologique, social ou économique et sa probabilité de réalisation » (Veyret, *op. cit.*). L'aléa qui se réalise a des conséquences sur les populations et sur les biens, ses effets pouvant affecter plus ou moins fortement le fonctionnement des sociétés humaines ou des écosystèmes.

On définit comme enjeux les « éléments ou systèmes qui sont sous la menace d'aléas de nature variée » (Veyret, *ibidem*). Les enjeux sont des personnes, des biens, des équipements, l'environnement. Les dommages et préjudices qui peuvent les affecter amènent à s'interroger sur leur vulnérabilité.

La vulnérabilité est le « niveau de conséquences prévisibles d'un aléa sur les enjeux » (Veyret, *ibidem*). Elle peut être humaine, socio-économique et environnementale et se mesure par l'estimation des dommages potentiels pouvant affecter un enjeu tel que le patrimoine construit ou la population.

La vulnérabilité d'une population est souvent affectée par des facteurs socio-économiques ou culturels, et ce sont généralement les pays du sud qui paient le plus lourd tribut aux aléas, comme en témoignent les exemples récents du cyclone Mitch en 1998, du tsunami dans le sud asiatique en 2004, et du tremblement de terre au Pakistan en octobre 2005. Les effets dramatiques en terme de victimes comme de dégâts traduisent une forte vulnérabilité de ces pays (Veyret et Meschinet de Richemond, 2003). Certains auteurs reconnaissent même l'indice de développement humain (IDH), intégrant le PIB/habitant, la santé et l'éducation, comme marqueur synthétique de la vulnérabilité (D'Ercole et Pigeon, 1999).

En effet, la pauvreté n'est pas réductible au seul revenu... elle révèle bien souvent une privation des besoins essentiels en matière de santé, ce qui, en cas de catastrophe, contribue à alourdir les pertes humaines. Une éducation insuffisante, l'analphabétisme, peuvent conduire

à une méconnaissance de l'aléa et des moyens d'y faire face. Enfin, la pauvreté influe sur l'habitat, souvent bâti de manière précaire. L'importante croissance de l'urbanisation, la multiplication de mégalopoles dans les pays en voie de développement, expliquent l'extension d'espaces de fortes densités, dont la vulnérabilité est très élevée. Et ce d'autant plus que cette extension se traduit par l'occupation de terres vulnérables, telles que les rivages, les vallées inondables, les pentes instables, etc.

Le risque est le produit entre l'aléa et la vulnérabilité. Il témoigne des rapports entre l'homme et son milieu, et de sa capacité à gérer les aléas. Un aléa, s'il ne menace pas une population, ne constitue pas un risque, de même qu'une population vulnérable n'est pas à risque si elle n'est pas soumise à un aléa. Par ailleurs, le risque peut être réduit, et la catastrophe évitée, si la population maîtrise l'aléa. Par exemple, dans certaines zones menacées régulièrement par des cyclones, la mise en place de plans de surveillance et de prévention permet à la population de prendre à temps les mesures nécessaires.

L'épidémiologie est la « *science qui étudie, au sein de populations (humaines, animales, voire végétales), la fréquence et la répartition des problèmes de santé dans le temps et dans l'espace, ainsi que le rôle des facteurs qui les déterminent* » (Larousse 2004). Pour les épidémiologistes, le risque, de nature probabiliste, est « *la probabilité de survenue d'un danger, combinée à l'importance de ses conséquences indésirables* » (Toma *et al.*, 1996). Le danger est, dans la plupart des cas, lié à l'apparition d'un agent pathogène, que l'on peut finalement assimiler à l'aléa des géographes. L'enjeu est la santé des populations, qui sont plus ou moins vulnérables face à la maladie. Les « facteurs » évoqués dans la définition de l'épidémiologie sont des facteurs de risque, qui peuvent, selon le cas être causaux ou non.

Prenons un exemple pour illustrer ce propos. Dans la majeure partie du Sénégal, le paludisme est endémique, c'est à dire que le parasite est présent en permanence. Cela correspond à l'aléa. La vulnérabilité des populations est influencée par leur niveau de vie et d'éducation : on est moins exposé aux moustiques dans une maison climatisée et équipée de moustiquaires que dans un bidonville humide de la banlieue dakaroise. Et on est également plus facilement sensibilisé par les affiches de prévention lorsqu'on a appris à lire. Enfin, certaines catégories d'individus, en particuliers les enfants en bas âge, sont plus sensibles (ou vulnérables) que d'autres à l'infestation par le *Plasmodium falciparum*. Finalement, le risque vu par les épidémiologistes est en fait une composante du risque des géographes, correspondant au

risque sanitaire. Dans le paragraphe suivant, nous faisons une brève revue des différents types de risques.

2.1.1.2. Les types de risque

Les risques sont innombrables, et nous n'abordons ici que ceux dont la perception et la gestion s'accompagnent d'une dimension spatiale. Nous laissons donc de côté les risques financiers, par exemple. Les risques les plus évidents sont les risques environnementaux, lesquels se décomposent en risques naturels simples et risques naturels aggravés ou provoqués par les activités humaines :

- les premiers peuvent être par exemple la conséquence d'aléas sismiques et volcaniques ou d'aléas climatiques (cyclones, sécheresses, tempêtes, etc.) ;
- les seconds celle d'aléas dont l'efficacité est accrue par les activités humaines : la désertification, les incendies, les pollutions.

Les populations sont également exposées à des risques économiques, géopolitiques et sociaux, engendrés par l'accès à certaines ressources et leur partage. Pour en être convaincu, il suffit de s'attarder sur l'origine de la plupart des conflits : l'eau, le pétrole, le diamant, ne sont que les exemples les plus marquants. Quant au risque social, il renvoie généralement à la ségrégation et à la fragmentation urbaine, et fait référence à l'insécurité, qui s'avère être encore une fois un problème très actuel.

Nous en venons enfin à ce qui nous concerne au premier chef : les risques sanitaires. La plupart des risques évoqués ci-dessus sont perçus comme ayant des effets négatifs sur l'individu ou sur le groupe social. Ces effets se traduisent soit par la perte des biens, soit par la mort, soit par la maladie, rejoignant les risques sanitaires. Ces derniers peuvent être dus à des pollutions de l'environnement ou de l'alimentation, à l'insuffisance alimentaire, et surtout à la transmission d'agents pathogènes (virus, bactéries, parasites, prions).

De nos jours, de grandes peurs collectives se nouent autour des risques sanitaires, comme le montre la panique engendrée par l'ESB (Encéphalopathie Spongiforme Bovine ou « vache folle »), le SRAS (Syndrome Respiratoire Aigu Sévère) ou tout récemment la grippe aviaire. Le risque sanitaire apparaît au premier plan et mobilise les esprits, parce que les maladies infectieuses sont mouvantes, adaptables et un peu abstraites, finalement. Elles représentent une menace imprécise, de dissémination rapide, contre laquelle il est difficile de se prémunir.

Ce sentiment de vulnérabilité est d'autant plus fort en Occident qu'il réapparaît après une trentaine d'années de large recul de ces maladies, dû entre autres à l'apparition des antibiotiques et à l'accès de tous à l'hygiène de base. La persistance des maladies tropicales, tels le paludisme, la poliomyélite, la lèpre, restaient alors une réalité lointaine, ne concernant en pratique que les expatriés et les voyageurs. Restant chez soi, on pouvait encore les éviter... Il a fallu la dissémination du SIDA et l'apparition de nouvelles zoonoses (ESB, tremblante du mouton etc.) en Amérique du Nord et en Europe pour que les habitants de ces territoires soient brutalement ramenés à leurs peurs ancestrales (Brillet, 2003). Le discours souvent amateur et dramatique des médias sur les éventuelles pandémies*, doublé d'une conscience collective qui n'admet plus l'exposition au risque, fait du contrôle sanitaire une priorité publique. L'enjeu de la lutte contre les maladies infectieuses est la santé des populations, s'échelonnant du niveau local au niveau planétaire selon la maladie considérée. Ceci nous mène à définir la santé et plus particulièrement ses relations avec l'espace.

2.1.2. Santé et espace : quelles relations ?

2.1.2.1. Qu'est-ce que la santé ?

Jusqu'à la définition de l'OMS en 1946, la santé était principalement abordée par ses dimensions physiques et psychologiques, toujours de façon très normative. Pour avoir la santé, il fallait répondre à certains critères : poids, capacités visuelles, auditives, respiratoires etc. Selon le Larousse, par exemple, la santé est un « *état de bon fonctionnement de l'organisme* »... En 1946, l'OMS dépasse cette approche limitée en définissant la santé comme « *un état de complet bien-être physique, mental et social et qui ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité* ». On suggère alors que la santé est multidimensionnelle, liée au bien-être physique, mental et social, et par conséquent elle est également une expérience subjective et personnelle.

Il s'agit donc d'un concept complexe, pluriel, dont les composantes ne se bornent pas seulement au point de vue strictement médical. C'est la combinaison d'un certain nombre de facteurs déterminants qui conduit à la santé ou à son absence :

- Les facteurs sanitaires : ils concernent à la fois ce qui se rapporte au système de santé (organisation du système de soins, état des connaissances médicales, personnels et équipements, accès aux soins) et ce qui concerne l'individu lui-même, en terme de facteurs biologiques (facteurs génétiques, physiologiques, physiques et psychiques).

- Les facteurs politiques : la planification économique et sociale, la législation sanitaire, les aides internationales, etc.
- Les facteurs socio-économiques : l'habitat, l'urbanisation et l'aménagement rural, les modes de vie, la situation de l'emploi, les modes de consommation, les loisirs.
- Les facteurs psycho-culturels : l'éducation, la mentalité des populations devant les problèmes sanitaires, les coutumes, croyances et traditions en matière de santé.
- Les facteurs démographiques : la répartition des populations par âge, la politique gouvernementale de planification familiale, la concentration urbaine et la dissémination rurale, les migrations etc.
- Les facteurs environnementaux : climat, végétation, relief, ressources du sol, etc.

La santé humaine ou santé publique est étroitement liée à la santé animale, pour des raisons tant médicales qu'économiques. En effet, l'animal, s'il est atteint par une zoonose, peut être source de contamination pour l'homme. Les zoonoses sont extrêmement nombreuses et leur gravité est variable, allant de la bénignité, comme dans le cas de la fièvre aphteuse, à une mortalité élevée, comme dans le cas de la rage.

Par ailleurs, les conséquences de la santé animale sur la santé humaine peuvent être indirectes, lorsque la maladie entraîne la mort ou la baisse de production des animaux de rente. A ce propos, il apparaît que, à l'instar du risque, la notion de santé est variable d'une population à une autre. Dans les pays riches, les conséquences des maladies animales sont le plus souvent financières et, même s'il ne s'agit pas de remettre en question la gravité de l'abattage systématique des animaux (en cas de fièvre aphteuse ou de grippe aviaire, par exemple), c'est plus la santé morale et économique des éleveurs qui est en jeu.

Dans un pays en développement par contre, une épidémie de peste, éradiquant les troupeaux, aura des conséquences plus directes sur la santé de leurs propriétaires : ils mourront tout simplement de faim, n'ayant que le lait de leurs animaux comme ressource en période de soudure⁸. Tout est donc question de référence, et il est impératif d'appréhender le contexte dans lequel on se situe lorsqu'on travaille sur la santé.

⁸ Période qui sépare la fin de la consommation de la récolte de l'année précédente et l'épuisement des réserves, de la récolte suivante.

2.1.2.2. Comment l'espace influence-t-il la santé ?

Au paragraphe précédent, nous avons vu que les facteurs environnementaux et socio-culturels sont des composantes de la santé, sous-tendant naturellement l'implication du géographe. Ce qui nous vient à l'esprit, lorsqu'on évoque la santé et les facteurs géographiques, ce sont d'abord les catastrophes naturelles, parce qu'elles frappent l'imagination. Cependant, l'espace géographique est également porteur de maladies, et leur impact sur la santé publique est bien plus important, en terme de mortalité, que les catastrophes climatiques. La relation entre espace et santé n'étant pas forcément évidente pour le profane, nous essayons dans ce paragraphe de l'explicitier et d'en donner des exemples concrets.

De prime abord, l'espace est porteur d'inégalités sociales et économiques, et donc de disparités dans l'accès à la santé. Il joue dans ce cas un rôle indirect dans le développement des maladies, en favorisant par exemple leur apparition chez des personnes affaiblies, malnutries ou soumises à de mauvaises conditions d'hygiène. Mais le milieu peut être plus qu'un facteur favorisant : il peut être la condition *sine qua non* de la transmission de la maladie, en permettant la réalisation de son cycle épidémiologique. Son implication dans la réalisation du cycle est plus ou moins grande selon les caractéristiques de la maladie. A ce propos, Cline écrit en 1970 : « *En général, la distribution des maladies infectieuses qui se maintiennent dans un cycle d'homme à homme est liée à des caractéristiques culturelles. Par contre, les maladies zoonotiques de l'homme tendent à avoir une distribution géographique plus restreinte, leurs cycles de maintenance dépendant de conditions écologiques contraignantes* » (Cline, 1970).

Prenons quelques exemples concrets dans le champ des pathologies humaines et animales pour illustrer ce propos. Une maladie à transmission inter-humaine nécessite uniquement une densité suffisante de population pour se manifester. C'est alors principalement le contexte social qui détermine sa répartition. Le choléra à *Vibrio cholerae* par exemple, dont la transmission est féco-orale, est étroitement lié à l'occurrence de catastrophes naturelles ou de conflits armés avec déplacement de réfugiés.

Le germe se trouve initialement dans le milieu hydrique, en particulier les eaux saumâtres, mais l'épidémie n'est déclenchée que par l'un des évènements décrits ci-dessus. A ce moment, c'est l'homme qui devient le réservoir et qui permet la dissémination rapide de la maladie (Piarroux, 2001). En 2003, l'OMS a rapporté que le choléra sévissait sous forme pandémique, c'est à dire que la maladie s'était étendue aux cinq continents (Anonyme, 2003).

Ce phénomène de pandémie est observé pour d'autres maladies à transmission inter-humaine, telles que l'infection à VIH/SIDA ou l'hépatite B. Ces observations valident la première partie de la citation de Cline.

Par contre, il nous semble que la seconde partie de la citation s'appliquerait plus aux maladies à vecteurs, qu'elles soient humaines, animales ou zoonotiques, qu'aux zoonoses à strictement parler. En effet, la répartition de ces maladies suit étroitement celle de leur(s) vecteur(s), et reste donc généralement limitée aux espaces favorables au développement de ces derniers.

Un exemple qui vient immédiatement à l'esprit dans ce cas est la trypanosomose, transmise par la glossine, plus communément appelée mouche tsé-tsé. La glossine ne se trouve qu'en Afrique, dans la végétation au bord des cours d'eau et des lacs, dans les forêts-galeries ou dans les savanes arbustives. La trypanosomose ne se rencontre donc que sur ce continent ; son aire de répartition est limitée au nord par une ligne allant du Sénégal à la Somalie (soit du 14^{ème} au 10^{ème} parallèle nord) et au sud par le désert du Kalahari (soit le 20^{ème} parallèle sud).

De même, la répartition du paludisme est conditionnée par celle de son vecteur, l'anophèle. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les scientifiques craignent que le réchauffement de la planète, en modifiant l'aire de répartition de certains arthropodes vecteurs, n'entraîne une résurgence de maladies typiquement « tropicales » dans des pays plus septentrionaux.

C'est donc sur la question de la transmission des maladies vectorielles que l'interdisciplinarité de l'épidémiologie et de la géographie est la plus pertinente, même si la démarche a également été mise en œuvre pour des pathologies non vectorielles. Le premier à avoir formalisé les relations entre le milieu et la maladie est Maximilien Sorre, à qui l'on doit le concept de « complexe pathogène ».

2.1.3. Le complexe pathogène

2.1.3.1. Définition du complexe pathogène

L'espace est porteur de risques pour la santé humaine et la santé animale, elles-mêmes étroitement liées. Les inégalités de l'espace conduisent donc naturellement à des inégalités dans l'exposition au risque de telle ou telle maladie. L'implication du lieu dans le cycle épidémiologique d'une maladie est un sujet d'étude complexe, car les facteurs environnementaux sont multiples, variés, et liés les uns aux autres. Certains sont épidémiologiquement dangereux, d'autres possèdent par contre un effet protecteur. L'aptitude du lieu à favoriser la maladie est définie par le jeu entre les uns et les autres. Les facteurs environnementaux se modifient dans l'espace, parfois de façon indépendante ou à une échelle

différente, parfois de façon conjointe. Le cycle épidémiologique peut également subir des modifications internes par une substitution d'espèces vectorielles, d'hôtes intermédiaires, de souches pathogènes etc.

La mise en situation géographique du phénomène épidémiologique observé permet de mettre en évidence une hétérogénéité spatiale et d'individualiser des unités territoriales au sein desquelles les conditions du cycle épidémiologique demeurent comparables. Ces unités homogènes ont toutes les chances de présenter des niveaux de risques comparables. Les différents lieux sont donc inégalement dangereux d'un point de vue épidémiologique, ce qui justifie de prendre en compte l'espace dans l'étude du fonctionnement d'une maladie (Remy, 1988).

Devant la difficulté de situer la maladie dans son contexte spatial, le concept de « complexe pathogène » apparaît comme un outil méthodologique puissant. Il permet d'appréhender et d'ordonner l'ensemble des processus mis en jeu dans les relations entre l'environnement et les maladies transmissibles. Mettant l'accent sur l'interdépendance des divers acteurs impliqués dans un cycle épidémiologique et sur l'entrecroisement de leurs écologies particulières, il mène à une approche globale de ces relations.

Son auteur, Maximilien Sorre, le définit ainsi en 1933: « *l'interdépendance des organismes mis en jeu dans la production d'une même maladie infectieuse permet de dégager une unité biologique d'un ordre supérieur : le complexe pathogène. Il comprend, avec l'homme et l'agent causal de la maladie, ses vecteurs et tous les êtres ou facteurs qui conditionnent ou compromettent leur existence* » (Sorre, 1961). L'existence du complexe pathogène aboutit chez l'homme, ou chez l'animal si l'on considère la pathologie vétérinaire, à l'apparition de la maladie. Le couple homme-agent pathogène (virus, bactérie ou parasite) constitue le noyau du complexe, autour duquel gravitent les vecteurs, les hôtes de moindre importance et les éventuels réservoirs. Ces éléments évoluent dans un milieu, avec lequel ils sont en interaction. La structure du complexe pathogène est variable d'une maladie à l'autre et gagne en complexité lorsque le nombre d'hôtes intermédiaires ou de vecteurs augmente.

2.1.3.2. Exemples de complexes pathogènes

Prenons à titre d'illustration deux maladies animales : la tuberculose et la dicrocoeliose (ou infestation par la petite douve). La transmission de la tuberculose est horizontale directe, le plus souvent par voie respiratoire, parfois par voie digestive ou cutanée (cf. Figure 9). Le cycle épidémiologique est des plus simples, consistant en une contamination entre deux mammifères, hôtes définitifs de la mycobactérie responsable de la maladie. Le complexe

pathogène de la tuberculose ne comprend donc que l'homme (ou tout autre mammifère) et l'agent pathogène *Mycobacterium sp.*, intégrés dans un milieu qui les influence dans une faible mesure.

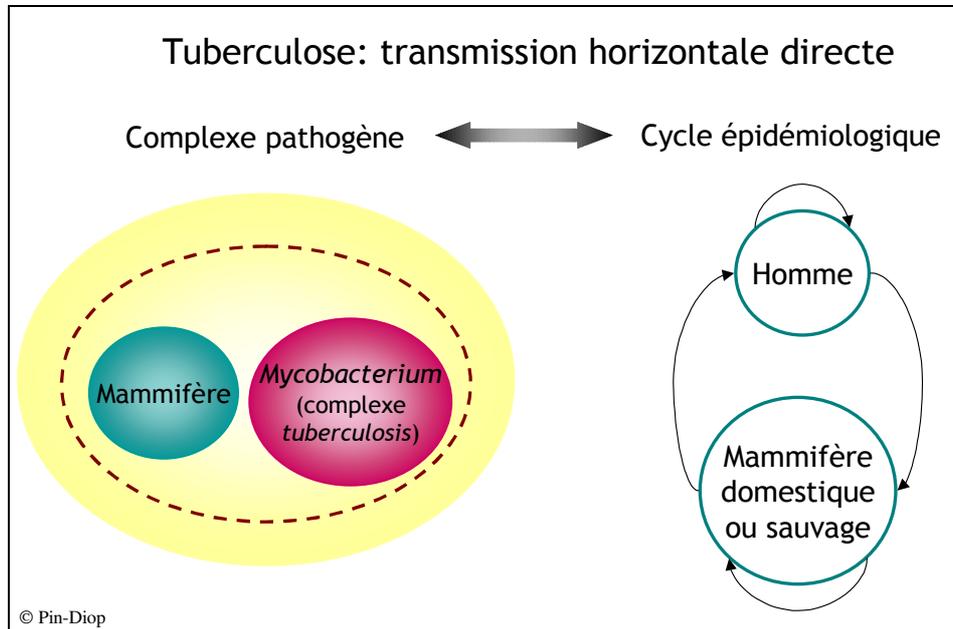


Figure 9 : Schéma du complexe pathogène et cycle épidémiologique de la tuberculose

Inversement, le cycle de la dicrocoeliose, comme c'est le cas pour de nombreuses parasitoses, est d'une grande complexité (cf. Figure 10). Il met en présence la petite douve *Dicrocoelium dendriticum*, un herbivore (l'hôte définitif) et deux hôtes intermédiaires : un escargot et une fourmi. La douve adulte, installée dans les canalicules biliaires de l'hôte définitif (un mouton généralement), émet des œufs qui sont excrétés dans les selles de l'hôte. Les œufs, ingérés par un escargot, évoluent en cercaires, que l'on retrouve collées sur l'herbe. La cercaire doit alors être mangée par une fourmi pour continuer son développement : devenue métacercare, elle s'installe dans la cavité abdominale de la fourmi et attend qu'un herbivore vienne se nourrir de l'herbe sur laquelle se trouve la fourmi infectée.

Le complexe pathogène de la dicrocoeliose rassemble donc l'hôte définitif herbivore, les deux hôtes intermédiaires, le parasite et le milieu qui, on peut l'imaginer, va jouer un rôle important dans la réalisation du cycle parasitaire. Il faut en effet que les conditions soient favorables aux deux hôtes intermédiaires, contrainte qui n'existe pas dans la transmission de la tuberculose, par exemple. La transmission de la petite douve est donc soumise à des aléas plus nombreux que celle de la mycobactérie.

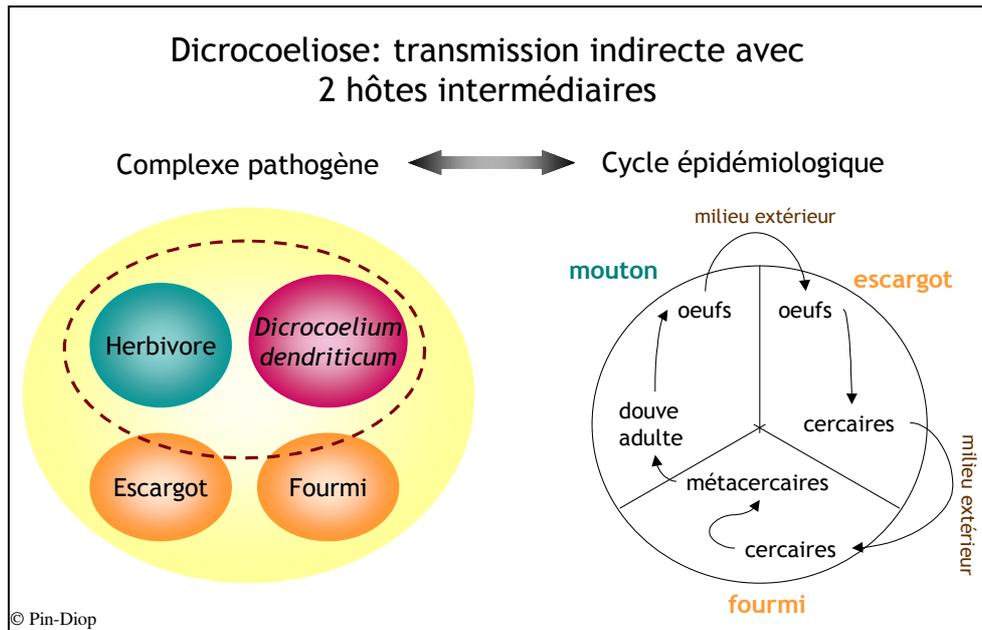


Figure 10 : Schéma du complexe pathogène et cycle épidémiologique de la dicrocoeliose

Pour contrer l'effet limitant des aléas du milieu, la petite douve a mis en place une stratégie assez remarquable. L'infestation de la fourmi par le parasite modifie le comportement de celle-ci, la paralysant au sommet d'un brin d'herbe, à l'heure où les herbivores viennent se nourrir. La probabilité d'ingestion de la fourmi infestée par l'herbivore est donc maximale, optimisant ainsi la réalisation du cycle parasitaire.

2.1.3.3. Complexe pathogène et répartition spatiale des maladies

Ce qui fait l'originalité du concept de complexe pathogène, par rapport à la représentation simple d'un cycle épidémiologique, c'est la formalisation des relations existant entre chaque élément et le milieu. Dans le complexe pathogène, la partie commune entre le vecteur et le milieu correspond à l'écologie du vecteur (1), celle entre l'homme et le milieu à l'écologie humaine (2), celle entre l'agent pathogène et le milieu aux conditions de résistance de l'agent dans le milieu extérieur (3) (cf. Figure 11). Ces différentes écologies définissent l'écologie globale du complexe, qui manifeste ainsi une dépendance plus ou moins marquée à l'égard des conditions du milieu.

Comme le dit Sorre, « l'aire d'extension d'une maladie, c'est celle d'un complexe pathogène ». A chaque complexe correspond une aire maximale, ou « aire du possible », dans laquelle les éléments pourraient être rassemblés, et qui ne se superpose pas forcément à l'aire d'extension réelle. L'association et la dissociation des éléments dans le temps et dans cette « aire du possible » explique les variations des aires d'occupation d'une maladie.

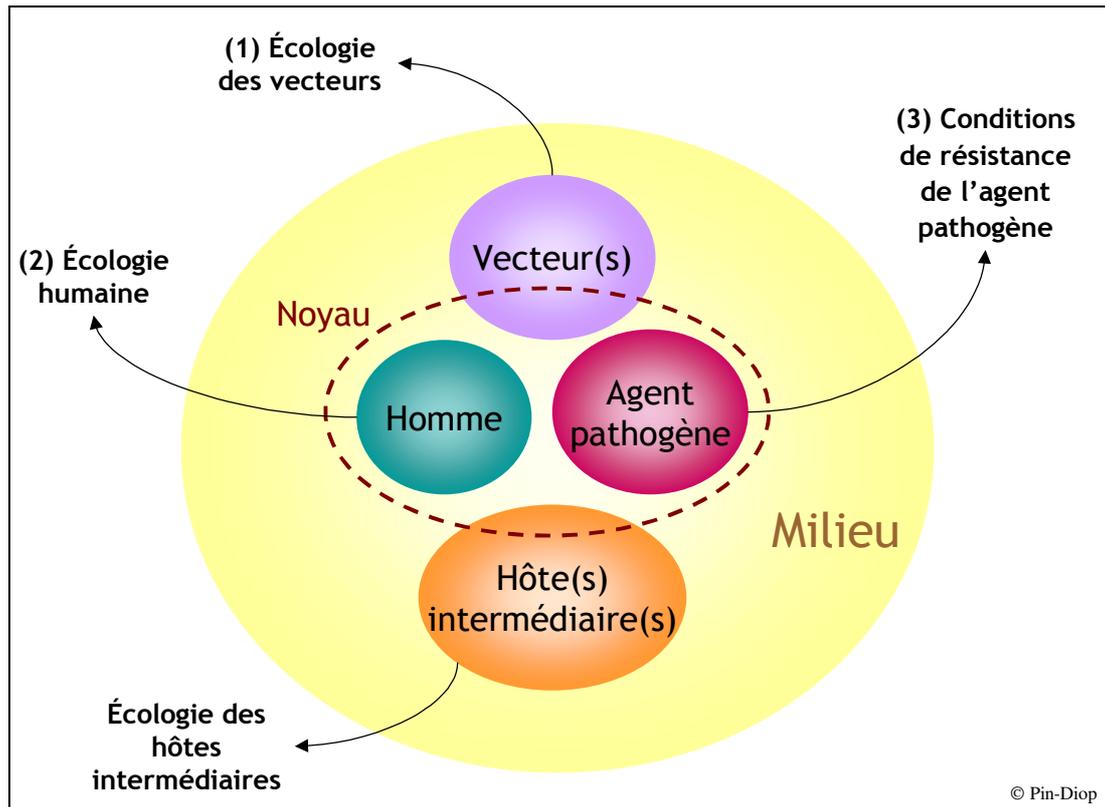


Figure 11 : Schéma du complexe pathogène défini par M. Sorre

Parmi les facteurs de l'environnement, le climat a souvent une influence majeure, car il conditionne de nombreux aspects du milieu naturel. En particulier, l'humidité, la pluviométrie, la température et les vents déterminent la répartition des espèces végétales et des ressources en eau. Mais l'action de l'homme ne doit pas être négligée pour autant. Il peut d'une part agir directement, lorsqu'il héberge l'agent pathogène ou l'un de ses hôtes intermédiaires. D'autre part, il peut rassembler les conditions nécessaires à la constitution d'un complexe pathogène, par des aménagements du territoire, par sa densité de population, par ses habitudes, ses activités ou son habitat.

Finalement, expliquer l'aire de répartition d'une maladie s'apparente à la résolution d'un problème écologique : déterminer les rapports particuliers avec le milieu des divers éléments constitutifs du complexe pathogène (Remy, 1988). Étudier ces relations implique donc de bien connaître le milieu dans lequel la maladie se transmet, afin de mettre en évidence les facteurs susceptibles d'influencer l'écologie des éléments du complexe pathogène.

Toutefois, la connaissance de l'écosystème dans lequel s'inscrit l'agent pathogène ne suffit pas à expliquer la propagation de la maladie. Les pratiques des populations, notamment leur mobilité, peuvent accroître leur vulnérabilité et constituent donc un élément central d'explication. Le paragraphe suivant présente les caractéristiques non seulement

géographiques, mais aussi socio-économiques, de la zone sahélienne de Barkedji, où nous avons mené notre étude.

2.2. La zone sahélienne de Barkedji

2.2.1. Le milieu naturel

La zone est située au nord du Sénégal. Elle a été choisie par l'équipe pour ses caractéristiques typiquement sahéliennes, ainsi que pour ses facilités logistiques. Elle s'étend sur 1 600 km² autour du village de Barkedji (-14.86731° ; 15.27881°), dans le Ferlo sénégalais. C'est un carré de 40 km de côté, qui couvre presque entièrement la communauté rurale de Barkedji, dans le département de Linguère et la région administrative de Louga (Figure 12).

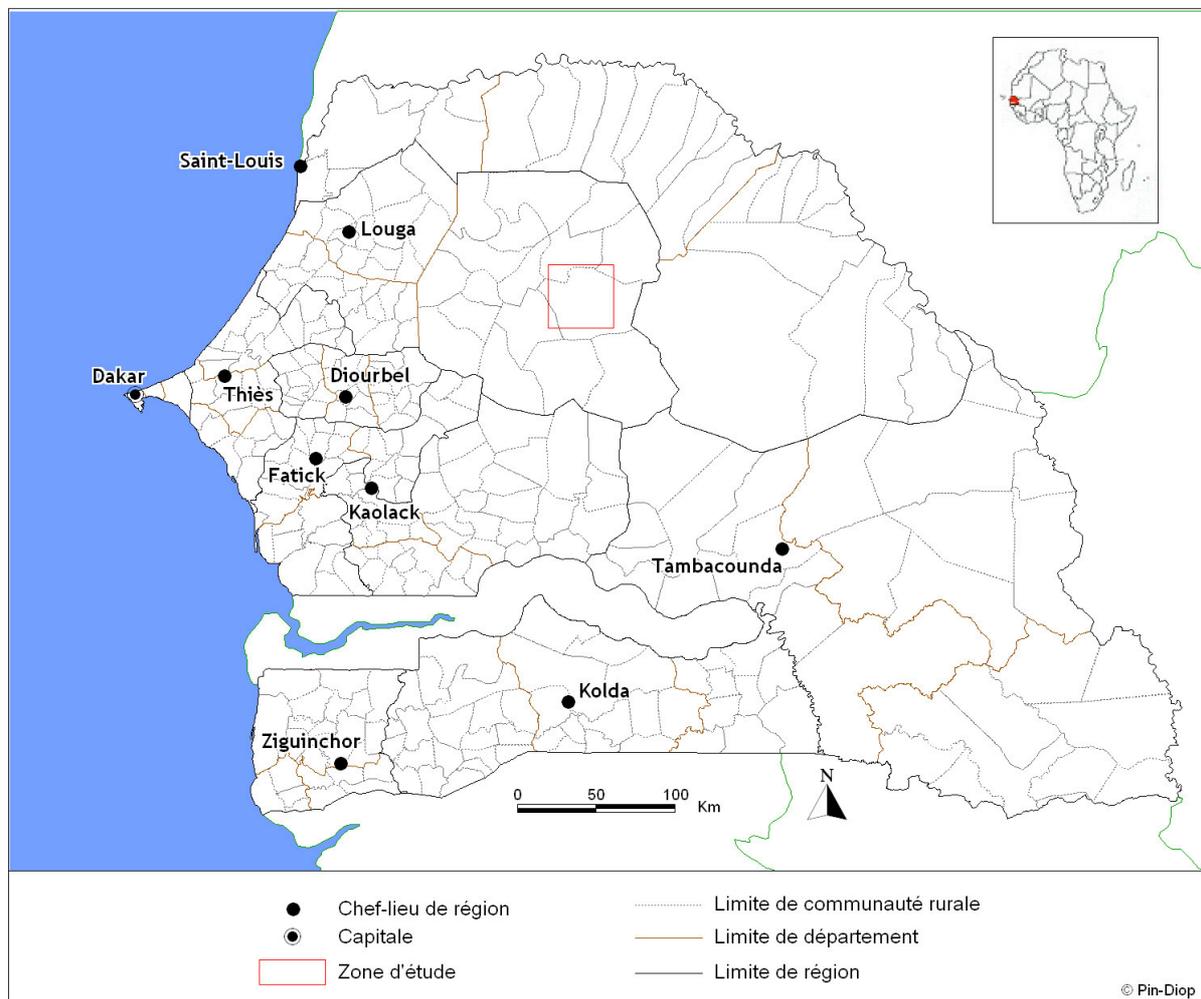


Figure 12 : Carte administrative du Sénégal

Le village de Barkedji est accessible en une journée depuis Dakar, d'abord par une route goudronnée allant jusqu'à Linguère, puis par une piste carrossable en latérite. Le village est équipé de structures permettant de travailler le plus efficacement possible : points d'eau,

électricité, centre téléphonique. En saison des pluies, la contrainte majeure pour les chercheurs et les techniciens est l'inondation des pistes, qui bloque temporairement l'accès à certains sites d'étude.

Le relief de la zone d'étude est composé d'un plateau latéritique, partiellement couvert par des dunes aplanies et stabilisées par la végétation (Le Houerou, 1988). Le plateau a été érodé par un ancien affluent du fleuve Sénégal, le Ferlo, qui a cessé de couler à la fin de la dernière période humide saharienne. Le Ferlo a laissé l'empreinte d'une large vallée, qui traverse la zone d'étude d'est en ouest et envoie des ramifications au nord et au sud (Figure 13).

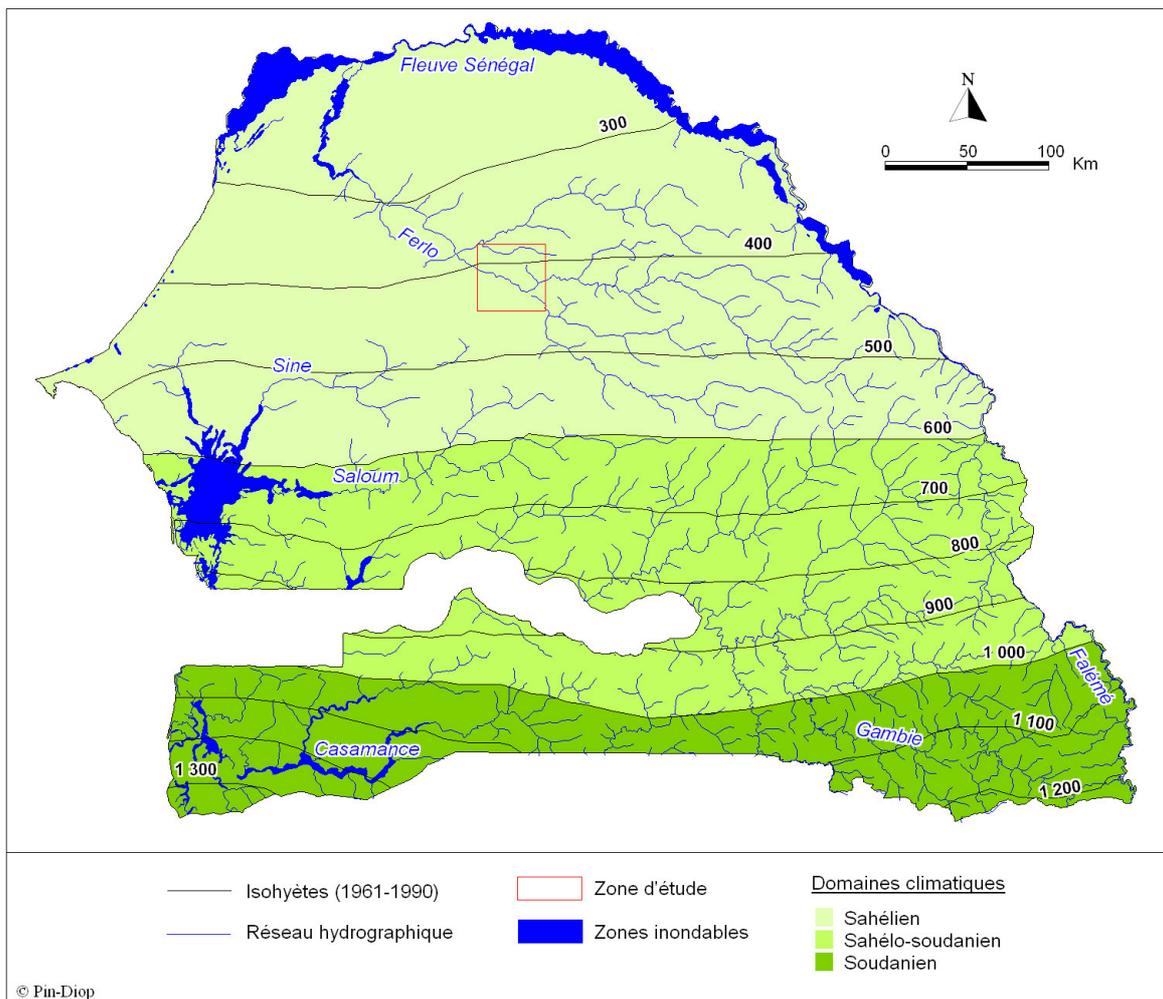


Figure 13 : Carte climatique du Sénégal

Avec des pluviométries annuelles comprises entre 300 et 500 mm, la zone d'étude appartient au Sahel, caractérisé par la prédominance de sols sableux sur lesquels se développe un tapis de graminées annuelles, parsemé d'arbustes et de petits arbres souvent épineux et caducifoliés*. Le climat y est de type tropical sec, avec une alternance entre une courte saison des pluies (de juin à octobre), d'intensité et de répartition très variables d'une année à l'autre,

et une longue saison sèche où la température diurne atteint fréquemment 47-48°C (Leroux, 1983; Bernus *et al.*, 1993).

A Barkedji, la pluviométrie a été globalement normale en 2001, avec 419 mm de précipitations relevées entre juin et octobre (Figure 14). La pluviométrie mensuelle normale, sur laquelle nous basons nos comparaisons, est la moyenne des années 1961 à 1990. Si l'on considère la pluviométrie mensuelle, on constate que juillet et octobre ont été conformes à la normale, septembre plus humide, juin et août plus secs.

En janvier 2002, des pluies inhabituelles se sont abattues sur le centre et le nord du Sénégal, accompagnées de températures très basses pour la saison, causant parmi le bétail des pertes importantes par stress thermique. Pendant la saison des pluies, un déficit global important (33%) a été noté, très accentué en juillet (58%) et en septembre (54%) (Ndione, J.A., communication personnelle).

En 2003, la saison des pluies a été globalement normale, mais avec une répartition inhabituelle. Au lieu d'une distribution d'aspect normal, on a observé deux pics, respectivement en juin et septembre/octobre, et un affaissement de la courbe en juillet et août.

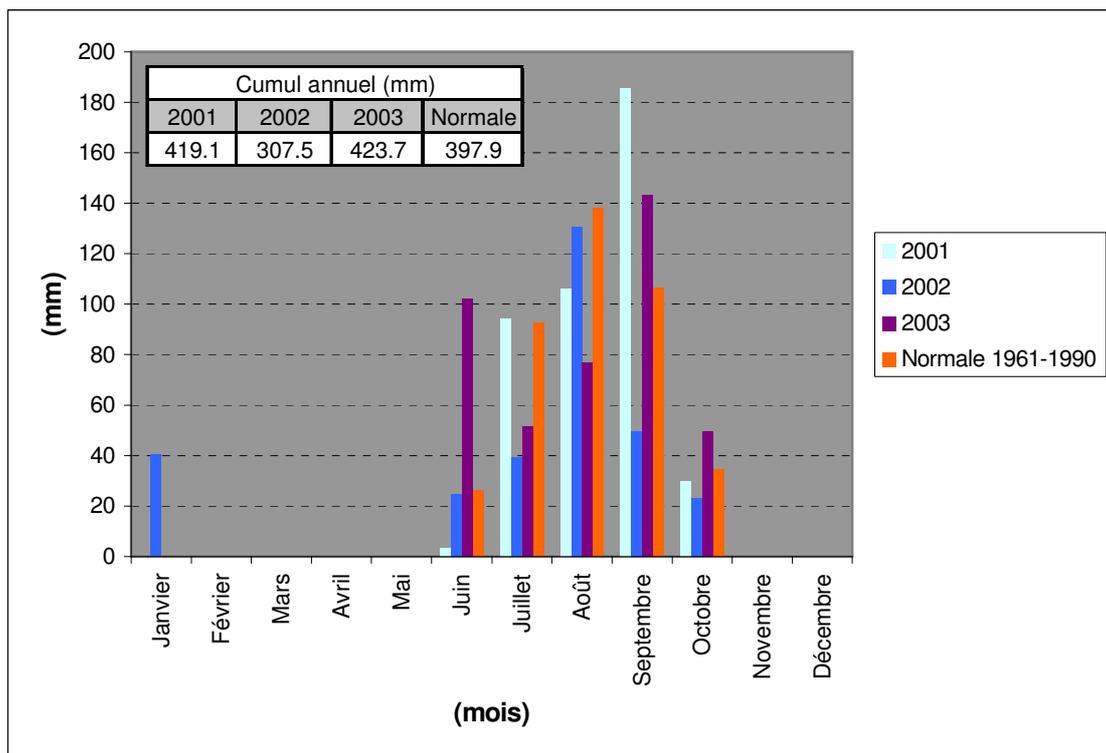


Figure 14 : Pluviométrie relevée à Barkedji de 2001 à 2003, comparée à la normale (source : Ndione, CSE, Dakar)

La zone est en majorité composée de paysages typiques du Sahel, dénommés par leur nom vernaculaire *fulani* (cf. Planche photo 2) (Raynaut *et al.*, 1997) :

- le *seeno** est une steppe arbustive sur dune et inter-dune (substrat sableux), dominée par les espèces ligneuses soudaniennes *Balanites aegyptiaca*, *Guiera senegalensis*, *Combretum glutinosum* et *Sclerocarya birrea*. Cette formation est propice à l'agriculture et offre une productivité fourragère élevée, grâce aux bonnes propriétés hydriques des sols sableux. Elle est cependant sensible à l'érosion éolienne et au surpâturage.
- le *sangre** est une steppe arbustive croissant sur les affleurements de cuirasse latéritique ; *Pterocarpus lucens*, *Sterculia setigera*, *Commiphora africana*, *Grewia bicolor* sont les espèces dominantes. Ses faibles réserves hydriques, dues à la porosité du sol, le rendent impropres à l'agriculture, mais pas au pâturage.
- le *baldiol** est une steppe arborée poussant dans les dépressions hydromorphes, à substrat argilo-sableux et caractérisée par *Acacia seyal*, *Adansonia digitata*, *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*. La pression pastorale y est importante en saison des pluies.



Planche photo 2 : Paysages caractéristiques du Sahel : le *seeno* (a), le *sangre* (b) et le *baldiol* (c) (Clichés : Pin-Diop 2002 et Mondet 2003)

2.2.2. Peuplement et activités rurales

2.2.2.1. Les peuls et le pastoralisme

La zone est peuplée majoritairement de pasteurs peuls nomades ou sédentaires, pour qui l'élevage représente l'activité la plus importante, même si elle est complétée en partie par la culture de produits vivriers (Mbow, 1983). Les peuls vivent dans des campements regroupant 3 à 10 familles, souvent unies par des liens de parenté. Chaque famille dispose d'une concession particulière ; les cases sont disposées en cercle autour d'une cour, délimitée par une palissade (Photo 3).



Photo 3 : Vue partielle d'un campement peul (Cliché : Aubert 1998)

Autour du campement sont disposés les parcs, faits de branches d'arbustes épineux, où les troupeaux sont rassemblés pour la nuit. Le bétail est essentiellement constitué de zébus de race gobra, de moutons peul-peul et de chèvres sahéliennes (cf. Planche photo 4). Les ânes et les chevaux sont utilisés comme moyen de transport (Le Houerou, 1988).

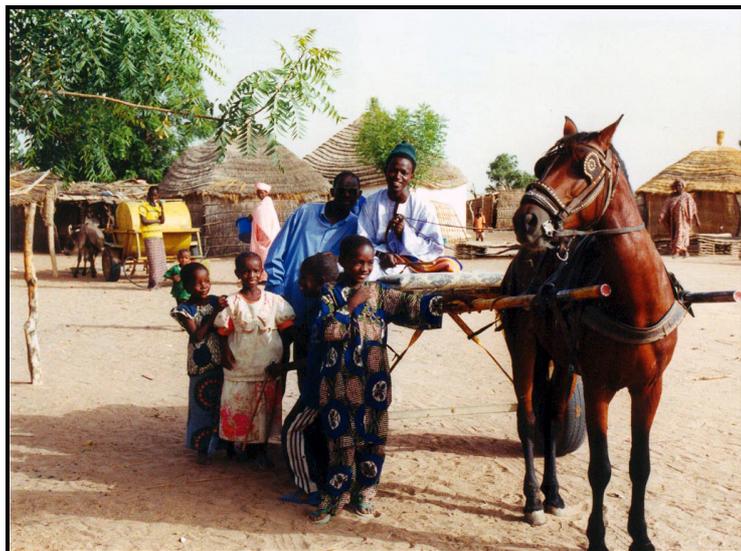
Le bétail est géré en commun au sein du campement : partage des parcs de nuit, constitution de troupeaux de jour, gardiennage à la pâture. L'effectif des troupeaux est variable, généralement compris entre une dizaine et une centaine de têtes. Il est particulièrement délicat d'estimer le nombre de têtes de bétail que possède un peul, car les traditions lui interdisent de compter ce qui lui est cher, que ce soient ses enfants ou ses animaux. En outre, les éleveurs paient des impôts en fonction du nombre de têtes de bétail qu'ils possèdent. Bien entendu, un visiteur, même animé des meilleures intentions, n'est pas autorisé à déroger à cette règle. Cette question sera discutée plus en détail au paragraphe 4.3.2.



(a)



(b)



(c)

Planche photo 4 : Animaux de rente : zébus de race *gobra* (a), moutons peul-peul et chèvres sahéniennes (b), cheval attelé (c) (Clichés : Pin-Diop 2002)

Bien que l'agriculture assure une part non négligeable de leur subsistance, l'élevage est la raison de vivre des peuls et la base de leur système de production. Le lait produit est destiné à l'autoconsommation, au troc (contre du mil en général) ou à la commercialisation. Les bêtes, quant à elles, ne sont jamais consommées par les éleveurs, sauf en cas de force majeure. En effet le troupeau, outre le prestige social qu'il confère, constitue l'épargne de son propriétaire. Ce dernier se séparera d'un de ses animaux s'il a besoin de liquidités ou encore à l'occasion de mariages ou de baptêmes.

Au Sahel, c'est la disponibilité des ressources qui rythme le cours des mois. En saison sèche, l'abreuvement des éleveurs sédentaires et de leurs animaux est pourvu, moyennant cotisation, par les points d'eau permanents : forages, puits ou céanes⁹. Les animaux pâturent aux endroits où l'herbe est encore disponible, parcourant chaque jour des kilomètres à la recherche de fourrages. Les petits ruminants se nourrissent d'arbustes, et les bergers peuvent avoir recours à l'élagage pour subvenir aux besoins des bovins, après disparition du tapis herbacé. Selon les contraintes climatiques et leurs préférences personnelles, les éleveurs peuvent partir en transhumance. En période de soudure, si les ressources deviennent insuffisantes, des hommes de la famille emmènent tout ou une partie des troupeaux, vers des régions plus accueillantes, telles que la vallée du fleuve Sénégal ou la moitié sud du pays.

Les éleveurs nomades, quant à eux, transhument systématiquement. Ils quittent leur campement d'hivernage dès la fin des pluies et vont passer la saison sèche dans les régions plus méridionales du Sénégal.

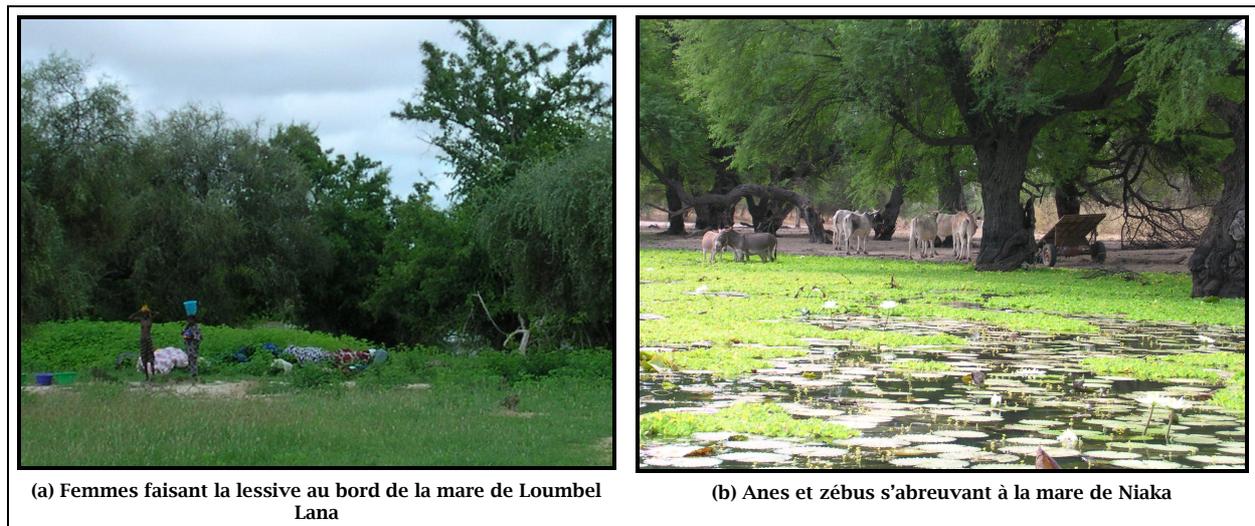
Les transhumants reviennent à Barkedji en début de saison des pluies lorsque les contraintes majeures, l'eau et le pâturage, sont levées. Les pluies font croître la végétation et remplissent des mares temporaires (cf. Photo 5), dont les plus grandes restent inondées jusqu'en décembre ou janvier.

Les transhumants profitent de cette opportunité pour s'installer loin des villages, et faire pâture leurs troupeaux dans des zones peu fréquentées. Les sédentaires exploitent également les mares qui présentent l'avantage non négligeable de la gratuité (cf. Planche photo 6). Ce système d'exploitation extensif est parfaitement adapté au milieu sahélien et aux contraintes liées à la disponibilité de l'eau et du pâturage (Toure et Arpaillage, 1986).

⁹ Ou « puisard » ; trou d'eau de plusieurs mètres de diamètre, creusé dans le sol par les populations et alimenté par une nappe phréatique.



Photo 5 : Mare temporaire de Niaka (Cliché : Mondet et Sibert 2003)



(a) Femmes faisant la lessive au bord de la mare de Loumbel Lana

(b) Anes et zébus s'abreuvant à la mare de Niaka

Planche photo 6 : Utilisation des mares temporaires pour les besoins ménagers (a) et l'abreuvement des animaux (b) (Clichés : Mondet et Sibert 2003)

2.2.2.2. Les ethnies de cultivateurs

Des agriculteurs *wolof* et *sereer* sont également présents dans la communauté rurale de Barkédji. Les *wolof* basent leur système de production sur une forme d'agriculture extensive avec une rotation annuelle de culture de mil et d'arachide, interrompue par une courte période de jachère. L'élevage se limite en général au petit bétail et n'est pas intégré au système d'exploitation. Chez les *sereer*, les cultures de subsistance priment sur la culture d'arachide et

l'élevage est combiné à l'agriculture. Le troupeau sert à fumer les parcelles, à l'approvisionnement en lait et fait également office d'épargne (Weicker, 1993).

Cette cohabitation entre pasteurs et agriculteurs, datant du milieu du siècle dernier, est source de nombreux conflits, que les autorités essaient tant bien que mal de gérer. En effet, traditionnellement, le bassin fossile du Ferlo est une zone à vocation pastorale et comprend l'une des plus importantes concentrations de peuls de l'Afrique. Au début du XX^{ème} siècle, la zone était uniquement occupée par des nomades transhumants et le système agro-sylvo-pastoral reposait sur l'exploitation des parcours forestiers, les cultures vivrières sous pluie et la cueillette forestière (Ba, 1989).

Dès 1950, les premiers paysans *wolof* font leur apparition dans le Ferlo, chassés du Jolof par l'intensification de la culture de l'arachide et l'accroissement de la population. L'aménagement de puits et de forages, initialement destinés aux pasteurs, agit également comme un facteur d'attraction pour ces agriculteurs qui installent leur famille à proximité de ces points d'eau permanents. Pour freiner l'expansion de l'agriculture et préserver les aires pastorales, l'administration fait alors aménager des « réserves sylvo-pastorales » ou « forêts classées », dans lesquelles l'exploitation du bois et les cultures de rente sont interdites.

Ces différents aménagements conduisent les peuls à modifier leur mode de vie et à se sédentariser. En outre, la sécheresse des années 1974-1975 est l'occasion de déplacements inhabituels de nomades venus du nord qui s'implantent dans la zone. Enfin, depuis 1970, on assiste également à l'avancée d'un front pionnier de paysans mourides* producteurs d'arachide, qui s'installent sans considération des parcours traditionnels des nomades (Weicker, 1993).

2.2.3. Ressources ou santé : cruel dilemme !

Soumise aux contraintes climatiques, la région de Barkédji est, comme l'ensemble du Ferlo, en équilibre instable et donc à la merci du moindre événement inattendu. Le pastoralisme, basé sur le mouvement incessant des hommes et des bêtes en quête d'eau et de fourrage, est la réponse la plus adaptée aux contraintes de ce milieu sahélien, car il permet une utilisation optimale des ressources.

Cependant, le comportement des éleveurs les expose, ainsi que leurs animaux, à de nombreuses maladies, en particulier vectorielles : paludisme, schistosomose, et arboviroses (parmi lesquelles la FVR). Les hommes installent leurs campements aux abords des mares

temporaires, qu'ils utilisent pour la consommation, les activités quotidiennes et l'abreuvement des animaux. Malheureusement, ces mares servent également de gîtes à de nombreuses espèces de vecteurs. Ces espèces disparaissent du milieu en saison sèche, mais ont mis en place des stratégies pour le coloniser à nouveau à chaque saison des pluies.

On trouve au niveau des mares les moustiques responsables du paludisme et des arboviroses, ainsi que les gastéropodes aquatiques responsables de la schistosomose de l'homme et du bétail. Ces pathologies sont un lourd fardeau pour les populations humaines et animales. Certains éleveurs, associant les maladies aux mares temporaires, s'installent un peu en retrait de celles-ci, minimisant le contact avec les moustiques. Cependant, la plupart d'entre eux préfèrent monter leur campement à quelques centaines de mètres des mares de façon à bénéficier d'un accès facile aux ressources, et ce au détriment de leur santé.

C'est cette proximité, dans le temps et dans l'espace, entre agents pathogènes, hôtes et vecteurs qui permet la transmission des maladies. Les interactions de ces éléments peuvent être formalisées par le biais du complexe pathogène dont nous analysons la structure pour la FVR à Barkedji dans le paragraphe suivant.

2.3. Le complexe pathogène de la FVR à Barkedji

Afin de mieux comprendre comment le cycle épidémiologique de la FVR peut se réaliser à Barkedji, nous nous basons sur le concept de complexe pathogène de M. Sorre. Pour cet auteur, le noyau du complexe pathogène est constitué par l'agent pathogène et l'homme. Limiter ce concept aux maladies humaines nous semble un peu restrictif, c'est pourquoi nous allons considérer par la suite que le noyau est constitué par l'agent pathogène et son hôte définitif, qui peut être selon le cas un homme ou un animal. Pour la FVR à Barkedji, le complexe pathogène est composé de cinq éléments en interaction avec le milieu : l'homme, le ruminant domestique, le virus de la FVR et les deux principales espèces potentielles de vecteurs, *Aedes vexans* et *Culex poicilipes*.

2.3.1. Les hôtes

L'homme est un hôte du virus mais il ne participe pas activement à l'entretien du cycle puisqu'il ne le retransmet pas. Il est toutefois mentionné dans le schéma du complexe, car d'une part il est sensible à la maladie et d'autre part c'est lui qui gère les ruminants domestiques (cf. Figure 15). L'écologie humaine à Barkedji présente une certaine complexité, de par la multiplicité des actions entreprises par l'homme et des relations qu'il tisse avec le milieu. Il occupe l'espace en implantant des campements ou des villages ; il l'exploite en le

cultivant ; il l'aménage en brûlant certaines aires dédiées aux cultures, en construisant des points d'eau, en créant des aires sylvo-pastorales protégées. Enfin, et surtout, il se déplace dans le milieu, à des distances variables selon qu'il est sédentaire ou nomade. Le point nodal de l'écologie humaine, auquel nous nous intéressons, est le campement au sein duquel se déroulent la plupart des activités et dont la localisation influence la transmission de la FVR.

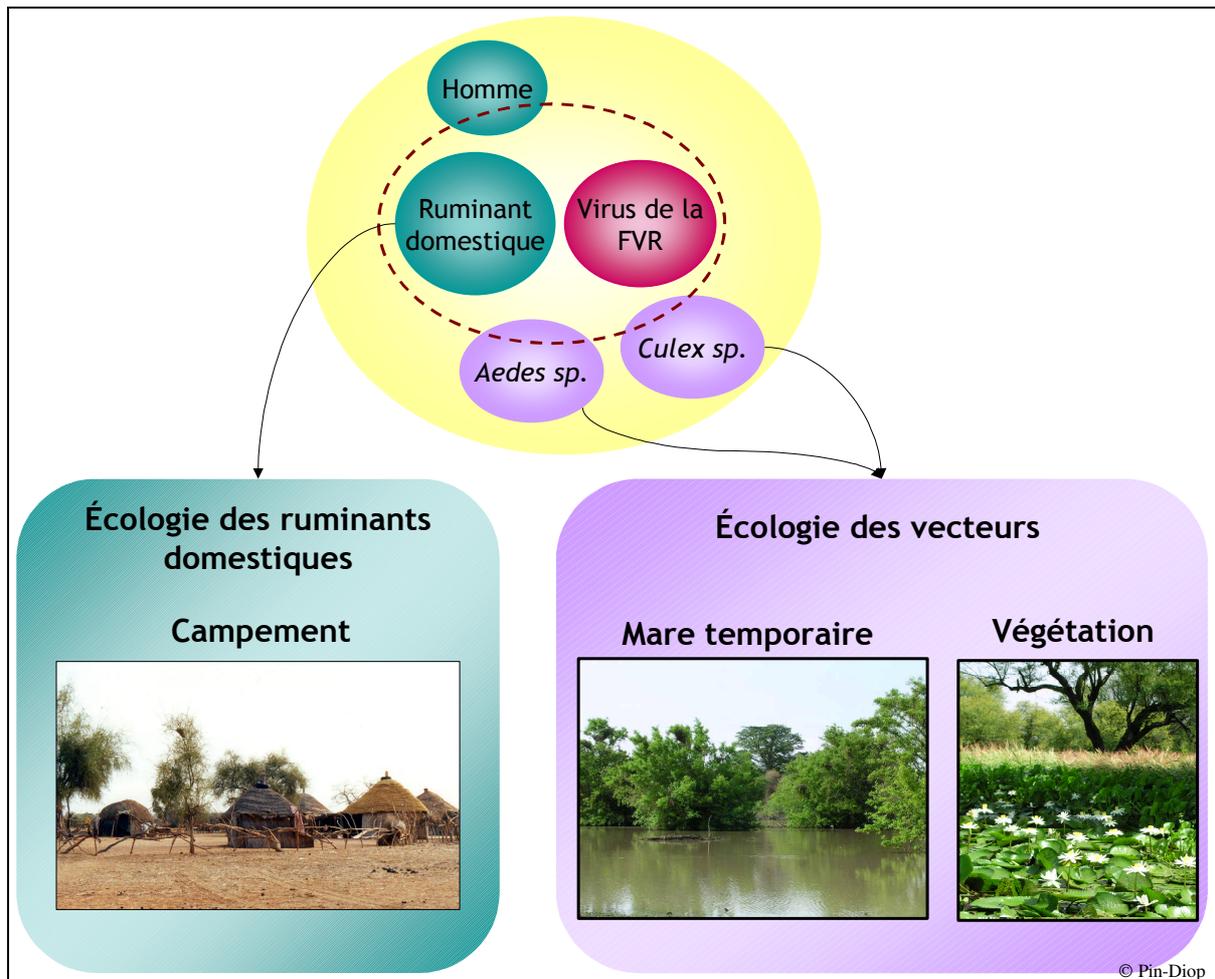


Figure 15 : Complexe pathogène de la FVR à Barkedji

Le ruminant domestique, mouton, chèvre ou zébu, est l'hôte définitif véritable. Les rapports qu'il entretient avec le milieu sont de deux sortes : d'une part, il consomme les ressources, ce qui sous-entend des déplacements quotidiens dans la zone pour trouver les mares où s'abreuver et les pâturage où se nourrir. D'autre part, il occupe le milieu, à différents endroits pendant la journée, et dans un parc la nuit. Il se déplace enfin selon les trajets de transhumance. En ce qui concerne la FVR, seul le parc de nuit présente un intérêt, puisque ce sont les vecteurs qui vont à la rencontre des animaux, et qu'ils ont une activité nocturne. Les parcs sont localisés autour du campement, et sont déplacés de quelques mètres de temps à

autre pour bénéficier de la fumure. Le campement est le lieu de contact entre les hôtes et les vecteurs, et il est localisé en fonction des ressources.

2.3.2. Le virus

L'autre élément du noyau du complexe, l'agent pathogène, est lui aussi présent dans la zone, puisqu'il s'agit d'une aire d'enzootie. Deux situations peuvent mener à l'apparition du virus. La première est l'émergence, en début de saison des pluies, d'*Aedes* adultes infectés, à partir d'œufs restés en diapause dans le sol. La seconde est l'introduction du virus par le biais d'animaux transhumants en phase de virémie. La part prise par chacun de ces mécanismes dans la présence du virus dans la zone reste encore peu documentée, mais notre expérience personnelle laisse à penser que ces mécanismes se complètent, avec une prédominance du rôle des œufs d'*Aedes* infectés. Par ailleurs, les interactions du virus avec le milieu, c'est-à-dire ses conditions de résistance, n'interviennent pas dans la réalisation du cycle, puisque le milieu ne joue pas le rôle d'un réservoir. Nous n'abordons pas dans ce travail la question du virus, de sa présence chez les hôtes ou les vecteurs. Nous posons simplement l'hypothèse de sa présence dans la zone de Barkedji.

2.3.3. Les vecteurs

Les derniers éléments du complexe, mais non les moindres, sont les deux espèces potentielles de vecteurs rencontrées à Barkedji : *Aedes vexans* et *Culex poicilipes* (Mondet *et al.*, 2005a). Dans cette zone, *Ae. vexans* est le principal vecteur, tandis que *Ae. ochraceus* ne joue qu'un rôle limité (Fontenille *et al.*, 1998). Le virus n'a pas été isolé chez *Cx. poicilipes* à Barkedji ; toutefois, le rôle prépondérant de cette espèce dans les épisodes de FVR de la vallée du fleuve Sénégal nous obligent à le considérer comme un vecteur potentiel. Les deux espèces précitées ont une activité nocturne et la capacité de transmettre le virus d'un ruminant à un autre. Mais elles ont des écologies différentes, ce qui rend complexe l'écologie de la transmission du virus.

Les femelles *Aedes* pondent sur les bords boueux des mares temporaires, à l'interface entre l'air et l'eau (Horsfall *et al.*, 1975). Pour éclore, les œufs doivent subir une période d'assèchement, estimée à une semaine environ, puis être immergés (O'Malley, 1990). En cas de sécheresse, les œufs entrent en dormance, ou en diapause, dans le sol, jusqu'à la prochaine pluie (cf. Figure 16). Il peuvent demeurer ainsi pendant plusieurs années. Si les pluies sont faibles ou absentes, les œufs restent en diapause dans le sol. C'est de cette manière que les populations d'*Ae. vexans* se développent à Barkedji dès le début de la saison des pluies. Par la

suite, elles sont donc favorisées par des épisodes pluvieux importants, séparés par de longues pauses (Mondet *et al.*, 2005b).

Les *Culex*, pour leur part, déposent leurs œufs directement à la surface de l'eau, et ceux-ci ne résistent pas à la dessiccation (Beaty et Marquardt, 1996). Ils doivent donc coloniser le milieu de proche en proche. Ils sont tributaires du niveau d'eau dans les mares temporaires, et sont favorisés par des pluies fréquentes, permettant au niveau de rester constant (Mondet *et al.*, 2005a).

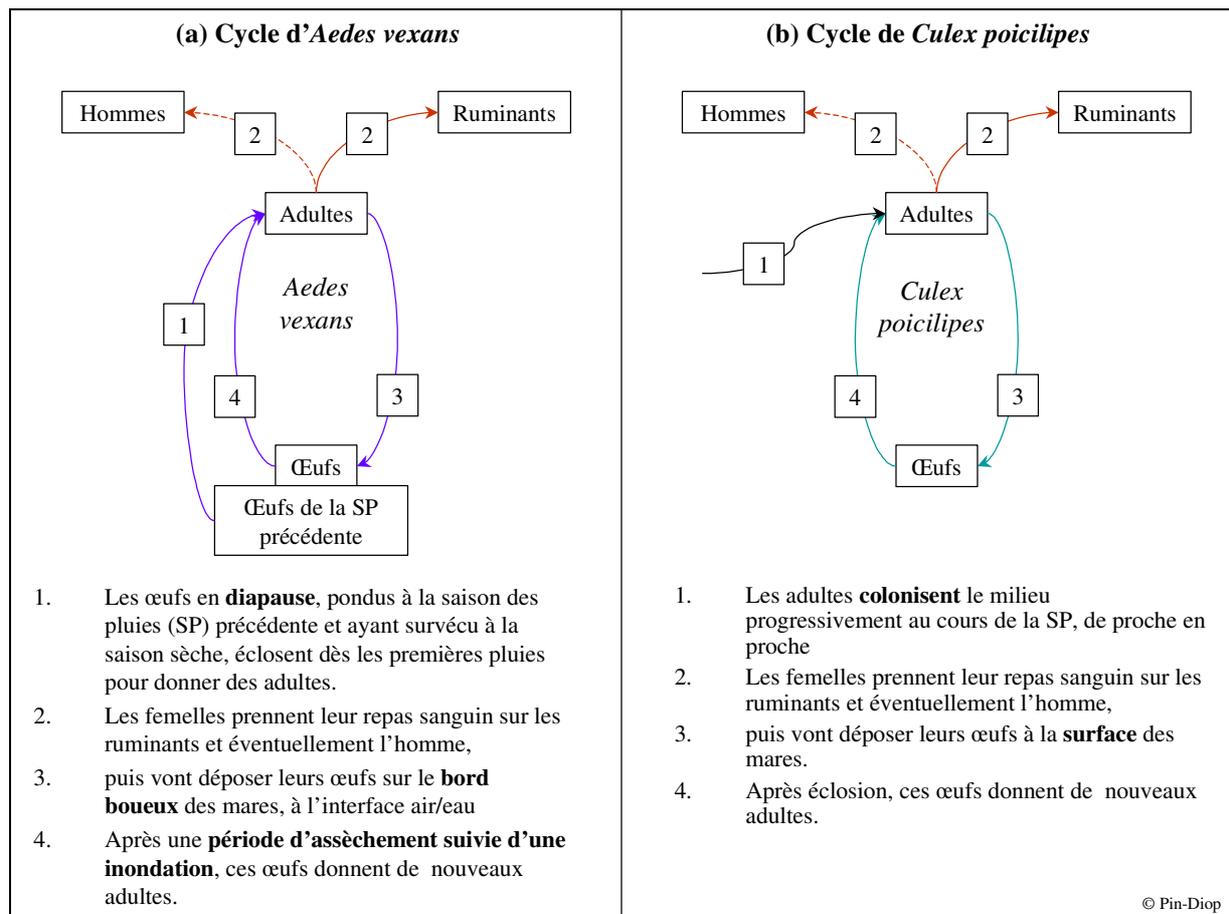


Figure 16 : Cycles de développement d'*Aedes vexans* (a) et de *Culex poicilipes* (b)

Finalement, ce n'est pas tant le cumul saisonnier des pluies que leur répartition dans le temps qui influence la dynamique de chaque espèce de vecteur, comme illustré à la figure 17 (cf. page suivante). Dans les deux exemples, le cumul saisonnier est égal à 410mm. Mais la série 1, caractérisée par des épisodes pluvieux intenses et séparés par de longues pauses, est plutôt favorable aux *Aedes*. Inversement, les épisodes pluvieux de moyenne ampleur mais de fréquence élevée de la série 2, sont plutôt propices à la prolifération des *Culex*.

Malgré ces spécificités, on observe certaines tendances dans la dynamique annuelle des populations d'*Ae. vexans* et de *Cx. poicilipes*. En début d'hivernage, les premières pluies suffisamment abondantes mettent en eau les œufs d'*Aedes* restés en diapause depuis l'année précédente, entraînant l'émergence des adultes. Les *Culex* n'apparaissent qu'en milieu de saison des pluies puisqu'ils colonisent le milieu de proche en proche. Par ailleurs, les deux espèces semblent préférer pondre dans des zones ombragées et se déplacer ou se reposer dans la végétation (Gjullin *et al.*, 1950). On estime que leur durée de vie n'excède pas trois semaines.

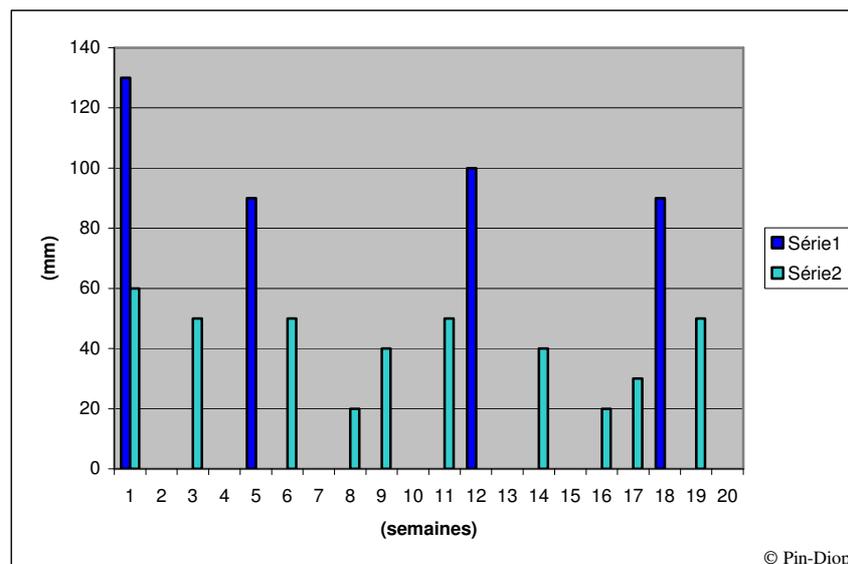


Figure 17 : Exemple de répartitions des pluies favorables à *Aedes* (série 1) et à *Culex* (série 2)

Les populations de vecteurs sont donc étroitement liées à la morphologie et à la dynamique des mares temporaires, cette dernière étant elle-même conditionnée par de nombreux facteurs environnementaux : pluviométrie, couvert végétal, température, hygrométrie, durée d'ensoleillement, vitesse et direction du vent. Le profil des mares est très variable dans la zone de Barkedji (cf. Planche photo 7), nous laissant à penser qu'il en est de même pour leur aptitude à favoriser le développement des vecteurs. A ce titre, la détection et la caractérisation des mares en saison des pluies constitue l'un de nos axes de recherche.

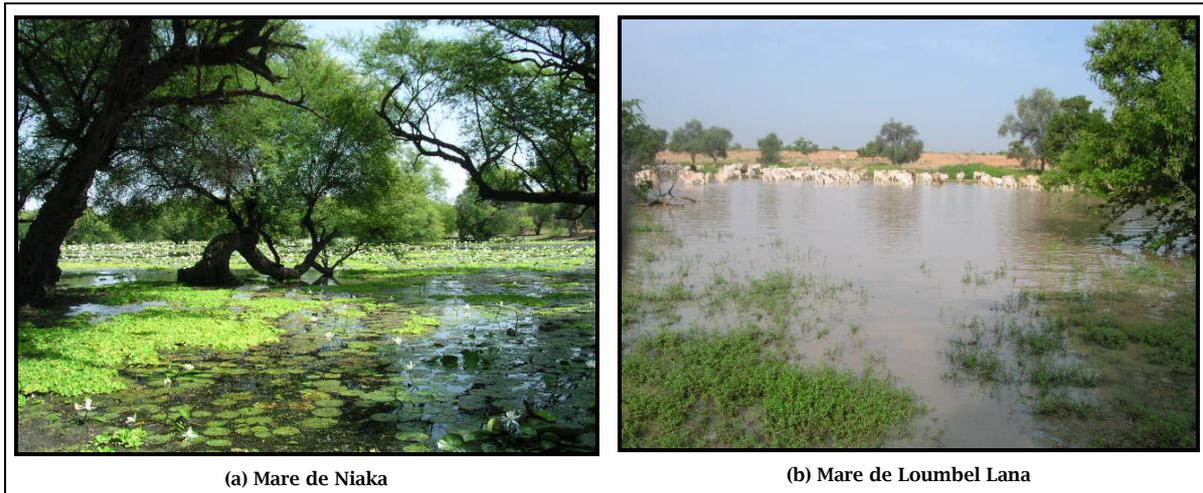


Planche photo 7 : Différents profils de mares temporaires : la mare de Niaka (a) et la mare de Loumbel Lana (b) (Clichés : Mondet et Sibert 2003)

2.3.4. Bilan

La décomposition du système pathogène en ses divers éléments met en exergue la complexité des mécanismes de transmission de la FVR dans la zone de Barkedji, en milieu sahélien. Le fait que les ruminants puissent être sédentaires ou transhumants, et que deux espèces de vecteurs aux écologies différentes soient impliquées, multiplie le nombre de scénarios possibles. Le manque de données et de connaissances sur les modalités de transmission du virus ne nous permet pas de clarifier la situation. On sait que le virus est présent dans la zone mais on ignore où et quand il se manifeste précisément ; on se doute que les transhumants jouent un rôle dans le transport de la maladie d'une région à une autre, mais sans en avoir la confirmation...

Il est donc illusoire, dans le cadre de cette thèse, de vouloir appréhender et modéliser simultanément tous les aspects du cycle de la FVR à Barkedji. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle une équipe pluridisciplinaire a été constituée! Il n'est pas question de nous substituer à cette équipe et nous devons donc nous focaliser sur les éléments qui nous semblent les plus déterminants, en fonction de l'objectif de notre travail de recherche : la spatialisation du risque de transmission de la FVR à Barkedji.

Au début de ce chapitre, nous avons présenté le concept de risque ainsi que ses multiples acceptions. Concernant la FVR à Barkedji, nous avons beaucoup réfléchi sur les mots que nous devons employer, afin de ne pas faire d'abus de langage. Finalement, il nous a semblé que le concept de risque pouvait être adapté à notre situation particulière, comme nous le montrons au paragraphe suivant.

2.4. Définition du risque de transmission de la FVR à Barkedji

En épidémiologie classique, on travaille beaucoup à partir d'un indice R_0 , qui représente le nombre de nouveaux cas d'une maladie à partir de l'introduction d'un individu infecté dans une population saine. La formule de cet indice est la suivante (Rogers et Randolph, 2006) :

$$R_0 = \frac{mbca^2e^{-\mu t}}{\mu r}$$

a = taux de piqûre journalier sur les hôtes

m = ratio vecteurs/hôtes

b = coefficient de transmission du vecteur à l'hôte

c = coefficient de transmission de l'hôte au vecteur

μ = taux de mortalité des vecteurs

t = période d'incubation extrinsèque

r = taux de guérison de l'hôte

De nombreuses variables, relatives aux hôtes et au vecteur (la condition d'application de cette formule est l'existence d'une unique espèce vectrice) sont nécessaires pour estimer le nombre de nouveaux cas : nombre de piqûres par hôte et par jour (a), ratio entre le nombre de vecteurs et d'hôtes (m), proportion de piqûres infectantes pour les hôtes lors du repas d'un vecteur infecté (b), proportion de repas pris sur un hôte infecté qui mène à une infection mature chez l'insecte (c), taux de mortalité des vecteurs (μ), durée d'incubation de l'agent pathogène dans le vecteur (t) et enfin, taux de guérison de l'hôte (r). La plupart de ces variables ne sont pas connues pour le virus de la FVR, car elles impliquent de lourdes expérimentations en laboratoire. Toutefois, les variables a et m sont directement liées à la densité des hôtes et des vecteurs, ainsi qu'à l'intensité de leur contact. Il s'agit là de paramètres que nous pouvons relier au spatial et quantifier au niveau de notre zone d'étude.

Par ailleurs, si l'on tente de relier les concepts de la géographie et de l'épidémiologie, on peut considérer que l'aléa correspond à l'abondance de vecteurs, potentiellement infectés puisque la zone est enzootique, et que la vulnérabilité est associée à la densité humaine ou animale dans le système des mares temporaires (Tran, 2004).

Ainsi, en nous appuyant sur le contexte de notre étude, de même que sur les concepts des diverses disciplines auxquelles nous nous rapportons, nous avons décidé de définir le risque de transmission de la FVR à Barkedji comme l'intensité du contact entre les hôtes et les vecteurs en saison des pluies. Le risque ainsi défini est une composante de l'indice R_0 et il est bien le produit entre l'aléa et la vulnérabilité.

Etant donné que pour la FVR, seuls les ruminants domestiques sont contaminés directement par les vecteurs, nous entendons par « hôtes » les bovins, caprins et ovins. Le risque d'infection de l'homme, dans ces régions où le contact avec l'animal est culturellement très

marqué, est corrélé positivement au risque d'infection de l'animal. Par ailleurs, nous intégrons dans le terme de « vecteurs » les deux principales espèces potentielles de vecteurs de la FVR à Barkedji : *Aedes vexans* et *Culex poicilipes*. Il est patent que chacune de ces deux espèces joue un rôle particulier, comme nous l'avons évoqué dans les précédents paragraphes. Cependant, en l'absence de modèles sur les dynamiques spatio-temporelles spécifiques des deux espèces vectorielles, nous sommes contraints de nous limiter à la recherche des facteurs environnementaux globalement favorables au développement des vecteurs, toutes espèces confondues.

Enfin, nous nous intéressons uniquement à la période pendant laquelle la transmission a la plus forte probabilité d'occurrence, c'est-à-dire la saison des pluies. L'aspect temporel de la maladie est laissé de côté car il ne nous a pas été possible de rassembler suffisamment de données. En effet, une étude temporelle robuste se doit d'intégrer des séries longues et répétées de données et de mesures de terrain (Boone *et al.*, 2000). Dans le cas de la FVR, la dynamique de transmission dépend principalement de celle des hôtes et des vecteurs. Les enquêtes de terrain se sont étalées de 2000 à 2004 ; c'est très insuffisant pour estimer les variations dans le temps des populations animales, influencées par le phénomène mouvant de la transhumance et des populations vectorielles, influencées par le climat. Nous avons donc préféré cibler la mise en évidence des déterminants strictement spatiaux de la transmission, pour laquelle des données étaient disponibles (images satellites, données géoréférencées).

Le risque que l'on tente d'estimer et surtout de cartographier, est un risque relatif : on attribue à chaque point (ou chaque pixel) de la zone un niveau d'intensité de contact entre hôtes et vecteurs. Il ne s'agit donc pas du risque absolu de probabilité d'apparition de la maladie, puisque nous ne disposons pas de données relatives au virus, à sa maintenance et à son apparition dans la zone. Nous partons du principe suivant : puisque la communauté rurale de Barkedji est enzootique, le virus est présent et par conséquent le niveau d'intensité du contact hôte-vecteur traduit un risque de transmission de la maladie.

Maintenant que notre objectif est ciblé, revenons sur le complexe pathogène de la FVR à Barkedji pour préciser notre réflexion. Pour estimer le risque, tel que nous l'avons défini, nous devons localiser les densités de ruminants domestiques et de vecteurs.

Or nous n'avons pas, ou pas suffisamment de données spatialisées. Pour les ruminants, il est évident que l'on ne peut pas localiser chaque tête de bétail sur l'ensemble de la zone d'étude. Nous choisissons donc de travailler à partir du campement puisqu'il s'agit du lieu où les troupeaux sont rassemblés et où survient la transmission de la FVR.

Pour les vecteurs, les piégeages sur un grand nombre de sites sont très difficiles à mettre en œuvre, en particulier en saison des pluies où les voies d'accès sont peu praticables. Nous devons donc recourir à d'autres méthodes pour mettre en évidence des indicateurs spatiaux d'abondance des vecteurs. Les mares temporaires et la végétation, éléments centraux de l'écologie vectorielle dans la zone, nous semblent constituer des indicateurs pertinents.

Conclusion

Nous avons présenté en première partie de ce chapitre les grands concepts sur lesquels est fondée notre réflexion et notre démarche : le risque, la santé et le complexe pathogène. Ces concepts, appliqués à notre étude de cas, peuvent être reliés dans un système : le système pathogène de la FVR dans la communauté rurale de Barkedji. Le risque est le fruit de l'association spatio-temporelle des éléments du complexe pathogène, ayant des effets possibles sur la santé animale et la santé humaine. Le milieu, décrit au sous-chapitre 2.2, fait partie intégrante de ce système, puisqu'il influence la répartition et l'abondance des hôtes et des vecteurs de la maladie. La représentativité de la communauté rurale de Barkedji par rapport au système pastoral et à l'ensemble du Sahel, ses facilités logistiques, ainsi que les nombreuses informations récoltées par les équipes de chercheurs de l'IRD, de l'Institut Pasteur de Dakar, de l'ISRA et du CIRAD, en font une zone d'étude pertinente. Nous avons enfin détaillé le fonctionnement du système pathogène de la FVR à Barkedji et mis en exergue sa complexité. Cela nous a conduit à proposer une définition du risque de transmission de la FVR à Barkedji et à cibler les éléments déterminants pour sa spatialisation. Les méthodes de spatialisation des pathologies vectorielles sont nombreuses et variées. Nous en avons fait une revue bibliographique avant de mettre en place notre protocole de recherche sur la FVR à Barkedji. Au chapitre suivant, nous présentons les travaux qui nous ont paru les plus intéressants, soit parcequ'ils soulignent le potentiel des outils spatiaux, soit parce que nous nous en sommes directement inspirés pour notre protocole.

Chapitre 3. Outils et méthodes de spatialisation du risque

Introduction

L'application de la télédétection à la surveillance et au contrôle des vecteurs de maladies remonte à 1949, lorsque Audy utilisa des photographies aériennes en noir et blanc pour déterminer les foyers endémiques de typhus en Asie du sud-ouest, à partir de la distribution d'un certain type de végétation (Audy, 1949, cité par Hassan *et al.*, 1998). Depuis lors, les progrès techniques ont conduit au développement de satellites de plus en plus performants, offrant aux chercheurs des possibilités inégalées pour observer l'environnement, en particulier dans des régions peu ou mal connues (Poncet, 1980). Les informations spatiales issues, soit d'enquêtes de terrain où les relevés sont géoréférencés par GPS (*Global Positioning System*), soit de l'imagerie satellitale, peuvent être organisées et manipulées dans les SIG (Systèmes d'Information Géographiques). Ce chapitre fait état des outils existants et de leur implication dans les problématiques de santé. Une revue des principales méthodes d'analyse spatiale des maladies vectorielles est ensuite menée, faisant la dichotomie entre les études à petite et à grande échelles. Une attention particulière est portée aux travaux existant sur la fièvre de la vallée du Rift. Après avoir jeté un regard critique sur ces méthodes, nous proposons un protocole d'étude du risque de la transmission de la FVR à Barkedji, tel que défini au chapitre 2. Nous dressons dans un premier temps un bilan des connaissances, données et moyens disponibles ; puis nous présentons les grandes étapes du protocole suivi. Les procédures spécifiques à chaque étape seront détaillées dans la deuxième partie, présentant l'application à la FVR à Barkedji (Chapitres 4 à 6).

3.1. Panorama des méthodes d'analyse spatiale des problèmes de santé

3.1.1. Les outils d'analyse spatiale

Les outils spatiaux disponibles à l'heure actuelle comprennent la télédétection, le GPS, les SIG et les statistiques spatiales.

3.1.1.1. Définitions

La Société française de Photogrammétrie et de Télédétection définit la télédétection comme « *l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets, par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci* » (COMITAS, 1988). Les deux grandes sources d'information fournies par les capteurs aéroportés ou spatioportés sont les photographies aériennes et les images satellitales, utilisées pour produire, par des procédés de classification, des cartes topographiques des régions terrestres et océaniques ou des cartes de ressources naturelles (végétation, géologie, activités anthropiques, etc.).

Le Centre Canadien de Télédétection définit le GPS comme « *un système de radio-navigation basé sur une constellation de 24 satellites et leurs systèmes de stations au sol, que l'on utilise pour obtenir un positionnement précis de cibles situées sur ou près de la surface de la Terre* ». Le GPS, manipulé au sol par un utilisateur, reçoit des signaux en provenance des satellites qui lui permettent, par un procédé de triangulation, de calculer sa position avec une grande précision. Le géoréférencement sur le terrain d'objets ponctuels ou linéaires devient ainsi un acte simple, rapide et à la portée de tous.

Un SIG est « *un système informatique servant à recueillir, stocker, manipuler et visualiser des informations et des données référencées géographiquement* » (Chrisman *et al.*, 1989). Les données spatiales sont présentées sous la forme d'une carte (ou couche) associée à une table attributaire de variables descriptives. En résumé, on peut dire qu'un SIG est une base de données relationnelle associée à des éléments cartographiés. Il offre la possibilité de manipuler les objets spatiaux à l'intérieur d'une couche ou de mettre en relation différentes couches. Son intérêt majeur est de prendre en compte simultanément des objets très divers, tant par leur forme (raster* ou vecteur* -ponctuelle, linéaire, surfacique-) que par leur échelle.

Enfin, les statistiques spatiales ou géostatistiques ont été développées par des géographes pour décrire, expliquer, extrapoler et prédire la distribution d'objets et de processus dans l'espace. A la différence des statistiques classiques, les géostatistiques considèrent la localisation des objets étudiés, se basant sur l'hypothèse que deux éléments proches dans l'espace ont plus de chance de se ressembler que des éléments éloignés. Différentes méthodes existent selon que l'on s'intéresse à des éléments dont seule la localisation est connue (méthode des plus proches

voisins), ou à des éléments caractérisés par un attribut, en plus de leur localisation (autocorrélation spatiale, krigeage, etc.). Le krigeage est une méthode d'interpolation d'une variable continue dans l'espace à partir d'un échantillon de sites de mesure.

Les statistiques dites « classiques » sont également utilisées avec succès par les géographes et les épidémiologistes. Les méthodes factorielles, telles que l'Analyse en Composantes Principales (ACP) ou l'Analyse Factorielle en Composantes Multiples (AFCM), permettent d'explorer et de synthétiser des données d'enquêtes, spatialisées ou non. Les classifications hiérarchiques regroupent les données, qu'il s'agisse de personnes ou de pixels, en « types » homogènes. On trouve aussi fréquemment dans la littérature des modèles statistiques comme l'analyse discriminante, la régression logistique et la régression linéaire, qui associent des variables explicatives (ou prédictives) environnementales à une variable expliquée (ou prédite) qualitative ou quantitative. Dans le cas de l'analyse discriminante et de la régression logistique, la variable expliquée est qualitative, généralement sous la forme « présence/absence » ou « infecté/non infecté ». L'appartenance à l'un des groupes est déterminée par les valeurs prises par les variables explicatives quantitatives continues (pour l'analyse discriminante) ou qualitatives (pour la régression logistique). La régression linéaire associe des variables continues ; la variable prédite peut donc être par exemple une abondance de vecteurs ou la prévalence d'une maladie (Green et Carroll, 1978). Le fait que ces modèles statistiques classiques ne prennent pas en compte intrinsèquement la dimension spatiale des données n'est pas une contre-indication à leur utilisation, lorsqu'il s'agit de mesurer l'importance relative de variables indépendantes pour l'estimation de l'abondance de vecteurs ou d'une maladie (Kitron, 1998).

3.1.1.2. Outils spatiaux et santé

Nous avons évoqué au chapitre précédent le concept de complexe pathogène, dans lequel les relations entre éléments aboutissent (ou pas) à la manifestation de la maladie. La description des interactions entre les éléments du cycle (agent pathogène, hôtes, vecteurs, réservoirs) et l'environnement fait partie intégrante de la compréhension globale de la transmission de la maladie. Les outils spatiaux permettent de rassembler, de gérer, d'intégrer et d'analyser des données spatiales et sont donc de plus en plus appliqués au domaine de la santé, notamment à l'étude des maladies vectorielles.

Celles-ci sont en effet circonscrites dans l'espace à l'aire de répartition conjointe du ou des vecteur(s) et des autres éléments du complexe pathogène. La distribution d'une espèce

vectorielle, selon qu'elle est vertébrée ou invertébrée, est plus ou moins étroitement inféodée à un environnement particulier.

Par exemple, les animaux vertébrés, tels que les rongeurs ou les oiseaux, ont en général une aire de répartition plus large que les arthropodes. Ces derniers, qui sont les plus souvent impliqués dans la transmission de maladies, sont tributaires pour leur développement de facteurs climatiques (pluviométrie, température, degré d'hygrométrie de l'air, ensoleillement, vents) et édaphiques (qualité et nature des sols), ainsi que de la disponibilité de gîtes de ponte. Les gîtes varient beaucoup d'une espèce à l'autre, allant par exemple de réceptacles d'eaux usées pour les moustiques *Culex annulirostris*, vecteurs d'arboviroses en Australie, au sommet des arbres pour *Aedes africanus*, vecteur de la fièvre jaune sylvestre en Afrique orientale et centrale. L'abondance d'eau et de végétation, les espèces végétales, l'occupation de l'espace par l'homme, sont donc également des facteurs à considérer.

On comprend alors aisément pourquoi la télédétection est un outil de choix pour l'étude des maladies vectorielles. L'éventail très large des images disponibles offre des solutions adaptées à chaque problématique :

- les satellites de la NOAA (*National Oceanographic and Atmospheric Administration*) ou de Météosat fournissent des séries d'images à faible résolution spatiale, mais avec une résolution temporelle élevée ; les variables dérivées des données brutes quantifient par exemple la densité de végétation (indice NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*), la température (indices LST – *Land Surface Temperature* et SST – *Sea Surface Temperature*), la pluviométrie (indice CCD – *Cold Cloud Duration*) sur de vastes surfaces ;
- la détection de l'eau est l'apanage des images SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) ou RADAR, ces dernières ayant l'avantage d'être moins perturbées par les nuages ou la végétation ;
- l'occupation du sol à grande échelle peut être établie grâce aux satellites LandSat ou SPOT, qui offrent plusieurs bandes spectrales, une résolution spatiale très haute et une résolution temporelle moyenne.

Les caractéristiques des capteurs de SPOT et LandSat sont détaillées en Annexe 1.

Les données issues des images satellitales, ainsi que celles relevées sur le terrain par GPS, peuvent être intégrées dans un SIG, afin de comprendre les modalités de transmission d'une maladie, d'identifier des facteurs favorisants et surtout de prédire les zones à risque. Selon le cas, les outils spatiaux servent :

- à poser des hypothèses ;
- à vérifier des hypothèses posées au préalable ;
- à orienter les activités de terrain ;
- à faire des prédictions.

Leur utilisation doit donc être intégrée dans une approche épidémiologique globale de la pathologie, dans le but de résoudre un problème précis. Le protocole d'étude doit être clairement établi, comme le propose Roberts (cf. Figure 18) (Roberts et Rodriguez, 1994).

Au préalable, on doit formaliser le complexe pathogène de la maladie et faire la synthèse des connaissances épidémiologiques et écologiques disponibles. Selon la situation, on aura besoin ou pas de mettre en place des études de terrain pour définir les déterminants environnementaux critiques pour la présence des vecteurs et des hôtes (Etape 1).

Puis on doit s'interroger sur la ou les échelle(s) spatiales et temporelles, appropriées aux déterminants environnementaux (Etape 2). Le choix de l'échelle conditionne les données à recueillir et le protocole à mettre en place. Par exemple, si on travaille au niveau continental, on se base plutôt sur des données climatiques ou cartographiques et satellitales à petite échelle. Si on travaille au niveau local, on a la possibilité de recueillir des données géoréférencées directement sur le terrain, et de les coupler à des données satellitales à haute ou très haute résolution.

On arrange ensuite toutes les données et connaissances dans le SIG, que l'on utilise pour modéliser les associations entre présence/absence ou abondance des vecteurs et des hôtes (Etape 3). A ce stade, le modèle est plus ou moins complexe selon la nature des associations.

On applique enfin le modèle pour prédire la distribution des vecteurs et des hôtes dans les zones où elle est inconnue (Etape 4).

Avant de pouvoir être appliqué dans le cadre d'un programme de contrôle de la maladie, le modèle doit impérativement être validé par des enquêtes de terrain appropriées (Etape 5).

Si les prédictions sont erronées ou ont une précision insuffisante, on doit ré-évaluer les critères prédictifs en revenant à chacune des étapes 1 à 4.

Si les prédictions sont correctes, on peut utiliser le modèle pour cibler les actions de prévention ou de lutte contre la maladie.

La figure 18 présente un protocole théorique et synthétique, qui est souvent adapté dans les projets de recherche, en fonction des moyens techniques et logistiques disponibles. Surtout, les méthodes spécifiques à chaque étape varient considérablement selon la maladie et l'échelle considérées, comme le montrent les exemples cités dans les paragraphes suivants. Nous y présentons un panorama des principales références bibliographiques en santé-environnement, en insistant sur les travaux relatifs à la FVR.

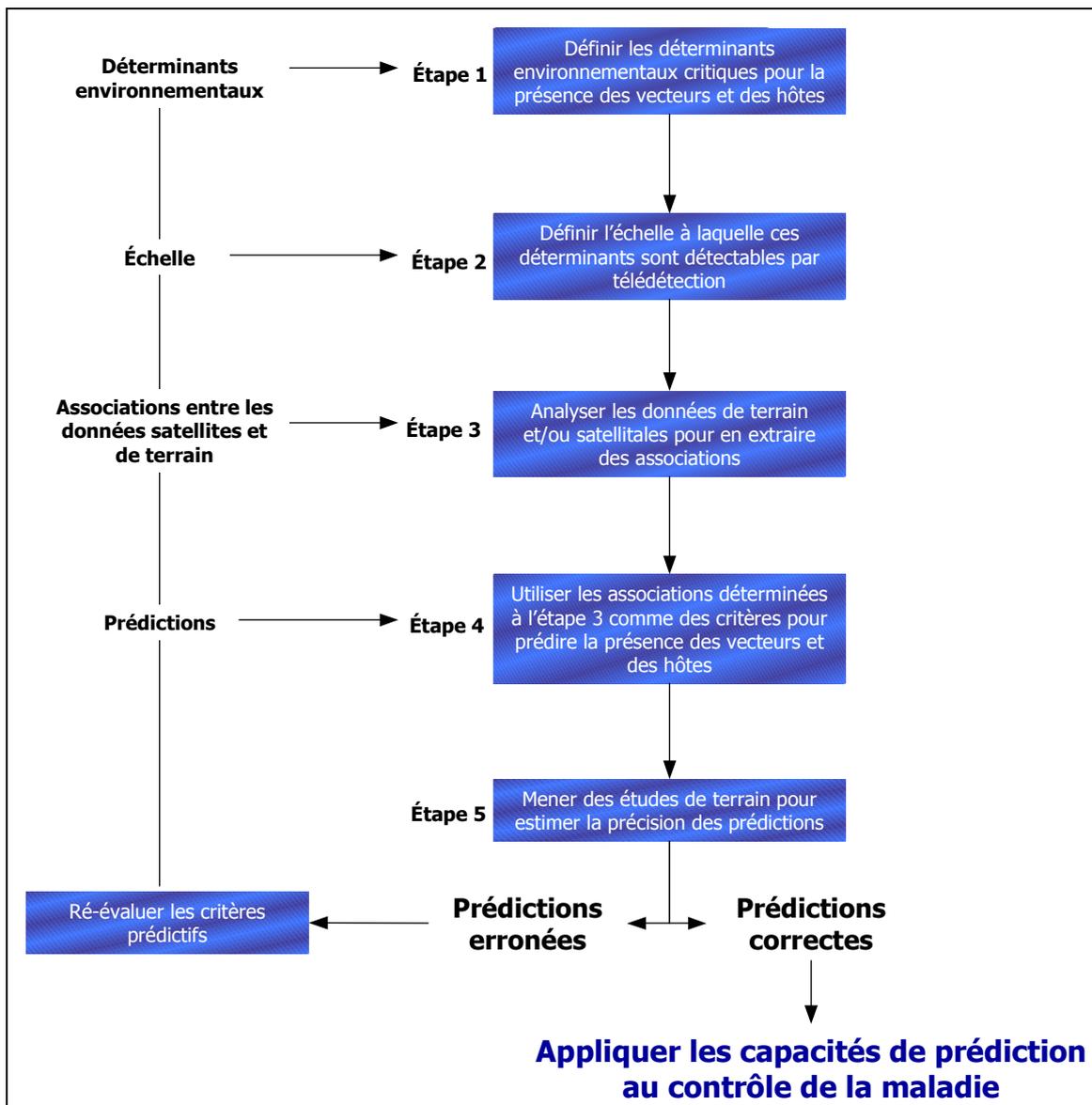


Figure 18 : Application de la télédétection à la prédiction de la distribution spatiale des vecteurs de maladies (adapté de Roberts, 1994)

3.1.2. Les études à petite échelle (niveau national, régional ou continental)

3.1.2.1. Principe des études à petite échelle

Les études à un niveau national, régional ou continental, visent généralement à associer la distribution connue d'un vecteur ou d'une maladie, établie par des enquêtes de terrain, à des données climatiques ou à des données satellitales à basse résolution, afin de prédire cette distribution dans des zones où elle est inconnue. Les variables climatiques sont issues des stations météorologiques, et donc discontinues dans l'espace. Les données satellitales ont l'avantage de couvrir de larges zones, avec une résolution temporelle élevée.

Plusieurs indices, calculés à partir d'une combinaison de canaux, sont fréquemment utilisés :

- Le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) est une transformation entre des données du canal rouge (Ch1, longueur d'onde entre 0.58 et 0.68 μm) et du canal proche infra-rouge (Ch2, 0.725 à 1.1 μm) :

$$NDVI = \frac{(Ch2 - Ch1)}{(Ch2 + Ch1)}$$

En général, le NDVI est calculé à partir des données issues du capteur AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). La résolution spatiale maximale du capteur est de 1.1km et sa résolution temporelle de 12h. Le NDVI mesure spécifiquement l'abondance chlorophyllienne et est utilisé pour évaluer la biomasse végétale et indirectement la pluviométrie.

- L'indice LST (*Land Surface Temperature*) est dérivé des canaux 4 (Ch4, 10.30 à 11.30 μm) et 5 (Ch5, 11.50 à 12.50 μm) du capteur AVHRR de la NOAA, selon la formule suivante :

$$LST = Ch_4 + 3.33(Ch_5 - Ch_4)$$

- Le CCD (*Cold Cloud Duration*), corrélé à la pluviométrie, est estimé à partir du canal infra-rouge du capteur HRR (*High Resolution Radiometer*) de Meteosat (Hay, 2000).

L'élévation peut également être intégrée aux modèles, lorsque l'altitude est susceptible d'avoir une influence sur la présence d'un vecteur ou d'une maladie. A partir des courbes de niveau, on extrapole pour obtenir un MNT (Modèle Numérique de Terrain) au format raster, indiquant l'altitude en tout point.

Ces études au niveau national, régional ou continental, sont scindées en deux grandes étapes. Partant des connaissances sur l'écologie du vecteur ou sur l'épidémiologie de la maladie, on cherche dans un premier temps à identifier, par des méthodes statistiques, quels sont les indicateurs les plus performants de présence du vecteur ou de la maladie. Dans un deuxième temps, le modèle validé sert à prédire la distribution dans des zones pour lesquelles on ne dispose pas de données de terrain, ou à tester des scénarios, notamment de changement climatique. Les maladies dont l'étude est la plus complète au niveau continental sont la trypanosomose et la FVR, en Afrique.

3.1.2.2. Exemple de la trypanosomose

Nous avons vu précédemment que les SIG permettaient d'analyser des données spatiales dans un contexte pluri-disciplinaire. En cela, ils sont la solution idéale pour représenter, analyser et interpréter les nombreux facteurs impliqués dans l'épidémiologie de la trypanosomose animale africaine : la distribution des différentes espèces de glossines, la maladie clinique, la densité de bétail, la distribution des races de bétail, les systèmes de production et l'occupation de l'espace. Ces données spatiales rassemblent les données de terrain (recensements et campagnes de piégeage des glossines) et des données satellitaires à faible résolution spatiale (Hendrickx *et al.*, 2001).

Découverte en 1865, la trypanosomose est étudiée depuis une centaine d'années et son épidémiologie, ainsi que l'écologie de son vecteur, la glossine ou mouche tsé-tsé, sont abondamment décrites dans la littérature (Kitron, 1998). Cette profusion de données constitue un terrain très favorable à l'étude des déterminants spatiaux de sa transmission.

Rogers *et al.* ont utilisé avec succès des données à basse résolution (NDVI, température et élévation) pour prédire, par analyse linéaire discriminante, la présence/absence des glossines au Kenya, au Zimbabwe et en Tanzanie. L'analyse discriminante (Green et Carroll, 1978) permet d'étudier, à partir d'un nombre limité de sites pris au hasard dans la zone de distribution connue de la tsé-tsé, le lien entre le critère présence/absence et un certain nombre

de variables quantitatives continues. Le modèle peut ensuite prédire la probabilité de présence/absence sur l'ensemble du pays.

Selon le pays et l'espèce de glossine, les éléments de prédiction les plus importants diffèrent : au Kenya et en Tanzanie, il s'agit du NDVI mensuel maximal pour *G. morsitans* et du NDVI mensuel minimal pour *G. pallidipes* ; au Zimbabwe, la meilleure variable pour *G. morsitans* est le maximum de la température moyenne mensuelle (Rogers et Randolph, 1993 ; Rogers et Williams, 1993). Un protocole semblable a également été appliqué en Côte d'Ivoire et au Burkina Faso, se basant sur les limites historiques de la distribution de la glossine en Afrique de l'ouest et sur des variables climatiques synthétisées par la méthode de Fourier (Rogers *et al.*, 1996).

Au Togo, Hendrickx *et al.* ont cherché à mieux comprendre certains aspects de la transmission de la trypanosomose en mettant en relation dans un SIG des données sur la prévalence de la maladie, la densité de tsé-tsé, les systèmes de production, les races de bétail et le climat. L'originalité de leur travail réside dans l'utilisation exclusive du mode raster pour représenter et analyser les données. Le pays a été divisé en une grille de 0.125° de côté, qui a servi de base d'échantillonnage, et dans laquelle toutes les données ont été projetées.

Les grandes divisions climatiques et les systèmes de production ont été obtenus par classification ascendante hiérarchique, se basant sur des indices climatiques (NDVI, CCD et LST) et sur des enquêtes de terrain dans les villages. Les densités de glossines ainsi que la prévalence trypanosomienne ont été mesurées *in situ* au cours d'enquêtes sur l'ensemble du territoire, cartographiées puis soumises à un lissage pour combler les sites manquants. Une fois ces informations stockées au format raster dans un SIG, les auteurs ont étudié les relations existant entre elles par simple régression linéaire, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des caractéristiques de la trypanosomose du bétail au Togo (Hendrickx *et al.*, 1989; Hendrickx *et al.*, 1999).

En Afrique méridionale enfin, Robinson *et al.* ont évalué la pertinence de plusieurs méthodes pour prédire la distribution de la glossine dans une zone couvrant 322000 km² au Malawi, Mozambique, Zambie et Zimbabwe, appelée « *common fly belt* ». Dans un premier article, les auteurs se basent sur la distribution des glossines publiée par Ford et Katondo en 1977 pour faire une analyse univariée (Robinson *et al.*, 1997b). Un échantillon de pixels est sélectionné dans les zones de présence et d'absence des glossines. A chaque pixel est attribuée une série

de quinze variables : 9 dérivées de la température, 4 dérivées du NDVI, la pluviométrie totale et l'élévation.

L'analyse univariée consiste à calculer les fonctions de densité de probabilité de présence et d'absence de glossines en fonction de chaque variable, prise séparément. Cette approche est limitée par le fait que la distribution des glossines est plus le résultat des interactions entre un ensemble de facteurs environnementaux que de l'influence d'un facteur unique. La simplicité de l'analyse univariée fait courir le risque d'omettre des interactions importantes entre les variables et ne reflète pas la complexité de l'écologie du vecteur.

Robinson *et al.* décrivent donc dans une autre publication l'analyse multivariée des données, et comparent deux méthodes : l'analyse linéaire discriminante et la classification par maximum de vraisemblance. La seconde méthode, plus puissante, est utilisée pour prédire la distribution de trois espèces de glossines dans la « *common fly belt* ». De même que dans les travaux de Rogers *et al.*, les variables les plus discriminantes varient selon l'espèce concernée :

- pluviométrie totale, minimum de la température maximale et élévation pour *G. morsitans centralis*
- maximum de la température minimale, minimum de la température maximale et moyenne de la température maximale pour *G. morsitans morsitans*
- maximum de la température minimale, minimum de la température moyenne et minimum de la température maximale pour *G. pallidipes* (Robinson *et al.*, 1997a).

La distribution des glossines prédite par analyse multivariée en Zambie a ensuite été superposée dans un SIG à des couches d'informations relatives à l'épidémiologie et à l'économie de la trypanosomose (limites des parcs nationaux, pourcentage d'agriculture, densité de bétail, potentiel arable). Les aires prioritaires, où la mise en place d'un contrôle de la maladie aurait le meilleur impact économique, ont ensuite été définies grâce à un arbre de décision, illustrant l'aspect pratique et opérationnel de ce type d'études (Robinson, 1998).

Ces différents modèles de distribution des glossines ont été appliqués à d'autres pays africains, puis compilés dans le cadre du Programme contre la trypanosomose africaine (*Programme Against African Trypanosomosis*) pour créer des cartes de répartition de chaque espèce de glossine au niveau continental (cf. Figure 19) (Hendrickx *et al.*, 2001).

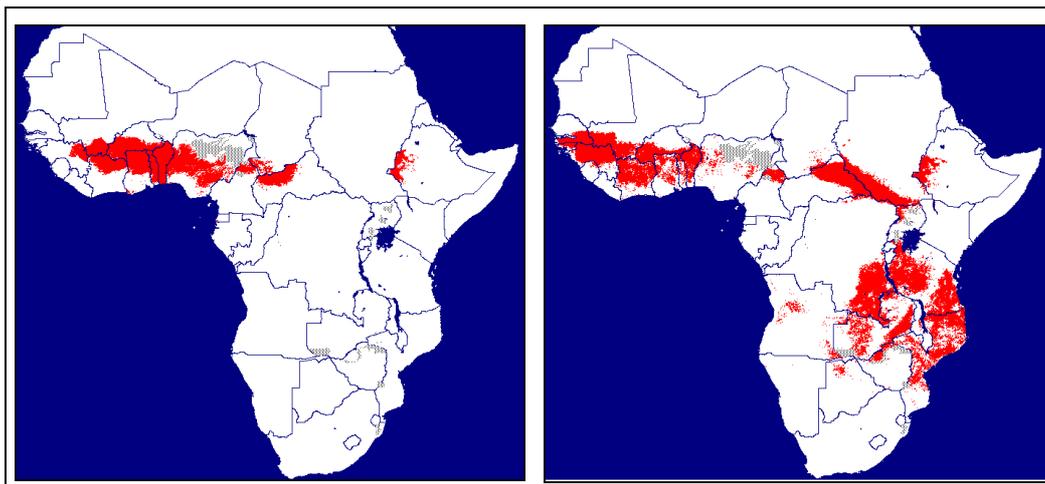


Figure 19 : Répartition de *Glossina palpalis tachinoides* (à gauche) et *Glossina morsitans morsitans* (à droite) en Afrique (source : FAO, <http://www.fao.org/paat/html/home.htm>)

3.1.2.3. Exemple de la Fièvre de la Vallée du Rift en Afrique de l'Est et du Sud

3.1.2.3.1. Etudes préliminaires : FVR et pluviométrie

En 1985, Davies *et al.* apportent la preuve que les épizooties de FVR au Kenya sont liées à des pluies supérieures à la moyenne, prolongées dans le temps et étendues dans l'espace (Davies *et al.*, 1985). Cette hypothèse avait déjà été suggérée par d'autres auteurs, mais les séries étudiées alors n'étaient pas assez longues pour conclure à une corrélation véritable (Daubney *et al.*, 1931; Scott *et al.*, 1956). L'originalité de l'approche de Davies *et al.* est d'avoir calculé sur une période de 33 ans un indice mensuel, intégrant non seulement la différence à la moyenne de la pluviométrie totale mais aussi le nombre de jours pluvieux :

$$I_{ij} = (P_{ij} - \overline{P_i}) \times N_{ij}$$

I_{ij} : indice pluviométrique pour le mois i de l'année j
 P_{ij} : pluviométrie totale (en mm) pour le mois i de l'année j
 $\overline{P_i}$: pluviométrie moyenne du mois i
 N_{ij} : nombre de jours pluvieux pour le mois i de l'année j

L'indice global, mis en relation avec les épizooties de FVR (cf. Figure 20), est la moyenne des indices I_{ij} calculés en 5 sites différents, où des épizooties de FVR avaient été confirmées. Sur le graphe la ligne zéro représente la pluviométrie mensuelle moyenne des 33 années. La corrélation entre les quatre épisodes de FVR et un surplus pluviométrique prolongé dans le temps est évidente.

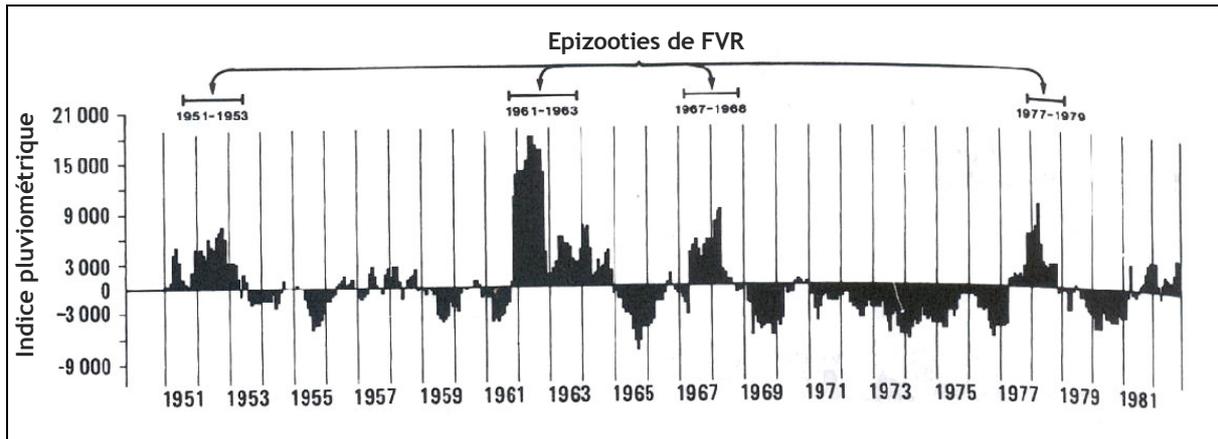


Figure 20 : Relation entre les épizooties de FVR et la pluviométrie au Kenya pour les années 1951-1982 (d'après Davies *et al.*, 1985)

Les auteurs expliquent ce phénomène par la mise en eau des *dambos* lorsque les pluies sont suffisamment abondantes, permettant l'éclosion des oeufs d'*Aedes* en diapause dans le sol et l'émergence d'un grand nombre d'adultes. En outre, la persistance des conditions humides et de la couverture nuageuse sont des facteurs très favorables à la reproduction des *Aedes* et des *Culex*, favorisant ainsi l'apparition de la maladie.

3.1.2.3.2. Modélisations de la FVR

Le travail de Linthicum *et al.* en 1987 (Linthicum *et al.*, 1987) confirme ces hypothèses et introduit pour la première fois l'idée d'utiliser des données obtenues par télédétection comme indicateurs de l'activité virale au Kenya. En particulier, la dynamique de la végétation chlorophyllienne, directement corrélée à la pluviométrie et mesurée régulièrement par les satellites météorologiques de la NOAA, pourrait être reliée aux épisodes de FVR.

Les auteurs ont donc relevé les densités de populations de moustiques, la mise en eau des *dambos* et l'activité virale de la FVR de septembre 1982 à mars 1985, sur deux sites appartenant aux zones écologiques II et III (cf. §1.2.2.2). La pluviométrie mensuelle sur cette même période a été fournie par le Département Kenyan de Météorologie et le NDVI hebdomadaire a été calculé à partir des données fournies par la NOAA.

Pour chaque site, un indice nommé PVAF (*Potential Viral Activity Factor* ou facteur d'activité virale potentielle) a été calculé, selon la formule suivante :

$$PVAF = \frac{A \times 10^0 + B \times 10^1 + C \times 10^2 + D \times 10^3}{4}$$

A : nombre de pixels où $0.05 < NDVI < 0.20$

B : nombre de pixels où $0.20 < NDVI < 0.29$

C : nombre de pixels où $0.29 < NDVI < 0.37$

D : nombre de pixels où $0.37 < NDVI < 0.65$

Ces deux ans et demi d'observation ont montré que la valeur du PVAF a été maximale pendant (pour la zone II) ou juste après (pour la zone III) la période de densité maximale des vecteurs et d'activité de la FVR (Figure 21). Les images du NDVI sur l'ensemble du Kenya aux mêmes périodes présentent également des valeurs très élevées dans les deux zones d'études.

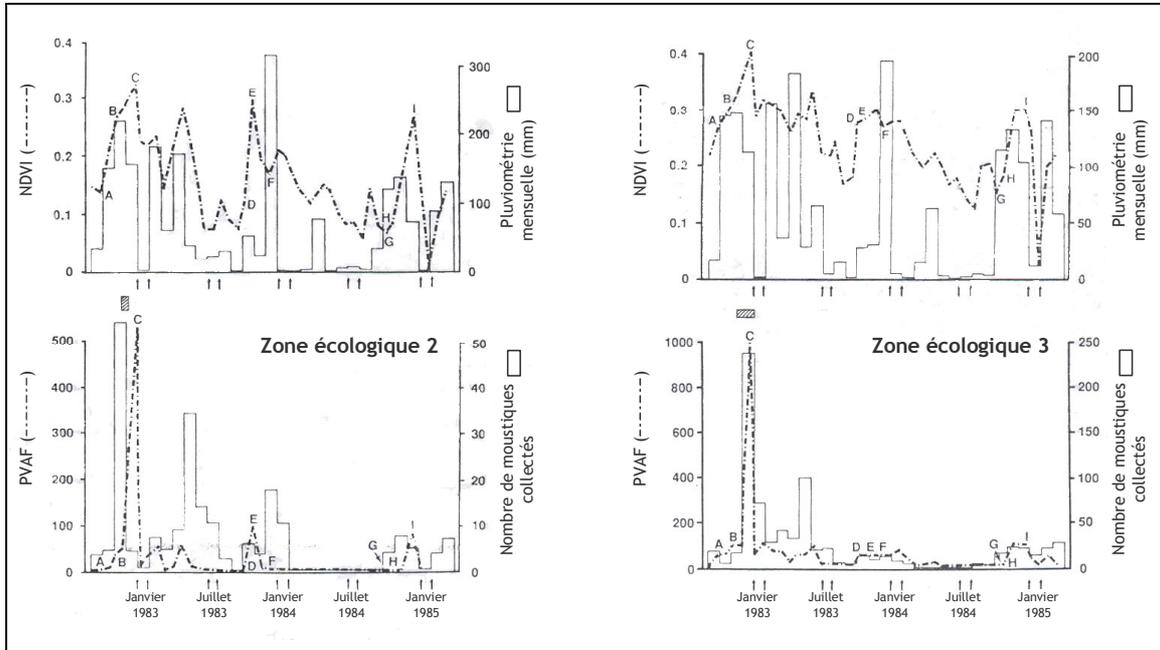


Figure 21 : Représentation des valeurs de NDVI et PVAF, de la pluviométrie mensuelle et de la densité de moustiques de septembre 1982 à mars 1985, dans les zones écologiques II (a) et III (b) du Kenya (d'après Linthicum *et al.*, 1987).

Il était cependant nécessaire d'approfondir cette étude, afin de produire un modèle fiable et surtout prédictif dans des délais suffisants pour permettre le déploiement d'activités de prévention sur le terrain, avant le déclenchement des épizooties.

En 1990, la même équipe publie les résultats d'une étude menée dans un site de la zone écologique III (Linthicum *et al.*, 1990). Pendant 7 ans, le NDVI et la pluviométrie mensuels ont été relevés, ainsi que les périodes d'inondation des *dambos*.

Les auteurs confirment que le NDVI est bien corrélé à la pluviométrie et montrent qu'un NDVI supérieur à 0.43 est un bon indicateur de l'inondation des *dambos*, considérée comme l'étape préliminaire d'une épizootie de FVR (cf. Figure 22).

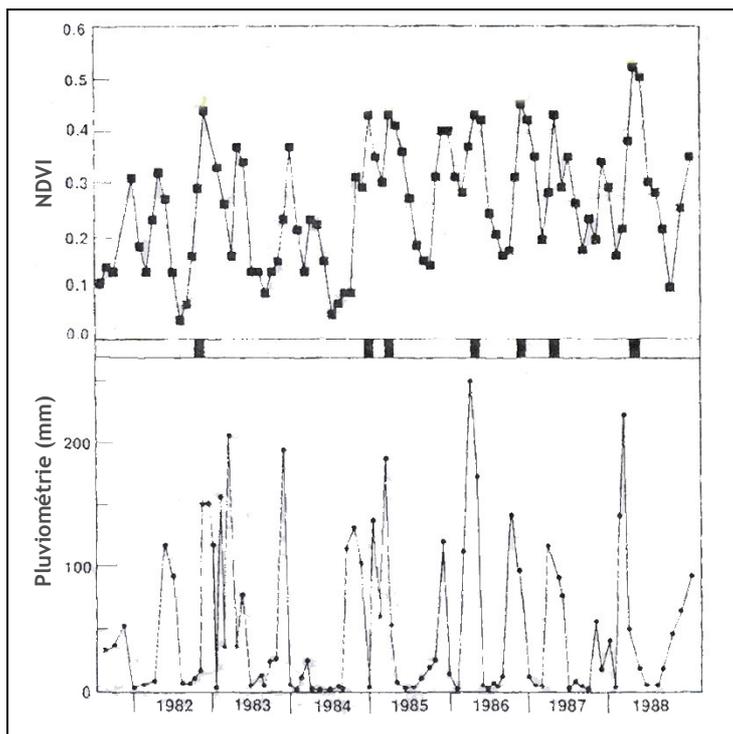


Figure 22 : Graphique des valeurs de NDVI et de la pluviométrie mensuels, d'octobre 1981 à décembre 1988 (d'après Linthicum *et al.*, 1990).

Le NDVI mensuel semble être un bon indicateur de l'activité virale, mais il ne permet pas, utilisé seul, de prédire les épisodes dans un délai suffisant. L'équipe de Linthicum a donc évalué d'autres indicateurs climatiques potentiels, liés à la pluviométrie et mesurables par télédétection (Anyamba *et al.*, 2001; Linthicum *et al.*, 1999) :

- le phénomène *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO), cause principale de la variabilité annuelle globale du climat et estimé par le *Southern Oscillation Index* (SOI). Après observations de séries sur une période de près de 50 ans (janvier 1950-mai 1998), il apparaît que l'activité virale et une pluviométrie au-dessus de la moyenne suivent toujours une période d'anomalie négative du SOI. Cependant la capacité de prédiction du SOI seul n'est que de 67%, et l'intensité de l'anomalie est sans relation avec l'importance de l'épizootie.
- les températures de la surface de la mer (SST) dans le Pacifique équatorial et dans l'océan Indien, liées aux précipitations en Afrique de l'Est. L'importance de l'anomalie de la SST de l'océan Indien est un indicateur de l'intensité et de la durée de l'activité virale, mais uniquement lorsque les deux valeurs de SST sont simultanément et anormalement élevées.

Les quatre variables, NDVI, SOI, SST Pacifique et SST Océan Indien, ont été combinées dans un modèle ARIMA, spécifique à l'analyse des séries temporelles. Le meilleur modèle met en jeu la SST du Pacifique équatorial, la SST de l'océan Indien et le NDVI et prédit 100% des épisodes de FVR en Afrique de l'Est avec 2 à 5 mois d'avance.

Un tel modèle est parfaitement applicable sur le terrain, puisque les données utilisées sont facilement disponibles et le délai suffisant pour la mise en place des actions de prévention. Il est cependant limité à l'Afrique de l'Est, les relations entre indicateurs climatiques et pluviométrie étant différentes dans les autres parties du continent.

Anyamba *et al.* (Anyamba *et al.*, 2002) ont par la suite essayé de mettre en place un modèle extrapolable à l'ensemble du continent, ou tout au moins à l'ensemble des écosystèmes favorables à la FVR. Dans ce cas, l'indicateur le plus pertinent est le NDVI, puisqu'un NDVI élevé est corrélé positivement à la pluviométrie dans quelque région que ce soit.

Les auteurs ont supposé que la FVR n'apparaissait que dans des écosystèmes de savanes propices au rassemblement entre hôtes et vecteurs autour de *dambos* (en Afrique de l'Est et du Sud), de mares ou de zones irriguées (au Sahel). Ils ont donc créé un masque correspondant aux savanes, en se basant sur la moyenne du NDVI de 1981 à 2000. Les pixels dont la valeur se situait entre 0.15 et 0.4 unités de NDVI ont été classés en savane, ainsi que le delta et la vallée du Nil, où l'activité de la FVR est récurrente.

A l'intérieur de ce masque, le risque d'épizooties de FVR a été défini selon la persistance d'anomalies positives du NDVI et matérialisé par les règles suivantes :

1. Les zones à risque doivent présenter des anomalies supérieures à 0.025 unité de NDVI pendant trois mois consécutifs au minimum :

$$\begin{aligned} \Delta NDVI_t &> 0.025 \\ \text{et } \Delta NDVI_{t-1} &> 0.025 \\ \text{et } \Delta NDVI_{t-2} &> 0.025 \end{aligned}$$

2. La moyenne des anomalies du NDVI de ces trois mois consécutifs doit dépasser la valeur seuil de 0.1 unité de NDVI :

$$\frac{\sum_{t=2}^t \Delta NDVI_t}{3} > 0.1$$

Ces règles de décision, appliquées sur l'ensemble de la zone de savanes de juillet 1981 à juillet 2000, ont permis de cibler des régions à risque dans le temps et dans l'espace (Figure 23).

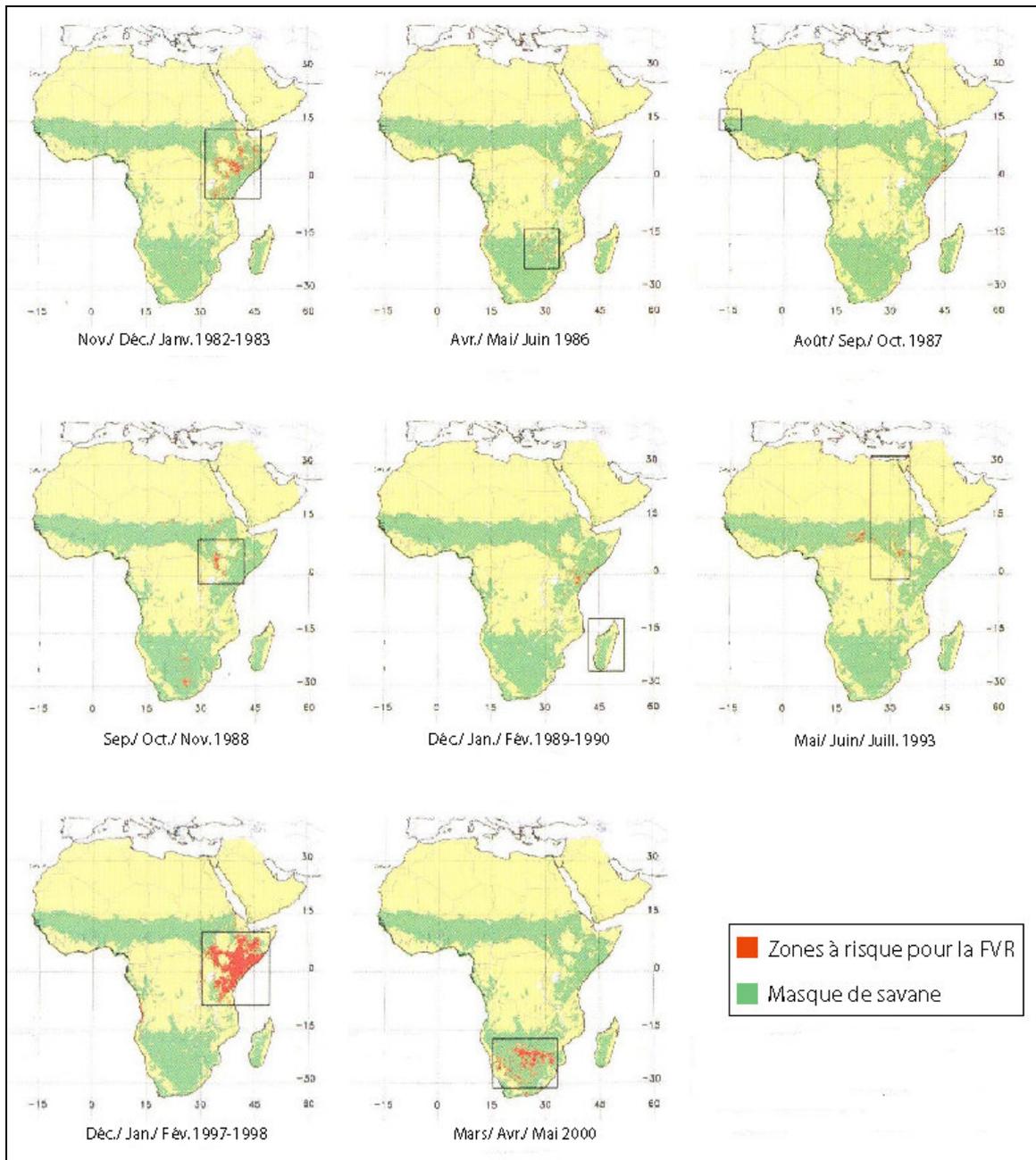


Figure 23 : Cartes du risque d'épizooties de FVR prédit par Anyamba *et al.*, 2002

Les résultats obtenus ont été comparés avec l'historique des épisodes de FVR sur le continent africain et à Madagascar. Les épizooties les plus conséquentes (Madagascar 1990-91, Egypte 1993, Kenya 1997-98) sont prédites avec succès par le modèle, avec une bonne estimation de l'extension géographique des épisodes. Les manifestations plus restreintes de l'activité virale semblent par contre plus difficiles à détecter, en particulier en zone sahélienne. Des épizooties

de faible ampleur, rapportées au Sénégal (1993), au Burkina Faso (1983) et en République Centrafricaine (1985) ne sont pas associées à des anomalies persistantes du NDVI.

Ce défaut du modèle peut être expliqué par deux observations. D'une part, la FVR en Afrique de l'Ouest n'est pas limitée strictement à l'écosystème savane, ce qui remet en question la pertinence du « masque savane » appliqué par les auteurs. Les cas de FVR relevés lors des épizooties mauritaniennes étaient localisés dans la vallée du fleuve Sénégal ou dans les zones arides situées plus au nord, régions non incluses dans le masque. D'autre part, le modèle est basé sur l'écologie de la transmission en Afrique de l'Est, qui est différente au Sahel.

Des améliorations pourraient être apportées au modèle, en adaptant la définition des règles de décision et des valeurs seuil aux conditions de transmission particulières de la FVR en Afrique de l'Ouest et en Afrique centrale.

Le modèle reste par contre pertinent pour les régions orientales et australes du continent africain, où l'accroissement de l'activité virale est lié à des conditions climatiques anormales. Il peut fournir aux autorités de santé des informations en temps réel sur les lieux où les actions de prévention et de contrôle doivent être ciblées, réduisant ainsi le coût de la surveillance de la maladie. Selon les auteurs, une meilleure compréhension de la biologie et des interactions entre les vecteurs, l'environnement et le climat serait toutefois susceptible de le perfectionner.

3.1.3. Les études à grande échelle (niveau local)

3.1.3.1. Principe des études à grande échelle

L'utilisation de données satellitales à haute résolution est basée sur l'idée que l'on peut identifier sur une image des éléments précis de l'environnement favorables au développement des vecteurs de maladies et à l'installation des hôtes. On peut y rechercher les gîtes de pontes ou les aires de repos pour les vecteurs arthropodes, les abris pour les vecteurs vertébrés (terriers, tanières, etc.), les villages ou encore les zones d'abreuvement ou de pâturage des animaux. Ces éléments ou indicateurs, sont généralement de petite taille (quelques dizaines ou centaines de m²) et c'est en cela que les données à haute résolution sont intéressantes.

Contrairement aux études au niveau national ou continental, celles menées au niveau local n'utilisent que rarement les séries temporelles, d'autant plus que la résolution temporelle des images à haute résolution spatiale est assez faible, de quelques jours à quelques dizaines de jours selon les cas. Le principe est plutôt de choisir une ou deux images à des dates précises, correspondant à la période où le risque de transmission est le plus élevé, de mettre en place

une méthode d'identification des sites favorables sur un échantillon puis d'extrapoler à l'ensemble de l'image.

Les images satellitales les plus appropriées et les plus fréquemment employées sont celles fournies par les capteurs LandSat et SPOT, dont la résolution spatiale atteint respectivement 15m et 2.5m pour le canal panchromatique (cf. Annexe 1). Les scènes couvrent 3600 km² pour SPOT, entre 30000 et 35000 km² pour LandSat, selon les capteurs. Le choix des images dépend alors de la taille des objets recherchés et de l'étendue de la zone d'étude.

Le protocole suivi est déterminé par les connaissances relatives à l'épidémiologie de la maladie et par les moyens logistiques disponibles. Dans certains cas, les sites dangereux sont déjà connus par les scientifiques, suite à des enquêtes de terrain et à des expériences de laboratoire. Il suffit alors de les identifier sur une image de résolution appropriée. La plupart du temps, cependant, les images sont d'abord intégrées dans un SIG ; des modèles statistiques sont utilisés pour chercher des corrélations entre l'abondance du vecteur ou la prévalence de la maladie (mesurées sur le terrain dans des échantillons) et l'environnement. Cette démarche est alors similaire à celle des travaux à petite échelle, à cela près que l'on prend en compte l'écologie particulière du vecteur dans la zone concernée.

Les méthodes d'analyse du risque au niveau local sont plus complexes que celles au niveau national ou continental, pour lesquelles la recherche de corrélations suffit généralement. Les données satellitales peuvent être intégrées sous une forme « brute », c'est à dire que l'on mesure dans le SIG les valeurs de chaque bande spectrale en différents points de l'espace. La plupart du temps, cependant, on a recours à des classifications, afin de produire des cartes d'occupation du sol des zones d'étude, partant du principe que chaque classe a une signature spectrale spécifique (Curran *et al.*, 2000). Selon les connaissances que l'analyste a du terrain, il choisit entre deux méthodes de classification : non supervisée (ou automatique) et supervisée (Bonn, 1996; Bonn et Rochon, 1992).

La carte d'occupation du sol obtenue est ensuite intégrée dans le SIG, où elle est superposée à d'autres données environnementales (réseau hydrographique, élévation, villages, etc.) ainsi qu'aux données sur la distribution des vecteurs ou de la maladie. Les fonctions avancées du SIG permettent ensuite de calculer des distances entre objets ou des proportions de classes d'occupation du sol dans des zones d'influence ou *buffers*.

Enfin, les variables mesurées ou calculées dans le SIG alimentent des modèles statistiques ou géostatistiques : analyse discriminante, régressions logistique ou linéaire, krigeage, etc. On

mesure des corrélations entre les variables environnementales d'une part, et une abondance de vecteurs, un taux d'infection ou un nombre de malades d'autre part, afin de discriminer les variables les plus significatives. Celles-ci sont conservées dans le modèle final, afin de prédire le risque dans les zones où il était inconnu, à la condition que le système pathogène y soit identique.

Ces méthodes sont l'objet d'un intérêt croissant de la part des épidémiologistes et des géographes, comme le montre le chapitre suivant, où quelques travaux sur les maladies vectorielles au niveau local sont décrits. La combinaison de la télédétection, des SIG et des statistiques est variable selon les auteurs, chacun utilisant les outils selon son contexte et sa problématique.

3.1.3.2. Exemples de travaux sur les maladies vectorielles au niveau local

Les études sur l'épidémiologie environnementale des maladies vectorielles abondent dans la littérature, empêchant d'en dresser ici une liste exhaustive. Nous avons donc choisi d'en présenter un échantillon, représentatif des méthodes évoquées ci-dessus.

Le protocole le plus simple est celui utilisé par Dale et Morris (Dale et Morris, 1996) pour localiser de manière effective et économique les gîtes de ponte de *Culex annulirostris*, vecteur d'arboviroses, dans la ville de Brisbane en Australie. Les gîtes de ponte ayant été décrits auparavant par les entomologistes comme des réceptacles d'eau saumâtre d'au moins 100m², les auteurs ont choisi des photographies aériennes au 1/30000^{ème} et ont localisé les sites favorables par simple interprétation visuelle. Des relevés de terrain ont par la suite permis de valider leur méthode de reconnaissance et de l'extrapoler à d'autres quartiers de la ville. Cependant, le fait que l'interprétation des images soit visuelle en limite l'usage à des territoires restreints. L'association de la télédétection d'images satellitales, du SIG et des statistiques reste donc de loin la plus intéressante, d'autant plus que les capteurs les plus récents offrent des images de résolution spatiale très élevée, adaptée aux dimensions des sites de reproduction ou de repos des vecteurs.

Au Burkina Faso, de La Rocque *et al.* ont exploité la haute résolution spatiale des images SPOT pour identifier et caractériser les forêts galeries, habitats des glossines ripariennes, sur une zone d'étude de 1200 km². Les différents paysages des vallées, caractérisés par leur formation végétale et des critères hydrologiques, géomorphologiques et édaphiques, sont plus ou moins favorables aux glossines. Grâce à la télédétection et à un logiciel d'analyse

paysagère (Clapas[®]), ces paysages ont pu être localisés précisément. Couplés dans un SIG aux autres couches d'information spatialisées disponibles, relatives en particulier à l'occupation du sol et aux systèmes d'élevage, ils ont permis aux auteurs de mettre en évidence les zones à risque pour la transmission de la trypanosomose animale. Ces zones ne représentent que 15% de la surface totale étudiée, limitant ainsi l'envergure des actions de prévention et de contrôle de la maladie (de La Rocque *et al.*, 2004; de La Rocque *et al.*, 2001; Michel *et al.*, 2002; Michel *et al.*, 1999).

Beck *et al.* ont testé l'efficacité de l'analyse discriminante et de la régression linéaire pour classer des villages selon leur risque de transmission de paludisme, dans une zone de 1160 km², au Mexique. Les auteurs se basent sur l'hypothèse que l'abondance d'*Anopheles albimanus*, vecteur de la maladie, est un bon indicateur du risque de transmission. Le principe est de faire une carte d'occupation des sols à partir d'une image Landsat TM, puis de chercher des corrélations entre les proportions de chaque classe dans un rayon (ou *buffer*) de 2 km autour des villages et l'abondance de moustiques, mesurée sur le terrain par piégeage. Selon le modèle, la variable prédite est modifiée : on prend le logarithme de l'abondance pour la régression linéaire et on classe les villages selon l'abondance de vecteurs, « élevée » ou « faible », pour l'analyse discriminante. Les deux modèles montrent que les classes d'occupation du sol les plus corrélées à l'abondance des vecteurs sont les pâturages et les marécages, et prédisent plus de 70% des villages à haut risque (Beck *et al.*, 1994; Beck *et al.*, 1997).

L'analyse discriminante a également été employée avec succès pour prédire :

- les villages à haut risque de filariose dans le delta du Nil à partir de l'occupation du sol, du NDVI et d'indices d'humidité issus d'une image Landsat TM (Hassan *et al.*, 1998)
- les rizières favorables au développement des moustiques en Californie, en fonction de la distance aux pâturages, mesurée dans un SIG, et du développement précoce de la canopée, estimé par des images Landsat et Daedalus (Wood *et al.*, 1992)
- la présence de rongeurs infectés par le virus Sin Nombre (SNV) au Nevada, selon l'altitude, la pente, la végétation et l'hydrologie, estimées par un modèle numérique de terrain et une image Landsat TM (Boone *et al.*, 2000).

Les risques d'infection de l'homme par ce même SNV ont été prédits par régression logistique, dans une autre région des Etats-Unis (Glass *et al.*, 2000).

Thomas et Lindsay ont mis en place un modèle prédictif du risque de transmission du paludisme infantile en Gambie, en associant l'abondance de moustiques et la proportion de classes d'occupation du sol, issues d'une image Spot4, dans un rayon de 1 km autour des villages. Deux modèles successifs ont été appliqués : la régression multiple et la régression logistique (Thomas et Lindsay, 2000).

Enfin, Jeanne a utilisé le krigeage pour mettre en évidence les tendances de regroupement des villages endémiques pour la schistosomose à Madagascar, distinguant ainsi deux zones hyperendémiques. L'observation de ces deux zones, superposées à des données physiques et socio-économiques dans un SIG, laisse supposer que la proximité d'une piste fréquentée par les zébus ainsi que l'appartenance à un bassin versant sont des facteurs de risque potentiels (Jeanne, 2000). Ces hypothèses sont très vraisemblables compte-tenu de l'épidémiologie de la maladie : l'homme s'infeste en entrant dans l'eau contaminée par des fèces de bovins.

Ces quelques exemples d'analyse spatiale des maladies vectorielles montrent bien que les protocoles de recherche se fondent essentiellement sur l'épidémiologie particulière des maladies dans les milieux considérés. Les modèles et les données sont choisis en fonction des hypothèses concernant la transmission de l'agent pathogène et les écologies particulières des vecteurs, des hôtes et des réservoirs.

3.1.4. Bilan et critiques

Les modèles au niveau national, régional ou continental ont été utilisés pour prédire la répartition de vecteurs ou de maladies sur des surfaces importantes, dans le cadre de programmes de contrôle nationaux ou internationaux. Ils constituent donc, par leur aspect opérationnel immédiat, une aide fort appréciable pour les décideurs. Cet aspect est renforcé par le libre accès aux images à basse résolution par le biais d'internet.

La revue des travaux effectués sur la FVR montre la validité et l'intérêt des modèles basés sur des données satellitales à basse résolution pour prédire les épisodes de FVR en Afrique de l'est, où le cycle de transmission a été étudié dans ses moindres détails. Cependant, les modèles qui ne sont valides que sur des surfaces homogènes et de grande étendue sont souvent mis en échec dès que l'organisation spatiale des paysages devient trop complexe (Lointier *et al.*, 2001), ou lorsque l'épidémiologie des maladies varie d'une région à l'autre. C'est le cas de la FVR, pour laquelle les mécanismes de transmission diffèrent en Afrique de

l'est et en Afrique de l'ouest, empêchant l'utilisation du modèle de Linthicum *et al* dans les régions sahéliennes occidentales du continent. Cette limite a contribué à crédibiliser les approches à plus grande échelle, telles que la recherche d'indicateurs sur des données à haute résolution.

L'interprétation d'images à haute résolution, les SIG et les statistiques permettent d'étudier la dimension spatiale et les facteurs de risque des maladies, en particulier vectorielles, à un niveau local. L'atout majeur de cette approche est la prise en compte des spécificités des cycles épidémiologiques dans des milieux particuliers. Cet avantage a cependant pour corollaire l'usage plus limité des modèles prédictifs mis en place ; en effet, les modèles ne sont extrapolables qu'à des milieux semblables, dans lesquels les vecteurs et les hôtes ont des comportements similaires. Il est donc plus délicat d'utiliser ces techniques dans le cadre de programmes de lutte à un niveau national, d'autant plus que le coût élevé des images peut en limiter l'acquisition. Cependant, ce type d'études est la plupart du temps mené dans des zones d'épidémie ou d'hyperendémie, pour lesquelles la lutte et la prévention sont prioritaires ; la cartographie du risque de transmission est alors une donnée fort appréciée des décideurs locaux.

Une autre limite que l'on peut trouver à l'approche par modélisation, quel que soit le niveau de l'étude, est le risque de perdre de vue la réalité épidémiologique. En effet, la puissance de la télédétection et des modèles peut inciter à tester un grand nombre de variables, sans forcément tenir compte de leur pertinence dans le contexte de la maladie. On risque alors de trouver des corrélations entre l'abondance de vecteurs ou la prévalence de la maladie, et des facteurs environnementaux dont on explique difficilement l'influence d'un point de vue épidémiologique. Et cela est d'autant plus vrai lorsque le nombre de variables prédictives retenues est important.

En fait, pour qu'un modèle puisse être véritablement une aide à la compréhension d'un problème, il doit être facilement interprétable (Bernard et Bureau, 1999; Tran, 2004). Son élaboration implique donc un choix judicieux des variables prédictives, leur nombre ne devant être ni trop limité, le modèle étant alors simpliste, ni trop important, le modèle étant alors abstrait. La meilleure approche est donc de sélectionner des variables ayant véritablement du sens, soit parce qu'elles permettent le développement des vecteurs ou des hôtes, soit parce qu'elles favorisent la rencontre entre les éléments du système pathogène.

Nous avons, dans ce paragraphe, présenté les différentes méthodes utilisées pour résoudre des problèmes complexes en santé-environnement, ainsi que leurs atouts et leurs limites. Deux points importants, thématique et méthodologique, émergent de cette revue bibliographique.

D'une part, les modèles prédictifs de la FVR mis en place en Afrique de l'est ne sont pas valables en Afrique de l'ouest, car les mécanismes épidémiologiques diffèrent. Par ailleurs, on sait que le milieu influence fortement la transmission de la maladie et que le Ferlo est la principale zone d'enzootie au Sénégal. La nécessité d'étudier le système pathogène de la FVR dans une communauté rurale du Ferlo, à un niveau local, apparaît alors clairement.

D'autre part, bien que les outils employés soient identiques, les protocoles mis en place sont librement adaptés à chaque cas, sous-tendant ainsi une réflexion approfondie sur la problématique de la maladie.

C'est donc à partir de ces exemples et de ces réflexions que nous avons mis en place le protocole d'étude de la fièvre de la vallée du Rift à un niveau local, dans la zone de Barkedji.

3.2. Protocole de recherche pour l'étude de la FVR à Barkedji

3.2.1. Hypothèses préalables

Dans les chapitres précédents, nous avons souligné l'intérêt de faire le point sur les connaissances épidémiologiques avant d'entamer un travail de modélisation. Les mécanismes de transmission de la FVR dans la zone de Barkedji ont été présentés au sous-chapitre 2.3. L'objectif final est de spatialiser le risque de transmission, c'est à dire l'intensité du contact hôte-vecteur, sur l'ensemble de la zone d'étude et à la période où la transmission est maximale.

3.2.1.1. Ecologie vectorielle

Pour cela, il nous faut estimer la répartition de l'abondance des vecteurs d'une part, et des hôtes d'autre part, puis intégrer ces données dans un modèle spatial. La télédétection permet de pallier l'absence de données de terrain sur la répartition spatiale des insectes en localisant des indicateurs environnementaux d'abondance.

Ces indicateurs sont déterminés par les hypothèses suivantes, posées par les entomologistes :

- les vecteurs ont besoin de gîtes de ponte adéquats pour se multiplier ; ces gîtes sont les bords de mares boueux et ombragés pour les *Aedes* et l'eau libre ombragée pour les *Culex*

→ H1 : *plus une mare est couverte par la végétation, plus elle est favorable au développement des vecteurs*

→ H2 : *plus une mare est étendue et découpée, plus les gîtes sont nombreux*

→ H3 : *plus une mare reste en eau longtemps, plus elle est favorable au développement des vecteurs*

- les vecteurs adultes « émergent » d'une mare temporaire et s'en éloignent pour chasser

→ H4 : *plus on s'éloigne de la mare, plus la densité de vecteurs diminue*

Au sous-chapitre 3.1, nous avons vu que le traitement d'images satellitales offrait la possibilité de détecter les surfaces en eau et la végétation, répondant ainsi à nos besoins. La justification du choix des images ainsi que les étapes des traitements sont présentées au paragraphe 5.1.1. Les hypothèses H1 à H3 montrent que les mares sont plus ou moins favorables à la multiplication des vecteurs. Le paragraphe 5.1.2 présente le modèle de décision mis en œuvre ainsi que les méthodes utilisées pour attribuer à chaque mare un indicateur, quantifiant sa capacité à permettre le développement des vecteurs. L'hypothèse H4 sert de base à l'estimation de l'abondance relative des vecteurs en tout point de la zone d'étude, détaillée au paragraphe 5.1.3.

3.2.1.2. Comportement des troupeaux

La répartition des hôtes est plus simple à estimer, en partant d'enquêtes de terrain sur un zone échantillon et en analysant ensuite les données de recensement, couplées aux données disponibles sur l'environnement. Là encore, c'est sur les connaissances des experts (pastoralistes) qu'est fondée la réflexion :

- les campements sont localisés à proximité des ressources en eau et/ou en pâturage
 - H5 : *la répartition spatiale des troupeaux est essentiellement liée à la disponibilité et à la qualité des ressources*
- sur la zone de Barkedji, les sédentaires et les transhumants se côtoient, ces derniers y passant seulement la saison des pluies
 - H6 : *le comportement spatial et la répartition des éleveurs est susceptible de changer selon leur statut*

La carte d'occupation des sols, décrivant le milieu et montrant la répartition des grands paysages pastoraux, peut être obtenue à partir d'une image satellitale de résolution appropriée, comme nous le décrivons dans le paragraphe 4.1.1. Le protocole d'enquêtes sur le terrain,

ainsi que les analyses statistiques exploratoires et le modèle spatial final de densité des troupeaux sont présentés au paragraphe 4.1.2.

3.2.1.3. Règles du contact hôtes-vecteurs

Enfin, le contact entre hôtes et vecteur est régi par les règles suivantes :

- le virus est transmis d'un animal à un autre par des vecteurs
 - ➔ *H7 : plus la densité de troupeaux est importante, plus le risque de transmission du virus augmente, avec une limite représentée par le pool de vecteurs (si le nombre de vecteurs est fixe, et que le nombre d'hôtes augmente, il arrive un moment où les vecteurs sont « dépassés » et ne peuvent pas piquer plus)*
 - ➔ *H8 : plus l'abondance vectorielle est élevée, plus le risque de transmission est important*
- les moustiques femelles adultes ont besoin de faire un repas de sang pour pondre. Pour cela, elles volent au hasard autour de la mare, puis « captent » l'odeur d'un hôte et se dirigent alors dans sa direction. Leur trajet est facilité par la présence de végétation (Jachowski L.A.Jr,1954, cité par Hassan *et al.*, 1998).
 - ➔ *H9 : plus la végétation est dense sur le trajet entre mare et campement, plus les vecteurs parviennent facilement au parc de nuit*

L'estimation du risque nécessite d'associer les données spatialisées sur les vecteurs et les hôtes, selon les règles de décision H7 à H9. L'outil le plus approprié est le SIG, pour ses capacités d'analyse spatiale entre objets de nature différente. Les règles de décision servent de point de départ à l'élaboration d'un modèle spatial, présenté au paragraphe 6.1.2, attribuant à chaque point de la zone d'étude un niveau de risque relatif.

3.2.2. Étapes du protocole de recherche

Dans un souci de clarification, les étapes du protocole d'étude sont schématisées à la figure 24 (cf. page suivante); en bleu sont mentionnées les données de départ et en noir les résultats intermédiaires obtenus. Les outils et méthodes utilisés pour parvenir à ces résultats sont indiqués dans les cercles de couleur verte. Nous précisons que CAH est l'abréviation de Classification Ascendante Hiérarchique.

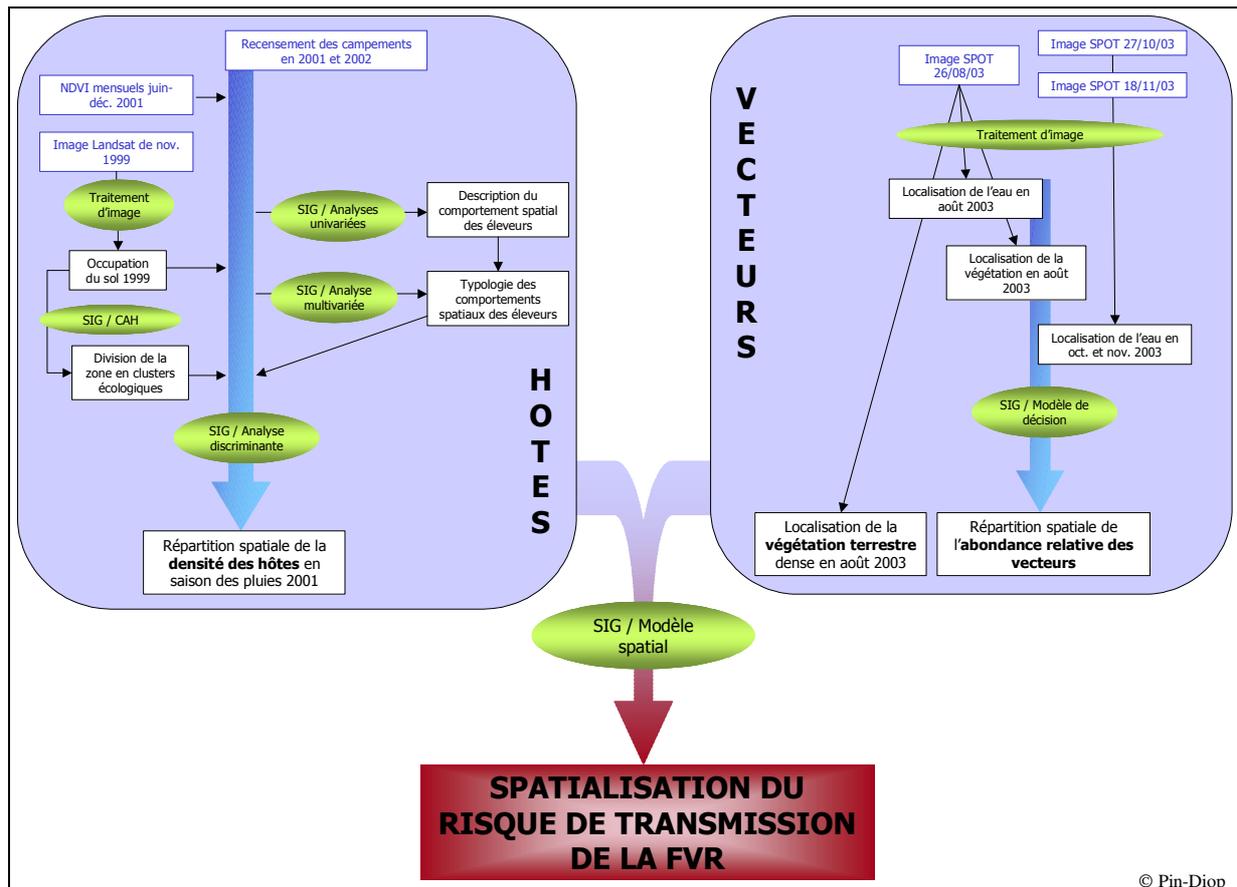


Figure 24 : Protocole de spatialisation du risque de la FVR au niveau local

Le schéma est scindé en deux parties, qui se rejoignent à la fin : à gauche se trouvent les éléments relatifs aux hôtes et à droite ceux relatifs aux vecteurs. L'intégration des données sur les hôtes et les vecteurs mène au résultat final : la spatialisation du risque de transmission de la FVR à Barkedji.

L'estimation de la répartition spatiale des hôtes (les ruminants domestiques) est le fruit d'étapes successives et complémentaires. Puisque les campements sont installés en fonction des ressources et des grands paysages pastoraux, nous partons d'une image Landsat de novembre 1999 pour produire une carte d'occupation des sols, puis pour faire un zonage écologique. La série des NDVI mensuels de la saison des pluies 2001 est synthétisée afin d'évaluer les variations de l'abondance de végétation.

Parallèlement, des enquêtes de terrain sur un échantillon spatial de la zone nous permettent d'explorer la distribution et le comportement spatiaux des éleveurs, par des analyses statistiques univariées. Une typologie (analyse multivariée) de ces comportements est issue du croisement entre les données de terrain et la carte d'occupation du sol dans le SIG. Enfin un modèle prédictif de la densité de troupeaux sur l'ensemble de la zone est mis en place d'après

les résultats des analyses statistiques descriptives. Ce modèle statistique utilise le SIG pour calculer les variables environnementales nécessaires à l'analyse discriminante.

Côté vecteurs, nous recherchons les indicateurs d'abondance : les mares temporaires et la végétation. Trois images Spot à haute résolution, prises au cours de la saison des pluies 2003, nous servent à localiser les trois éléments essentiels : les surfaces en eau, la végétation aquatique et la végétation terrestre. Les deux premiers servent ensuite à caractériser les mares temporaires et à cartographier l'abondance relative des vecteurs.

Enfin, la répartition spatiale des hôtes et des vecteurs, ainsi que la végétation terrestre qui favorise leur rencontre, sont intégrées dans un modèle de décision spatial. Les sorties de ce modèle sont des cartographies du risque relatif de transmission de la FVR à Barkedji en saison des pluies.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une revue des outils et méthodes de spatialisation du risque appliqués aux maladies vectorielles, en faisant la dichotomie entre études à petite et à grande échelle. Nous avons abordé les modèles prédictifs de la trypanosomose et de la FVR, en insistant sur la chronologie des travaux relatifs à cette dernière, en Afrique de l'est et du sud. Cela nous a permis de dresser un bilan des connaissances et des lacunes sur l'épidémiologie de la FVR dans différents milieux : l'écosystème des *dambos* et le milieu sahélien. Il nous est apparu que l'étude de la FVR à un niveau local, dans le Ferlo, est parfaitement justifié tant du point de vue opérationnel que du point de vue théorique. Nous avons également présenté notre protocole de recherche pour la modélisation du risque relatif de transmission de la FVR, dans la zone de Barkedji et en saison des pluies. Pour mettre en place ce protocole, nous nous sommes inspirés des outils et méthodes relevés dans les travaux en environnement-santé, en les adaptant à la problématique particulière de la FVR en milieu sahélien et au niveau local.

Synthèse de la première partie

La première partie de cette thèse nous a permis de faire le cadrage thématique, conceptuel, géographique et méthodologique de notre sujet : la fièvre de la vallée du Rift dans la zone sahélienne de Barkedji. Nous avons d'abord présenté la maladie et ses relations avec le milieu, de manière à éclairer le lecteur sur la nécessité d'une réflexion pluridisciplinaire, impliquant épidémiologie et géographie. Nous avons ensuite défini les concepts fondateurs de notre étude, puis notre terrain : la communauté rurale de Barkedji. La connaissance des concepts et du milieu nous a alors conduit à expliquer le fonctionnement du système pathogène de la FVR à Barkedji et à en souligner la complexité. Ainsi, en toute connaissance de cause, nous avons ciblé les éléments nécessaires à la spatialisation du risque de transmission de la maladie, que nous avons défini comme l'intensité du contact hôtes-vecteurs en saison des pluies. Enfin, nous avons effectué une revue des principaux travaux publiés en santé-environnement, dans le domaine particulier des maladies vectorielles, en portant une attention particulière à la FVR. Cela nous a permis de mettre en place notre protocole de recherche, à la fois en nous inspirant des méthodes rencontrées dans la littérature, et en ayant à l'esprit notre problématique spécifique. Afin de rendre la lecture plus agréable et de faciliter la compréhension des méthodes, nous avons seulement expliqué le déroulement des étapes du protocole, sans nous attarder sur les détails techniques. Ceux-ci seront détaillées au fur et à mesure dans la deuxième partie, qui applique au cas de la FVR à Barkedji les connaissances acquises dans les trois premiers chapitres.

Deuxième partie. Spatialisation du risque de FVR à Barkedji

Introduction à la deuxième partie

Après avoir fait le cadrage scientifique de notre sujet, nous détaillons dans la deuxième partie le processus de spatialisation du risque relatif de transmission de la FVR à Barkedji, en saison des pluies. Notre protocole de recherche est scindé en deux parties complémentaires, concernant les hôtes et les vecteurs du virus, qui se rejoignent pour aboutir à la spatialisation du risque. Le plan de cette deuxième partie se déduit directement de cette structure. Aux chapitres 4 et 5, nous nous intéressons respectivement aux hôtes principaux du virus, les ruminants domestiques, et aux vecteurs, les moustiques du genre *Aedes* et *Culex*. Le chapitre 6 fait la synthèse des résultats obtenus pour mener à notre objectif : la cartographie du risque relatif. Les trois chapitres sont construits quasiment sur le même plan : présentation des méthodes, suivie des résultats et de la discussion. Nous avons conscience que ce choix peut paraître simpliste, mais en le faisant, nous avons souhaité éviter au lecteur de fastidieux allers-retours entre résultats et méthodes. Le fait que chaque chapitre soit rattaché à une thématique et constitue une entité quasi-indépendante permet de rendre la lecture continue et agréable. Le dernier chapitre ouvre la discussion sur les perspectives soulevées par nos résultats, en particulier les améliorations à apporter et les contributions de notre travail à la prévention de la FVR.

Chapitre 4. Organisation spatiale des hôtes de la FVR

Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la première composante du risque : la répartition spatiale des ruminants domestiques dans la zone de Barkedji. Nous avons posé l'hypothèse que la distribution des campements et donc des troupeaux, était étroitement liée à la disponibilité et à la qualité des pâturages. Notre zone d'étude est une mosaïque de paysages caractéristiques du milieu sahélien, plus ou moins favorables à l'élevage. Nos objectifs sont donc de décrire finement le milieu, en produisant entre autres une carte d'occupation du sol, puis de caractériser le comportement spatial des éleveurs et enfin, d'utiliser ces données environnementales pour prédire la répartition spatiale des troupeaux en saison des pluies. Nous présentons d'abord les méthodes spécifiques à cette étude : traitement des images satellitales, analyses statistiques des données d'enquêtes recueillies dans les campements, modélisation de la densité de troupeaux. Les résultats obtenus sont ensuite détaillés, avant d'être discutés dans le dernier paragraphe.

4.1. Matériels et méthodes

4.1.1. Caractérisation de l'occupation du sol

4.1.1.1. Acquisition des données satellitales

L'hypothèse H5 (cf. §3.2.1.2) indique que la répartition des campements est liée essentiellement à la disponibilité et à la qualité des ressources, et ainsi aux grands paysages pastoraux (*seeno**, *sangre** et *baldiol**). Nous savons également que certains éléments du milieu, la vallée fossile, les pistes et les points d'eau permanents, sont des facteurs d'attraction.

Etant donné les éléments recherchés, de grande taille, nous avons choisi d'utiliser une image LandSat7, de résolution spatiale 30 m en mode multispectral et 15 m en mode panchromatique. L'avantage du capteur LandSat ETM+ est de prendre des images dans sept bandes spectrales, ce qui permet de faire des classifications précises, pour peu que la résolution spatiale soit adaptée aux besoins de l'analyste.

Deux scènes (204-49 et 204-50) couvrant notre zone d'étude et datant de novembre 1999, ont été mises à notre disposition par le Centre de Suivi Ecologique (CSE, Dakar, Sénégal). Notre

étude a été réalisée de 2001 à 2003, années pour lesquelles aucune image LandSat n'était disponible. Cependant, 1999 a été une année normale d'un point de vue pluviométrique, et on peut raisonnablement supposer que la région n'a pas subi de changement majeur en l'espace de quelques années. L'image de 1999 est donc convenable.

Pour évaluer l'abondance des pâturages, nous avons téléchargé à partir du site de Spot Végétation¹⁰ les valeurs mensuelles du NDVI pour la zone d'étude, de juin à décembre 2001. Cette série temporelle de données, nous permettant d'estimer la dynamique de la végétation, a été synthétisée sous Idrisi 3.2[®] par une Analyse en Composantes Principales (ACP) (Lebart *et al.*, 1982).

4.1.1.2. Etablissement de la carte d'occupation du sol

Les procédés actuels de classification d'image développent différentes approches, utilisant à la fois l'interprétation visuelle classique (ou photo-interprétation) et l'interprétation numérique, la première étant basée sur l'identification des objets composant l'espace et la deuxième sur l'étude des propriétés spectrales des pixels individuels. La complémentarité entre l'expérience de l'homme et l'objectivité de l'ordinateur garantit en effet des résultats plus fiables que l'une ou l'autre méthode utilisée seule.

Partant de ce principe, la classification se divise en deux entités: la classification dirigée (ou supervisée) et la classification non-dirigée (ou automatique). La classification dirigée implique que l'on tente d'identifier sur toute une image des spécificités de terrain déjà connues. C'est à partir de la réalité du terrain que l'on crée des sites d'entraînement, éléments essentiels pour la création de la signature spectrale des thèmes retenus.

Dans le cas de la classification non-dirigée, l'analyste tente d'interpréter les informations numériques de l'image selon une classification déterminée par l'ordinateur. Celui-ci configure les données sous forme de nuages de points qui déterminent la signature spectrale des thèmes retenus. Cette classification propose une image qui devra par la suite être confrontée à la réalité de terrain (Bonn et Rochon, 1992; Desjardins, 2000). Le choix de la méthode de classification dépend donc des connaissances préalables de l'analyste sur les objets qui composent l'espace étudié.

¹⁰ <http://www.spot-vegetation.com>

Dans notre cas, la classification dirigée nous a semblé être la méthode la plus adaptée, étant donnée notre expérience sur la zone de Barkédji et sur la signature des paysages sahéliens en général. Les étapes en sont présentées à la figure 25. Il s'agit d'un processus itératif, au cours duquel on évalue sans cesse la qualité des résultats obtenus. Le logiciel utilisé pour cette classification, ainsi que pour tous nos traitements d'images, est Idrisi 3.2®.

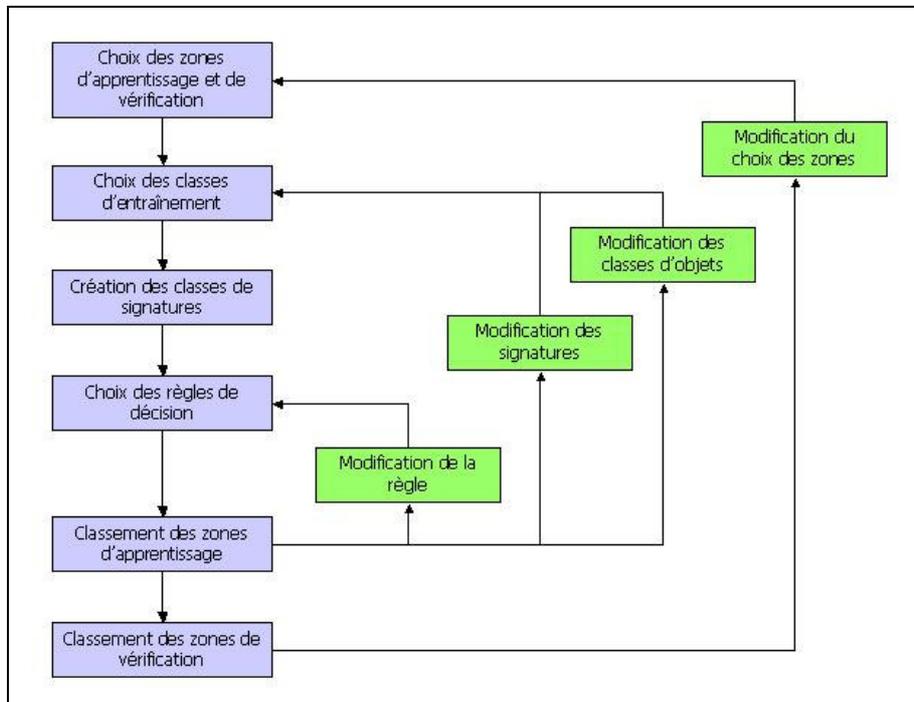


Figure 25 : Etapes de la classification par voie dirigée (d'après Bonn et Rochon, 1992)

Avant d'entamer la classification proprement dite, des améliorations ont du être faites sur les deux scènes initiales. La zone d'étude a été extraite à partir des deux scènes raccordées. Puis chacune des quatre bandes multispectrales utilisées (2, 3, 4 et 7) a subi une correction géométrique par la méthode polynomiale, une amélioration du contraste par étalement linéaire (cf. Figure 26), puis a été mixée avec le canal 8 panchromatique. Nous obtenons ainsi des images d'une meilleure qualité visuelle et dotées d'une résolution spatiale de 15 m. Puis les canaux modifiés ont été combinés dans une composition colorée additive « fausses couleurs » (cf. Figure 27), nous permettant de mieux identifier *de visu* les éléments du paysage.

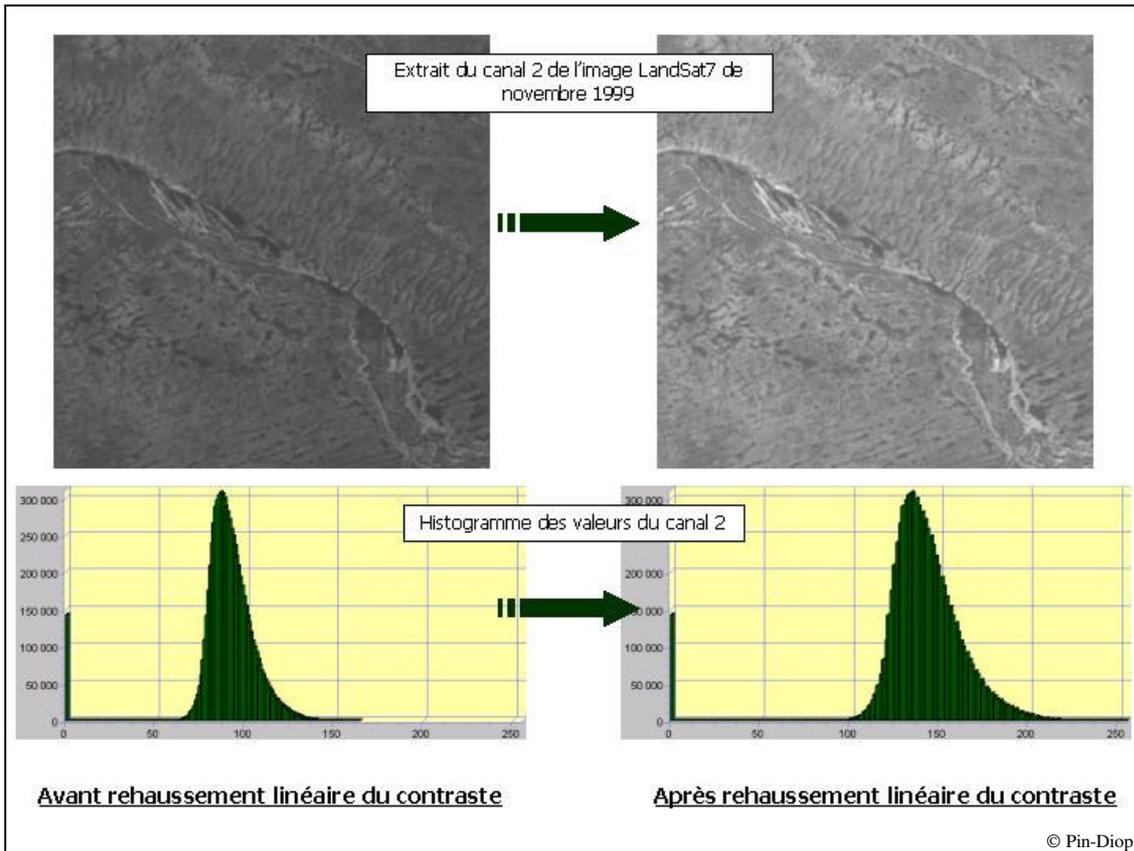


Figure 26 : Illustration du rehaussement linéaire du contraste

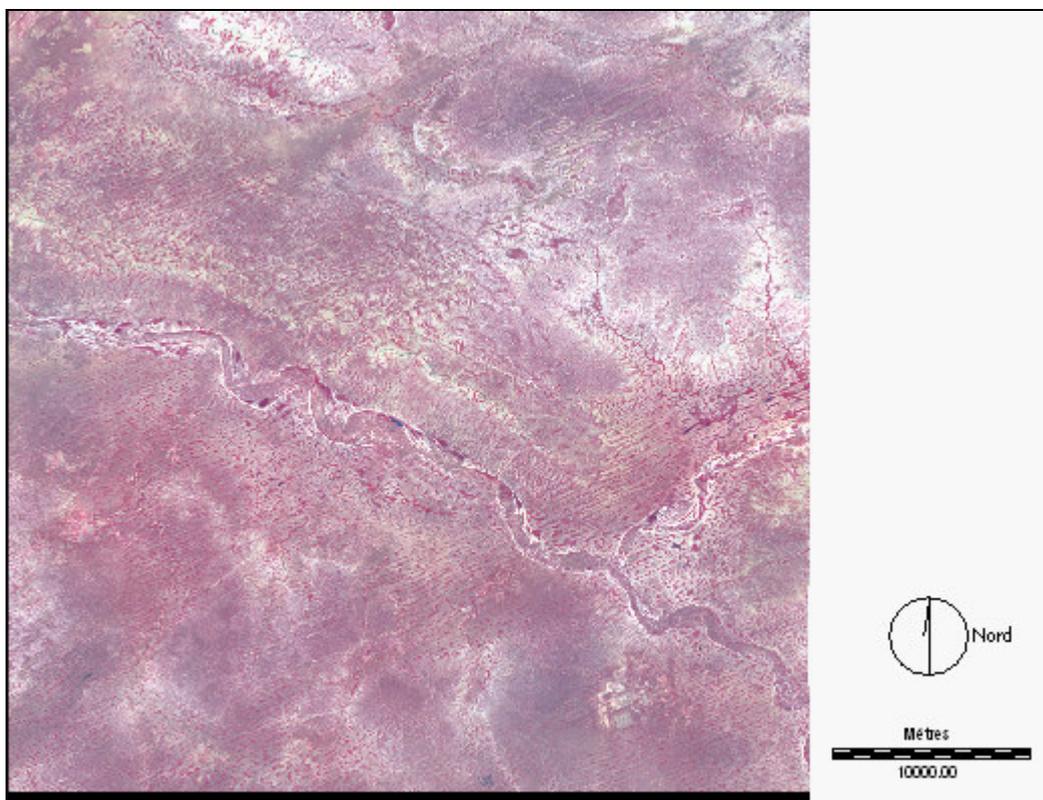


Figure 27 : Composition colorée « fausses-couleurs » (B2, V3, R4) de l'image Landsat de novembre 1999 (Source : Centre de Suivi Ecologique, Dakar ; Copyright : Landsat)

Ces traitements successifs sont destinés à favoriser l'interprétation de l'image. L'objectif de la classification est d'obtenir une image segmentée comportant des classes ; l'hypothèse qui sous-tend cette interprétation est qu'une plage homogène identifiée sur l'image correspond à un type d'objet sur le terrain. Notre travail était donc d'associer une signification thématique aux classes identifiées sur les compositions colorées (Bakis et Bonin, 2000).

Les parcelles d'apprentissage (ou sites d'entraînement) ont été digitalisées de manière à représenter cinq classes :

- le *baldiol**,
- les mares en eau,
- le *sangre**,
- le *seeno**,
- la steppe dégradée.

Les parcelles identifiées dans l'espace image contiennent des pixels ayant un coloris et une texture homogène (Figure 28). Ces pixels ont également des coordonnées proches dans l'espace spectral, dont chacun des axes correspond à une bande de l'image (Figure 29).

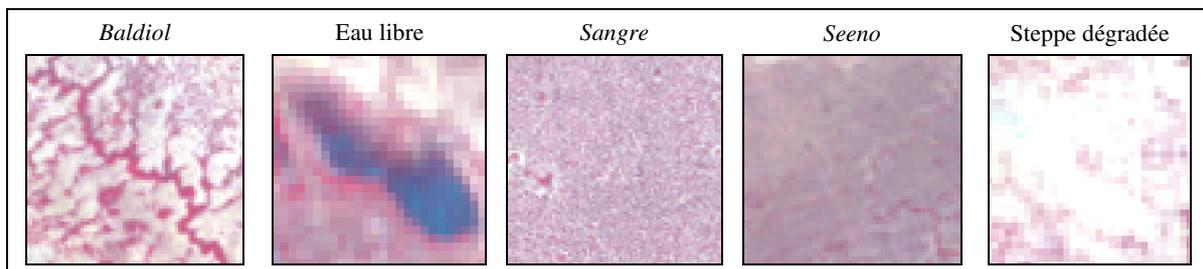


Figure 28 : Signatures des cinq classes identifiées sur l'image

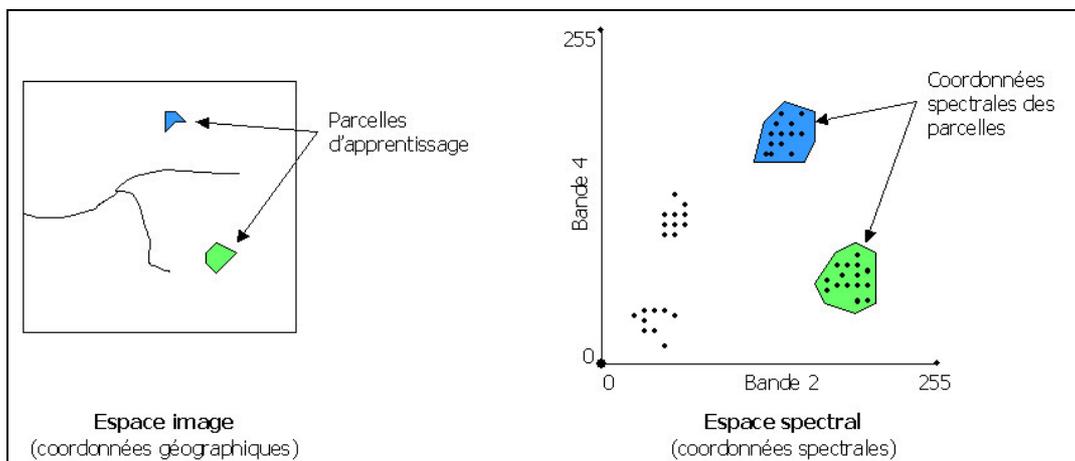


Figure 29 : Exemple de localisation de parcelles d'apprentissage dans l'espace image et dans l'espace spectral (d'après Bonn et Rochon, 1992)

La classification a ensuite été réalisée par la méthode du maximum de vraisemblance, classant chaque pixel dans l'une des cinq classes selon sa signature spectrale. La pertinence de la classification obtenue a été évaluée d'abord par comparaison visuelle avec la composition colorée, puis par le calcul d'une matrice d'erreurs. Plusieurs améliorations ont été nécessaires avant d'obtenir une classification satisfaisante, avec un indice *kappa* égal à 0.76. La classification finale a été soumise à un lissage de type « mode » avec une fenêtre de dimension 5×5, puis vectorisée.

Les cultures ont été digitalisées par interprétation visuelle de l'image et les escarpements, les pistes et le réseau hydrographique fossile à partir d'une carte au 1/50000^{ème} scannée. Les points d'eau permanents ont été géoréférencés sur le terrain.

Ces couches d'information spatialisées ont ensuite été exportées dans le SIG. La liste des tables créées dans le SIG est reportée en annexe 2. Toutes les tables du SIG sont projetées dans la projection de référence pour la zone de Barkedji, à savoir Universal Transverse Mercator, zone 28 Nord. Deux logiciels ont été utilisés selon nos besoins et leurs potentialités: MapInfo[®] et ArcGis[®]. MapInfo bénéficie d'une grande facilité de manipulation, en particulier pour les requêtes SQL, mais ne gère pas le format raster, ce qui nous a conduit à utiliser également ArcGis[®] pour effectuer les requêtes entre couches vecteur et raster.

Nous avons tenté de synthétiser toutes ces données environnementales – occupation du sol, points d'eau permanents, pistes et vallée fossile – en divisant notre zone d'étude en aires écologiquement homogènes.

4.1.1.3. Division de la zone en clusters écologiques

Afin d'identifier les zones écologiquement homogènes, nous avons utilisé une méthode proposée par Hendrickx *et al.* dans leur travail sur la trypanosomose au Togo (Hendrickx *et al.*, 1989). Dans un premier temps, nous avons créé une grille couvrant la totalité de la zone d'étude et dont chaque carré mesure 1 km de côté. La plupart des données nécessaires à la modélisation de la densité de troupeaux, puis du contact hôte-vecteur, ont par la suite été projetées sur cette grille.

Cette méthode de travail en mode raster permet de synthétiser et de lisser l'information, d'appliquer les modèles sur chaque pixel de la zone d'étude et d'obtenir ainsi des cartographies continues (Michel *et al.*, 1999; Raynal *et al.*, 1996). Le choix de l'unité 1 km est justifié à la fois d'un point de vue pratique et thématique. En effet, la grille est alors composée de 1600 carrés, donnant un aspect visuel satisfaisant. L'information projetée sur le maillage

n'est pas trop diluée, et les calculs ne sont pas trop lourds à réaliser d'un point de vue technique. Le fait que la surface de chaque pixel soit de 1 km² simplifie également les calculs de densités et de proportions de surface. Enfin, l'objectif étant de réaliser une cartographie du risque de transmission, il fallait que l'échelle choisie ait un sens pour les futurs utilisateurs de la carte et le kilomètre carré est une unité facile à interpréter.

Après création de la grille dans le SIG, nous avons calculé pour chaque pixel différentes variables relatives à l'environnement géographique, par des requêtes spatiales (Tableau 5). Pour les variables de distance, nous avons utilisé le module *Distance* dans l'extension *Spatial analyst* d'ArcGis[®], qui attribue à chaque pixel de la zone une valeur en mètres, correspondant à la distance à l'élément le plus proche.

Tableau 5 : Dictionnaire des variables caractérisant l'environnement géographique, retenues pour la division de la zone en *clusters* écologiques et pour la modélisation de la densité de troupeaux

| Code | Description | Zonage écologique | Modèle troupeaux |
|-------------|---|----------------------|---------------------|
| dhy | distance (m) à la vallée fossile | | |
| dpi | distance (m) à la piste la plus proche | | |
| dpe | distance (m) au point d'eau permanent le plus proche | | |
| m2 | moyenne des valeurs du canal 2 LandSat ETM+ | | |
| sd2 | écart-type des valeurs du canal 2 LandSat ETM+ | | |
| m3 | moyenne des valeurs du canal 3 LandSat ETM+ | | |
| sd3 | écart-type des valeurs du canal 3 LandSat ETM+ | | |
| m4 | moyenne des valeurs du canal 4 LandSat ETM+ | | |
| sd4 | écart-type des valeurs du canal 4 LandSat ETM+ | | |
| m7 | moyenne des valeurs du canal 7 LandSat ETM+ | | |
| sd7 | écart-type des valeurs du canal 7 LandSat ETM+ | | |
| mcl | moyenne des classes d'occupation du sol | | |
| sdcl | écart-type des classes d'occupation du sol | | |
| vrcl | variété des classes d'occupation du sol | | |
| pse | proportion de <i>seeno</i> | | |
| psa | proportion de <i>sangre</i> | | |
| pba | proportion de <i>baldiol</i> | | |
| pde | proportion de steppe dégradée | | |
| psem | proportion de <i>seeno</i> normalisée | | |
| psam | proportion de <i>sangre</i> normalisée | | |
| pbam | proportion de <i>baldiol</i> normalisée | | |
| pdem | proportion de steppe dégradée normalisée | | |
| ndvi | valeur de la composante 1 de l'ACP des NDVI de juin à décembre 2001 | | |
| zone | numéro du <i>cluster</i> écologique | | |

Il suffit ensuite de superposer ces couches à la grille initiale et de mettre à jour les champs *dhy*, *dpi* et *dpe*. Pour les variables de proportion *pse*, *psa*, *pba* et *pde*, nous avons fait une requête spatiale d'inclusion (« l'objet grille contient l'objet classe d'occupation du sol ») pour mesurer dans chaque pixel la surface (en km²) couverte par chacune des quatre classes d'occupation du sol. Pour les variables *mcl*, *sdcl* et *vrcl*, nous avons utilisé le module *Zonal statistics* d'ArcGis[®], qui calcule pour chaque pixel le nombre, la moyenne et l'écart-type des classes d'occupation du sol.

Enfin, nous avons soumis les pixels de la zone à une Classification Ascendante Hiérarchique, un processus itératif qui groupe un à un les individus (ou pixels) ou les groupes d'individus déjà classés, selon leur ressemblance, pour obtenir des partitions successives (Escofier et Pages, 1990). Ce traitement statistique, visant à regrouper les 1600 pixels dans des types (ou *clusters*) homogènes, ainsi que les traitements suivants, ont été réalisés dans le logiciel R[®]. Le script est rapporté en annexe 3.1. Le résultat est représenté graphiquement sous forme d'un arbre appelé dendrogramme ou arbre hiérarchique. Le découpage du dendrogramme en un nombre de *clusters* pertinent permet d'attribuer à chaque pixel le numéro du *cluster* dans lequel il se trouve puis de cartographier le résultat, à savoir les zones écologiquement homogènes.

4.1.2. Modélisation spatiale de la densité de troupeaux

4.1.2.1. Echantillonnage et acquisition des données

4.1.2.1.1. Mise en œuvre des enquêtes

Au cours des différents projets de recherche menés de 2000 à 2005 dans la communauté rurale de Barkedji, de nombreuses données ont été recueillies sur le terrain. Lorsque nous sommes arrivés à Dakar en 2002 pour travailler sur la spatialisation du risque de FVR, les données de 2001 étaient déjà disponibles. Par la suite, nous avons à la fois participé aux enquêtes organisées dans le cadre des projets existants et mené nos propres recherches, lorsque cela était nécessaire.

Les premières enquêtes, initiées dans le cadre d'Emercase puis poursuivies dans celui de l'ACI, avaient pour objet de localiser les campements dans l'espace et de recueillir des données de base sur leur organisation, ce pendant plusieurs années. En juin 2001, tous les campements de la zone ont été visités et leur position relevée par GPS. A partir de ces données, sept échantillons circulaires de 5 km de rayon ont été choisis pour les enquêtes transversales, de façon à simplifier et à accélérer le travail des enquêteurs (cf. Figure 30). Ces

derniers ont ensuite relevé la position des campements en juillet, août et octobre 2001, puis en juin, août et septembre 2002, de façon à montrer l'évolution de l'occupation de l'espace par les éleveurs et leurs troupeaux. Dans cette thèse, nous n'avons utilisé que les données collectées en saison des pluies, c'est à dire celles de juillet 2001, août 2001, août 2002 et septembre 2002. Les relevés par GPS ont été faits en UTM 28 Nord. A chaque visite, des questionnaires relatifs à l'organisation du campement (nombre de concessions, de troupeaux de bovins et de troupeaux de petits ruminants) et à son statut sédentaire ou transhumant ont été présentés aux chefs de famille (Annexe 4).

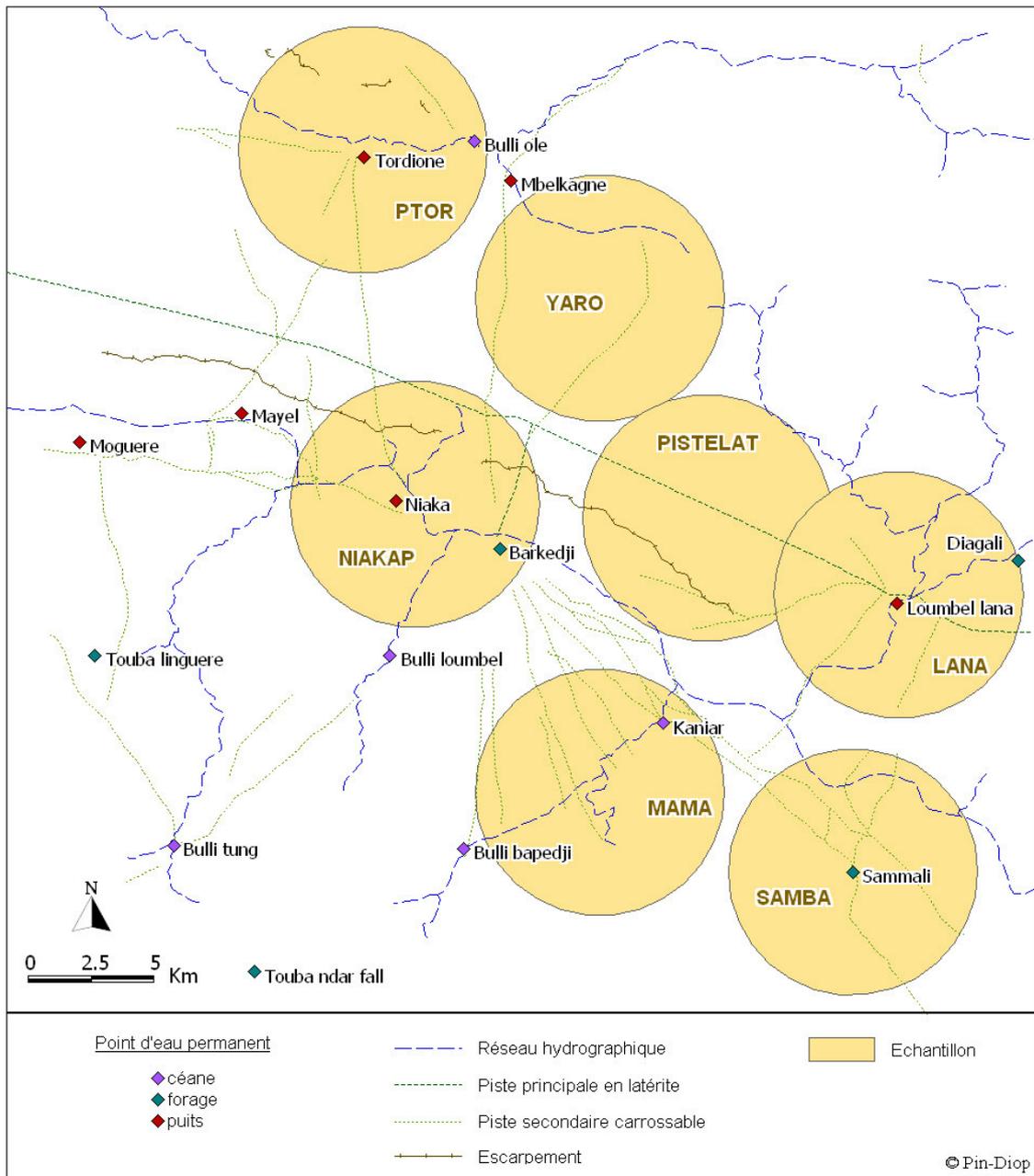


Figure 30 : Echantillonnage de la zone d'étude

Par la suite, il nous a semblé important de retourner voir les éleveurs afin de discuter plus longuement de certaines pratiques pastorales. Nous avons donc interrogé 30 chefs de famille sur ce qui les amenait à choisir un emplacement particulier pour installer leur campement, sur l'utilisation des mares et la fréquentation des pâturages (Annexe 4).

Le travail de terrain auprès des éleveurs a également été l'occasion d'observer les paysages sahéliens, d'apprendre à reconnaître les espèces végétales et surtout de discuter de manière informelle avec les éleveurs. Cela nous a permis de faire le rapprochement avec les connaissances plus théoriques, acquises dans les livres et les revues. Cette thèse penchant plus vers le travail purement scientifique que vers le carnet de route, nous ne détaillerons pas nos expériences de terrain. Nous tenons toutefois à préciser que nous nous y sommes rendus à plusieurs reprises, dans le cadre des enquêtes mentionnées ci-dessus, et également dans le cadre d'une réunion de discussion sur la fièvre de la vallée du Rift avec les chefs de villages, les autorités administratives et les vétérinaires du département. Cela a été l'occasion de discuter avec les acteurs du terrain sur l'importance de la maladie, sur la perception qu'ils en avaient, et de préciser quelles étaient les conséquences et bénéfices attendus de nos travaux.

4.1.2.1.2. Organisation des données

Les données issues des questionnaires ont été saisies dans une base de données relationnelle, conçue dans ce but (Chavernac, communication personnelle). La base de données Access[®] a été reliée au SIG MapInfo, de façon à projeter facilement les données spatialisées.

4.1.2.2. Analyses statistiques descriptives des données

4.1.2.2.1. Statistiques univariées

Les données issues de l'enquête d'opinion auprès des éleveurs ont été dépouillées manuellement et les pourcentages de chaque modalité de réponse calculé dans Microsoft Excel[®].

Pour les enquêtes transversales, des requêtes dans Microsoft Access[®] ont permis de calculer le nombre de campements, de concessions, de familles et de troupeaux, à chaque période d'enquête. Les campements en saison des pluies ont ensuite été projetés dans le SIG, afin d'avoir une représentation visuelle de leur répartition. Pour les analyses descriptives simples et la typologie, nous avons travaillé sur tous les campements recensés en 2001 et 2002, en enlevant les doublons, de façon à exploiter au maximum l'information disponible.

Des requêtes spatiales de distance et d'inclusion nous ont permis de calculer pour chaque campement plusieurs variables relatives à son emplacement : distance à la piste, à la vallée du

Ferlo et au point d'eau permanent les plus proches, proportions de chaque classe d'occupation du sol dans un *buffer* (ou rayon) de 2 km autour du campement. Les minima, maxima, moyennes et écarts-types de ces variables ont ensuite été calculées pour les sédentaires et les transhumants. Puis les moyennes ont été comparées deux à deux par un test de Student, afin de tester les différences entre ces deux groupes (cf. hypothèse H6, §3.2.1.2). Les variances étant égales pour toutes les variables, nous avons utilisé le test de Student classique (Lebart *et al.*, 1982).

4.1.2.2.2. Typologie des campements

Ces variables ont ensuite été utilisées pour faire une typologie des campements, afin d'identifier les grands types d'emplacements et les variables environnementales les plus discriminantes. La typologie a été conduite en deux temps : d'abord une Analyse Factorielle des Correspondances Multiples (AFCM), adaptée au traitement de variables qualitatives, suivie d'une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sur les coordonnées factorielles des campements.

Le principe des méthodes factorielles dont fait partie l'AFCM est le suivant : partant d'un tableau de n observations (ou individus) sur p variables, décrivant un nuage de points à p dimensions, une analyse factorielle détermine les k premiers axes d'un système d'axes orthogonaux résumant le maximum de la variance du nuage. L'idée fondamentale est de résumer et de synthétiser l'information existant dans le tableau à l'aide d'un faible nombre de variables (ou facteurs, ou composantes) qui sont une combinaison des variables originales. L'analyse factorielle permet de représenter un nuage à p dimensions sur une succession de plans factoriels à deux dimensions, un peu comme une photographie donne une image en deux dimensions de la réalité. Selon les angles de prise de vue, on obtient différentes images en 2D d'un même élément en 3D. Il existe différentes méthodes factorielles selon la nature des variables ; dans notre cas, nous sommes en présence de plus de deux variables, issues d'enquêtes et d'analyses spatiales. Nous avons donc choisi d'utiliser l'AFCM, adaptée aux variables qualitatives (Crucianu *et al.*, 2004).

Pour faire cette typologie, nous avons utilisé les campements recensés en 2001 et en 2002 après avoir supprimé les doublons, de façon à prendre en compte le maximum d'informations. Cette démarche se justifie d'un point de vue thématique, puisque les motivations qui dirigent le choix de l'emplacement du campement varient peu *a priori* d'une année à l'autre.

Le dictionnaire des variables et de leurs modalités est présenté au tableau 6. Les variables ont été mises en classe après observation de leur distribution, les 6 premières de manière subjective et les 4 dernières selon les valeurs des quantiles 33% et 66%.

Tableau 6 : Dictionnaire des variables retenues pour la typologie et de leurs modalités

| Variables actives | | Modalités | Description |
|---|--|-----------|-----------------------|
| <i>Composition du campement</i> | | | |
| conc | Nombre de concessions | conc1 | 1 ou 2 concessions |
| | | conc2 | De 3 à 5 concessions |
| | | conc3 | Plus de 5 concessions |
| bo | Nombre de troupeaux de bovins | bo0 | Aucun troupeau |
| | | bo1 | 1 troupeau |
| | | bo2 | Plus d'un troupeau |
| ppr | Nombre de troupeaux de petits ruminants | pr1 | Aucun ou 1 troupeau |
| | | pr2 | 2 ou 3 troupeaux |
| | | pr3 | Plus de 3 troupeaux |
| <i>Position du campement par rapport aux éléments marquants du paysage pastoral</i> | | | |
| perm | Distance au point d'eau permanent le plus proche | perm1 | Moins de 2km |
| | | perm2 | De 2 à 3.5km |
| | | perm3 | Plus de 3.5km |
| foss | Distance à la vallée du Ferlo | foss1 | Moins de 500m |
| | | foss2 | De 0.5 à 1.5km |
| | | foss3 | Plus de 1.5km |
| pist | Distance à la piste la plus proche | pist1 | Moins de 1km |
| | | pist2 | De 1 à 2km |
| | | pist3 | Plus de 2km |
| <i>Composition du paysage dans un rayon de 2 km autour du campement</i> | | | |
| see | Proportion de <i>seeno</i> | see1 | Moins de 20.8% |
| | | see2 | De 20.8 à 37.5% |
| | | see3 | Plus de 37.5% |
| san | Proportion de <i>sangre</i> | san1 | Moins de 39.7% |
| | | san2 | De 39.7 à 53.4% |
| | | san3 | Plus de 53.4% |
| bal | Proportion de <i>baldiol</i> | bal1 | Moins de 2.6% |
| | | bal2 | De 2.6 à 5.3% |
| | | bal3 | Plus de 5.3% |
| deg | Proportion de steppe dégradée | deg1 | Moins de 11.3% |
| | | deg2 | De 11.3 à 20.1% |
| | | deg3 | Plus de 20.1% |

Nous avons finalement obtenu 10 variables et 30 modalités. Le tableau a été analysé sous R[®] (script en annexe 3.2). Après interprétation des axes, nous avons utilisé les coordonnées factorielles des campements pour les classer en quatre grands types, par classification ascendante hiérarchique.

La typologie nous a permis de qualifier les campements, en les intégrant dans un groupe. Nous avons également souhaité analyser leur distribution spatiale en tant que processus ponctuel non marqué.

4.1.2.2.3. Analyse de la répartition spatiale des campements

Les campements sont assimilables à un processus ponctuel. Par conséquent, on peut utiliser les géostatistiques pour analyser leur structure spatiale. Nous avons voulu savoir si la distribution des campements en saison des pluies était agrégée, aléatoire ou régulière. Pour cela, nous avons travaillé sur les données recueillies en 2001.

Nous pouvons utiliser la fonction de Ripley $K(r)$, qui mesure le nombre de points dans un rayon r à partir d'un point quelconque (Ripley, 1977):

$$K(r) = \frac{E(\text{nbre de voisins à distance } \leq r)}{\text{densité}}$$

Elle n'est cependant pas très simple d'utilisation, c'est pourquoi nous avons préféré utiliser la fonction linéarisée, proposée par Besag (Besag, 1977) :

$$L(r) = \sqrt{\frac{K(r)}{\pi}} - r$$

L'hypothèse associée à cette fonction est la suivante : pour un semis aléatoire, $L(r)$ est nulle. $L(r)$ est positive lorsque le semis ponctuel est agrégé et négative lorsque le semis est régulier. Cependant, il reste toujours une part de variabilité dans la réalisation d'un processus aléatoire (Goreaud et Couteron, 2005). Nous avons donc calculé la fonction $L(r)$ pour le processus ponctuel réel, c'est-à-dire les campements en saison des pluies 2001 puis nous avons comparé le résultat à un intervalle de confiance, composé des bornes des fonctions $L(r)$ calculées pour 20 semis de Poisson (Baddeley et Turner, 2003). Les semis de Poisson ont été réalisés avec 244 points, correspondant au nombre total de campements dans la zone en 2001, estimé par Lancelot dans le cadre du projet Emercase (Lancelot, R., communication personnelle). Le script de cette analyse est présenté en annexe 3.3.

Un modèle se doit d'être adapté d'une part à l'objectif recherché et d'autre part aux types de variables utilisées. Ici, ce sont les résultats des analyses statistiques descriptives des campements qui nous ont guidé pour mettre en place le modèle prédictif de la densité de troupeaux en saison des pluies.

4.1.2.3. Prédiction de la densité de troupeaux en saison des pluies

4.1.2.3.1. Choix du modèle et des variables à tester

Le but de cette modélisation est de prédire la densité de troupeaux en saison des pluies sur l'ensemble de la zone d'étude, à partir des données recueillies en 2001 dans les échantillons spatiaux. Nous avons montré que la répartition des campements et des troupeaux était étroitement liée à l'environnement : pâturages, paysages pastoraux, vallée fossile du Ferlo, points d'eau permanents, pistes.

Les éleveurs s'installent également à proximité des mares temporaires en saison des pluies mais ce n'est pas un critère déterminant. En effet à cette période, l'eau est abondante et les troupeaux ont tout au plus quelques kilomètres à parcourir pour parvenir à un point d'eau, quel que soit leur emplacement sur la zone. C'est donc généralement la qualité du pâturage qui est la première motivation pour le choix d'un emplacement, tendance confirmée par les échanges que nous avons eus avec les chefs de famille lors de l'enquête d'opinion.

Nous avons décidé de tester une série de 20 variables prédictives relatives à l'environnement, la variable prédite étant la densité de troupeaux. Ces variables sont présentées au tableau 5 (cf. p.108).

4.1.2.3.2. Mise en œuvre de l'analyse discriminante

Nous avons utilisé l'analyse discriminante dont les conditions d'application sont relativement souples. Comme nous l'avons expliqué au paragraphe 3.1.1.1, cette méthode donne des prédictions de type présence/absence. Dans notre cas, nous avons cherché à discriminer 3 classes de densité de troupeaux : très faible, faible et élevée. Nous avons pu voir dans les travaux de Beck et al. (Beck *et al.*, 1994), Cross et al. (Cross *et al.*, 1984), Boone et al. (Boone *et al.*, 2000) et Wood et al. (Wood *et al.*, 1992), que les modèles utilisant l'analyse discriminante ne sont pas très puissants, avec une précision avoisinant les 70%. Toutefois, cette méthode nous a paru la plus adaptée à la nature et à la qualité de nos données.

Nous nous sommes à nouveau basés sur la grille de 1600 pixels de 1 km². Les 20 variables ont été calculées dans le SIG pour chaque pixel, toujours avec des requêtes SQL et les modules *Distance* et *Zonal statistics* d'ArcGis[®]. Les proportions p de classes d'occupation du sol ont été normalisées en appliquant la fonction $\arcsin\sqrt{p}$ (Hassan *et al.*, 1998). Puis la grille a été découpée dans les échantillons, pour lesquels les densités réelles de troupeaux étaient connues.

A chacun des 588 pixels des six échantillons restants, nous avons attribué le nombre total de troupeaux par requête spatiale d'inclusion avec la couche des campements de 2001, le nombre de troupeaux par campement étant connu. Cette valeur a été divisée par la surface du pixel (égale à 1km², sauf pour les pixels coupés en bordure d'échantillon) pour obtenir une densité d au km². Les classes de densité de troupeaux ont été définies comme suit :

- $d \leq 0.5$ troupeaux/km² : classe « très faible »
- $0.5 < d \leq 3$ troupeaux/km² : classe « faible »
- $d > 3$ troupeaux/km² : classe « élevée ».

Les tables ainsi créées, avec les pixels en lignes et les variables en colonnes, ont été importées dans R[®] pour l'analyse discriminante (script en annexe 3.4). Les variables ont été testées sur un échantillon test de 294 pixels. Sur les 20 variables, nous avons gardé uniquement les plus discriminantes pour faire le modèle prédictif final, conformément à ce que nous avons pu lire dans la littérature. Le calcul de la précision du modèle a été réalisé sur les 294 pixels restants. Nous avons ensuite appliqué le modèle validé aux pixels hors échantillon et exporté les résultats dans le SIG. Les pixels à l'intérieur et à l'extérieur des échantillons ont alors été rassemblés et les effets de bords corrigés, menant à une cartographie de la densité de troupeaux prédite sur l'ensemble de la zone d'étude.

4.2. Résultats

4.2.1. Cartographie des grands paysages

4.2.1.1. Carte d'occupation des sols

L'interprétation de l'image LandSat de novembre 1999 a donné une carte d'occupation du sol de la zone d'étude (cf. Figure 31). La zone est principalement occupée par deux classes qui occupent respectivement 52.5% et 30.1% de la surface totale : le *seeno* au nord-ouest et au sud-est, et le *sangre* au nord-est et au sud-ouest (cf. Tableau 7). Ces paysages, propices à l'élevage, prennent généralement la forme de grandes étendues sauf aux alentours de la vallée du Ferlo, où ils sont plus mosaïqués. La steppe dégradée est présente autour de la piste principale et sur les pentes de la vallée. Les zones de bas-fonds ou *baldiol* ainsi que la plupart des grandes mares suivent la vallée fossile du Ferlo et ses ramifications.

Les points d'eau permanents sont également répartis le long de la vallée. Les cultures ou les jachères sont peu importantes et situées principalement autour des forages de Sammali et

Touba Linguere. Elles correspondent à des villages de sédentaires, dont l'agriculture fait partie intégrante du système de production. Les transhumants peuvent également cultiver la terre mais sur des parcelles de taille réduite. C'est la raison pour laquelle les parcelles cultivées ne peuvent pas constituer un indicateur de présence des campements. La surface des mares temporaires est faible (0.4 km²) car l'image a été prise en fin de saison des pluies.

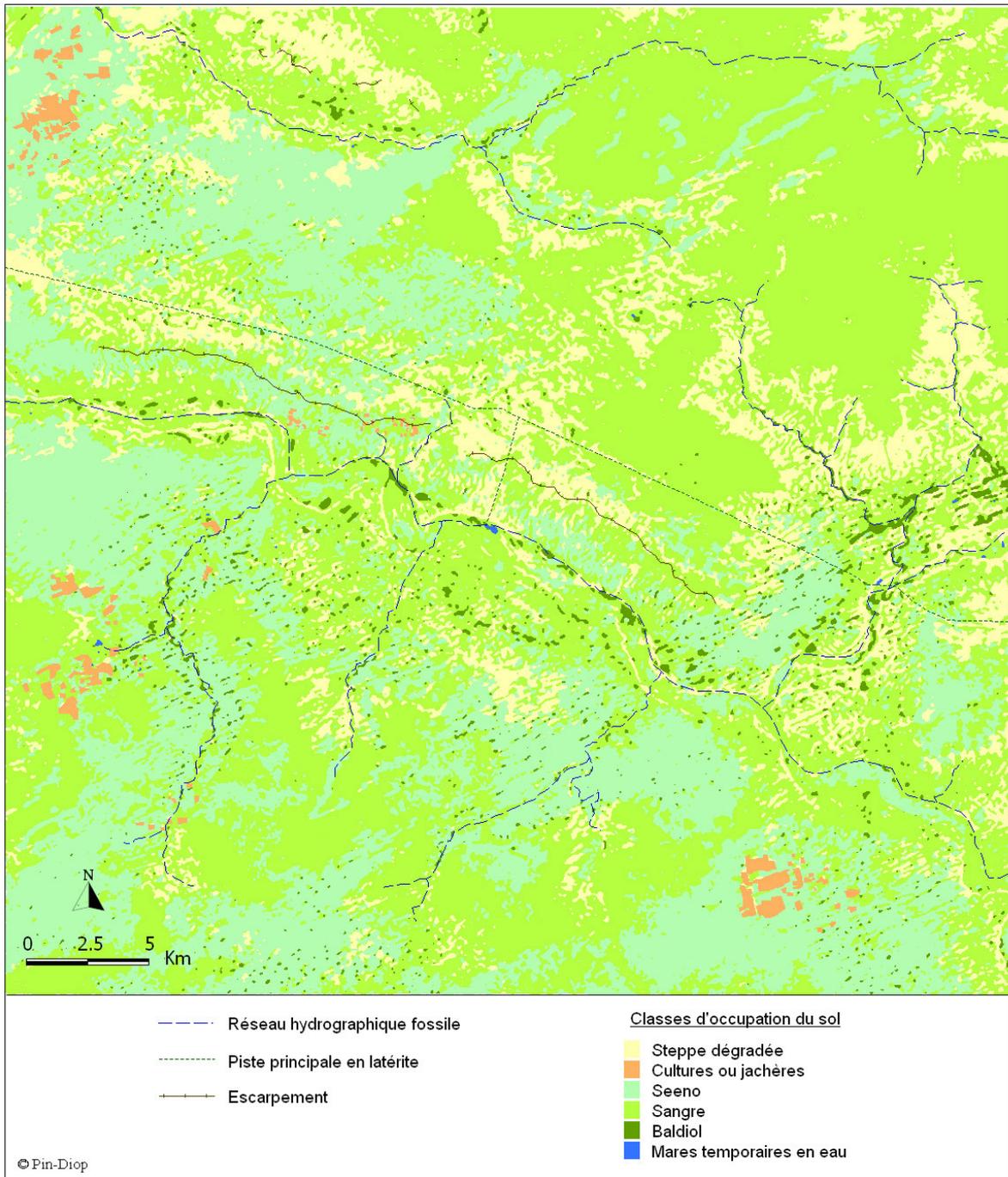


Figure 31 : Carte d'occupation des sols de la zone d'étude en novembre 1999, issue d'une image Landsat7 (Source : Centre de Suivi Ecologique, Dakar ; copyright : Landsat)

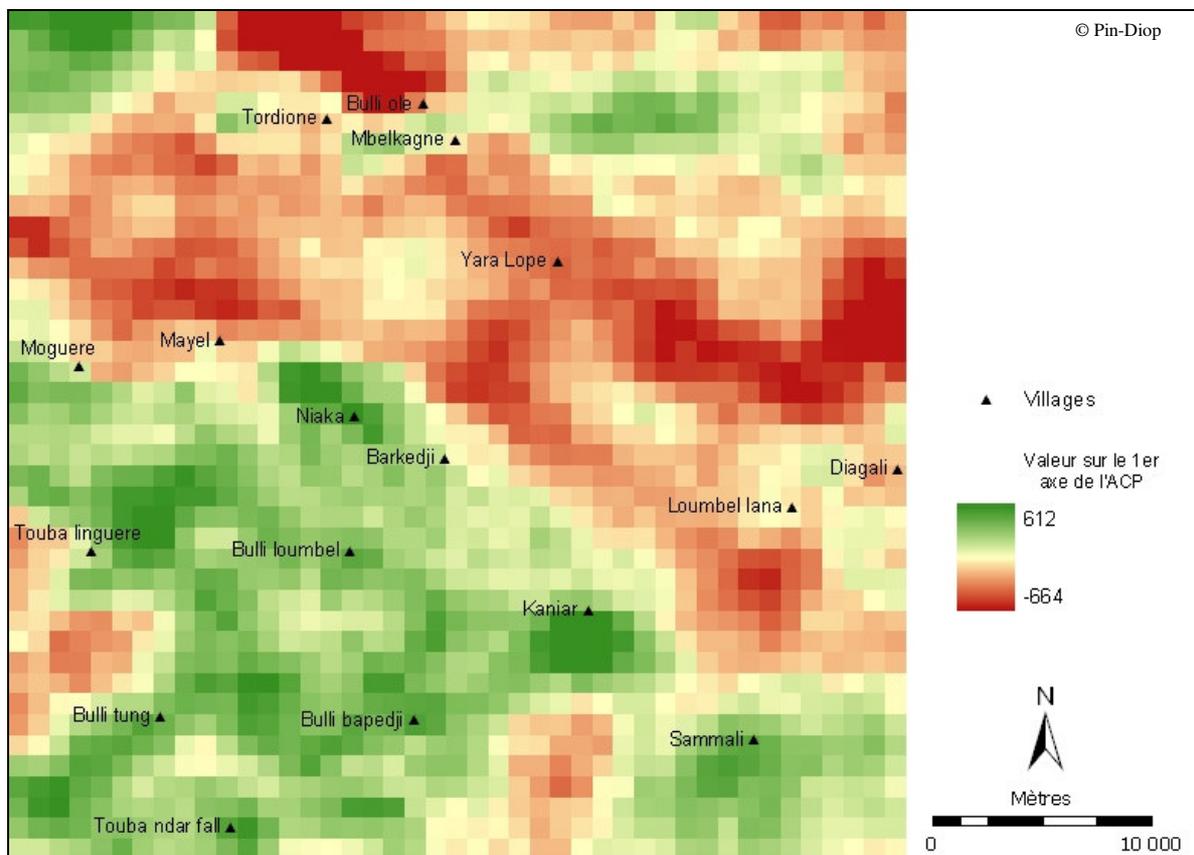
Tableau 7 : Surfaces occupées par chaque classe d'occupation du sol en novembre 1999

| Classe | Aire en km ² | Pourcentage |
|--------------------------|-------------------------|-------------|
| Steppe dégradée | 239.1 | 14.94 |
| Cultures ou jachères | 13.5 | 0.84 |
| Seeno | 481.0 | 30.06 |
| Sangre | 839.7 | 52.48 |
| Baldiol | 26.4 | 1.65 |
| Mares temporaires en eau | 0.4 | 0.02 |

4.2.1.2. Dynamique de la végétation

Les NDVI mensuels de juin à décembre 2001 ont été synthétisés par une ACP. Seule l'image de la première composante, rassemblant 60% de l'information, a été conservée.

Les zones où les valeurs sont négatives sont celles où le NDVI varie le moins au cours de la saison des pluies et réciproquement (Figure 32). Cette image reflète bien la dynamique de la végétation herbacée : sachant qu'en début de saison des pluies, elle est quasi inexistante, les zones où le NDVI varie beaucoup sont celles où elle croît le plus et où le pâturage est le plus abondant.

**Figure 32 : Variations du NDVI en saison des pluies 2001**

4.2.1.3. Répartition des clusters écologiques

Les variables issues de la classification de l'image Landsat et la synthèse des valeurs du NDVI ont été utilisées pour classer chaque pixel de la grille dans un groupe (ou *cluster*), selon ses caractéristiques écologiques. Le dendrogramme a été découpé en 5 classes (Figure 33), pour lesquelles nous avons calculé les écarts à la moyenne permettant de décrire les particularités de chaque groupe. Puis nous avons attribué à chaque pixel une couleur selon son *cluster*, de manière à visualiser le zonage écologique de notre zone d'étude (cf. Figure 34).

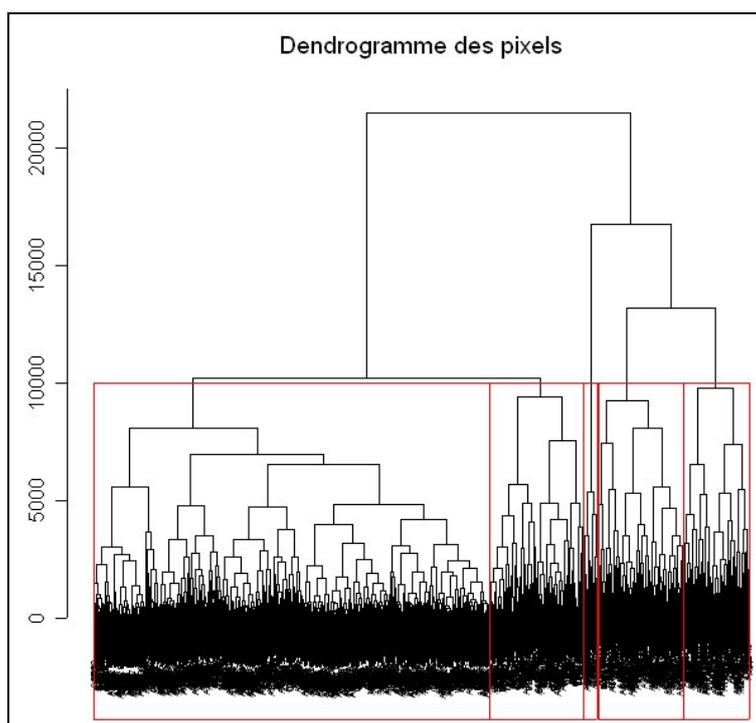


Figure 33 : Dendrogramme des pixels, découpé en 5 groupes ou *clusters*

Les caractéristiques de chaque groupe sont les suivantes :

- Groupe 1 (n = 161)

Il s'agit de pixels situés à distance moyenne du réseau hydrographique, très éloignés des pistes et des points d'eau permanents. Le NDVI y est légèrement inférieur à la moyenne. Le sol y est peu humide, majoritairement occupé par du *sangre* (70%), avec un peu de *seeno* (11%) et de steppe dégradée (14%). Ces zones sont *a priori* peu favorables à l'élevage, car elles sont loin des ressources en eau et la végétation n'y est pas spécialement abondante.

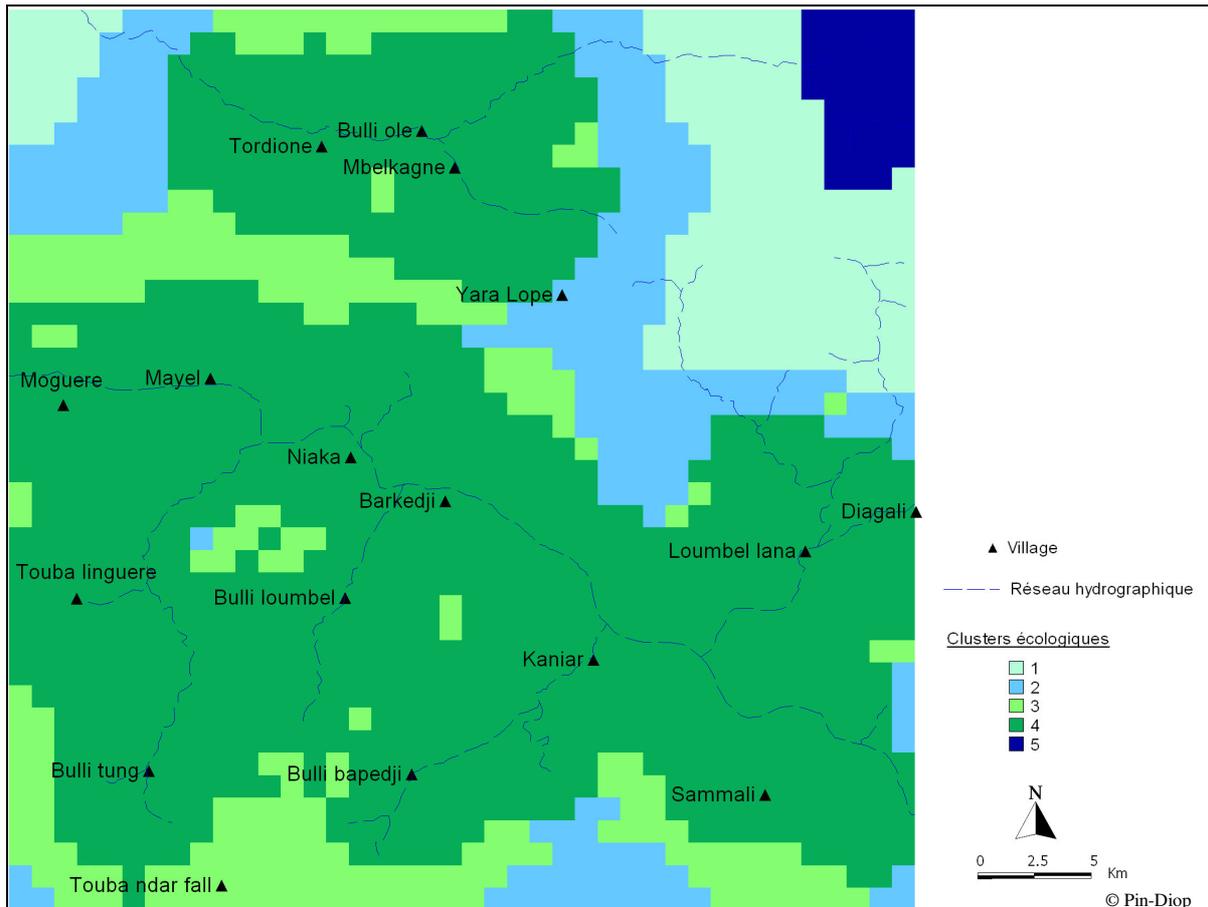


Figure 34 : Répartition des *clusters* écologiques de la zone d'étude

- Groupe 2 (n = 209)

Ce groupe est composé de pixels isolés, éloignés du réseau hydrographique, des pistes et des points d'eau permanents. Le NDVI y est faible et le paysage composé en moyenne de 21% de *seeno*, 56% de *sangre*, 0.8% de *baldiol* et 17% de steppe dégradée. Il pourrait éventuellement convenir à des éleveurs transhumants, exploitant les pâturages dans le *seeno* et le *sangre*, et les quelques mares présentes dans le *baldiol* en saison des pluies. Cependant la densité globale de troupeaux reste faible car les ressources sont limitées.

- Groupe 3 (n = 230)

Ce *cluster* correspond à des pixels éloignés du réseau hydrographique et des pistes, mais plus proches des points d'eau permanents que les clusters 1 et 2. Ces points d'eau deviennent donc exploitables. Le NDVI y est le plus élevé des 5 zones. Le paysage est composé pour moitié de *sangre* et de *seeno*, avec 1% de *baldiol*. C'est donc une zone favorable à l'installation de campements sédentaires ou transhumants, car les pâturages sont abondants et les ressources en eau accessibles (points d'eau permanents en saison sèche et mares du *baldiol* en saison des pluies).

- Groupe 4 (n = 965)

Les pixels du groupe 4 sont proches du réseau hydrographique, des pistes et des points d'eau permanents. Le NDVI y est assez élevé et c'est également la zone la plus humide, avec 2.2% de *baldiol*. Le paysage est composé de 31% de *seeno* et 46% de *sangre*. Ce cluster semble donc être le plus favorable à l'installation des campements sédentaires et transhumants, car toutes les ressources sont abondantes.

- Groupe 5 (n = 35)

Il s'agit d'une petite zone isolée au nord-est de la communauté rurale, loin des pistes et très loin des points d'eau permanents de Barkedji ; cependant, étant donné son emplacement à la frontière de la communauté rurale, il est probable que cette zone soit en fait proche de points d'eau permanents de la communauté rurale voisine. Le paysage y est majoritairement composé de *sangre*. Comme il s'agit d'une zone frontalière, il est difficile d'évaluer ses caractéristiques réelles et donc son potentiel d'accueil des campements.

Chaque *cluster* possède ses caractéristiques propres, permettant un zonage écologique de la communauté rurale. Il est intéressant de noter que bien que la méthode employée (CAH) appartienne aux statistiques classiques, le résultat traduit bien une structure spatiale marquée. Les pixels d'un même groupe sont rassemblés en zones homogènes, montrant que les particularités de chaque pixel individuel reflètent son appartenance à un paysage à une échelle inférieure.

4.2.2. Répartition spatiale des campements recensés sur le terrain

4.2.2.1. Interprétation des enquêtes d'opinion

Les discussions avec les chefs de famille ont été très prolifiques et nous ont apporté de nombreuses informations quant au choix de l'emplacement du campement et à l'utilisation des ressources. Nous avons interrogé 30 chefs de famille, repartis en 13 peuls transhumants, 11 peuls sédentaires et 6 *sereer* transhumants.

Lorsqu'on leur demande quel est l'avantage principal de leur emplacement, 70% des éleveurs interrogés mettent en avant la qualité et l'abondance du pâturage. Le tiers de ces éleveurs mentionne également l'abondance de l'eau. En contrepartie, les inconvénients des emplacements choisis sont principalement les problèmes de santé (éloignement du vétérinaire et du dispensaire, abondance de moustiques, etc.), le manque d'eau en fin de saison des pluies

et les problèmes de voisinage. La grande majorité des éleveurs (77%) ne changent pas de campement durant la saison des pluies, et les 33% qui le font sont motivés par la recherche de bons pâturages. A la question « quels sont les meilleurs pâturages ? », les réponses sont très diverses ; certains éleveurs se basent sur l'existence de certaines espèces herbacées, d'autres sur la hauteur de la strate végétale (herbe rase, zone boisée,...), d'autres encore sur la classification *fulani* des paysages pastoraux. Dans ce dernier cas, il ressort que le *seeno* et le *sangre* sont appréciés en début de saison des pluies (36%), le *seeno* en milieu de saison des pluies (27%) et le *baldiol* en fin de saison des pluies (30%). Un tiers environ des personnes interrogées ne répondent pas directement à cette question, indiquant simplement qu'ils évitent les zones de cultures.

Par ailleurs, 77% des éleveurs disent préférer s'installer à proximité de la mare qu'ils utilisent, afin de réduire au maximum les déplacements pour accéder à l'eau, à la fois pour le bétail et pour les besoins domestiques. Ils ne changent de mare que si celle-ci devient boueuse ou se tarit. Et dans ce cas, ce n'est pas une motivation suffisante pour changer l'emplacement du campement.

Enfin, près de la moitié des éleveurs préfèrent s'installer dans des endroits isolés, afin de bénéficier d'un espace suffisant pour faire paître les animaux. S'ils n'ont pas le choix, ce qui est souvent le cas en saison des pluies, lorsque la densité humaine et animale est importante, les transhumants préfèrent cohabiter avec d'autres transhumants, afin de limiter les problèmes de voisinage. Au contraire, 20% des chefs de famille interrogés, majoritairement des éleveurs transhumants *sereer*, apprécient la proximité d'autres campements, pour la sécurité que cela apporte et pour l'entraide en cas de besoin.

Les résultats de notre enquête auprès des éleveurs montrent que le principal critère dictant le choix de l'emplacement du campement est la qualité et l'abondance du pâturage. La ressource en eau est éventuellement prise en compte, mais elle n'est pas déterminante. Les mares sont nombreuses en saison des pluies, et les hommes et les animaux utilisent celles qui sont à proximité du campement, sans distinction particulière. Si la mare vient à se tarir ou est trop boueuse, ils iront chercher l'eau plus loin, sans pour autant déplacer le campement. Par contre, la recherche de pâturages peut conduire certains éleveurs transhumants à installer leur campement ailleurs, au cours de la saison des pluies. Ceci valide notre choix de travailler sur une image Landsat pour faire une carte d'occupation du sol basée sur la classification *fulani* des paysages, et d'utiliser ces données pour prédire la répartition des troupeaux. Le fait

qu'une majorité d'élèves préfèrent s'isoler, mais n'en ont pas forcément la possibilité montre l'intérêt d'utiliser les géostatistiques sur processus ponctuels pour explorer la distribution des campements à différentes échelles.

4.2.2.2. Projection des campements aux différentes dates

Les campements, recensés à quatre périodes lors des enquêtes de terrain, ont été projetés dans le SIG (Figure 35). Par simple interprétation visuelle, on relève une homogénéité dans la répartition des campements, confirmant au niveau des zones échantillonnées les hypothèses issues des enquêtes d'opinion sur un petit nombre d'élèves.

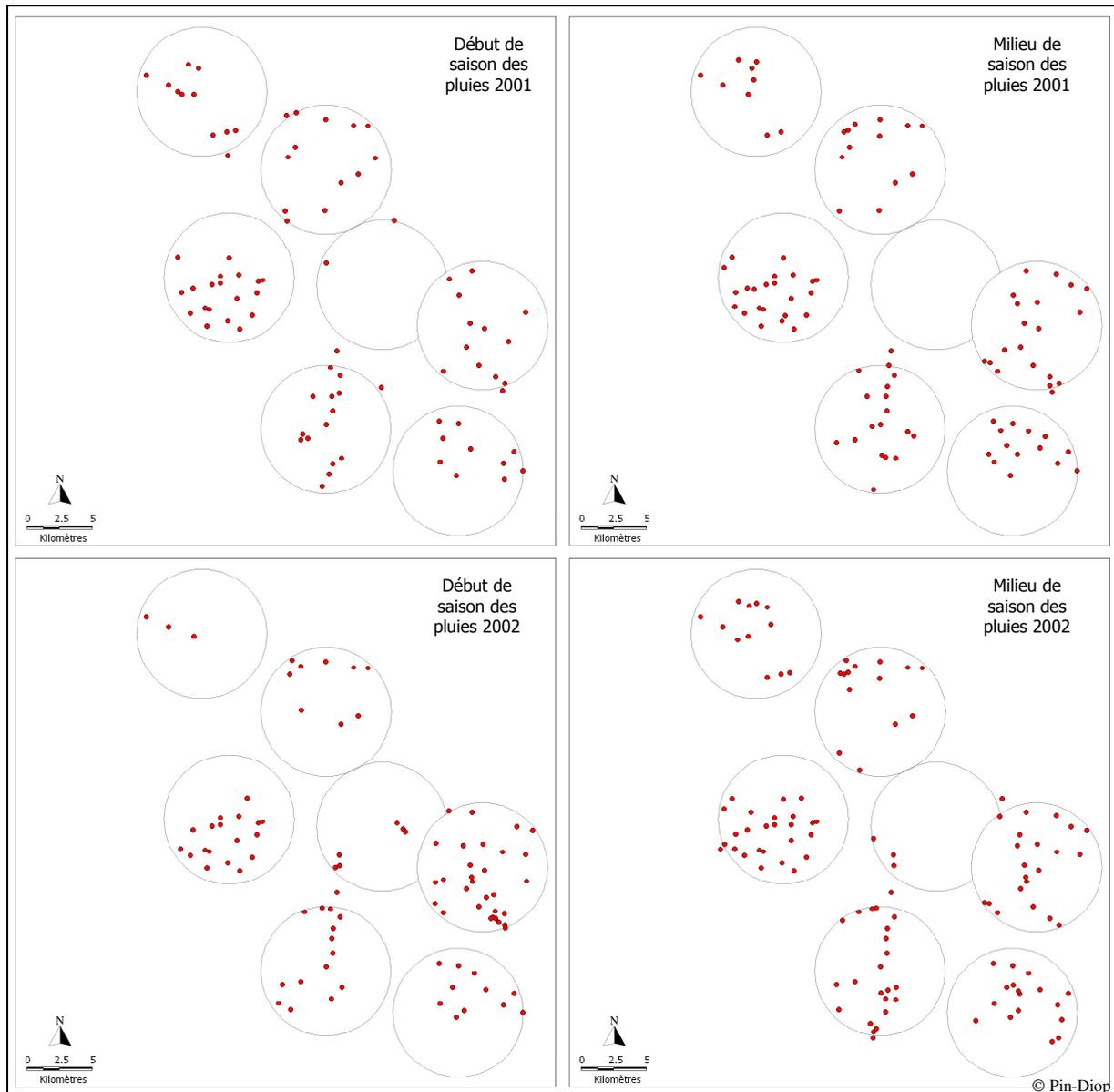


Figure 35 : Répartition des campements dans les échantillons en début et milieu de saison des pluies 2001-2002

En superposant les campements aux données environnementales issues des traitements d'image et des relevés de terrain, on constate qu'une partie des campements est installée à proximité de la vallée du Ferlo et des points d'eau permanents (cf. Figure 36). Les campements qui sont plus éloignés de la vallée se situent plutôt dans des mosaïques de paysages ; par ailleurs, l'échantillon PISTELAT, composé d'une étendue uniforme de *sangre*, ne semble guère propice à l'installation, quelle que soit la période considérée. L'observation simple de la carte ne permet pas la mise en évidence de comportements spatiaux spécifiques aux petits ou aux grands campements.

Ce paragraphe montre l'intérêt premier des SIG : superposer des couches d'informations pluri-thématiques, ayant une référence spatiale commune. Cette superposition, menant à des représentations simples et attractives des phénomènes spatiaux, permet de décrire la réalité et de poser des hypothèses sur le fonctionnement d'un système.

Dans ce cas précis, les conclusions que l'on peut tirer de la simple observation des cartes sont les suivantes :

- il existe une homogénéité dans la répartition des campements
- l'installation des campements suit une certaine logique, tenant compte de facteurs environnementaux, parmi lesquels les classes d'occupation du sol, la vallée fossile, les pistes et les points d'eau permanents.

Toutefois, la simple analyse visuelle des processus est limitée. Elle doit être complétée par des analyses statistiques exploratoires afin d'exploiter au mieux l'information contenue dans les données spatialisées. Ces hypothèses renforcent l'idée de mettre en place un modèle prédictif de la densité des troupeaux en fonction de variables environnementales. Dans le paragraphe suivant, nous analysons la distribution des campements en 2001 en tant que processus ponctuel, afin de répondre à la question suivante : la répartition des campements est-elle agrégée, aléatoire ou régulière ?

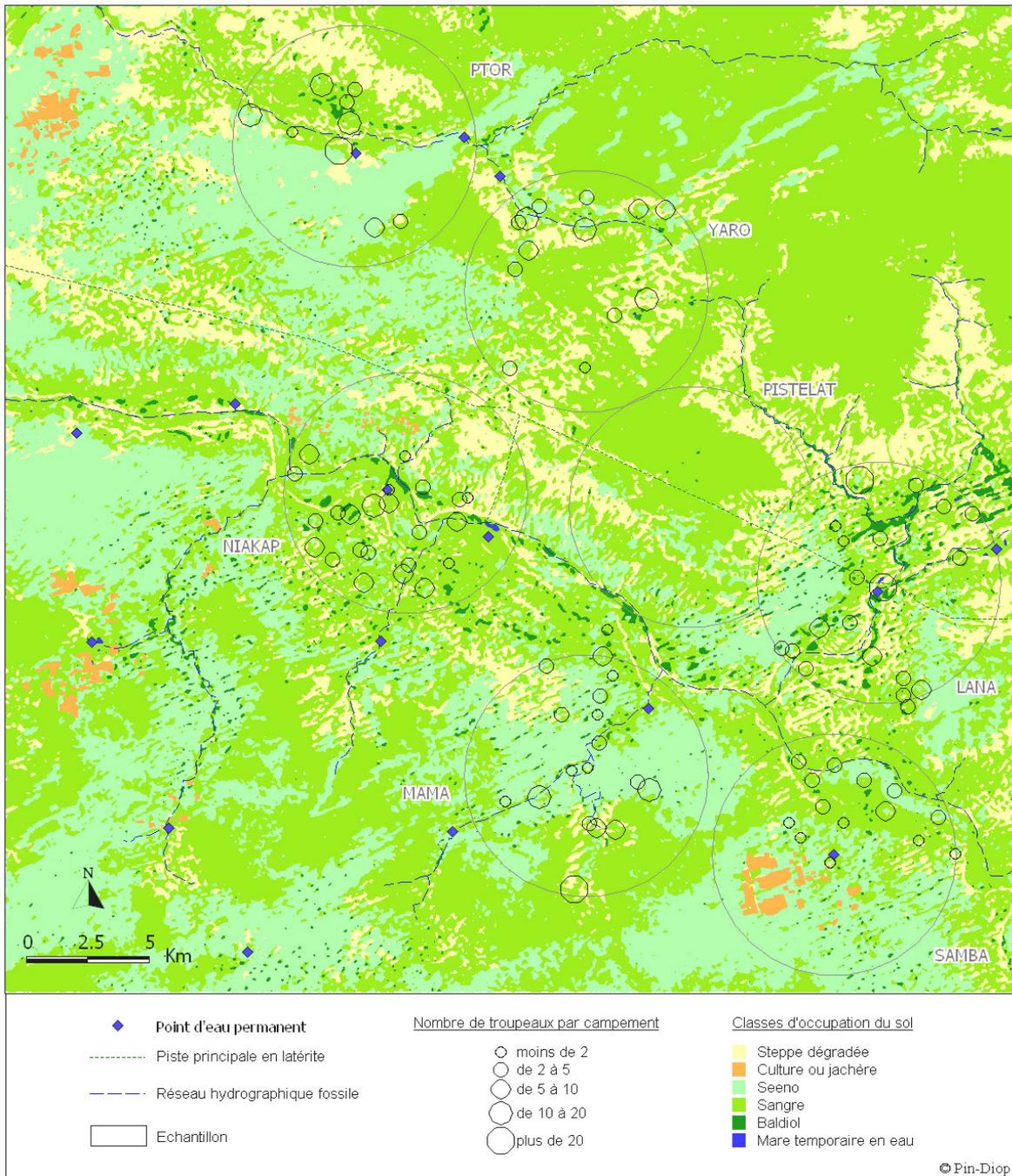


Figure 36 : Campements et environnement en milieu de saison des pluies 2001

4.2.2.3. Distribution du processus ponctuel « campements »

La fonction $L(r)$ calculée pour chaque point d'un semis les plus proches voisins dans un rayon r , afin de déterminer si le processus ponctuel est régulier, aléatoire ou agrégé. Sur la figure 37, la variable L des campements en fonction de la distance (en mètres) est représentée en vert ; les lignes noires en pointillés sont les fonctions L calculées pour 20 semis aléatoires de Poisson ; les lignes rouges entière et pointillées sont respectivement la moyenne et l'intervalle de confiance de ces 20 fonctions. Le graphique de droite est un « zoom » du graphique de gauche, afin de mieux visualiser l'endroit où la courbe verte sort de l'intervalle de confiance.

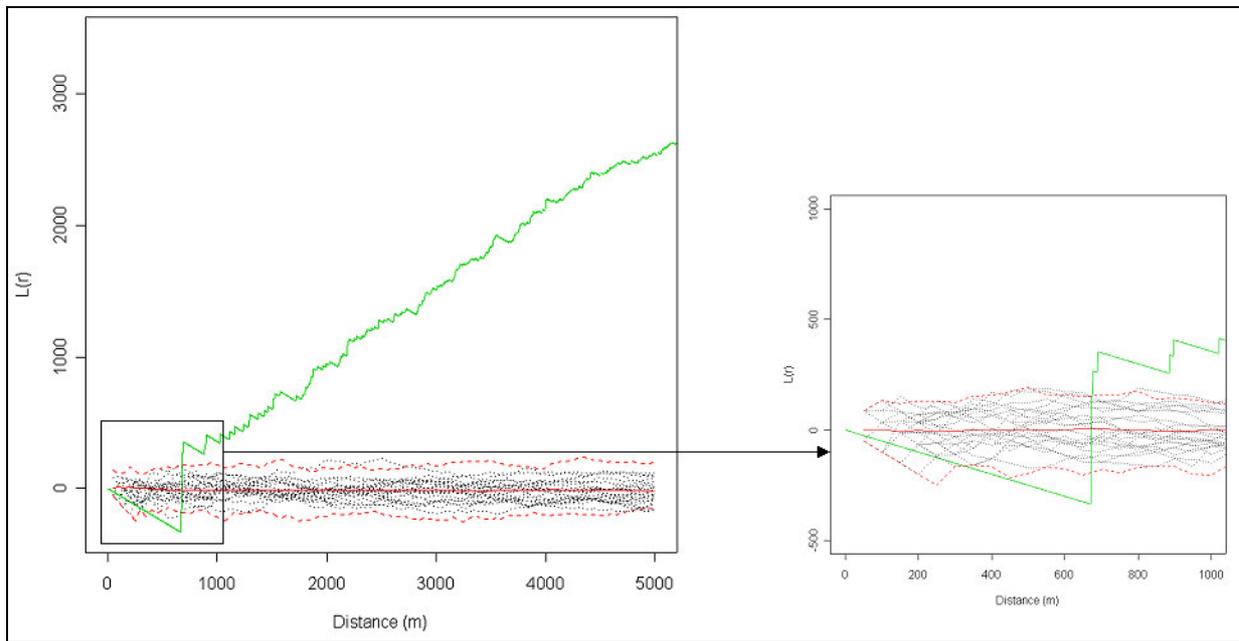


Figure 37 : Fonction de Ripley linéarisée pour les campements en saison des pluies 2001

A très grande échelle, les campements sont d'abord répartis aléatoirement (r compris entre 0 et 350 m) puis régulièrement (r compris entre 350 m et 700 m). Lorsqu'on change d'échelle, dès que r est supérieur à 700m, la courbe verte passe au dessus de l'intervalle de confiance, c'est à dire que la distribution devient agrégée. Ce graphique montre qu'à très grande échelle (moins de 700m), les éleveurs s'installent régulièrement, afin de bénéficier d'un espace suffisant autour du campement, pour les cultures par exemple. L'agrégation des campements à partir de 700m reflète une tendance à se regrouper en « villages », liée à l'exploitation des ressources en eau et en pâturage.

Les observations faites sur les campements dans le SIG, ainsi que le calcul de la fonction de Ripley confirment que la distribution spatiale des campements obéit à des règles précises, et qu'il est donc possible de la modéliser. Toutefois, avant de passer à l'étape de modélisation, nous décrivons au paragraphe suivant l'organisation spatiale des campements sédentaires et transhumants par rapport à l'occupation du sol et aux éléments importants de l'environnement (pistes, réseau hydrographique, etc.). Puis nous comparons les moyennes des variables environnementales deux à deux, afin de voir si le statut sédentaire ou transhumant implique un changement de comportement par rapport au choix de l'emplacement du campement. Enfin nous faisons une typologie, pour mettre en évidence les variables les plus discriminantes et identifier les grands types de campements. L'objectif de ces analyses statistiques préalables est double : d'une part, évaluer quelles sont les variables importantes pour le choix de l'emplacement et donc pour le modèle ; d'autre part, s'il est indispensable de construire deux modèles différents ou si tous les campements, sédentaires et transhumants, peuvent être rassemblés dans un même modèle.

4.2.3. Typologie des campements

4.2.3.1. Comparaison de la composition et de l'emplacement des campements sédentaires et transhumants, en 2001 et 2002

En 2001, nous avons recensé 94 campements dans les échantillons, dont 53 sédentaires et 41 transhumants, et en 2002, 113 campements dont 59 sédentaires et 54 transhumants. En saison des pluies, le nombre de campements et de troupeaux (bovins et petits ruminants confondus) est quasiment multiplié par deux, avec l'arrivée des transhumants (Tableau 8).

Tableau 8 : Nombre de campements et de troupeaux recensés dans les échantillons en saison des pluies 2001 et 2002

| | | Nombre de campements | Nombre de troupeaux |
|------|--------------|----------------------|---------------------|
| 2001 | Sédentaires | 53 | 301 |
| | Transhumants | 41 | 198 |
| 2002 | Sédentaires | 59 | 349 |
| | Transhumants | 54 | 314 |

En moyenne, un campement sédentaire est composé de 3.52 concessions ou familles, 1.57 troupeaux de bovins et 3.93 troupeaux de petits ruminants. Un campement transhumant est quant à lui composé de 2.56 concessions, 1.73 troupeaux de bovins et 3.55 troupeaux de petits ruminants. Les éleveurs transhumants ont donc tendance à posséder un plus grand nombre

d'animaux par personne que les sédentaires. En effet, ce sont généralement les éleveurs nomades qui possèdent les plus grands troupeaux.

Nous avons comparé les moyennes de diverses variables relatives à l'emplacement des sédentaires et des transhumants : distances par rapport aux points d'eau permanents, à la vallée du Ferlo et aux pistes, et proportions de chaque classe d'occupation du sol dans un rayon de 2 km autour du campement. Les résultats sont présentés au tableau 9.

Tableau 9 : Comparaison des variables liées à la composition et à l'emplacement du campement entre les sédentaires et les transhumants

| Variable | Description | Sédentaires | Transhumants | p |
|-------------|--|-------------|--------------|-------|
| conc | Nombre de concessions | 3.52 | 2.56 | |
| bo | Nombre de troupeaux de bovins | 1.57 | 1.73 | |
| ppr | Nombre de troupeaux de petits ruminants | 3.93 | 3.55 | |
| perm | Distance au point d'eau permanent le plus proche (m) | 2834.6 | 3486.78 | <0.05 |
| foss | Distance à la vallée du Ferlo (m) | 1154.38 | 1501.87 | |
| pist | Distance à la piste la plus proche (m) | 1181.2 | 1040.87 | |
| see | Proportion de <i>seeno</i> dans un rayon de 2km | 0.32 | 0.36 | <0.5 |
| san | Proportion de <i>sangre</i> dans un rayon de 2km | 0.46 | 0.44 | <0.5 |
| bal | Proportion de <i>baldiol</i> dans un rayon de 2km | 0.05 | 0.04 | <0.05 |
| deg | Proportion de steppe dégradée dans un rayon de 2km | 0.17 | 0.16 | <1 |

Les variables pour lesquelles la différence est statistiquement significative sont la distance au point d'eau permanent et les proportions de *seeno*, *sangre*, *baldiol* et steppe dégradée autour du campement. Cependant, les valeurs de p sont élevées, traduisant une différence peu marquée. En ne prenant en compte que les variables pour lesquelles $p < 0.05$, on peut conclure que par rapport aux sédentaires, les transhumants s'installent plus loin des points d'eau permanents et dans des zones où le *baldiol* est moins important en terme de surface.

Là encore, les résultats statistiques vont dans le sens des observations faites sur le terrain. En effet, les villages des sédentaires sont construits autour des points d'eau permanents, pour une exploitation optimale de la ressource en saison sèche. Lorsque les transhumants arrivent, ils viennent rarement s'installer dans ces villages, à l'exception peut être des *sereer*, qui apprécient la sécurité que leur offre le village. Les peuls par contre, préfèrent s'isoler dans des zones où le pâturage est abondant et où la concurrence n'est pas à craindre.

Le bilan de ces analyses statistiques exploratoires est qu'il n'y a pas de différence de comportement très marquée entre les campements sédentaires et transhumants ; ils sont donc traités ensemble pour la typologie et pour le modèle de densité de troupeaux.

4.2.3.2. Les différents types de campements

La typologie, constituée d'une AFCM suivie d'une CAH, porte sur tous les campements recensés en 2001 et 2002, moins les doublons. Le dictionnaire des variables est rapporté au tableau 6 (cf. p.113). Au total, nous avons 10 variables décomposées en 30 modalités.

Pour l'interprétation de l'AFCM, nous avons conservé les 3 premiers axes factoriels, expliquant respectivement 25%, 22% et 17% de la variabilité, soit 64% au total.

On observe d'abord la participation des variables à la formation de chaque axe, pour sélectionner celles qui sont les plus importantes (Tableau 10).

Tableau 10 : Contribution des variables à la formation des 3 premiers axes factoriels et variables conservées pour l'interprétation

| | Axe 1 | Axe 2 | Axe 3 |
|------|------------|------------|------------|
| conc | 0.01082515 | 0.70133794 | 0.14386164 |
| bo | 0.02321571 | 0.3579226 | 0.26963685 |
| ppr | 0.02024163 | 0.67005499 | 0.02017445 |
| perm | 0.02460034 | 0.02341982 | 0.372598 |
| foss | 0.1154691 | 0.09585524 | 0.25738745 |
| pist | 0.26629111 | 0.02455489 | 0.34058032 |
| see | 0.79253612 | 0.13775895 | 0.0076074 |
| san | 0.53009331 | 0.04224764 | 0.21788218 |
| bal | 0.14000236 | 0.15430375 | 0.05355254 |
| deg | 0.53843219 | 0.01057512 | 0.04684115 |

Nous avons conservé les variables suivantes :

- pour l'axe 1 : la proportion de *seeno*, de *sangre* et de steppe dégradée ;
- pour l'axe 2 : le nombre de concessions, de troupeaux de bovins et de troupeaux de petits ruminants ;
- pour l'axe 3 : la distance au point d'eau permanent, à la vallée fossile et à la piste les plus proches.

Les variables les plus discriminantes sont liées d'abord au type d'occupation de sol, puis à la composition du campement et enfin à la distance par rapport aux points d'eau, à la piste et à la vallée du Ferlo.

On s'intéresse ensuite aux oppositions sur les axes des modalités des variables conservées, après avoir vérifié que leur contribution soit suffisante pour que les coordonnées aient réellement un sens. Les modalités des variables ont été projetées sur les plans factoriels 1-2 (respectivement en abscisses et en ordonnées) et 2-3 (idem), afin de mieux visualiser les oppositions et les regroupements (cf. Figure 38).

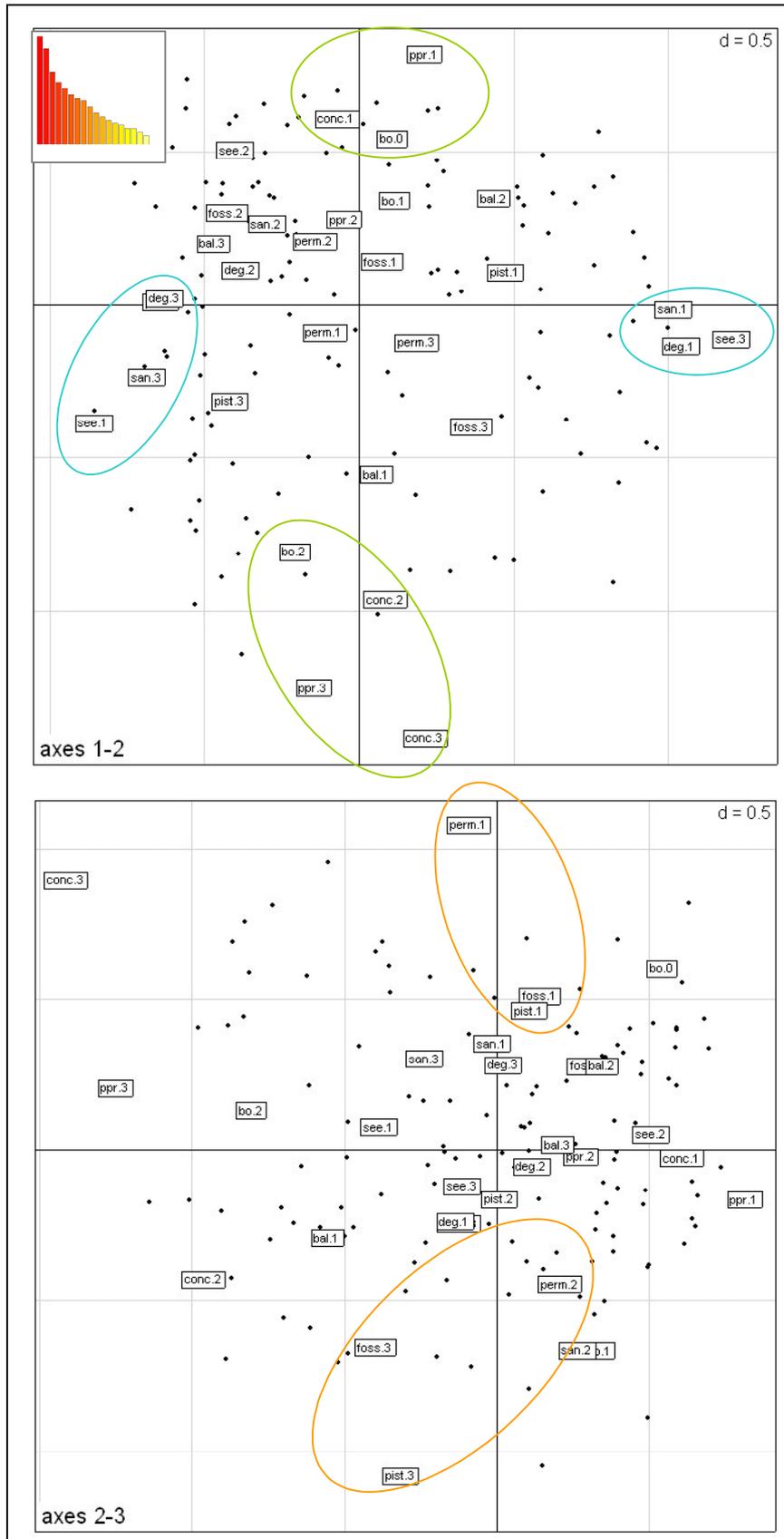


Figure 38 : Projection des modalités (encadrés) et des individus (points) sur les plans factoriels 1-2 et 2-3

Sur cette figure, on voit également l'histogramme des valeurs propres des axes dans le coin supérieur gauche. Les modalités conservées pour l'interprétation sont entourées sur les plans factoriels, donnant une représentation graphique des regroupements.

L'axe 1 correspond aux paysages qui entourent les campements ; il oppose :

- du côté négatif : les campements entourés majoritairement de *sangre* (plus de 53.4%) et de steppe dégradée (plus de 20.1%), aux dépens du *seeno* (moins de 20.8%) ;
- du côté positif : les campements situés dans des paysages mixtes, composés en grande partie de *seeno* (plus de 37.5%), d'un peu de *sangre* (moins de 39.7%) et de steppe dégradée (moins de 11.3%).

L'axe 2 correspond à la composition du campement, des plus importants aux plus petits; il oppose :

- du côté négatif : les moyens ou grands campements, caractérisés par plus de 3 concessions, au moins 2 troupeaux de bovins et au moins 4 troupeaux de petits ruminants ;
- du côté positif : les petits campements avec une ou deux concessions, pas de troupeau de bovins et un seul troupeau de petits ruminants.

L'axe 3 correspond à l'emplacement des campements par rapport à la vallée, aux pistes et aux points d'eau permanent ; il sépare :

- du côté négatif : les campements plutôt isolés, situés à plus de 1.5 km de la vallée et plus de 2 km d'une piste et d'un point d'eau permanent ;
- du côté positif : les campements situés à moins de 500 m de la vallée du Ferlo, à moins de 2 km d'un point d'eau permanent et à moins d'1 km d'une piste.

Après classification des individus (ou campements) selon leurs coordonnées factorielles et observation du dendrogramme, nous avons décidé de créer 4 groupes de campements (cf. Figure 39).

Par contre les modalités représentées sur les axes 2 et 3, relatives respectivement à la composition du campement et à sa position par rapport à des éléments du paysage (piste, vallée fossile, point d'eau permanent), sont nettement associées à des groupes de campements.

Les caractéristiques des 4 types de campements sont détaillées ci-dessous.

- Groupe 1 (n = 47) :

Ce groupe est placé du côté négatif sur les axes 2 et 3, et tend à être également du côté négatif sur l'axe 1. Par conséquent, il rassemble des campements de grande taille, possédant de nombreux troupeaux et relativement isolés. Ils ont plutôt tendance à s'installer dans des paysages de *sangre*, adaptés à l'élevage. D'après nos observations de terrain, on peut penser que ce groupe correspond à des grands campements de peuls transhumants.

- Groupe 2 (n = 32) :

Ce groupe est situé du côté positif sur les axes 2 et 3. Les campements qui le constituent sont de petite taille, avec un ou deux troupeaux. Ils sont installés à proximité d'un point d'eau permanent (c'est-à-dire d'un village), d'une piste et de la vallée du Ferlo. Ce groupe correspond plutôt à des sédentaires et des transhumants d'origine *sereer*, qui utilisent un système de production mixte associant l'élevage et l'agriculture.

- Groupe 3 (n = 46) :

Situés du côté positif de l'axe 2 et du côté négatif de l'axe 3, les campements du groupe 3 sont plutôt de petite taille et localisés loin des points d'eau permanents, de la piste et de la vallée fossile. Il peut s'agir soit de petits transhumants, soit de petits villages d'agro-éleveurs sédentaires, utilisant les mares temporaires en saison des pluies et parcourant une grande distance pour avoir accès à l'eau en saison sèche.

- Groupe 4 (n = 9) :

Ce petit groupe de campements est positionné du côté négatif de l'axe 1, ce qui signifie que les campements sont situés sur des paysages de *sangre*. Par ailleurs, sa position sur le plan factoriel 2-3 montre qu'il s'agit de grands campements, avec de nombreux troupeaux, localisés à proximité des villages. Ce groupe ne comprend que 9 campements, correspondant sûrement à des peuls sédentarisés, installés à proximité d'un point d'eau permanent.

4.2.3.3. Bilan des analyses statistiques exploratoires

Les statistiques univariées montrent que la densité de campements et de troupeaux est paradoxalement supérieure en 2002, qui est une année sèche, par rapport à 2001, qui est une année à pluviométrie normale. On peut supposer que cette disparité soit due au fait que lorsque la saison des pluies commence mal, une partie des transhumants, qui remontent habituellement du sud du pays vers la vallée du fleuve Sénégal, s'arrêtent dans le Ferlo, où ils sont sûrs de trouver des ressources.

Pour prendre en compte les variations annuelles dues au climat, des recensements doivent être pratiqués sur plusieurs années et les trajets de transhumance estimés. Cela sort du cadre de ce travail de thèse et nous avons donc choisi une temporalité réduite pour modéliser la densité de troupeaux. Nous nous sommes basés sur les données collectées en saison des pluies de l'année 2001, où la pluviométrie a été normale. Par ailleurs, les comparaisons de moyennes entre sédentaires et transhumants ne révèlent pas de différence majeure, tant pour la composition du campement que pour son emplacement. Tous les campements, quel que soit leur statut, peuvent donc être rassemblés dans un même modèle.

Enfin, la typologie met en évidence les variables qui discriminent le mieux les campements ; il apparaît que la composition de l'environnement immédiat joue un rôle prépondérant dans le choix de l'emplacement. Certaines modalités des variables environnementales sont regroupées sur les plans factoriels avec celles des variables de composition du campement, indiquant l'existence d'un lien entre le nombre de troupeaux et l'emplacement du campement. Les résultats de ces analyses préliminaires nous ont guidé pour le choix du modèle et des variables à tester.

4.2.4. Prédiction de la densité de troupeaux sur l'ensemble de la zone d'étude

4.2.4.1. Paramètres du modèle

Nous avons initialement intégré à notre modèle 20 variables (cf. Tableau 5, p.108), parmi lesquelles nous n'avons finalement conservé que les plus discriminantes. Nous avons testé plusieurs modèles en gardant successivement 4, 5, 6, 7 et 8 variables.

Le modèle le plus pertinent est celui intégrant 7 variables : *mcl*, *sdcl*, *sd2*, *zone*, *psam*, *pdem*, *pbam*. On retrouve ici le rôle prépondérant de l'environnement dans la répartition spatiale de la densité de troupeaux ; 6 variables sur 7 sont directement liées à l'occupation du sol, et la

variable *zone*, correspondant au *cluster* écologique, synthétise également des informations sur l'environnement.

Le modèle indique que les proportions de steppe dégradée et de *sangre* sont plus élevées dans le groupe « densité élevée » que dans les autres groupes (Tableau 11). En effet, les campements propriétaires de nombreux troupeaux ne pratiquent pas l'agriculture et préfèrent donc s'installer dans des zones à *sangre* propices à l'élevage. Les proportions de *baldiol* sont plus élevées dans les groupes de densité « faible » et « élevée » que dans le groupe « densité très faible ». Cela traduit le fait que le *baldiol* correspond à des zones humides, dont les éleveurs profitent en saison des pluies. La moyenne de la variable *sd2* croît avec la densité de troupeaux, ce que l'on peut expliquer par la réflectance élevée de l'eau et de la végétation dans la bande 2 de LandSat. C'est également le cas de la variable *zone*. Nous avons vu en effet que sur les 5 *clusters* environnementaux, les numéros 3, 4 et 5 étaient les plus propices à l'élevage. Enfin, les variables *mcl* et *sdcl* sont plus difficiles à interpréter directement.

Tableau 11 : Moyennes par groupe des 7 variables conservées dans l'analyse discriminante

| | sd2 | mcl | sdcl | zone | psam | pbam | pdem |
|-------------|-------|------|------|------|------|------|------|
| très faible | 12.67 | 2.35 | 1.18 | 3.73 | 0.70 | 0.10 | 0.31 |
| faible | 13.98 | 2.30 | 1.23 | 3.81 | 0.72 | 0.17 | 0.32 |
| élevée | 14.92 | 2.59 | 1.28 | 3.94 | 0.84 | 0.16 | 0.36 |

L'estimation des erreurs commises par le modèle donne des résultats assez satisfaisants, compte-tenu de la précision de l'analyse discriminante. En effet, 67% des observations sont correctement prédites. Les 33% d'erreurs se répartissent en 6% d'erreurs par omission¹¹ et 27% d'erreurs par commission¹².

4.2.4.2. Distribution spatiale de la densité de troupeaux sur la zone de Barkedji

Une fois que les pixels situés hors de l'échantillon ont été classés par le modèle dans l'un des trois groupes, nous les avons cartographiés, avec un code de couleurs. La carte qui en résulte est présentée à la figure 41 (cf. page suivante).

¹¹ Pixels classés en densité très faible alors qu'ils auraient du être classés en densité faible ou élevée.

¹² Pixels classés en densité faible ou élevée alors qu'ils auraient du être classés en densité très faible.

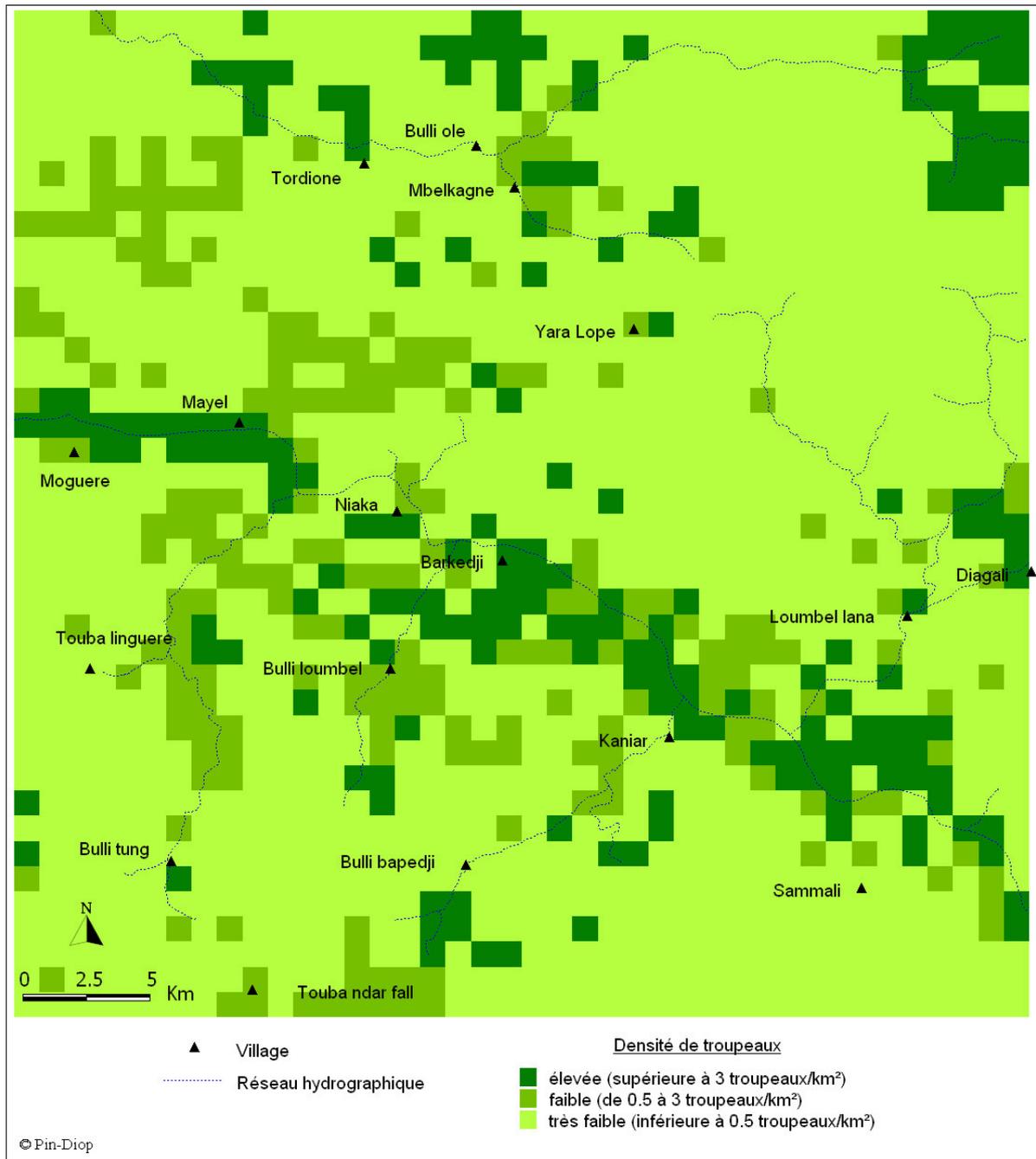


Figure 41 : Densité de troupeaux prédite par le modèle

A nouveau, bien que le modèle utilisé ne soit pas géostatistique, la densité prédite a un caractère spatial très marqué. Des zones à forte densité de troupeaux se détachent nettement, en particulier le long de l'axe principal et des ramifications de la vallée du Ferlo. On note également quelques taches à forte densité au nord, au nord-est et à l'est. Cette structure spatiale est due au fait que dans l'analyse discriminante, on cherche le lien entre la densité de troupeaux et plusieurs variables indépendantes, elles-mêmes spatialisées. Dans ce cas,

l'utilisation des statistiques classiques ne pose pas de problème particulier et la variable prédite conserve des propriétés spatiales (Kitron, 1998).

L'observation de la carte met en évidence une relation entre le réseau hydrographique et la densité élevée de troupeaux. L'axe central de la vallée, ainsi que ses ramifications en direction de Touba Linguere, Bulli Loumbel et Kaniar, sont les lieux de fort peuplement humain et animal. Par contre, les ramifications situées au nord et au nord-ouest de Diagali semblent peu propices à l'installation des campements. Etrangement, la distance au réseau hydrographique n'est pas une variable discriminante dans notre modèle ; c'est plutôt l'occupation du sol qui permet de prédire cette répartition spatiale. Le réseau hydrographique est pris en compte dans la variable *zone*, issue de la classification en *clusters* écologiques. Ce résultat montre bien que le choix de l'emplacement des campements est complexe, dicté par un ensemble de facteurs, ce qui corrobore notre approche par l'analyse multivariée.

4.3. Discussion

4.3.1. Critiques du modèle

Comme nous l'avons évoqué au chapitre 3, les modèles prédictifs utilisés en santé-environnement sont pléthoriques, allant des modèles statistiques aux géostatistiques. Parmi ces modèles, il fallait choisir celui qui, tenant compte des caractéristiques de nos données, était à même de répondre à notre objectif, à savoir prédire la répartition des hôtes de la FVR en fonction de variables environnementales.

Nous avons donc examiné les variables que nous voulions tester ainsi que la variable prédite. Etant donné que la transmission de la FVR est liée à la densité d'hôtes, nous avons pensé qu'il était plus pertinent de travailler sur le nombre de troupeaux, plutôt que sur le nombre de campements. Le modèle devait prédire une densité de troupeaux rapportée pour chaque pixel de la grille couvrant la zone d'étude. Cette variable est quantitative continue, mais sa distribution est loin d'être normale : la plupart des campements possèdent entre 0 et 10 troupeaux, à l'exception de quelques gros campements ou villages qui en ont plus de 30.

En outre, la distribution des campements dans l'espace n'est pas continue, et la majorité des pixels présente une densité égale à 0. Par conséquent, au risque de devoir choisir un modèle moins puissant, nous avons préféré discriminer 3 classes de densité de troupeaux (très faible, faible et élevée), plutôt que prédire une valeur numérique. L'analyse discriminante est alors

apparue comme la méthode de choix, bien que les sorties du modèle ne soient « que » qualitatives et que la précision de ce type de modèles ne soit pas très élevée.

Le modèle nous a permis d'estimer une des composantes du risque de transmission de la FVR à Barkedji : la densité de troupeaux. Son principal intérêt est d'extrapoler au niveau de la zone d'étude, les données issues de recensements effectués dans des échantillons de taille limitée. Nous avons ainsi évité des recensements exhaustifs longs, fastidieux et dans lesquels le risque d'omettre des campements n'est pas négligeable. Notre modèle affiche une précision conforme à ce que l'on peut attendre d'une analyse discriminante.

En outre, parmi les différents modèles possibles, nous avons choisi celui qui minimisait le pourcentage d'erreurs par omission, au détriment du pourcentage d'erreurs par commission. Notre objectif étant de cibler les zones à risque pour la FVR, nous avons pensé qu'il était préférable de sur-estimer la densité de troupeaux, positivement corrélée à ce risque, plutôt que de la sous-estimer. Cet exemple illustre bien le fait qu'un modèle doit toujours être relié à une réalité physique ou biologique. Dans ce cas, nous travaillons sur un problème de santé. Il n'est donc pas question de sous-estimer le risque sous prétexte d'obtenir un modèle théoriquement plus performant.

En outre, si l'on observe attentivement la répartition spatiale des variables descriptives et le résultat du modèle, il apparaît que le pourcentage relativement élevé d'erreurs de commission pourrait en partie être dû à un biais lié à l'intégration de la variable *zone*, représentant les *clusters* écologiques. En effet, sur les 5 *clusters*, deux (le 1 et le 5) ne sont pas représentés dans les échantillons qui ont servi à tester les variables. Il faudrait donc vérifier que le biais n'est pas trop important en allant recenser les campements dans deux échantillons, pris dans les zones 1 et 5. En attendant, on peut supposer que la tache de forte densité localisée au nord-est, c'est à dire dans la zone 5, pourrait être une surestimation due à ce biais.

4.3.2. Possibilités d'amélioration du modèle

Diverses solutions pourraient être envisagées pour améliorer la précision de notre modèle. Nous pourrions tester d'autres variables, relatives à l'occupation de l'espace par les éleveurs, comme la pente et l'altitude, à condition de disposer d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Nous pourrions également travailler sur la question du pâturage, qui reste la motivation première des éleveurs, en testant des indices de végétation autres que le NDVI,

voire même en détectant les différentes espèces herbacées et leur abondance au cours de la saison des pluies.

Par ailleurs, il serait plus juste d'estimer la densité de bétail, au lieu de la densité de troupeaux qui est une donnée moins précise. Nous avons déjà abordé le problème du recensement exhaustif des animaux chez les peuls au paragraphe 2.2.2.1. Pour obtenir le nombre d'animaux par campement, des techniciens expérimentés pourraient faire des comptages visuels lors des recensements. L'inconvénient de cette méthode est d'une part son manque de discrétion, d'autre part son imprécision lors des estimations sur des troupeaux de grande taille. Son avantage est un coût plus limité que les comptages par avion, une autre méthode de dénombrement. Ceux-ci sont plus précis, mais ils sont onéreux et il est difficile de rattacher les troupeaux à un campement en particulier puisque les vols s'effectuent dans la journée, lorsque les animaux sont au pâturage (Michel, 1998; Michel, 2000).

Finalement, la meilleure solution serait peut-être de se baser sur l'unité « parc de nuit », l'enclos dans lequel les animaux sont rassemblés le soir. En effet, les parcs sont généralement de surface assez homogène et pourraient être un bon indicateur du nombre d'animaux. Ils ont par ailleurs été géoréférencés lors des enquêtes de 2001-2002. Dans ce cas, la difficulté à laquelle nous sommes confrontée est d'ordre technique, car les parcs sont agrégés à deux niveaux : eux-mêmes sont agrégés autour d'un campement et les campements sont agrégés entre eux. Nous n'avons pas trouvé de modèle adéquat, répondant à cette contrainte. Peut être que les géostatistiques pourraient nous apporter des éléments de réponse et fournir ainsi de meilleures prédictions de la répartition des hôtes de la FVR.

Enfin, notre modèle est limité à la seule saison des pluies 2001. Or le nombre de campements et de troupeaux estimé sur toute la zone d'étude est significativement supérieur en 2002, année où la pluviométrie a été déficitaire (Lancelot, communication personnelle). Cette évolution de la densité globale de troupeaux pourrait être prise en compte, par l'intégration d'une variable climatique par exemple. Dans ce cas, il faudrait utiliser un modèle qui prenne en compte les données temporelles et travailler sur une série de plusieurs années, afin d'établir des corrélations entre la pluviométrie et la densité globale de campements.

Conclusion

Nous avons décrit finement le milieu dans la communauté rurale de Barkedji en traitant une image LandSat 7 et en divisant la zone en *clusters* écologiquement homogènes. Puis nous avons étudié la répartition spatiale des campements en saison des pluies, à partir de données relevées sur le terrain dans des échantillons. L'analyse multivariée des données a mis en évidence les variables qui discriminaient le mieux les différents comportements spatiaux : la composition du paysage dans un rayon de 2 km autour du campement joue un rôle prépondérant dans le choix de l'emplacement du campement en saison des pluies. Nous avons également montré qu'il n'y avait pas de différence marquée entre les comportements spatiaux moyens des sédentaires et des transhumants, ce qui nous a autorisé à les inclure dans le même modèle. Enfin nous avons élaboré un modèle statistique permettant de prédire la répartition spatiale de la densité des hôtes du virus de la FVR, en saison des pluies et sur l'ensemble de la zone d'étude. Le résultat de ce modèle est la première composante du risque de transmission de la FVR. Dans le chapitre suivant, nous nous intéressons à la répartition des vecteurs *Aedes* et *Culex* en partant de leurs gîtes principaux : les mares temporaires.

Chapitre 5. Caractérisation des mares temporaires et spatialisation de l'abondance relative des vecteurs

Introduction

Les mares temporaires, remplies en saison des pluies, constituent à la fois une des ressources principales pour les éleveurs et le gîte des deux principales espèces de moustiques vecteurs du virus de la FVR. Bien que la rencontre entre hôtes et vecteurs n'ait pas lieu sur la mare, elle focalise les éléments du système pathogène et en constitue le point central. Les mares ne sont pas toutes également favorables au développement des vecteurs. Leur topographie, leur profil et leurs caractéristiques phyto-sociologiques entraînent des variations dans leur capacité à héberger les vecteurs et à permettre leur reproduction. L'objectif de ce chapitre est de localiser les mares, de les classer selon leur dangerosité, puis de créer à partir de ces données environnementales un indicateur d'abondance relative des 2 vecteurs potentiels de la FVR (*Ae. vexans* et *Cx. poicilipes*) au niveau de la zone d'étude. Nous présentons d'abord les méthodes utilisées, basées sur le traitement d'images satellitales à très haute résolution, puis les résultats obtenus avant de les discuter.

5.1. Matériels et méthodes

5.1.1. Détection des mares temporaires et de la végétation à partir d'une série d'images SPOT5

5.1.1.1. Données satellitales et relevés de terrain

Les vecteurs sont tributaires de la disponibilité et de la qualité des gîtes de ponte. Les hypothèses H1, H2 et H3 montrent que deux éléments jouent un rôle prépondérant : l'eau des mares temporaires et la végétation qui les couvre.

- *H1 : plus une mare est couverte par la végétation, plus elle est favorable au développement des vecteurs*
- *H2 : plus une mare est étendue et découpée, plus les gîtes sont nombreux*
- *H3 : plus une mare reste en eau longtemps, plus elle est favorable au développement des vecteurs*

Des observations sur le terrain lors d'une mission de reconnaissance avaient montré que la superficie des mares temporaires est extrêmement variable, allant de quelques mètres carrés à quelques dizaines d'hectares.

Il importait donc de localiser précisément les surfaces en eau et la densité de végétation. Il est probable que certaines espèces végétales soient plus propices au développement des vecteurs que d'autres, mais nous ne disposons actuellement d'aucune information sur les préférences d'*Ae. vexans* ou de *Cx. poicilipes*. Nous nous sommes donc limités à évaluer la densité de la végétation, sans discriminer les espèces.

Ces différentes contraintes nous ont amené à choisir une série de quatre images SPOT5 (scène 025-319), datant du 26/08/2003, 11/09/2003, 27/10/2003 et 18/11/2003, mises à disposition par J.A. Ndione, du Centre de Suivi Ecologique de Dakar, qui les avait obtenues dans le cadre d'un programme ISIS impliquant Médias-France (Toulouse, France), le CSE et le Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan Simeon Fongang (Dakar, Sénégal). La résolution spatiale de 5 m nous a semblé bien adaptée au problème de la localisation des petites surfaces en eau et de la végétation aquatique.

En outre, en 2003, les mares ont été à leur niveau maximal à la fin du mois d'août, d'après des relevés limnimétriques réalisés sur le terrain. La première image reflète donc le niveau de remplissage maximal des mares lors d'une année normale, et les images suivantes la permanence des surfaces en eau au cours de la saison des pluies. Le fait que nous n'ayons pas utilisé ces images SPOT pour cartographier l'occupation du sol est due à leur complexité et à la lenteur des traitements informatiques, chacune des images étant composée de 64 000 000 de pixels. Puisque la résolution spatiale de l'image LandSat était suffisante, il était plus simple et plus rapide de la mettre à profit.

Afin d'enrichir nos connaissances sur le milieu, nous avons effectué à la fin du mois d'août 2004 une série de relevés sur 49 sites de la zone d'étude, choisis à partir de l'observation d'une composition colorée de l'image Spot du 26/08/03 (cf. Figure 42). Nous avons focalisé notre attention sur les mares temporaires et les objets difficilement identifiables sur l'image ; le choix des sites de relevés a également été contraint par leur accessibilité en saison des pluies. Nous avons relevé la topographie, la végétation et les autres caractéristiques de chaque lieu, qui auraient pu être importantes pour le traitement d'images. En particulier, un travail fastidieux a été réalisé pour décrire les mares temporaires. En effet, les points avaient été

positionnés sur la composition colorée de l'image, et ne correspondaient donc pas forcément à des sites accessibles à pied. Nous avons donc parfois du ajuster nos relevés, en tenant compte des contraintes du terrain, mais toujours en veillant à décrire des lieux remarquables.

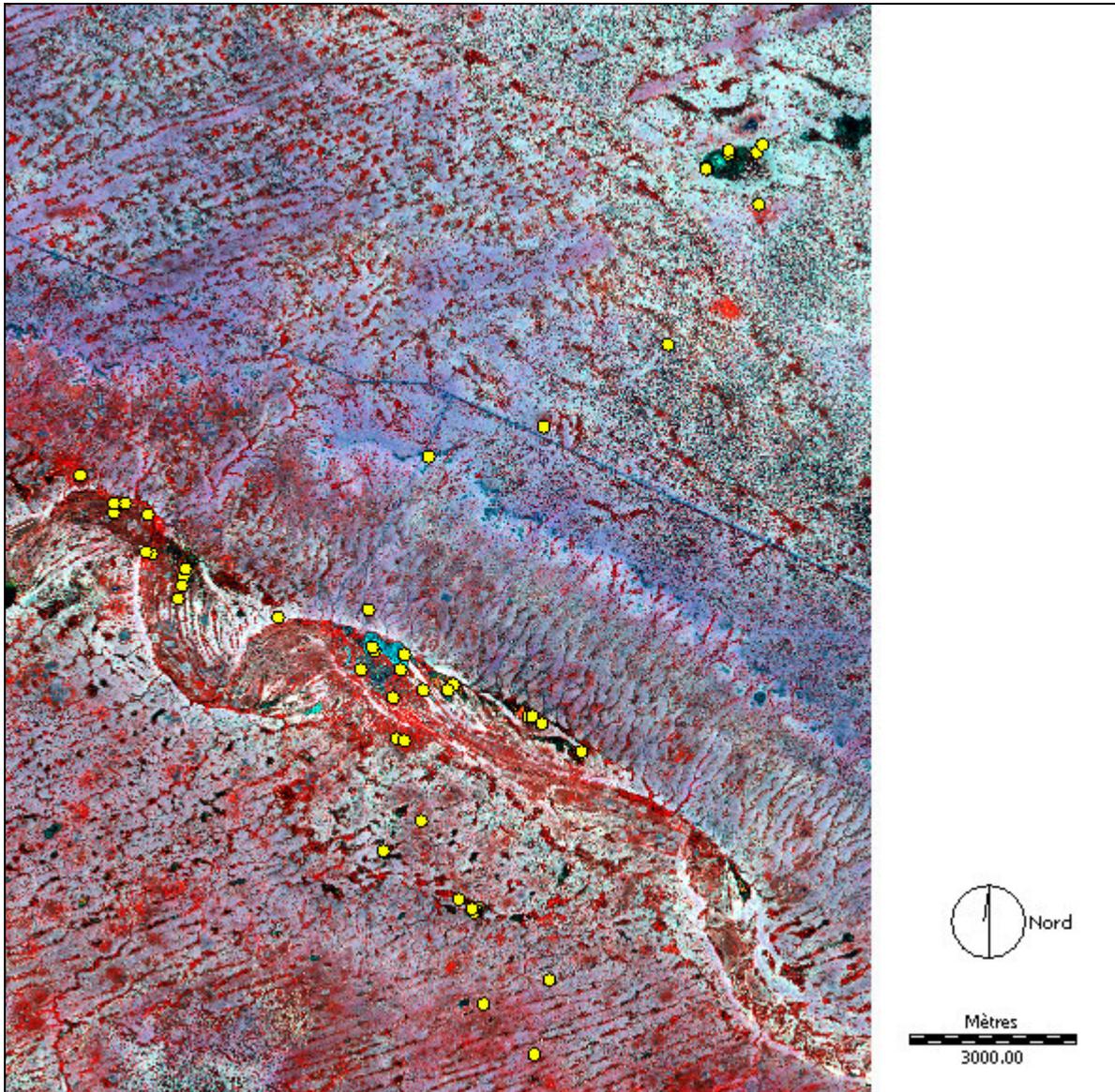


Figure 42 : Position des relevés de terrain sur un extrait de la composition fausses couleurs (B1, V2, R3) de l'image SPOT du 26/08/03 (Source : Centre de Suivi Ecologique, Dakar ; Copyright : SpotImage)

5.1.1.2. Traitement des images SPOT

5.1.1.2.1. Indications préalables

La détection de l'eau sur des images SPOT ne pose normalement pas de problèmes particuliers, car elle présente une signature caractéristique dans le spectre électromagnétique (cf. Figure 43). La valeur spectrale de l'eau libre est élevée dans la bande XS1 (vert) de

SPOT, puis décroît dans les bandes XS2 (rouge) et XS3 (PIR ou proche infra-rouge). Elle est donc bien discriminée dans les compositions colorées.

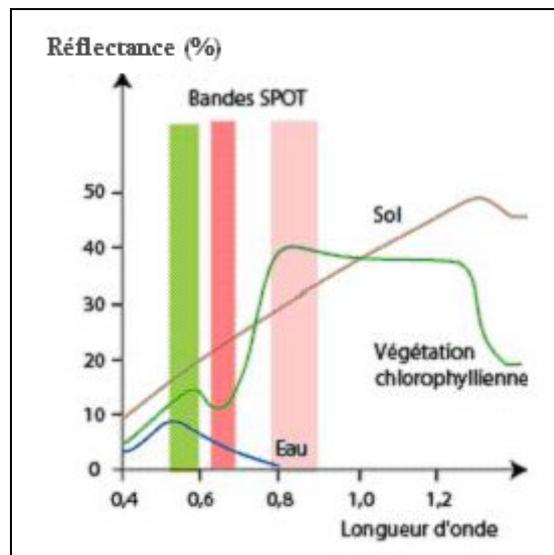


Figure 43 : Signatures de l'eau, du sol et de la végétation chlorophyllienne dans le spectre électromagnétique (Source : Eduspace, adapté par Rohmer)

La situation n'est malheureusement pas aussi simple dans le cas de Barkedji. En effet, les mares sont très différentes d'un point de vue topographique et phytosociologique, et nombreuses sont celles qui sont couvertes partiellement ou totalement par de la végétation arborée, arbustive ou aquatique (nénuphars, algues, etc.). Par ailleurs, les mares sont inégalement fréquentées par les éleveurs et les troupeaux, entraînant des variations de turbidité. Le signal de l'eau est donc très variable sur l'ensemble de l'image, selon l'abondance de végétation, la profondeur de la mare et sa fréquentation (cf. Planche photo 8). Ces difficultés nous ont amené à essayer deux méthodes de détection : la classification supervisée par pixel et la classification orientée-objet. Cette dernière a été mise en œuvre par Philippe Rohmer, étudiant en 2^{ème} année du Master Géomatique de l'Université d'Orléans, dans le cadre de son stage de fin d'année.

5.1.1.2.2. Pré-traitements des images

Les scènes SPOT nous ont été fournies sous forme de compositions colorées au format GeoTIFF, accompagnées de leur fichier de métadonnées. Les canaux ayant servi à faire les compositions colorées avaient déjà été mixés avec le canal panchromatique et les images avaient donc une résolution spatiale de 5 m. L'image datant du 11/09/03 n'a pas été utilisée car la couverture nuageuse était trop importante.

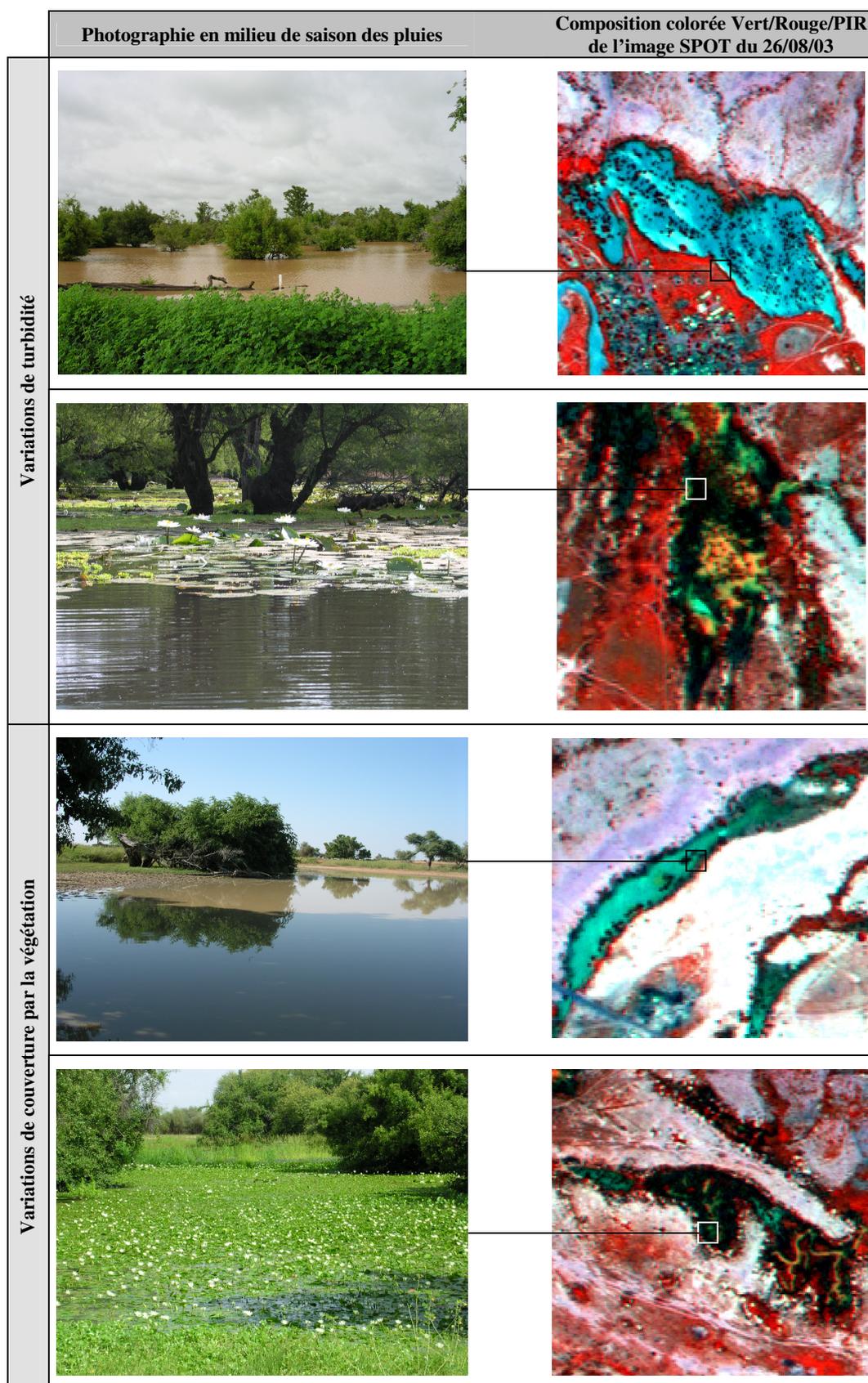


Planche photo 8 : Exemples de variations du signal des mares temporaires (Clichés : Mondet et Sibert 2003)

Il nous a fallu importer les trois images restantes sous Idrisi® en individualisant chacun des 3 canaux bruts XS1, XS2 et XS3. Puis la zone d'étude a été extraite de chacune des bandes. Les scènes ayant un niveau 2A, les corrections géométriques n'ont pas été nécessaires. Par contre des corrections radiométriques par régression d'image ont été appliquées sur les images du 27/10/03 et du 18/11/03, afin de les rendre comparables à celle du 26/08/03 (Rohmer, 2005). Enfin, nous avons amélioré le contraste par rehaussement linéaire puis fait une composition colorée « fausses-couleurs » afin de faciliter l'interprétation visuelle.

5.1.1.2.3. Classification supervisée

Le principe et la méthode de la classification supervisée ont déjà été détaillés au paragraphe 4.1.1.2 ; c'est la raison pour laquelle nous n'indiquons ici que les principales étapes de la classification des images SPOT. La différence majeure observée par rapport au traitement de l'image Landsat est l'extrême hétérogénéité des images SPOT, due à leur haute résolution spatiale. Le niveau de détail atteint est très élevé, rendant d'autant plus délicate l'identification des objets géographiques sur les compositions colorées.

Pour nous, l'intérêt de travailler sur de telles images n'était pas forcément de discriminer un très grand nombre de classes, mais plutôt de cibler les surfaces en eau et couvertes par la végétation. Sachant que nombre de mares étaient couvertes par la végétation, nous avons créé les parcelles d'apprentissage de façon à séparer six classes d'objets :

- l'eau libre,
- la végétation terrestre,
- la végétation aquatique,
- les sols nus,
- le *seeno**,
- le *sangre**.

Le même procédé a été utilisé pour les images aux trois dates. La classification a été réalisée par la méthode du maximum de vraisemblance, puis évaluée par interprétation visuelle et par le calcul d'une matrice d'erreurs. Après observation à l'œil nu des résultats et réajustement des parcelles d'apprentissage, la classification nous a semblé de bonne qualité, impression confirmée par un indice *kappa* égal à 0.72.

Discriminer un nombre aussi faible de classes sur des images à très haute résolution peut paraître insuffisant, c'est pourquoi nous avons dans un deuxième temps essayé de faire une classification plus détaillée, en nous appuyant sur tous les détails topographiques et phyto-

sociologiques relevés sur le terrain. Cette tentative nous a mené à séparer 21 classes différentes, prenant en compte des critères aussi divers que la densité et la hauteur de la végétation, la turbidité de l'eau, la profondeur des mares, etc.

A première vue, le résultat semblait prometteur, mais nous avons malheureusement mis à jour par une observation attentive de nombreuses confusions, en particulier entre les paysages latéritiques et certains types de mares très couvertes par la végétation. Nous avons donc préféré revenir à notre premier résultat et nous en tenir aux 6 classes mentionnées ci-dessus.

Nous avons ensuite localisé les mares temporaires, correspondant aux objets identifiés comme « eau libre » et « végétation aquatique », étant entendu que la végétation aquatique, comme son nom l'indique, recouvre de l'eau. Après application d'un filtre de type « mode » de dimension 5×5 pour lisser la classification, ces deux classes ont été rassemblées en une classe « mares temporaires » (cf. Figure 44, étape 1), puis l'image booléenne (1 : mare ; 0 : non mare) ainsi obtenue a été vectorisée et exportée dans le SIG. Sachant qu'il existe toujours des confusions dans une classification, et que les mares de très petite taille, rapidement asséchées, n'ont qu'un rôle négligeable dans le développement des vecteurs, nous avons décidé de supprimer les mares dont la surface était inférieure à 500m² (étape 2).

Nous avons ainsi atteint notre premier objectif, qui était de détecter les mares temporaires. Cependant, nous n'avons pas discriminé la végétation selon sa densité ; or l'hypothèse H1 nous indique que plus la mare est couverte par la végétation, plus elle constitue un gîte de ponte propice pour les vecteurs.

Par ailleurs, nous voulions voir si la méthode de classification orientée-objet pouvait améliorer l'interprétation de l'image. Nous avons donc confié à Philippe Rohmer le soin de recommencer les traitements dans le logiciel eCognition[®], adapté à la démarche orientée-objet.

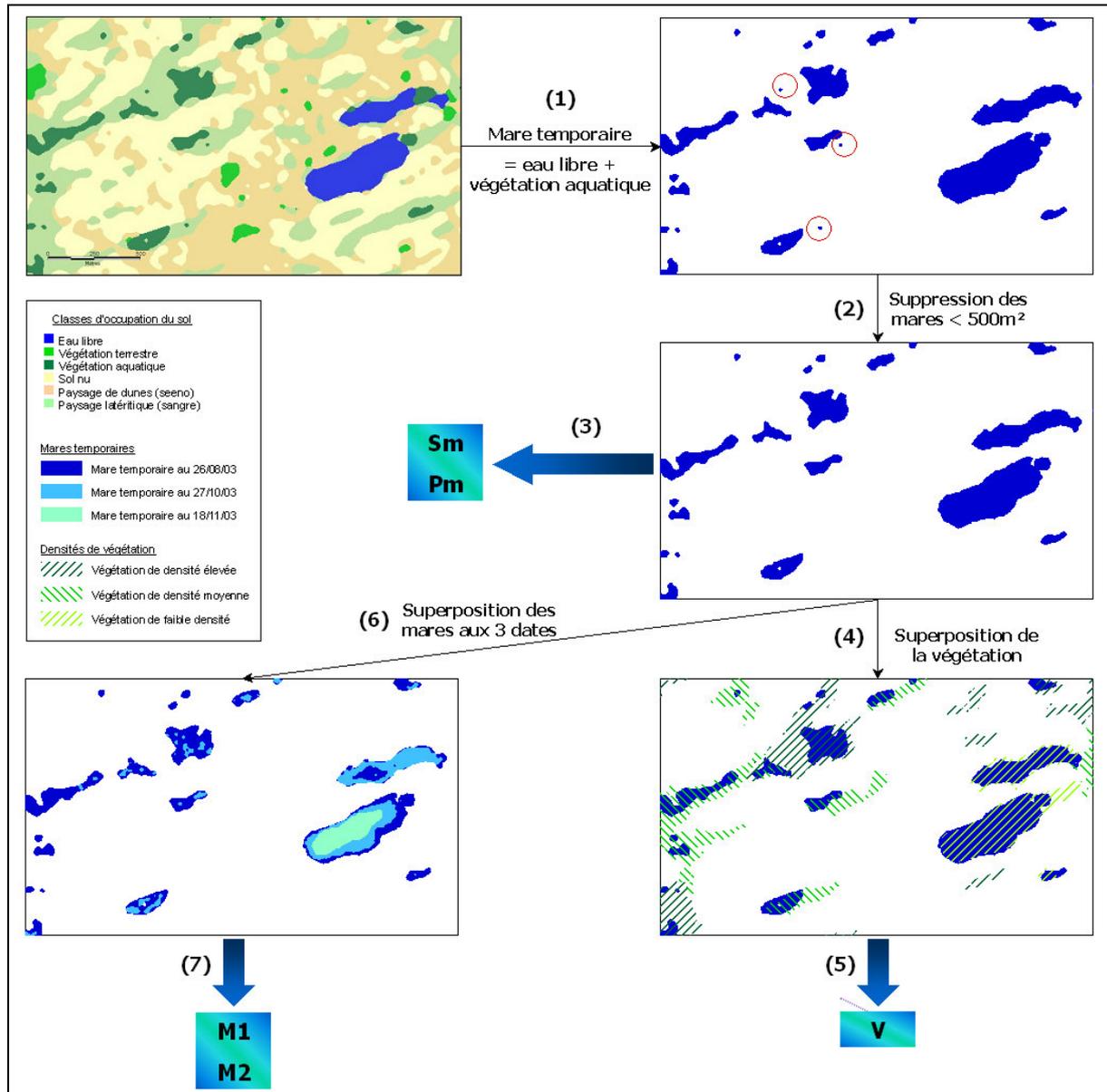


Figure 44 : Etapes de la caractérisation des mares temporaires

5.1.1.2.4. Classification orientée-objet

Principe

Dans les approches traditionnelles de télédétection, l'espace géographique est assimilé à une image formée de pixels. Les caractéristiques radiométriques de ces derniers sont le lien entre l'espace radiométrique et l'espace géographique *via* le modèle radiométrique. En analyse orientée-objet, l'image n'est plus assimilée à une grille de pixels mais à des agrégats de pixels formant des « objets » dans l'image. L'identification de ces objets repose sur l'étude de leurs attributs radiométriques mais aussi géométriques ou spatiaux, c'est-à-dire leur topologie. La première étape de ce type d'analyses est la segmentation de l'image en objets, un processus

itératif qui consiste à regrouper les pixels d'une image selon leur homogénéité. Le regroupement se poursuit jusqu'à ce qu'il ne reste que des régions homogènes, ayant entre elles des différences suffisamment grandes. C'est l'utilisateur qui définit, en fonction de ses connaissances, le ou les niveau(x) de segmentation (Devaux, 2006).

La classification des objets-images en objets géographiques est également basée sur les connaissances de l'utilisateur, au même titre que la classification supervisée par pixel. La nouveauté de l'approche orientée-objet, outre le principe de segmentation de l'image, est de caractériser les objets-images non seulement par rapport à leurs caractéristiques propres (radiométrie, topologie etc.) mais également par rapport à leur voisinage (au même niveau de segmentation) et à leurs sous-objets ou super-objets (à des niveaux de segmentation différents). Pour clarifier notre propos, prenons un exemple dans la zone de Barkedji : un objet, ayant la signature spectrale de la végétation herbacée, sera classé en « pâturage » si le super-objet qui le contient est du *sangre* ou du *seeno* ; il sera classé en « nénuphars » si le super-objet qui le contient est une mare.

Le potentiel de l'approche orientée-objet pour le traitement d'images à haute ou très haute résolution ne fait aucun doute. Toutefois, il s'agit de méthodes complexes, requérant une connaissance approfondie du milieu étudié. Le logiciel qui a été utilisé pour travailler sur les images SPOT de Barkedji est eCognition[®] (Benz *et al.*, 2004).

Méthode de classification

L'échelle de segmentation a été choisie de manière à séparer les différentes parties des mares (couvertes ou découvertes, turbides ou non turbides). Avec un niveau de segmentation égal à 20, les mares apparaissent constituées de plusieurs objets, selon leur taille, leur turbidité et leur couverture végétale (cf. Figure 45).

Les classes que l'on a cherché à discriminer sont les suivantes :

- eau libre non turbide
- eau libre turbide
- sols très humides
- sols moyennement humides
- végétation de densité élevée
- végétation de densité moyenne
- végétation de faible densité
- autres.

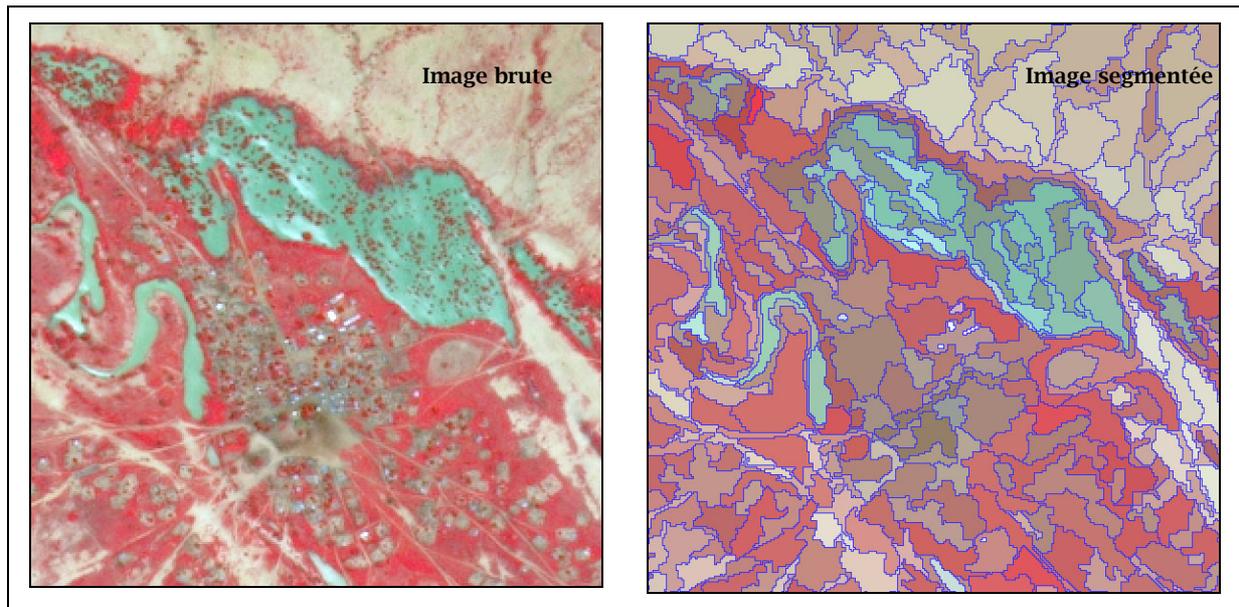


Figure 45 : Exemple de segmentation sur la mare de Barkedji et ses alentours au 26/08/03 (Source : P. Rohmer)

La définition des classes s'appuie sur un canal ou un néocanal particulièrement discriminant, auquel ont été associés d'autres critères afin de limiter les confusions. L'eau étant difficile à détecter à partir des canaux bruts des images, nous avons créé un néocanal adapté du NDVI, à partir du canal vert (V ou XS1) et du canal proche infra-rouge (PIR ou XS3). A la différence des autres objets, la réponse spectrale de l'eau à l'état liquide est maximale dans le canal du vert et décroît fortement dans le proche infrarouge. L'indice créé, nommé Indice Normalisé de Caractérisation de l'Eau (INCE), est positif uniquement pour les surfaces en eau.

$$INCE = \frac{V + PIR}{V - PIR}$$

Pour la végétation, nous nous sommes basés sur l'indice NDVI, en attribuant des seuils croissants pour discriminer les densités faible, moyenne et élevée. Les critères d'identification de chaque classe sont présentés au tableau 12 (cf. page suivante).

Les mêmes critères ont été appliqués aux trois images car les corrections radiométriques effectuées au préalable les ont rendues comparables. Les produits des classifications aux trois dates, au format vecteur, ont ensuite été exportées dans le SIG (Rohmer, 2005).

Tableau 12 : Critères d'identification des classes pour la classification orientée-objet

| Classes | Critères* | Classes | Critères* |
|--------------------------|--|-------------------------------|---|
| Eau libre non turbide | INCE > 1 PIR < 70 | Végétation de densité élevée | NDVI > 0.27 |
| Eau libre turbide | INCE > 1 PIR < 128 NDVI < 0.05 | Végétation de densité moyenne | NDVI ∈ [0.2 ; 0.27] |
| Sols très humides | V < 65 R < 75 PIR < 10 Pas « eau libre non turbide » Pas « eau libre turbide » | Végétation de faible densité | NDVI < 0.2 |
| Sols moyennement humides | V > 80 R > 85 PIR ∈ [100 ; 140] NDVI > 0.1 Pas « eau libre non turbide » Pas « eau libre turbide » Pas « sols très humides » | Autres | Pas « eau libre non turbide » Pas « eau libre turbide » Pas « sols très humides » |

* INCE : indice normalisé de caractérisation de l'eau ; PIR : canal proche infra-rouge ; V : canal vert ; R : canal rouge.

Bilan de l'approche orientée-objet

La classification orientée-objet a été évaluée à dire d'expert, d'après les connaissances de l'image et du terrain. Il nous est apparu que les classes et les critères retenus pour la classification orientée-objet ne permettaient pas d'identifier correctement l'ensemble des mares temporaires. Des objets qui auraient dû être classés en eau libre étaient rattachés par erreur à la classe « sols très humides ». Par contre, les surfaces couvertes par la végétation ont été bien discriminées dans les trois classes de densités.

Par conséquent, sachant que les surfaces en eau, responsables du développement des vecteurs, ne devaient pas être sous-estimées, nous n'avons conservé de la classification orientée-objet que les couches d'information relatives à la végétation, extraites de l'image du 26/08/03. Pour les mares temporaires aux trois dates, nous avons préféré utiliser les résultats de la classification supervisée par pixel. Le paragraphe suivant présente la méthode de caractérisation des mares selon leur capacité à favoriser le développement des vecteurs.

5.1.2. Caractérisation de la capacité des mares à favoriser le développement des vecteurs

5.1.2.1. Définition des règles de décision

La définition des règles de décision pour caractériser les mares temporaires se base sur les hypothèses H1 à H3. Le traitement d'images nous a permis de localiser les surfaces en eau au 26/08/03, 27/10/03 et 18/11/03, ainsi que la végétation au 26/08/03. Nous avons donc calculé une série de 5 indices, dont la somme détermine la capacité globale de chaque mare à favoriser le développement des vecteurs.

Les indices sont définis comme suit :

- S_m = surface maximale en eau au 26/08/03
- P_m = périmètre maximal de la mare au 26/08/03
- $M_1 = 0$ si la mare est vide au 27/10/03, 1 dans le cas contraire
- $M_2 = 0$ si la mare est vide au 18/11/03, 1 dans le cas contraire
- V = indice de couverture par la végétation, défini par la formule suivante

$$V = V_f + V_i^2 + V_d^3$$

où V_f = proportion de surface couverte par la végétation de faible densité
 V_i = proportion de surface couverte par la végétation de densité intermédiaire
 V_d = proportion de surface couverte par la végétation de forte densité

La surface et le périmètre des mares ne sont pas des variables redondantes : la première est un bon indicateur pour *Cx. poicilipes*, qui pond à la surface de l'eau, et la deuxième pour *Ae. vexans*, qui pond sur les bords des mares, à l'interface entre l'eau et le sol.

Les proportions V_i et V_d sont élevées respectivement à la puissance 2 et à la puissance 3, car plus la végétation est dense, plus la mare est ombragée et donc propice aux gîtes de ponte.

Concernant la prise en compte de la variation de niveau des mares, nous avons hésité sur la pertinence des différents indices. En effet, nous n'avons que trois images à notre disposition, ce qui nous semblait insuffisant pour calculer un indice de variation synthétique ou un écart-type, par exemple. Nous nous sommes donc contentés de qualifier la pérennité des mares au 27/10 et au 18/11, et de leur attribuer un indice binaire en 0/1.

Les 5 variables ont été calculées dans le SIG et renseignées dans la couche des mares détectées au 26/08/03. S_m et P_m ont été mesurés directement dans le SIG (cf. Figure 44, p.148, étape 3). Pour l'indice de végétation, nous avons successivement croisé la couche des

mares au 26/08/03 avec les couches de végétation de densité faible, moyenne et élevée (cf. Figure 44, p.148, étape 4). Nous avons mesuré quelle était la surface de mare couverte par chaque type de végétation, en nous basant sur une requête spatiale d'inclusion « l'objet mare contient l'objet végétation » (cf. Figure 44, p.148, étape 5).

Le même procédé a été utilisé pour mesurer la surface en eau au 27/10/03 et au 18/11/03 (cf. Figure 44, p.148, étape 6). Nous avons au préalable attribué aux mares repérées à ces deux dates (chaque date correspondant à une couche d'objets de type polygone) le même identifiant numérique qu'au 26/08/03 en faisant les requêtes suivantes : « l'objet mare_260803 contient l'objet mare_271003 » et « l'objet mare_260803 contient l'objet mare_181103 ».

Etant donné que le niveau des mares était maximal sur l'image du 26/08/03, nous sommes sûrs de ne pas avoir omis de mare. Les deux variables M1 et M2 ont pu alors être complétées (cf. Figure 44, p.148, étape 7).

5.1.2.2. Mise en œuvre du modèle de décision

Une fois les variables renseignées pour chaque mare au 26/08/03, nous avons procédé à une mise en classes, de façon à attribuer à chaque classe de variable un score, lié à l'importance de la modalité pour le développement des vecteurs (Tableau 13). La capacité totale C de chaque mare est égale à la somme des 5 scores, puisque chaque variable est corrélée positivement au développement des vecteurs.

$$C = S_m + P_m + V + M_1 + M_2$$

Tableau 13 : Modèle de décision de la capacité C des mares à favoriser le développement des vecteurs

| Variable | Description | Modalité | Limites de classe ^a | Score |
|----------|--|-------------|--------------------------------|-------|
| Sm | Surface maximale (au 26.08.03) | Faible | < 10000 m ² | 1 |
| | | Moyenne | 10000 - 50000 m ² | 2 |
| | | Grande | 50000 - 100000 m ² | 3 |
| | | Très grande | ≥ 100000 m ² | 4 |
| Pm | Périmètre maximal (au 26.08.03) | Faible | < 1000 m | 1 |
| | | Moyen | 1000 - 5000 m | 2 |
| | | Elevé | ≥ 5000 m | 3 |
| V | Indice de recouvrement par la végétation (au 26.08.03) | Nul | = 0 | 0 |
| | | Faible | 0 - 0.5 | 2 |
| | | Moyen | 0.5 - 1 | 4 |
| | | Egal à 1 | = 1 | 6 |
| M1 | Remplissage au 27.10.03 | Mare vide | | 0 |
| | | Mare en eau | | 1 |
| M2 | Remplissage au 18.11.03 | Mare vide | | 0 |
| | | Mare en eau | | 1 |

^a Dans les intervalles, la limite supérieure est non incluse.

C est un indice relatif, compris dans l'intervalle [2 ; 15], qui permet de classer les mares les unes par rapport aux autres selon leur dangerosité.

5.1.3. Estimation de l'abondance relative des vecteurs

La variable C indique la capacité de chaque mare à favoriser le développement et la reproduction des vecteurs, en fonction de sa surface, son périmètre, sa couverture végétale et sa pérennité. On peut donc considérer que C est un indicateur de l'abondance relative des vecteurs au niveau de chaque mare.

Cependant, on sait que la rencontre entre les vecteurs et les hôtes n'a pas lieu à la mare mais au campement, lorsque les vecteurs chassent. L'hypothèse H4 indique que « *plus on s'éloigne de la mare, plus la densité de vecteurs diminue* ». En effet, les moustiques ont une capacité de vol, et donc une dispersion, limitées.

Nous avons alors tenté de généraliser l'indice calculé pour chaque mare à l'ensemble de la zone d'étude, afin de disposer d'un indicateur de l'abondance relative des vecteurs. Sachant que l'on peut trouver dans un pixel plusieurs mares de capacités différentes, il fallait trouver un moyen de synthétiser l'information. Nous avons donc repris la grille de 1600 pixels de 1 km² et calculé pour chaque pixel un indice C_p (capacité par pixel), selon la formule suivante :

$$C_p = \sum C \times R_s$$

où C est la capacité de la mare n

et R_s le ratio de la surface de la mare n par rapport à celle du pixel qui l'entoure

C_p a été calculé dans le SIG par requête SQL, basée sur le critère « l'objet pixel contient l'objet mare de capacité C et de surface R_s ». Pour chaque mare contenue dans un pixel, le produit $C \times R_s$ a été calculé, puis nous avons fait la somme pour obtenir la valeur finale.

La variable C_p n'est pas continue car les pixels qui ne contiennent pas de mare ont une valeur égale à 0. Or dans la réalité, la distribution spatiale de l'abondance des vecteurs est continue, les moustiques ne s'arrêtant pas brusquement de voler en bordure de pixel... Par conséquent, il faut estimer cette abondance non plus seulement à la mare mais dans ses alentours, sachant que l'abondance de vecteurs est corrélée négativement à la distance à la mare.

Nous avons donc rasterisé la grille de 1600 pixels sous ArcGis[®], en lui attribuant la valeur de C_p , puis nous avons lissé l'image obtenue avec le module *Inverse Distance Weighting* de l'extension *Geostatistical analyst*. Il permet de calculer, pour chaque pixel, une nouvelle valeur dépendant des pixels environnants, en partant du principe qu'un pixel proche a plus d'influence qu'un pixel éloigné. Cette nouvelle valeur est une moyenne des valeurs des n pixels environnants, pondérée par l'inverse de la distance élevé à la puissance p . Les variables n et p sont déterminées par l'utilisateur, selon ses besoins. Dans notre cas, le nombre de pixels n doit être choisi en fonction de la distance de dispersion des vecteurs.

Malheureusement, nous ne disposons que de peu d'informations sur la dispersion des espèces *Ae. vexans* et *Cx. poicilipes*. La bibliographie fait état de distances allant de quelques centaines de mètres à une quarantaine de kilomètres selon les régions. La difficulté dans l'appréciation de la distance de dispersion est d'ordre théorique et technique : d'une part, les moustiques s'adaptent aux contraintes de leur environnement, si bien que l'on ne peut transposer les résultats obtenus pour les mêmes espèces dans d'autres pays ; d'autre part, la mesure de la dispersion des moustiques sur le terrain est extrêmement longue, coûteuse et aléatoire. Il s'agit de capturer des moustiques sur une mare, de les marquer, de les relâcher puis de disposer des pièges à intervalles de distance réguliers pour essayer de capturer à nouveau des moustiques marqués. L'opération nécessite de marquer des milliers de moustiques pour avoir une chance de capturer à nouveau quelques individus...

En l'absence de données précises, nous avons, en accord avec les entomologistes, supposé qu'une dispersion de l'ordre de quelques kilomètres était raisonnable. En conservant cet ordre de grandeur, nous avons fait trois opérations de lissage, de manière à estimer l'abondance vectorielle avec différentes valeurs de dispersion : faible, moyenne et élevée. Nous avons donc pris en compte respectivement les 12, 49 et 121 pixels voisins, correspondant à des dispersions maximales de 2.5 km, 4 km et 6 km. Suite au lissage, nous avons obtenu des représentations homogènes de l'abondance vectorielle relative en chaque point de la zone d'étude. Cette nouvelle variable a été appelée A_v , pour « abondance vectorielle ».

5.2. Résultats

5.2.1. Cartographie des mares temporaires et de la végétation

5.2.1.1. Evolution des mares temporaires au cours de la saison des pluies

La classification supervisée par pixel a permis de discriminer 6 classes d'occupation du sol : l'eau libre, la végétation terrestre, la végétation aquatique, les sols nus, les paysages de dunes (*seeno*) et les paysages latéritiques (*sangre*). Le rassemblement des deux classes « eau libre » et « végétation aquatique » a mené à l'individualisation des mares temporaires au 26/08/03, 27/10/03 et 18/11/03.

Elles sont réparties principalement le long de la vallée du Ferlo et de ses ramifications, à l'exception de quelques grandes mares situées dans le quart nord-est de la zone (cf. Figure 46). Ces mares situées hors du lit du Ferlo sont plus isolées que celles de la vallée qui forment souvent un véritable réseau, tel que l'on peut le voir à l'est de la communauté rurale. Dans la moitié sud de la zone, les mares sont relativement petites, et souvent hors du lit du Ferlo.

A la première date, nous avons identifié 1644 mares sur l'ensemble de la zone d'étude, avec des surfaces très variables allant de 504.2 m² à 637 800 m² (cf. Tableau 14). L'histogramme de la surface des mares est très décalé vers la gauche : la majorité des mares ont une surface comprise entre 500 m² et 20 000 m², avec une valeur moyenne égale à 10 130 m². Cet histogramme a été borné à 100 000 m², afin de pouvoir le comparer à ceux des deux autres dates. Cependant, un petit nombre de mares dépassent cette valeur, allant jusqu'à 637 800 m².

A la fin du mois d'octobre, les surfaces en eau ont diminué ; les grandes mares sont encore bien remplies et les petites presque asséchées. En effet, la pluviométrie est à son maximum en août puis décroît progressivement. En septembre, elle est encore suffisamment importante pour maintenir les mares à un certain niveau, mais en octobre elle devient insuffisante. Les petites mares commencent donc à se tarir à cette période. Cette réalité est bien reflétée par l'histogramme : il a la même allure que celui du 26/08/03 mais le nombre de mares est inférieur dans chaque classe de surfaces. Le nombre total de mares a diminué à peu près de moitié, ce qui correspond à l'assèchement des plus petites mares. Cependant on trouve encore à cette période des mares bien remplies, puisque la surface maximale détectée est de 192 000 m².

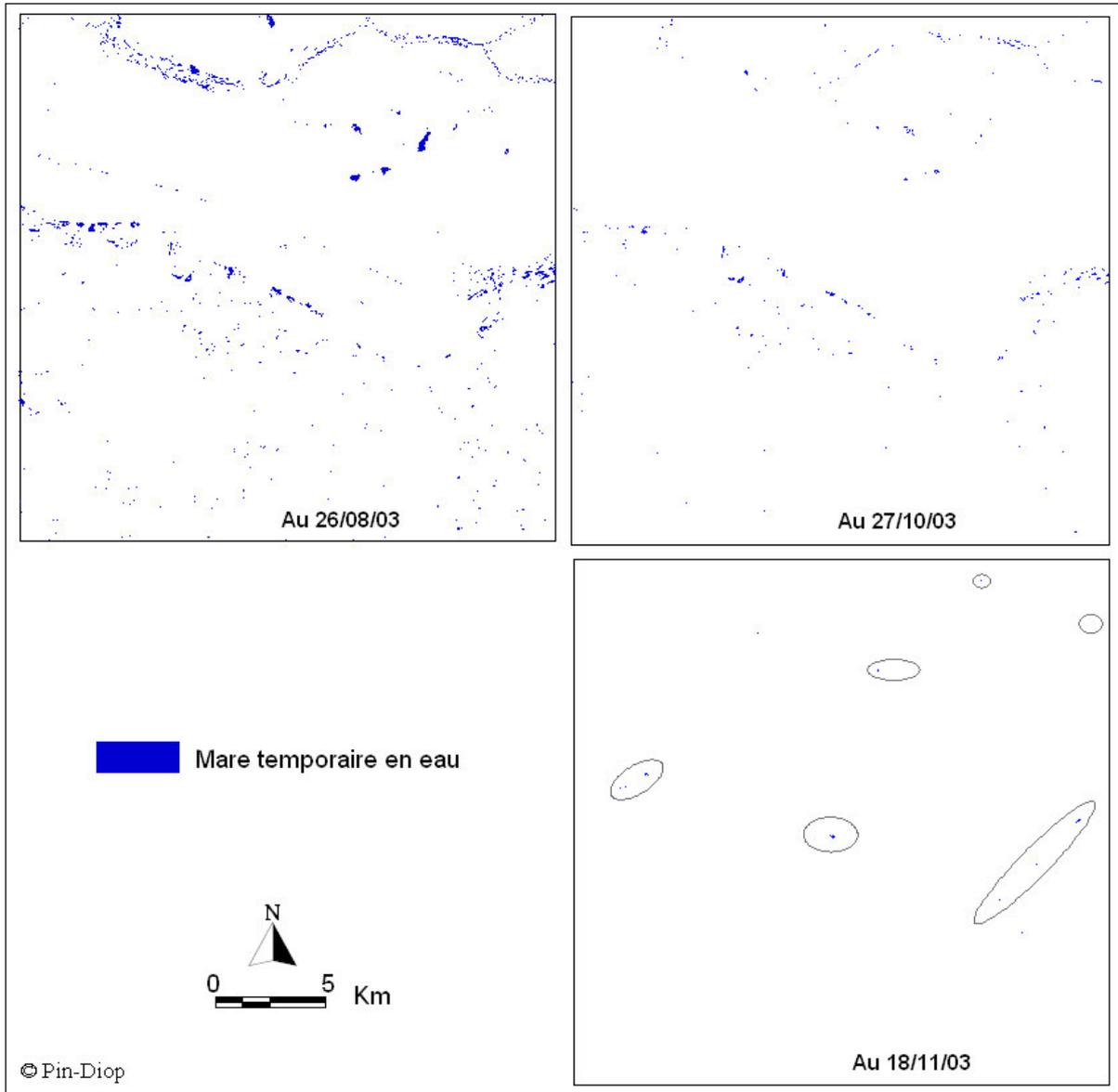


Figure 46 : Mares temporaires de la zone d'étude détectées sur la série d'images SPOT du 26/08/03, 27/10/03 et 18/11/03

Tableau 14 : Statistiques descriptives des mares temporaires détectées sur la série d'images SPOT

| Date | Statistiques descriptives | | Distribution de la surface (m ²) |
|----------|------------------------------------|------------|--|
| 26/08/03 | Nombre | 1644 | |
| | Surface totale (m ²) | 16 601 208 | |
| | Surface minimale (m ²) | 504.2 | |
| | Surface maximale (m ²) | 637800 | |
| | Surface moyenne (m ²) | 10130 | |
| 27/10/03 | Nombre | 725 | |
| | Surface totale (m ²) | 3 607 539 | |
| | Surface minimale (m ²) | 24.13 | |
| | Surface maximale (m ²) | 192000 | |
| | Surface moyenne (m ²) | 4976 | |
| 18/11/03 | Nombre | 14 | |
| | Surface totale (m ²) | 262 893 | |
| | Surface minimale (m ²) | 5190 | |
| | Surface maximale (m ²) | 55280 | |
| | Surface moyenne (m ²) | 18780 | |

En novembre enfin, la saison des pluies est terminée et seules les très grandes mares restent encore en eau : on n'en compte plus que 14. En moins d'un mois, la plupart des mares sont taries. Celles qui restent encore en eau, avec une surface minimale supérieure à 5000 m² et une surface moyenne de 18 780 m², sont les mares vastes et profondes. Elles constituent les dernières ressources en eau disponibles et représentent une opportunité pour les troupeaux. Cependant, leur nombre limité entraîne une concentration des troupeaux et l'eau est à ce moment là d'une qualité très médiocre.

5.2.1.2. Cartographie de la densité de végétation au 26/08/03

La densité de végétation a été détectée à partir de l'image SPOT du 26/08/03 par approche orientée-objet, avec des critères de discrimination s'appuyant sur des seuils de NDVI. On voit sur la figure 47 que la végétation est disséminée, formant çà et là des îlots de densité et de taille variables.



Figure 47 : Distribution spatiale des densités de végétation détectées sur l'image SPOT du 26/08/03

La végétation de densité élevée est largement majoritaire avec 88.1% de la surface totale, contre 7.3% et 4.6% pour la végétation de densité moyenne et faible, respectivement (cf. Tableau 15). Elle correspond surtout à la végétation arborée des bas-fonds, aux étendues recouvertes d'espèces herbacées vivaces, telles que *Cassia tora*, et aux champs cultivés. On

retrouve aussi de la végétation à densité élevée dans les paysages de *seeno* et de *sangre*, sous forme de bosquets. La végétation de densité moyenne est représentée dans les bas-fonds, et dans les paysages de *seeno* et *sangre*. A la différence des deux autres classes, la végétation de faible densité se retrouve en majorité (71%) sur les mares ou dans des bas-fonds étroits, au nord de la zone.

Tableau 15 : Superficies des classes de végétation détectées sur l'image SPOT du 26/08/03

| Classe de densité | Surface en m ² | Pourcentage de la surface totale | Surface de végétation terrestre | Ratio végétation terrestre/végétation totale |
|-------------------|---------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--|
| Faible | 10 812 891 | 4.6 | 3 096 428 | 0.29 |
| Moyenne | 17 271 748 | 7.3 | 13 886 526 | 0.80 |
| Dense | 207 420 762 | 88.1 | 203 647 503 | 0.98 |

5.2.2. Attribution aux mares d'un indicateur *C* de développement des vecteurs

La variable *C* a été attribuée à chaque mare en fonction de sa surface et de son périmètre maximaux (au 26/08/03), de l'importance du recouvrement par la végétation et de sa pérennité au cours de la saison des pluies. Cet indice, allant de 2 à 13, a une distribution d'allure normale, quoi que la fréquence des mares à faible capacité soit élevée (Figure 48). La majorité des mares a un indice moyen, allant de 5 à 8. Les mares les plus dangereuses, ayant un indice supérieur ou égal à 11, sont peu nombreuses (2% de l'effectif total).

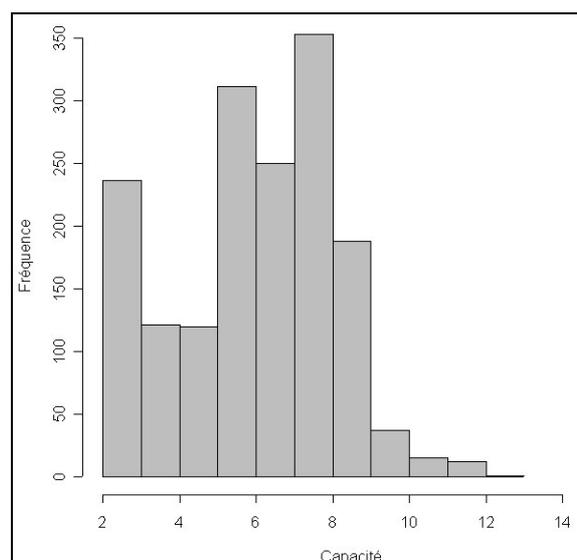


Figure 48 : Histogramme de la variable *C*

Pour localiser ces mares, l'indice C a été cartographié dans le SIG avec un code de couleurs (cf. Figure 49). On constate que la majorité des mares ayant une capacité élevée sont les très grandes mares, situées dans la vallée fossile du Ferlo ou dans ses ramifications. En effet, la surface des mares est corrélée positivement à leur périmètre et ce sont également celles qui restent le plus longtemps en eau. Toutefois, si les mares ayant une capacité très élevée sont de grandes mares, la réciproque n'est pas forcément vraie. De nombreuses grandes mares sont peu recouvertes par la végétation et ont donc une capacité moindre, égale à 8 ou 9.

Les mares de taille moyenne, situées aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de la vallée fossile, ont des capacités qui s'échelonnent entre 5 et 10. L'intérêt de ces mares réside dans le fait qu'elles constituent également une ressource appréciable pour les éleveurs. Celles dont la capacité est inférieure à 8 sont moins dangereuses que les grandes mares et les éleveurs peuvent donc s'y installer pour profiter de l'eau.

Enfin, les petites mares ont toutes une capacité réduite, due au fait qu'elles sont peu recouvertes par la végétation et qu'elles s'assèchent rapidement. Ces mares ne représentent pas un grand danger en terme de transmission de la FVR, mais elles sont également peu attractives pour les éleveurs et ne sont exploitées qu'en début de saison des pluies.

La capacité C des mares est un indicateur indirect de l'abondance de vecteurs qui en « émergent ». En effet, plus C est élevé, plus le nombre de gîtes de ponte disponibles au niveau de la mare est important. Nous parlons ici d'indicateur indirect, car la valeur de C ne correspond ni à une abondance vectorielle ni à une probabilité de présence des vecteurs. Cependant il permet de classer les mares des plus dangereuses aux moins dangereuses, selon leur profil. Nous avons choisi cet indice C comme base de travail pour estimer l'abondance relative des vecteurs au niveau de la zone d'étude.

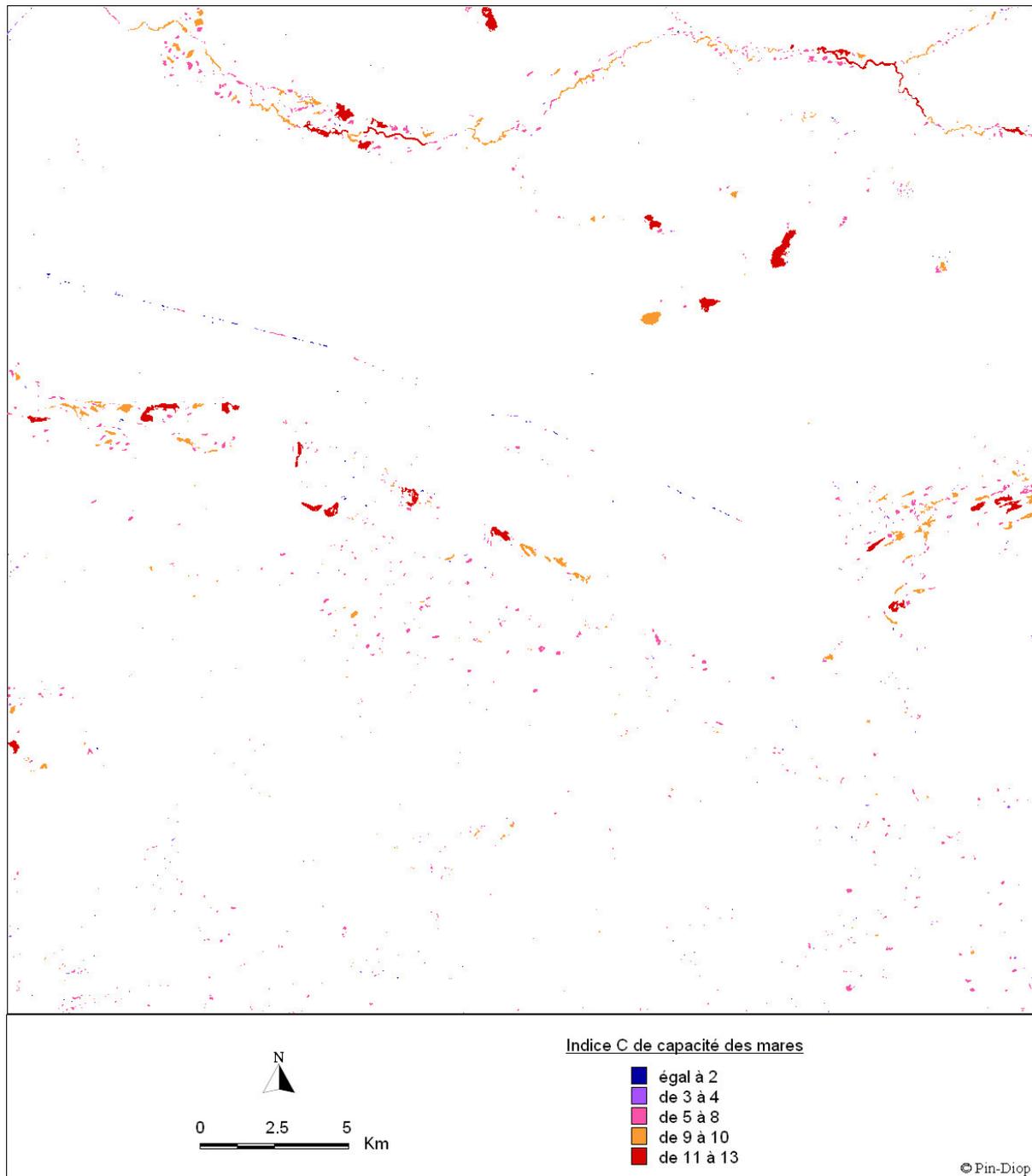


Figure 49 : Cartographie des mares au 26/08/03 et de leur capacité C à favoriser le développement des vecteurs

5.2.3. Cartographie de l'abondance relative des vecteurs

Partant du principe que les vecteurs se reproduisent et se développent au niveau de la mare puis s'en éloignent pour chasser, il apparaît que l'abondance vectorielle en un point dépend de la distance aux mares les plus proches et de la capacité de celles-ci. Plus on est loin d'une mare et plus sa capacité est réduite, plus l'abondance de vecteurs est faible et réciproquement. Nous avons utilisé les potentialités du SIG en mode raster pour déduire la carte d'abondance vectorielle à partir de la carte des mares temporaires et de leur capacité C . Les filtres gaussiens appliqués sur celle-ci calculent pour chaque pixel une valeur pondérée, dépendant des pixels environnants. Lorsque les filtres sont appliqués à l'ensemble de l'image, l'influence de toutes les mares est prise en compte.

Les cartes de l'abondance vectorielle estimée sont présentées à la figure 50 (cf. page suivante). Les cartes (a), (b) et (c) représentent l'abondance vectorielle relative estimée en prenant en compte respectivement les 12, 49 et 121 pixels voisins. Dans le cas (a), la dispersion maximale considérée est faible, ne dépassant pas 2.5 km. Etant moins dispersés, les vecteurs ont des densités plus élevées au niveau des mares, formant des îlots de forte abondance qui contrastent avec des zones d'abondance quasi nulle. Plus la distance de dispersion maximale augmente, plus on observe un étalement dans l'espace et une homogénéisation de l'abondance relative. Sur les cartes (b) et (c), les zones de très forte abondance sont plus restreintes, au profit de larges zones contiguës, d'abondance moyenne. Sur la carte (c), les aires où les vecteurs sont absents ont quasiment disparu.

Cependant, malgré ces variations dues à la variable de dispersion, on observe sur les trois cartes de vastes étendues très infestées, autour de Tordione et Yara Lope, entre Moguere et Mayel, entre Loumbel Lana et Diagali, ainsi qu'à l'extrême nord-est de la zone. Des zones plus restreintes, mais également infestées, sont détectées autour de Niaka, Barkedji et Yara Lope.

Ces densités importantes de vecteurs sont dues à l'existence de réseaux de grandes mares temporaires, dans la vallée du Ferlo et ses ramifications. Les abondances moyennes sont plutôt liées à de grandes mares, entourées par des mares de surface et de capacité plus faibles. Enfin les zones où l'abondance relative est faible sont les grandes plaines de *seeno* et de *sangre*, situées entre les ramifications de la vallée du Ferlo et où les mares temporaires sont rares.

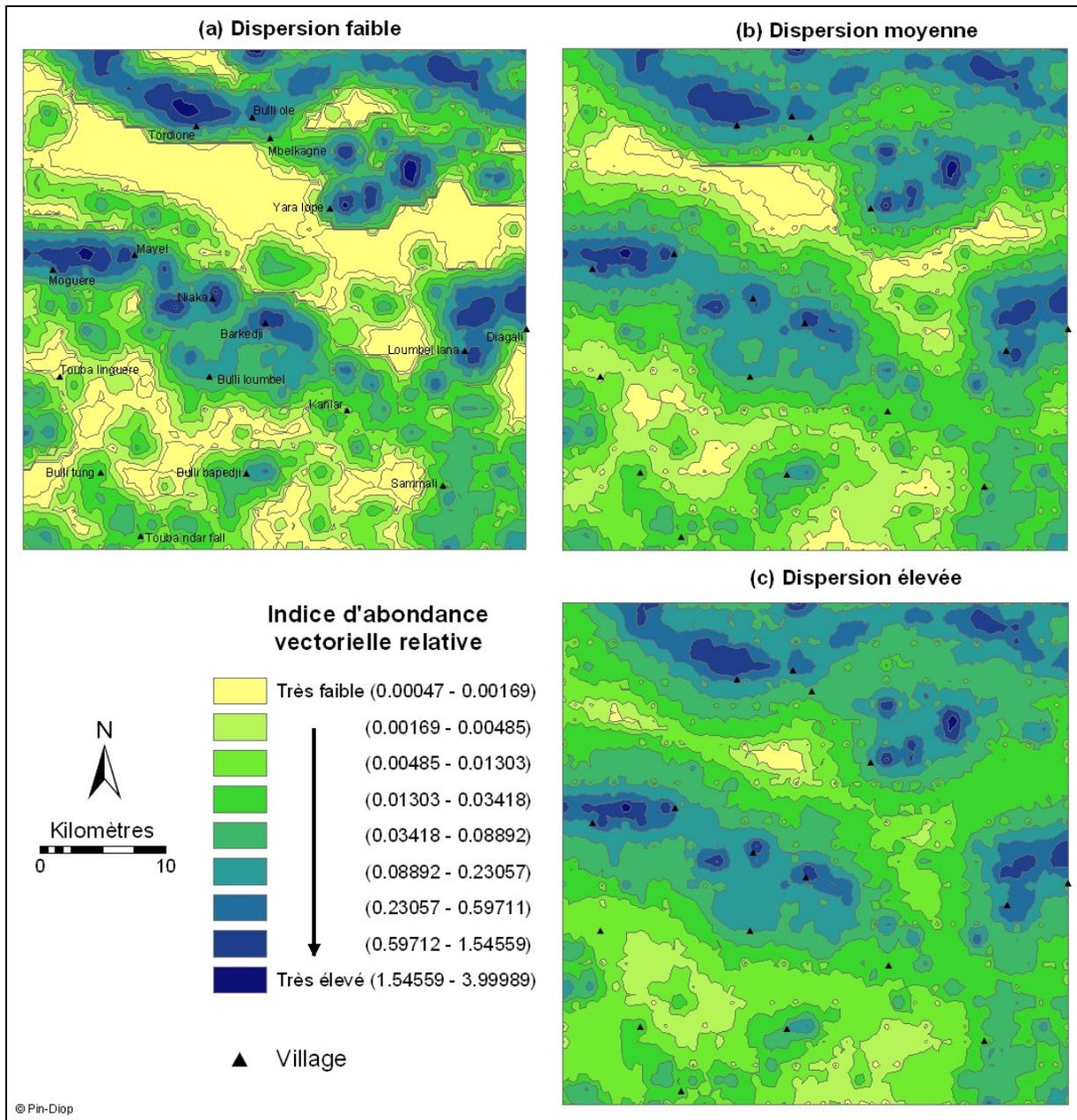


Figure 50 : Distribution spatiale de l'abondance vectorielle relative sur la zone d'étude avec une dispersion faible (a), moyenne (b) et élevée (c).

5.3. Discussion

5.3.1. Détection des mares temporaires

La détection des mares temporaires sur les images SPOT est l'une des principales difficultés rencontrées dans ce travail de recherche. Nous avons expliqué plus haut que le signal de l'eau était modifié par la couverture végétale et par la turbidité, entraînant de nombreuses confusions dans les classifications. Certaines confusions, entre les mares très couvertes et les villages ou les escarpements, ont pu être corrigées à la main ; d'autres par contre, entre ces mêmes mares et les zones de latérite dense, nous ont posé d'avantage de problèmes. Quelle que soit la méthode utilisée, les confusions persistent.

Nous avons décidé, en l'absence de solution idéale, de conserver la classification qui classe des pixels de latérite en mare temporaire, en partant encore du principe qu'il vaut mieux surestimer l'abondance des mares que la sous-estimer. Le fait de supprimer les mares inférieures à 500 m² a réduit ce biais.

La méthode de détection des mares pourrait être affinée. Deux solutions nous semblent envisageables : soit continuer à travailler sur l'approche orientée-objet, en intégrant de nouveaux critères, soit traiter une série d'images RADAR (Radio Detection and Ranging).

La première solution a l'avantage de la disponibilité des images et de la maîtrise de la technique de classification. Cependant, affiner la classification sous eCognition[®] impliquerait de retourner sur le terrain pour faire de nombreux relevés. Or ces enquêtes sont difficiles à réaliser. En saison des pluies, les pistes sont souvent impraticables, ce qui ralentit considérablement le travail. En outre, faire des relevés avec le GPS implique de rentrer dans les mares pour localiser les points remarquables : parties couvertes par la végétation arborée, herbacée, parties découvertes, etc. C'est un travail long et fastidieux, que nous avons déjà expérimenté pour faire les 49 relevés d'août 2004. Enfin, rien n'indique que la nouvelle classification mènerait à une réduction des confusions...

L'utilisation d'images RADAR nous semble donc être la meilleure alternative, à condition de disposer de telles données et d'apprendre à les traiter. En effet, les images RADAR permettent de détecter les surfaces en eau avec une bonne précision, car elles sont moins perturbées par les nuages et la végétation que les images SPOT. Une série d'images RADAR à intervalles réguliers au cours d'une saison des pluies nous permettrait de préciser la dynamique des mares, dont nous avons vu l'importance pour le développement d'*Ae.vexans*.

5.3.2. Détection de la végétation

Dans ce travail, nous nous sommes uniquement intéressés à la détection de la densité de végétation puisque nous ne disposons pas d'informations très précises sur l'écologie des vecteurs. La seule hypothèse sur laquelle nous pouvions nous baser est que les vecteurs préfèrent pondre sur des gîtes ombragés. En l'état actuel des connaissances, il aurait été inutile de travailler plus en détail sur la végétation. Nous avons donc choisi de discriminer les densités de végétation en déterminant des seuils de NDVI.

Cette méthode a l'inconvénient d'être subjective, car en modifiant les seuils, on peut faire varier les pourcentages respectifs de chaque classe de densité. Cependant le résultat a été validé par observation de la composition colorée et des relevés de terrain d'août 2004. Il reste que cette méthode par seuillage n'est transposable en l'état ni à une autre période, ni à une autre région, ce qui en limite l'usage.

A l'avenir, il serait intéresser d'approfondir les recherches entomologiques et phytosociologiques. La télédétection permet de classer la végétation selon sa hauteur, son recouvrement, sa densité, ses espèces etc. Ce potentiel pourrait être exploité à condition de connaître les préférences des vecteurs. Pour cela, des enquêtes entomologiques sont nécessaires, afin de préciser l'écologie des *Aedes* et des *Culex* dans la zone de Barkedji.

5.3.3. Calcul de l'indicateur *C*

Les cinq variables utilisées pour estimer la capacité des mares à favoriser la reproduction et le développement des vecteurs sont pertinentes, puisqu'elles s'appuient sur des hypothèses posées par les entomologistes. L'indicateur *C* traduit le fait que la capacité des mares n'est pas seulement dépendante de leur surface, mais aussi de leur recouvrement par la végétation et de leur pérennité.

Si dans la plupart des cas, les mares les plus vastes sont également celles qui sont les plus couvertes et les plus pérennes, ce n'est pourtant pas une règle. Parmi les mares dont on sait qu'elles attirent les éleveurs et les troupeaux, toutes ne sont pas aussi dangereuses. Cette approche a un intérêt direct : indiquer aux autorités locales et aux éleveurs quelles sont les mares qui hébergent le plus de moustiques, afin que les premiers puissent cibler d'éventuels traitement insecticides et que les deuxièmes aient la liberté de les éviter. Nous avons appris, par une enquête d'opinion, que certaines mares de la zone sont connues pour abriter les mollusques vecteurs de schistosomose et que les éleveurs évitent d'y faire boire leurs bêtes.

Au même titre, des informations sur les mares dangereuses pour la FVR seraient les bienvenues.

Cependant, avant de mettre en œuvre ces applications pratiques, nous pensons que certaines améliorations peuvent être apportées à notre travail. En particulier, on sait qu'*Ae. vexans* joue un rôle majeur dans la maintenance du virus de la FVR dans la région. Or sa dynamique est très dépendante de la variation du niveau des mares, variable que nous n'avons pu appréhender sur 3 images. Cette dynamique des mares pourrait être évaluée avec une série d'images RADAR prises à intervalles rapprochés, couplée à un MNT de 1 m de résolution spatiale. A défaut, il serait possible de mesurer directement sur le terrain les variations de hauteur de quelques mares, choisies selon leur profil par échantillonnage stratifié, puis d'extrapoler à l'ensemble des mares détectées sur la zone d'étude. Partant de là, il serait également plus judicieux de travailler séparément sur les 2 espèces vectorielles potentielles, et de calculer l'indice *C* en tenant compte de leurs écologies particulières.

5.3.4. Estimation de l'abondance vectorielle

Nous avons cartographié l'abondance vectorielle relative sur l'ensemble de la zone d'étude en utilisant des filtres appliqués à la couche des mares temporaires, caractérisées par leur capacité *C*. La taille des filtres a été choisie selon l'hypothèse émise par les entomologistes sur la dispersion des vecteurs, c'est à dire pour une distance de quelques kilomètres. En l'absence de valeur plus précise, nous avons réalisé trois cartographies pour montrer que le paramètre « dispersion » pouvait être aisément modifié et surtout pour comparer les cartes de risque qui en étaient issues.

Quelle que soit la valeur attribuée à la variable « dispersion », les résultats sont intéressants d'un point de vue opérationnel, car ils montrent les variations spatiales de l'abondance vectorielle sur l'ensemble de notre zone d'étude. Nous montrons qu'il est possible pour les éleveurs d'installer leur campement dans les zones où l'abondance vectorielle relative est moyenne et où ils peuvent répondre à la contrainte de l'eau tout en limitant les contaminations par les insectes vecteurs.

Etant donné l'état de nos connaissances sur l'écologie des vecteurs à Barkedji, la méthode que nous avons utilisée nous semble pertinente à plusieurs égards. D'une part, elle intègre le fait que la densité de vecteurs en un point de l'espace dépend de la distance aux mares qui l'entourent et de la capacité de celles-ci. D'autre part, l'utilisation d'un filtre de lissage en

mode raster permet de prendre en compte toutes les mares simultanément et pas seulement la plus proche ou les n plus proches.

On pourrait encore améliorer nos prédictions en considérant d'autres facteurs susceptibles d'influencer la répartition des vecteurs autour des mares. Par exemple, on sait que les vecteurs volent au hasard, puis « captent » l'odeur d'un hôte potentiel, et se dirigent alors dans sa direction. Les troupeaux dans leurs parcs de nuit exercent donc certainement une attraction sur les vecteurs. Cependant, on ignore à quelle distance les moustiques sentent la présence des hôtes et les parcs des troupeaux transhumants ne sont pas toujours au même emplacement, ce qui complique sérieusement le problème... Dans le cadre de notre travail, nous nous sommes donc contentés de prendre en compte la capacité des mares et la distance par rapport à celles-ci, qui nous ont semblé être les facteurs les plus déterminants pour l'estimation de l'abondance vectorielle.

Il serait également opportun de mener des études de terrain visant à déterminer la dispersion d'*Ae. vexans* et de *Cx. poicilipes* dans la zone de Barkedji. Le cas échéant, il suffirait d'adapter les dimensions du filtre de lissage pour obtenir une cartographie de l'abondance relative des vecteurs conforme à la réalité du terrain. Des piégeages, sur des sites échantillonnés selon l'abondance prédite, permettraient alors de valider notre approche.

Conclusion

Au chapitre 4, nous avons prédit par un modèle statistique la densité des troupeaux de ruminants, hôtes de la FVR, au niveau de la zone d'étude. Au chapitre V, nous avons localisé les mares temporaires, gîtes des vecteurs. Un indicateur C , quantifiant leur capacité à « produire » les vecteurs, leur a été attribué. Enfin, l'abondance vectorielle relative a été estimée en tout point de la zone d'étude, selon différentes valeurs de dispersion. Nous disposons donc d'informations sur la répartition spatiale des hôtes et des vecteurs du virus de la FVR en saison des pluies, synthétisées sur une grille de 1600 pixels de 1km², couvrant notre zone d'étude. Ayant défini le risque de transmission comme l'intensité du contact entre hôtes et vecteurs, nous pouvons croiser ces couches d'information pour modéliser le risque relatif dans la zone de Barkedji. C'est l'objet du sixième et dernier chapitre.

Chapitre 6. Modélisation du risque relatif de transmission de la FVR

Introduction

Ce sixième chapitre a pour objectif de synthétiser les informations spatialisées obtenues aux chapitres 4 et 5, respectivement sur la densité des hôtes et des vecteurs de la FVR. L'intensité du contact entre les hôtes principaux et les vecteurs de la FVR en saison des pluies, déterminant le niveau de risque relatif, est déterminée par des règles épidémiologiques. Le modèle spatialisé que nous proposons se base sur ces règles, rappelées en début de chapitre. Les méthodes de modélisation sont ensuite présentées ainsi que les résultats obtenus, sous forme de cartographies du niveau de risque. Après discussion de notre méthode et des résultats, nous nous attardons sur les améliorations à apporter à notre protocole, individuellement et au sein du projet pluridisciplinaire sur la FVR au Sénégal. Enfin nous présentons les applications pratiques que l'on peut espérer mettre en place à moyen terme, en particulier en coopération avec le réseau sénégalais de surveillance de la maladie.

6.1. Matériel et méthodes

6.1.1. Rappel des hypothèses régissant le contact hôtes-vecteurs

Les règles du modèle spatial de décision pour l'attribution d'un niveau de risque sont basées sur les hypothèses épidémiologiques initiales H7 à H9, que nous rappelons ici :

- *H7 : plus la densité de troupeaux est importante, plus le risque de transmission du virus augmente, avec une limite représentée par le pool de vecteurs.*
- *H8 : plus l'abondance vectorielle est élevée, plus le risque de transmission du virus augmente.*
- *H9 : plus la végétation est dense sur le trajet entre mare et campement, plus les vecteurs parviennent facilement au parc de nuit.*

Au sous-chapitre 2.4, nous avons défini le risque comme l'intensité du contact entre hôtes et vecteurs. Le niveau de risque dépend donc de l'association de trois variables :

- la densité de troupeaux (D)
- l'abondance relative des vecteurs (Av)
- la densité de la végétation terrestre (Vt).

L'objectif du modèle spatial est d'attribuer à chaque pixel de la grille couvrant la zone d'étude un niveau de risque, selon les valeurs prises par chacune des trois variables.

6.1.2. Mise en œuvre du modèle spatial

6.1.2.1. Calcul des variables dans le SIG

La densité de troupeaux D (cf. §4.2.4) et l'abondance vectorielle relative Av (cf. §5.2.3) ayant déjà été prédites pour chaque pixel de la grille constituant notre base de travail, il nous restait à localiser la végétation terrestre dense au 26/08/03. Nous l'avons identifiée dans le SIG en supprimant, dans la couche de végétation de densité élevée, les surfaces qui recouvraient les mares temporaires. La couche obtenue a alors été croisée avec la grille. Pour chaque pixel, la surface de végétation terrestre dense a été mesurée par requête spatiale, avec comme critère d'inclusion « l'objet pixel contient l'objet végétation terrestre dense ». Le pourcentage de recouvrement Vt est égal à la surface de végétation en km², puisque la surface de chaque pixel est de 1 km².

6.1.2.2. Combinaison des variables dans le modèle

La corrélation n'est pas linéaire entre le niveau de risque et chacune des variables. Il faut au minimum qu'il y ait une densité suffisante d'hôtes et de vecteurs, leur rencontre pouvant être modulée par la présence de végétation. D et Av sont les variables déterminantes, tandis que Vt est un simple facteur favorisant. Nous avons donc décidé de créer un modèle de décision sous la forme d'un arbre hiérarchique, comptant autant de niveaux que de variables (Robinson, 1998). A chaque « branche » de l'arbre correspond une combinaison de variables, à laquelle on affecte un niveau de risque échelonné de 1 à 4. Ce modèle, présenté à la figure 51 (cf. page suivante), permet d'attribuer un niveau de risque à chaque pixel de la zone d'étude, selon des critères épidémiologiques pertinents.

Lorsque la densité de troupeaux ou l'abondance de vecteurs est très faible, le risque est à son niveau le plus bas, quelles que soient les valeurs prises par les autres variables.

Lorsque l'abondance des vecteurs est faible, le niveau de risque est égal à 2, que la densité de troupeaux soit faible ou élevée, car l'intensité du contact hôte-vecteur est limitée par le pool de vecteurs. Dans ce cas, même si la densité de troupeaux augmente, les vecteurs en petit nombre ne peuvent pas piquer plus, leur capacité de transmission est saturée.

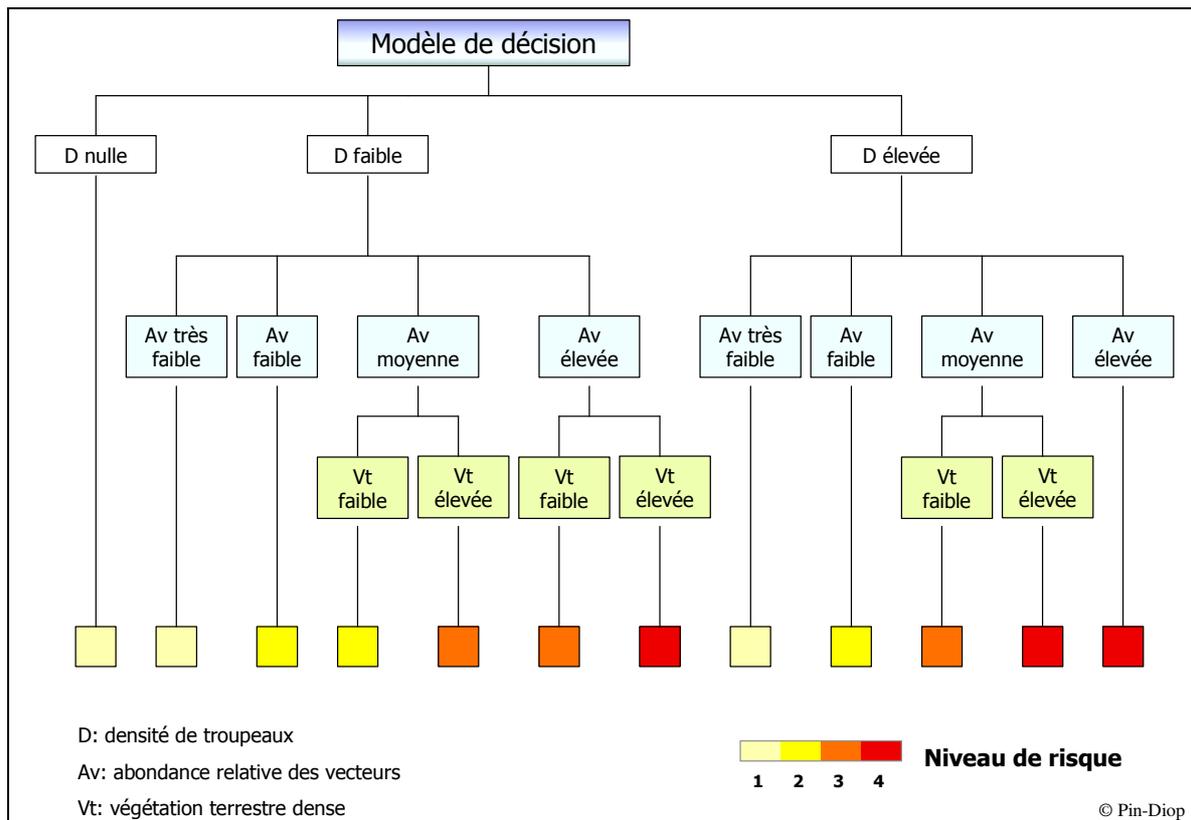


Figure 51 : Modèle du risque relatif de transmission de la FVR

Par ailleurs, si la densité de troupeaux est faible, mais l'abondance relative des vecteurs moyenne ou élevée, le risque est lié à l'abondance de végétation qui permet aux vecteurs de se déplacer plus facilement à la recherche des hôtes.

Dans le cas où la densité de troupeaux est élevée et l'abondance de vecteurs moyenne, la végétation est également un facteur favorisant.

Enfin, lorsque hôtes et vecteurs sont très abondants, le risque est à son niveau maximal quelle que soit la densité de végétation.

Pour intégrer les variables dans notre modèle hiérarchique, il fallait les mettre en classes, à l'exception de D qui l'était déjà. La variable Av a été mise en classe d'après les valeurs des quantiles 25%, 50% et 75%, selon les modalités suivantes :

- $Av < q_{25} \rightarrow$ classe « très faible »
- $Av \in [q_{25} ; q_{50}[\rightarrow$ classe « faible »
- $Av \in [q_{50} ; q_{75}[\rightarrow$ classe « moyenne »
- $Av \geq q_{75} \rightarrow$ classe « élevée ».

La variable V_t a été mise en classe selon la valeur de la médiane (ou quantile 50%) :

- $V_t < q_{50} \rightarrow$ classe « faible »
- $V_t \geq q_{50} \rightarrow$ classe « élevée ».

Les niveaux de risque prédits ont ensuite été attribués à chaque pixel dans le SIG, selon les combinaisons du modèle, par une suite de sélections simultanées sur les champs correspondant aux variables mises en classes. Nous avons répété cette opération trois fois, en considérant successivement une dispersion de vecteurs faible, moyenne et élevée. Un code de couleurs a été appliqué sur les cartes de risque, afin de mieux en visualiser la répartition. Nous rappelons que le risque prédit par notre modèle est un risque relatif puisque d'une part, il s'appuie sur une abondance vectorielle relative et d'autre part, il nécessite une mise en classes des variables.

6.1.2.3. Comparaison avec les données sérologiques disponibles

En saison des pluies 2003, les épidémiologistes de l'équipe ont mesuré l'incidence de la FVR sur 16 campements de la zone d'étude, afin de confirmer la circulation du virus. L'incidence sérologique correspond au nombre de séroconversions (changement du statut négatif au statut positif) mesurées entre le début et la fin de la saison des pluies.

Les campements ont été choisis pour leur accessibilité, et parce qu'ils étaient situés non loin de mares surveillées par les entomologistes. Dans chacun d'eux, 30 jeunes ovins ou caprins ont été échantillonnés au hasard et bouclés ; ce nombre correspond à l'effectif nécessaire pour détecter au moins 1 séroconversion avec une précision de 95%, si l'on considère que l'incidence sérologique de la FVR dans la population totale est égale à 10%. Les animaux ont été prélevés en début et en fin de saison des pluies, c'est-à-dire en juillet-août et en décembre 2003. Les prélèvements de sérums ont été centrifugés et conservés à -20°C avant d'être testés à l'ISRA par séroneutralisation (cf. §1.1.4.3) (Chevalier *et al.*, 2005).

Pour comparer les résultats des enquêtes avec nos prédictions, nous avons attribué à chacun des 16 campements suivis un statut sérologique selon l'incidence qui y a été mesurée : négatif si l'incidence est nulle, positif si l'incidence est supérieure ou égale à 1 et inconnu si l'incidence n'a pas pu être mesurée. Les campements, caractérisés par un code de couleurs selon leur statut sérologique, ont été cartographiés et superposés à chacune des trois sorties du modèle, afin de faire visuellement la correspondance entre le statut réel et le niveau de risque prédit.

6.2. Résultats

6.2.1. Spatialisation du risque de transmission de la FVR en saison des pluies

L'utilisation de l'arbre hiérarchique de décision sur des données liées à la grille de pixels nous a permis d'obtenir des cartographies continues du risque de transmission au niveau de la zone d'étude, à partir de données de terrain relevées sur un échantillon et de données satellitales. Pour mettre en œuvre notre modèle, nous nous sommes basés sur des hypothèses émises par les épidémiologistes et les entomologistes.

Nous avons réalisé trois cartographies du risque, en faisant varier la distance de dispersion présumée des vecteurs. Les résultats de ces modélisations sont présentées à la figure 52 (cf. page suivante).

Il est intéressant de noter que dans tous les cas, certaines zones particulièrement à risque se distinguent :

- la vallée centrale du Ferlo et ses alentours, sur un axe allant de Moguere à Kaniar
- les alentours du forage de Diagali
- les alentours des puits de Mbelkagne et de Tordione
- la partie frontalière située à l'extrême nord-est de notre zone d'étude.

Ces quatre zones à haut risque se situent toutes à proximité à la fois de la vallée fossile du Ferlo, ou d'une de ses ramifications, et d'un point d'eau permanent (forage ou puits). Elles sont également couvertes par un réseau de grandes mares temporaires, dont nous avons souligné plus haut la dangerosité. Elles sont favorables à la fois à l'installation des campements sédentaires à cause des points d'eau permanents, et des campements transhumants à cause des mares temporaires. En outre, ces mares ont un profil qui permet le développement des vecteurs. Toutes les conditions sont donc rassemblées pour favoriser la transmission du virus, qu'il provienne des *Aedes* émergeant des mares ou des animaux transhumants infectés.

D'autres parties de la vallée du Ferlo présentent un niveau de risque moyen : le triangle formé par Kaniar, Sammali et Loumel Lana, ainsi que la zone allant de Touba Ndar Fall à Bulli Bapedji. Dans le cas d'une faible dispersion des vecteurs, le niveau de risque reste encore assez élevé, avec de nombreux pixels de niveau 4 ; par contre, dans le cas d'une dispersion moyenne ou élevée, la plupart des pixels sont classés en 2 ou 3.

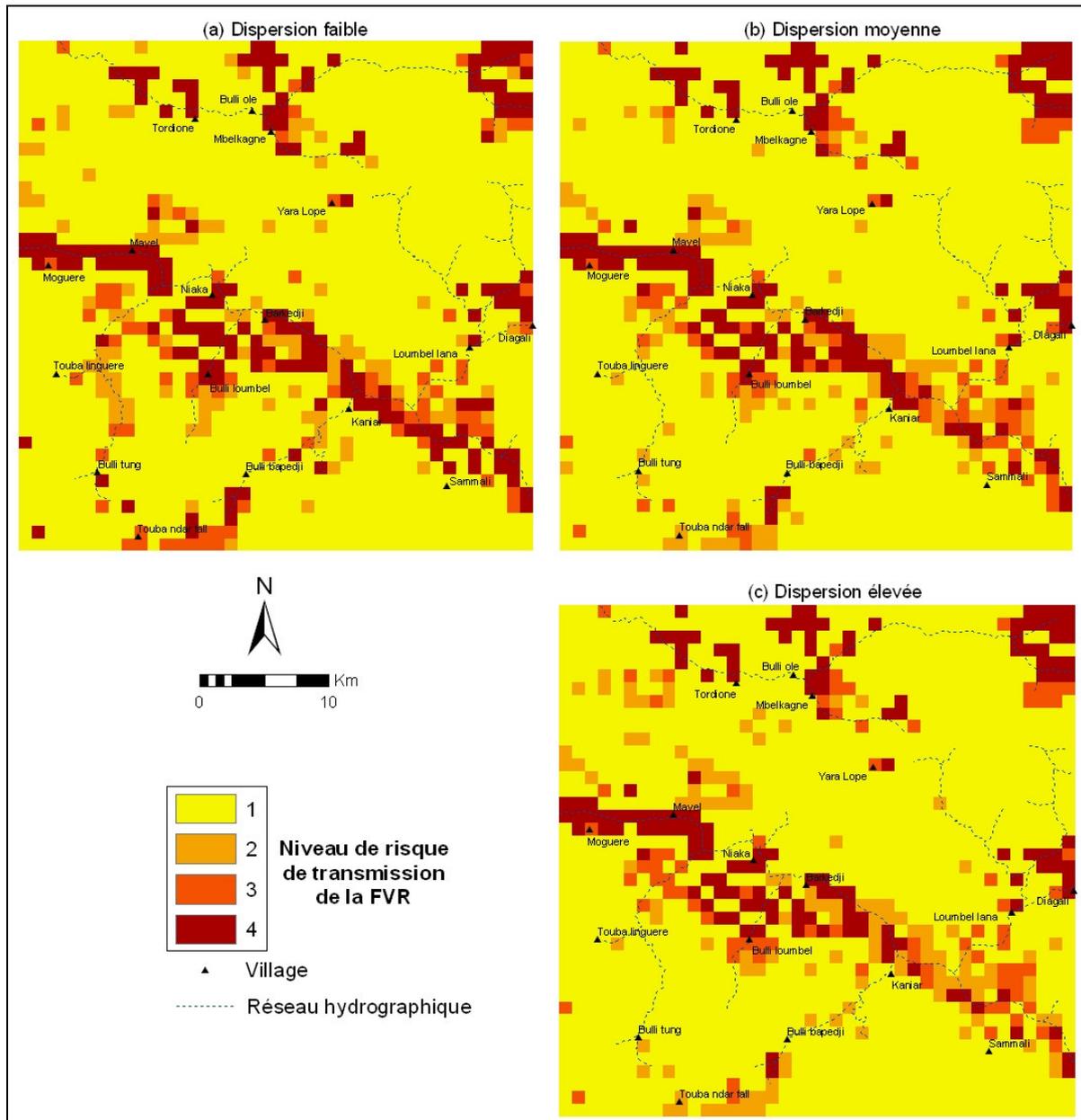


Figure 52 : Cartographies du risque relatif de transmission de la FVR en saison des pluies dans la zone de Barkedji, selon la distance de dispersion des vecteurs : faible (a), moyenne (b) ou élevée (c)

Ce sont en fait des zones où les mares sont nombreuses et de petite taille, et où le peuplement animal reste malgré tout assez dense. Cela explique les variations observées en fonction de la dispersion des vecteurs. Lorsque celle-ci est faible, l'abondance relative des vecteurs est élevée à proximité des mares ; comme la densité de troupeaux est importante, le risque est à son niveau maximal. Lorsque la dispersion est plus importante, les vecteurs, qui sont en nombre limité (puisque les mares n'ont pas une grande capacité), s'éparpillent dans les nombreux campements, diminuant le risque de contact hôtes-vecteurs dans chacun d'eux. Ces zones peuvent être intéressantes à la fois d'un point de vue sanitaire et pastoral, puisque les

ressources sont présentes et le risque de transmission de la FVR moins élevé que dans les autres parties de la vallée.

Enfin, le reste de notre zone d'étude présente, à l'exception de quelques pixels épars classés en 2 ou 3, un niveau de risque minimal, quel que soit le niveau de dispersion des vecteurs. Il s'agit des grandes plaines de *seeno* et de *sangre*, situées au nord et au sud de l'axe principal de la vallée du Ferlo, dans lesquelles les ressources en eau sont rares : quelques petites mares temporaires éparpillées çà et là, des céanes creusés par les populations. Les pâturages y sont de bonne qualité, mais la contrainte due à l'eau limite l'installation des campements.

Certains choisissent tout de même d'exploiter ces régions, dont l'avantage majeur est d'être préservées du surpâturage et de certaines maladies liées aux mares ; ils parcourent plusieurs kilomètres chaque jour pour parvenir à l'eau. Par conséquent, bien que le risque sanitaire de transmission de la FVR soit minimal dans ces zones, il semble peu probable qu'elles puissent être régulièrement exploitées par les éleveurs.

Les variations de la variable « dispersion des vecteurs » ont une influence réduite sur le nombre de pixels classé dans chaque catégorie. Les différences observées dans les distributions de ces effectifs de pixels sont minimales, et la répartition spatiale globale des zones à haut risque change peu (Figure 53).

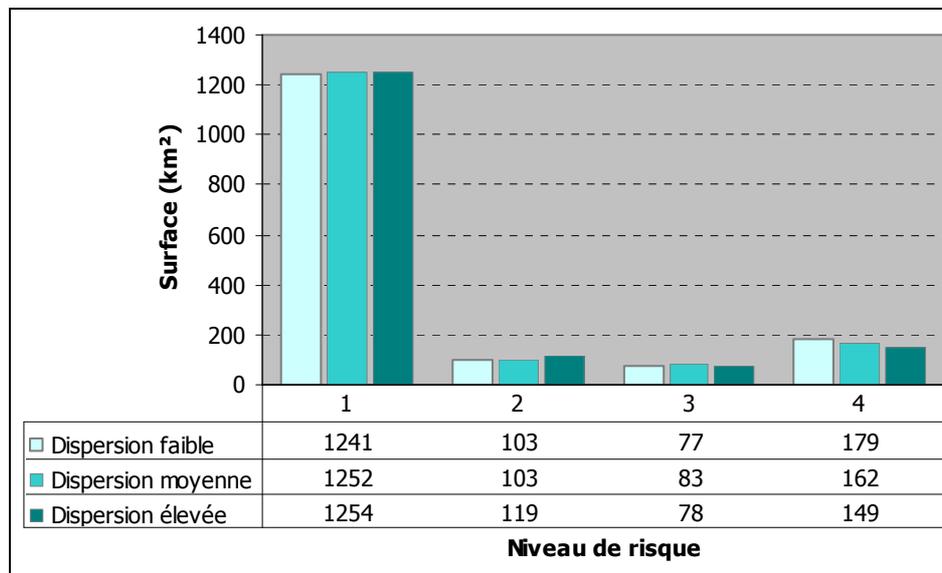


Figure 53 : Histogramme de la surface de chaque niveau de risque, pour les trois modalités de dispersion

Simplement, dans le cas où la dispersion des vecteurs est faible, leur abondance relative maximale ainsi que l'effectif de pixels classés en 4 sont plus élevés, puisque les vecteurs sont moins éparpillés autour des mares. 16% de la surface de la zone sont à haut risque, classés en niveau 3 ou 4. Lorsque la distance de dispersion augmente, on observe une légère diminution du nombre de pixels classés en 4, au profit des pixels classés en 1 ou 2. Cependant, le nombre de pixels concerné est faible par rapport à la surface totale de la zone et le pourcentage de surface à haut risque varie peu : 15.3% pour une dispersion moyenne et 14.2% pour une dispersion élevée. Si l'on considère un risque $\alpha=5\%$, les pourcentages de surface à haut risque ne sont pas significativement différents, que la dispersion soit faible, moyenne ou élevée.

6.2.2. Comparaison avec les données d'incidence sérologique

Sur les 16 campements suivis pendant la saison des pluies 2003, 6 sont négatifs, 9 sont positifs et 1 inconnu (Chevalier *et al.*, 2005). Sur la figure 54, les campements sont projetés sur la carte du risque relatif en cas de faible dispersion, à titre d'illustration. L'incidence n'a pas pu être mesurée dans le campement NIAK4, les éleveurs ayant quitté la zone avant la deuxième période de prélèvements. Il est représenté sur la carte mais n'a pas été intégré dans la comparaison, ramenant le nombre de sites exploitables à 15.

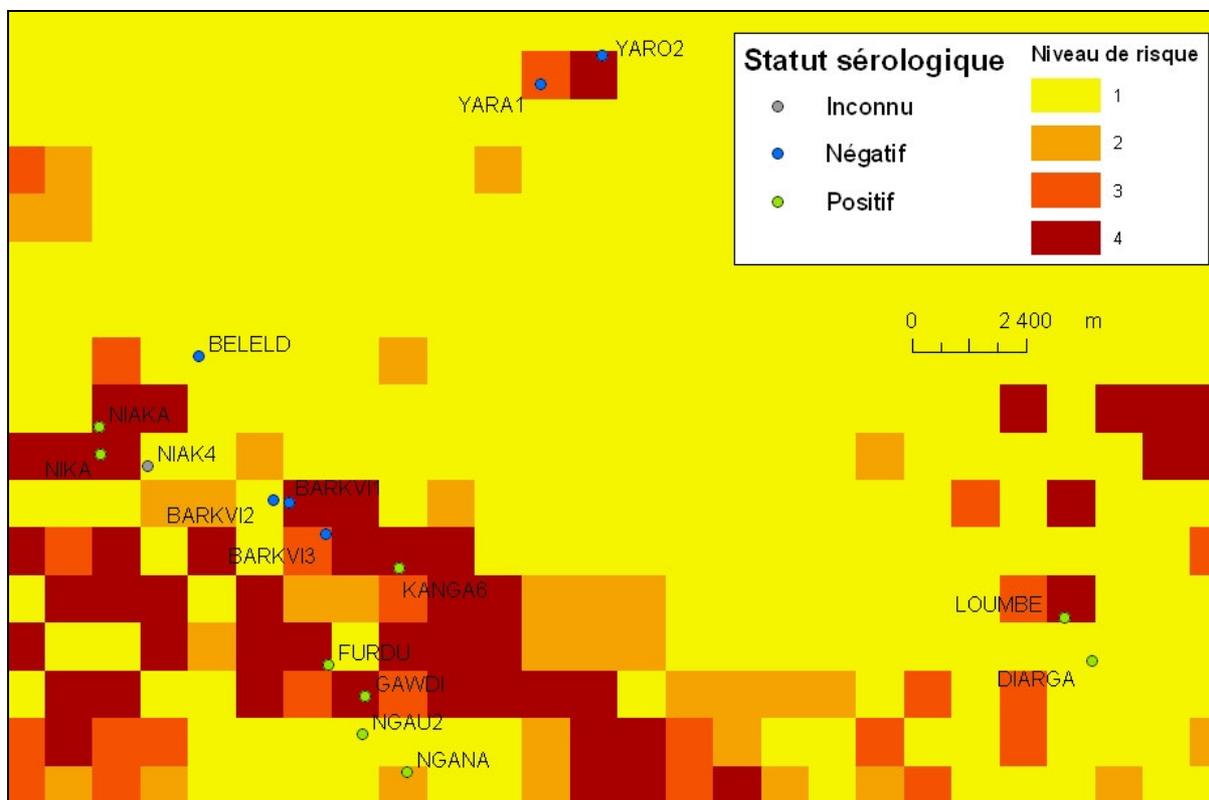


Figure 54 : Statut sérologique des campements suivis et niveau de risque prédit par le modèle avec une dispersion moyenne des vecteurs

Nous avons considéré que la prédiction était correcte si :

- un campement négatif se situait sur un pixel de risque 1
- un campement positif se situait sur un pixel de risque 2 à 4.

Dans ce cas de figure, on trouve les mêmes sensibilités* et spécificités* pour les trois sorties du modèle : ils prédisent correctement 9 observations sur 15 (60%), dont 7 campements positifs sur 9 (77.8%) et 2 campements négatifs sur 6 (33.3%).

Parmi les 9 campements positifs, 2 (DIARGA et NGAU2) sont mal classés, car positionnés sur des pixels de niveau 1. Ces erreurs sont dues au modèle prédictif de la densité de troupeaux. Dans le cas de DIARGA, le campement n'existait pas encore en 2001 et n'avait donc pas été recensé. Comme notre modèle de densité est basé sur les campements de 2001, le pixel entourant DIARGA apparaît en densité « très faible » et donc en niveau de risque 1. Pour NGAU2, il s'agit d'une erreur de prédiction : le pixel a été classé en densité « très faible » par le modèle, alors qu'il aurait dû être classé en densité « faible ».

Les 4 campements négatifs qui sont mal classés sont BARKVII, BARKVI2, YARA1 et YARO2. Les deux premiers appartiennent au village de Barkedji, qui est un cas particulier. En effet, bien que la mare de Barkedji soit une des plus grandes de la zone et soit partiellement couverte par de grands arbres, elle semble peu favorable au développement des moustiques, d'après les piégeages réalisés dans le village.

Selon nous, deux hypothèses pourraient expliquer cet état de fait. La densité humaine et animale est très importante dans le village, entraînant sûrement une dispersion des moustiques. Ceux-ci auraient alors moins tendance à être capturés dans les pièges ; dans ce cas, l'abondance mesurée par piégeage aurait pu être sous-estimée. Il est également possible que l'utilisation intensive de la mare pour les besoins ménagers des habitants du village (lessive en particulier) modifie la qualité de l'eau et limite effectivement le développement des vecteurs, en particulier les *Aedes* qui ne supportent pas l'eau polluée. Quoi qu'il en soit, Barkedji constitue une situation à part et il serait hasardeux de tirer des conclusions à partir des incidences qui y ont été mesurées.

Par contre, le fait que les campements YARA1 et YARO2 soient négatifs est intéressant pour l'évaluation de notre modèle. En effet, ils hébergent un grand nombre de troupeaux et sont situés à proximité de grandes mares, favorables aux vecteurs.

Nous supposons que l'absence de séroconversion est due au fait que ces campements sont intégrés dans un grand village (Yara Lope) de transhumants sédentarisés, appartenant à la même famille élargie, et très isolés du reste de la zone. Yara Lope est situé dans une grande plaine de *sangre*, peu propice à l'agriculture et où les ressources en eau sont limitées aux quelques mares qui entourent le village. Ce n'est donc pas un lieu d'installation pour les nomades et les villageois vivent en quasi-autarcie. Il est donc probable que le virus n'ait jamais été introduit dans la zone : les mares sont trop isolées pour être colonisées de proche en proche par des *Culex* infectés et les transhumants ne s'y arrêtent pas. Toutefois, s'il advenait que le virus soit introduit dans le village, il trouverait des conditions favorables à son développement et à sa transmission, ainsi que le prédit notre modèle.

6.3. Discussion

6.3.1. Critiques du modèle proposé

Notre modèle de prédiction du niveau de risque est qualitatif, combinant simplement les variables mises en classes dans un arbre hiérarchique. Les sorties du modèle sont des représentations cartographiques du niveau de risque au format raster, avec une résolution spatiale de 1 km. Le modèle prédit 7 campements positifs sur les 9 mis en évidence sur le terrain, même si l'on fait varier la distance de dispersion des vecteurs. La spécificité est faible (33.3%), mais la sensibilité est élevée (77.8%), ce qui convient à notre objectif de prédiction du risque sanitaire de transmission de la FVR à Barkedji.

Les avantages de ce type de modèles sont d'une part d'être clairs et parlants, d'autre part de laisser une large place à la réflexion épidémiologique dans l'attribution du niveau de risque. On peut aussi facilement modifier les différentes variables et les paramètres qui leur sont associés, comme nous l'avons fait en faisant varier la distance de dispersion des vecteurs. Cette propriété est particulièrement intéressante dans un contexte de travail en équipe pluridisciplinaire. En effet, les avancées de chaque membre de l'équipe dans un domaine particulier peuvent ainsi être aisément prises en compte et intégrées dans le modèle.

Enfin, la représentation cartographique du niveau de risque est aisément interprétable par les chercheurs et compréhensible par les bénéficiaires du projet. Les risques s'expriment spatialement au travers de zonages, dont l'intérêt en aménagement n'est plus à souligner. Porter le risque sur une carte revient à « dire le risque » dans l'espace concerné. Le zonage et la cartographie qui l'accompagne constituent donc la base d'une politique de prévention

(Veyret *et al.*, 2003), qui constitue l'objectif final du projet sur la modélisation de la FVR à Barkedji.

L'inconvénient de notre modèle est de nécessiter une mise en classes des variables continues, qui apporte une certaine subjectivité : si l'on fait varier les limites des classes, les sorties du modèle changent. Pour éviter cet écueil, nous avons choisi les quantiles comme limites de classes, de manière à garantir une répartition équitable des effectifs dans chaque classe. Puisque notre objectif était de parvenir à cartographier non pas un risque absolu, mais un risque relatif de transmission de la FVR en saison des pluies, ce choix nous semble pertinent.

Enfin, pour comparer nos prédictions et les données d'incidence avec une plus grande précision, nous aurions pu confronter le niveau de risque prédit avec les taux d'incidence bruts et non avec le statut positif/négatif des campements. Ces données brutes étaient disponibles, puisque c'est le nombre de séroconversions par campement qui avait été mesuré. Cependant nous avons considéré que le nombre d'observations (15) était très insuffisant pour rechercher des corrélations entre les prédictions et les taux d'incidence réels, d'autant plus que les campements n'avaient pas été échantillonnés en fonction de nos résultats.

Les enquêtes sérologiques réalisées dans le cadre du projet ACI n'avaient pas pour objectif d'estimer la précision de notre modèle spatial, mais de mesurer l'incidence des séroconversions lors d'une saison des pluies, sur un petit nombre de sites de la zone d'étude. Nous ne pouvions donc pas les utiliser à des fins de validation. Il aurait toutefois été regrettable de ne pas utiliser ces données, qui étaient les seules dont nous disposions concernant le statut sérologique des troupeaux. Nous nous sommes donc limités à la comparaison entre nos prédictions et le statut sérologique pour faire une première évaluation qualitative de notre modèle.

6.3.2. Perspectives

6.3.2.1. Comment améliorer le modèle ?

6.3.2.1.1. Perspectives à court terme

L'un des objectifs de ce travail était de présenter une démarche d'intégration de plusieurs disciplines afin d'élucider un problème complexe de santé-environnement. Nous avons tenté d'emprunter à l'épidémiologie et à la géographie les connaissances, outils et méthodes nécessaires pour prédire le risque relatif de transmission de la FVR à Barkedji en saison des pluies.

L'intérêt de croiser ainsi plusieurs disciplines est à nouveau mis en exergue, puisque cela nous a permis de répondre à des questions que l'une ou l'autre discipline seule n'aurait pu résoudre. L'épidémiologie a servi de base à la formalisation du complexe pathogène et à la définition du risque comme l'intensité du contact entre hôtes et vecteurs. Les outils et les méthodes de la géographie nous ont permis de spatialiser ce risque. Le protocole que nous avons mis en place est adapté à la problématique de la FVR en zone pastorale sahélienne et nos résultats sont intéressants pour les membres de l'équipe pluridisciplinaire.

A court terme, nous espérons pouvoir apporter les améliorations que nous avons proposées à chaque étape de notre travail, et que nous rappelons brièvement ici.

La question de l'estimation de la répartition des ruminants domestiques, hôtes du virus, a été discutée au sous-chapitre 4.3. Mettre en place un meilleur modèle prédictif de la répartition spatiale des troupeaux en saison des pluies serait la première amélioration à apporter à notre modèle. Nous avons vu qu'il faudrait pour cela se baser sur l'unité « parc de nuit » et non sur l'unité campement, et trouver un modèle adapté à la situation spatiale particulière de ces parcs, agrégés à deux niveaux.

Les modèles géostatistiques nous permettraient sûrement de trouver une solution adéquate à ce problème et de prédire ainsi un nombre de troupeaux par pixel, au lieu d'une classe de densité. Une fois le modèle mis en place, nous pourrions tester de nouvelles variables, relatives en particulier à la topographie du terrain et à la qualité du pâturage, afin d'augmenter la précision des prédictions.

Certaines modifications pourraient également être faites pour améliorer l'estimation de l'abondance vectorielle relative. Les variables à prendre à compte pour affiner la capacité C des mares temporaires ont été explicitées au sous-chapitre 5.3. Nous pourrions progresser sur la détection des mares, l'étude de leur dynamique et de leur couvert végétal, à condition d'enrichir nos connaissances sur l'écologie vectorielle et de disposer de données satellitales *ad hoc*. Par ailleurs, nous nous sommes contentés d'un ordre de grandeur de quelques kilomètres pour la distance maximale de dispersion des vecteurs, en l'absence de données plus précises. Il nous est apparu que les variations de la variable « dispersion » n'avaient qu'une influence modérée sur la répartition du niveau de risque dans la zone de Barkedji, tant qu'elles ne dépassaient pas cet ordre de grandeur. Certes, des protocoles de capture-marquage-recapture nous permettraient de fixer avec plus de précision les dimensions

maximales du filtre de lissage, mais il semble peu probable que de telles expériences puissent être mises en œuvre à Barkedji, d'autant plus que le bénéfice retiré serait minime.

Enfin, nous avons considéré que la dispersion des vecteurs se faisait dans toutes les directions, à partir de la mare. Or nous savons que les vecteurs se déplacent plus facilement dans les couverts végétaux et qu'ils peuvent être attirés par « l'odeur » des hôtes. Il serait donc plus juste d'intégrer notre variable « végétation terrestre dense » directement dans l'estimation de l'abondance vectorielle, plutôt que dans l'arbre hiérarchique final. Il faudrait pour cela modifier les paramètres de lissage de la capacité des mares, en augmentant la pondération des pixels recouverts par la végétation. Le phénomène d'attraction des hôtes nous semble plus délicat à prendre en compte, à cause du caractère mouvant des parcs de nuit et surtout parce que la distance à laquelle les moustiques repèrent les hôtes est pour l'instant inconnue.

Finalement, si nous parvenions à prédire la densité de troupeaux sous forme de variable continue dans l'espace, ainsi que l'abondance vectorielle relative par pixel, il suffirait, pour prédire l'intensité du contact hôte-vecteur et donc le niveau de risque, de croiser ces deux couches d'information dans le SIG.

Ces améliorations sont dites « à court terme », car elles ne requièrent pas d'investigations supplémentaires sur le terrain, ni de compétences autres que celles dont nous disposons actuellement. Elles nécessitent seulement d'acquérir de nouvelles données satellitaires. Toutefois, si nous souhaitons que notre modèle puisse être intégré dans des actions de prévention, il est indispensable de le valider, ce qui est impossible sans la coopération des autres membres de l'équipe. Le paragraphe suivant détaille les actions qui pourraient être entreprises à moyen terme, dans le cadre du projet EDEN par exemple.

6.3.2.1.2. Perspectives à moyen terme

Nous n'avons pu faire qu'une évaluation qualitative de nos résultats (cf. §6.2.2), puisque l'échantillonnage des campements intégrés dans le suivi sérologique n'était pas adapté à la validation de notre modèle. Or, tant que la justesse de notre démarche n'est pas confirmée par des données recueillies sur le terrain, il nous est impossible de transmettre nos résultats aux bénéficiaires du projet. Nous espérons cependant que dans le contexte du projet EDEN, où la communauté rurale de Barkedji a été choisie à nouveau comme terrain d'étude, il sera possible de valider notre modèle. Le cas échéant, il faudrait mettre en place un suivi sérologique, basé sur le même protocole que celui de 2003, mais en sélectionnant un plus

grand nombre de campements et surtout en les échantillonnant selon les niveaux de risque prédits. Nous pourrions alors calculer la corrélation entre les taux d'incidence bruts et le niveau de risque prédit et évaluer ainsi la qualité du modèle.

Il serait également judicieux d'aborder concrètement la question du rôle des transhumants dans l'importation du virus dans la zone. L'hypothèse de leur implication dans le transport du virus d'une aire d'endémie ou d'enzootie à une autre est toujours d'actualité, mais à ce jour, aucune enquête sérologique au Sénégal n'est venue corroborer cette hypothèse. Une enquête auprès des chefs de famille transhumants, réalisé en 2004 par I. Kane, en stage à l'ISRA, a montré que la durée de transhumance excédait généralement la durée de virémie chez les animaux. Qu'en est-il exactement ? Quel est le risque réel lié aux mouvements des troupeaux transhumants entre le Ferlo et les autres régions du Sénégal ? Des prélèvements effectués sur des troupeaux transhumants à leur arrivée dans la communauté rurale de Barkedji, en début de saison des pluies, permettraient de statuer sur la réalité de ce risque. En cas de confirmation, il serait alors nécessaire d'ajuster notre modèle, en majorant le risque dans les zones de passage ou d'installation des transhumants en provenance de régions endémiques ou épizootiques. C'est alors seulement que notre travail de recherche pourrait être utilisé à des fins de prévention dans la zone de Barkedji, voire être extrapolé à des régions où le système pathogène est similaire.

6.3.2.2. Applications pratiques

Dans le contexte de la recherche pour le développement, il est important de garder à l'esprit que le fruit de notre travail doit avoir un impact à la fois théorique et pratique. Au Sénégal, un réseau coordonné par la Direction de l'Elevage (DIREL) et composé de l'ISRA, de l'Institut Pasteur de Dakar et de vétérinaires, est en charge de la surveillance de la FVR sur l'ensemble du territoire. Depuis 1992, dans la zone de Barkedji, quatre troupeaux de petits ruminants font l'objet d'un suivi clinique et sérologique, au rythme d'un tous les deux mois. Dans chacun des troupeaux, vivant à proximité de mares temporaires, quarante femelles sont identifiées par bouclage. Les prélèvements sont envoyés à l'ISRA pour être analysés, permettant de mettre en évidence d'éventuelles séroconversions. Par ailleurs, les éleveurs ont pour consigne de signaler au vétérinaire toute augmentation suspecte du nombre d'avortements dans leurs troupeaux. Dans ce cas, le vétérinaire effectue des prélèvements de sérum destinés à l'ISRA.

Si la FVR est confirmée, des actions de prévention sont mises en place (Thiongane *et al.*, 1996).

Le suivi sérologique réalisé par les épidémiologistes du projet en saison des pluies 2003 a révélé une circulation active du virus, qui n'a pas été détectée par le réseau de surveillance. Nous pensons donc que notre modélisation du risque de transmission pourrait avoir deux applications pratiques, dans le cadre du réseau national :

- permettre aux autorités sanitaires de choisir les troupeaux sentinelles dans les zones les plus à risque, afin de maximiser les chances de détection de la circulation virale ;
- indiquer aux vétérinaires, en cas de circulation avérée du virus, quelles sont les zones où la prévention (vaccination des animaux, recommandations aux éleveurs) doit être prioritaire.

C'est dans ce but que nous avons réalisé un modèle spatialisé, dont la sortie est une représentation cartographique du niveau de risque en mode raster, de 1 km de résolution spatiale. Les zones à risque sont facilement visualisées et leur étendue calculée, en comptant le nombre de pixels. Ainsi, selon les moyens logistiques disponibles, on peut choisir d'axer la prévention seulement sur les zones les plus à risque (niveau 4), ou sur les zones de risque moyen à élevé (niveau 3 et 4). Les campements où l'on doit intervenir sont tout de suite identifiés et localisés.

Notre modèle peut également être utile si l'on souhaite mettre en place des actions de lutte anti-vectorielle, telles que la démoustication des mares. En effet, traiter toutes les mares est illusoire et inutile ; traiter des mares favorables aux moustiques, mais peu fréquentées serait également une perte de temps et de moyens. Notre carte de risque offre aux décideurs la possibilité de traiter uniquement les mares situées dans les zones à risque, c'est à dire celles à la fois favorables aux vecteurs et attractives pour les éleveurs.

Conclusion

Ce chapitre clôt notre travail de recherche en présentant les résultats de la spatialisation du risque relatif de transmission de la FVR en saison des pluies, dans la zone de Barkedji. Ce résultat se présente sous la forme de cartographies du niveau de risque en mode raster, avec une résolution spatiale de 1 km². Nous avons obtenu trois cartes, correspondant à trois niveaux de dispersion des vecteurs : faible, moyenne ou élevée. Toutefois, les variations de la variable « dispersion » n'entraînent pas de variations significatives dans la répartition des

niveaux de risque sur l'ensemble de la zone d'étude, montrant une certaine robustesse de notre modèle. Des améliorations peuvent encore être apportées, à différentes étapes de notre protocole, avant d'entamer le processus de validation du modèle et de passer à l'aspect opérationnel de ce travail. Cependant, notre protocole a porté ses fruits, puisque nous avons obtenu des représentations cartographiques du risque, intégrant à la fois les hôtes et les vecteurs de la maladie.

Synthèse de la deuxième partie

Dans la deuxième partie, nous avons détaillé le protocole de spatialisation du risque relatif de transmission de la FVR en saison des pluies, dans la zone sahélienne de Barkedji. Dans un premier temps, nous avons utilisé une image LandSat7 et des données recueillies dans un échantillon de campements à Barkedji pour prédire la répartition spatiale des troupeaux au niveau de la zone d'étude. Dans un deuxième temps, nous avons localisé les mares temporaires, gîtes des vecteurs de la maladie, sur une série de trois images SPOT5. Un indicateur, quantifiant la capacité des mares à permettre le développement des vecteurs, leur a été attribué. Cet indicateur prend en compte la surface et le périmètre maximaux des mares, leur couverture par la végétation et leur pérennité. Nous avons ensuite extrapolé les données sur les mares pour produire une cartographie de l'abondance relative des vecteurs en tout point de la zone d'étude, selon différents niveaux de dispersion. Enfin, ces données relatives aux hôtes et aux vecteurs ont été intégrées dans un arbre hiérarchique, combinant la densité de troupeaux, l'abondance vectorielle et la densité de végétation terrestre pour en déduire un niveau de risque. Ce modèle a été appliqué à chaque pixel de la zone, menant à des cartographies continues du niveau de risque de transmission du virus en saison des pluies, sur l'ensemble de notre zone d'étude.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail de recherche était de spatialiser le risque relatif de transmission de la fièvre de la vallée du Rift (FVR) dans une zone agropastorale sahélienne du Sénégal septentrional. Ce travail s'est inscrit dans un projet d'envergure, visant à modéliser le risque de FVR et de schistosomose dans un système de mares temporaires. Au sein de l'équipe pluridisciplinaire participant à ce projet, nous devions utiliser nos compétences en épidémiologie et en géomatique pour mettre en place un modèle spatial du risque au niveau de la zone d'étude, dans un laps de temps limité à une saison des pluies. Le protocole que nous avons mis en œuvre nous a permis d'atteindre cet objectif et de répondre aux différentes questions soulevées par notre problématique. En cela, cette thèse constitue un apport certain d'un point de vue thématique et surtout méthodologique dans le domaine de la FVR en milieu sahélien.

La formalisation du complexe pathogène de la maladie dans notre zone d'étude a mis en exergue la complexité des mécanismes de transmission, due entre autres aux écologies particulières des deux espèces vectorielles principales (*Aedes vexans* et *Culex poicilipes*) et à la cohabitation en saison des pluies d'éleveurs sédentaires et transhumants. L'allure épidémiologique des épisodes de FVR dans la zone (enzootie ou épizootie) est déterminée par la combinaison spatio-temporelle des éléments composant le cycle de la maladie : virus, ruminants domestiques, hommes, vecteurs. Ces éléments, qui s'entrecroisent et interagissent dans le milieu, ont chacun une dynamique et une répartition spatiale propres. Cette complexité nous a contraint à laisser de côté certains aspects pour nous focaliser sur les acteurs principaux du système : les ruminants domestiques, hôtes principaux du virus, et les deux espèces de vecteurs. Nous tenons à rappeler que le choix de ne pas travailler sur l'homme en tant qu'hôte de la maladie a été dicté par le fait qu'il n'est pas un hôte actif, participant à l'amplification du cycle de transmission. En outre, comme le contact entre l'homme et ses animaux est très étroit en milieu pastoral, le niveau de risque pour l'homme est directement corrélé au risque de contamination de ses animaux.

Nous nous sommes donc intéressés à la répartition spatiale des ruminants domestiques et des vecteurs, avant de synthétiser ces informations dans un modèle prédisant le niveau de contact hôtes-vecteurs, équivalent pour nous au niveau de risque. L'originalité de notre modèle prédictif de la répartition spatiale de la densité des ruminants réside dans l'utilisation conjointe des statistiques classiques uni- et multivariées, des géostatistiques, de la

téledétection et du SIG. La télédétection a servi à décrire les éléments du milieu influençant la répartition des troupeaux : types d'occupation du sol et dynamique de la végétation. Ces données ont été croisées dans le SIG avec des données issues de recensements sur le terrain, afin de générer de nouvelles variables spatialisées. Enfin, le modèle basé sur l'analyse discriminante a intégré ces informations plurithématiques pour prédire la densité de troupeaux sur l'ensemble de la zone de Barkedji.

En ce qui concerne les vecteurs, nous nous sommes appuyés sur les connaissances des entomologistes pour déterminer des indicateurs d'abondance. L'écologie vectorielle nous indique que les mares temporaires et la végétation sont les principaux facteurs qui déterminent la répartition d'*Aedes vexans* et *Culex poicilipes*. Nous avons donc utilisé une série de trois images SPOT5 pour caractériser les mares selon leur surface, leur périmètre, leur couvert végétal et leur pérennité au cours de la saison des pluies. Un indicateur de développement des vecteurs, directement déduit de ces informations, a été attribué à chaque mare. Puis le travail dans le SIG en mode raster nous a permis d'extrapoler cet indicateur de la mare à ses environs, calculant ainsi pour chaque point de notre zone d'étude une abondance vectorielle relative, en fonction de la distance aux mares environnantes et de leur capacité à « produire du vecteur ». L'apport de cette étape de notre travail est plus méthodologique que thématique, car les connaissances les plus récentes sur l'écologie vectorielle n'ont pu être intégrées, faute de temps. Cela fait partie des améliorations à apporter à notre modèle.

Enfin, les données issues des travaux sur les hôtes et les vecteurs ont été synthétisées dans un arbre hiérarchique, attribuant à chaque point de la zone d'étude un niveau de risque, déterminé par la combinaison entre la densité de troupeaux, l'abondance vectorielle relative et l'abondance du couvert végétal entre mare et campement. Les sorties de ce modèle sont des cartographies du niveau de risque relatif en mode raster, avec une résolution spatiale de 1 km. Ces cartes permettent d'identifier les zones où le contact entre hôtes et vecteurs est le plus élevé et où la transmission a le plus de chances de se produire. La zone de Barkedji est enzootique, c'est-à-dire que le virus y circule de manière régulière. Cependant, il pourrait également être introduit par l'intermédiaire des troupeaux transhumants, provenant d'autres régions du Sénégal. Il est donc difficile de prédire exactement où et quand le virus apparaît. Notre modèle distingue les zones où le virus, s'il est présent, trouve un terrain favorable à son expansion.

C'est la raison pour laquelle notre travail pourrait être utile aux membres du réseau sénégalais d'épidémiologie de la FVR. En effet, sur les 1600 km² de la zone d'étude, entre 14 km²

et 16 km² seulement ont été prédits comme étant à haut risque. Ce zonage permet de cibler les actions de surveillance et de prévention de la maladie, et de réaliser une économie de temps et de moyens.

Toutefois, avant de transmettre nos résultats aux décideurs, il nous semble important d'y apporter certaines améliorations, relatives en particulier à la caractérisation des indicateurs de l'abondance vectorielle. Notre travail montre les limites de la classification par pixel des images à très haute résolution, dans un environnement complexe et hétérogène. P. Rohmer a ouvert la voie en tentant d'exploiter les potentialités de l'analyse orientée-objet. Approfondir cette démarche mènerait sûrement à une meilleure détection des mares temporaires, quel que soit leur profil. Par ailleurs, étant donnée l'influence de la dynamique des mares sur celle des vecteurs, il serait judicieux de travailler sur un MNT à très haute résolution, voire sur une série d'images RADAR, parfaitement adaptées à la détection des surfaces en eau. Ces perspectives sont envisagées dans le cadre d'une collaboration étroite avec les entomologistes, afin de cibler les éléments les plus déterminants pour le développement des vecteurs et de ne pas se « perdre dans les outils ».

Malgré ses imperfections, ce travail de recherche contribue à la réflexion sur la problématique des maladies vectorielles émergentes. L'intérêt de spatialiser les phénomènes et en particulier les maladies est désormais un acquis. Mais entre le « dire » et le « faire », le fossé n'est pas si aisé à combler. Nous montrons qu'il est possible de travailler sur des maladies relativement récentes, pour lesquelles on manque de données et de recul. En Afrique de l'Est et du Sud, l'étude des mécanismes de transmission de la FVR au niveau local, dans les *dambos*, a permis d'identifier les facteurs qui déterminent l'apparition et l'amplification du virus. Ces résultats ont conduit à la mise en place de modèles prédictifs basés sur des images satellitales à basse résolution, adaptées à l'échelle de fonctionnement de la maladie dans ce milieu particulier. Dans le cas du Sénégal, les mécanismes de maintenance et de transmission de la maladie sont plus complexes et doivent dans un premier temps être abordés à grande échelle, ce que nous avons fait. Il n'est pas exclu que les résultats obtenus au niveau de la communauté rurale de Barkedji puissent un jour être transposés dans des régions plus vastes, telles que le Ferlo. Il convient cependant de rester prudent et de poser certaines conditions. En particulier, on ne pourra extrapoler qu'à des milieux sahéliens, dans lesquels le complexe pathogène de la FVR est comparable à celui observé à Barkedji. Dans l'immédiat, nous préférons donc nous limiter à notre zone d'étude et ne pas faire de perspectives hasardeuses.

Enfinement, l'intérêt principal de notre travail est la mise en place d'un protocole directement inspiré d'une réflexion approfondie sur la maladie considérée dans un milieu particulier. Le choix des données et des méthodes a été basé sur des hypothèses solides, posées par les épidémiologistes, les pastoralistes et les entomologistes. L'intégration de données multi-sources et multi-échelles dans un SIG est une opportunité formidable pour la recherche en santé-environnement, à condition d'utiliser les outils dans un cadre bien précis. Les objectifs ainsi que les moyens à mettre en œuvre pour les atteindre doivent être définis par l'ensemble des acteurs du projet, et ce d'autant plus qu'ils proviennent de disciplines différentes. Les étapes du protocole sont déterminées en début de projet et chaque membre de l'équipe y contribue selon ses connaissances et son expertise. C'est cette concertation, couplée à une réflexion approfondie sur la problématique en début de projet qui permettront une utilisation raisonnée et efficace des outils spatiaux.

Enfin, avant de clore ce travail, nous tenons à rappeler que l'importance des maladies vectorielles émergentes n'est pas simplement une vue de l'esprit d'une thésarde en mal de sujet. A l'heure où nous écrivons ces lignes, les réunionnais se battent contre une maladie dont le grand public n'avait, jusqu'à présent, jamais entendu parler. Le chikungunya, arbovirose transmise par l'*Aedes albopictus*, a déjà touché 218 000 personnes et les autorités essaient tant bien que mal d'enrayer l'épidémie. Preuve est faite qu'en matière d'arboviroses, comme en toute chose, mieux vaut prévenir que guérir !

Bibliographie

- Abd El-Rahim I.H.A., Abd El-Hakim U., Hussein M. An epizootic of Rift Valley fever in Egypt in 1997. *Revue Scientifique et Technique de l'Office International des Epizooties*, 1999, vol. 18, n° 3, pp. 741-748.
- Abdel-Wahab K.S., El Baz L.M., El-Tayeb E.M., Omar H., Ossman M.A., Yasin W. Rift Valley Fever virus infections in Egypt: pathological and virological findings in man. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 1978, vol. 72, n° 4, pp. 392-396.
- Akakpo A.J., Saluzzo J.F., Bada R., Bornarel P., Sarradin P. Epidémiologie de la Fièvre de la vallée du Rift en Afrique de l'Ouest. 2. Enquête sérologique chez les petits ruminants domestiques du Niger. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 1991, vol. 84, pp. 217-224.
- Akakpo A.J., Some M.J.R., Bornarel P., Jouan A., Gonzalez J.P. Epidémiologie de la Fièvre de la vallée du Rift en Afrique de l'Ouest. 1. Enquête sérologique chez les ruminants domestiques au Burkina Faso. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 1989, vol. 82, pp. 321-331.
- Alrajhi A.A., Al-Semari A., Al-Watban J. Rift Valley Fever encephalitis. *Emerging Infectious Diseases*, 2004, vol. 10, n° 3, pp. 554-555.
- Anonyme. Sixième rapport sur la situation sanitaire dans le monde. Genève: Organisation Mondiale de la Santé, 1980.
- Anonyme. Weekly epidemiological record. Genève: Organisation Mondiale de la Santé, 2003, pp. 269-276.
- Anyamba A., Linthicum K.J., Mahoney R., Tucker C.J., Kelley P.W. Mapping potential risk of Rift Valley fever outbreaks in african savannas using vegetation index time series data. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 2002, vol. 68, n° 2, pp. 137-145.
- Anyamba A., Linthicum K.J., Tucker C.J. Climate-disease connections: Rift Valley Fever in Kenya. *Cadernos de Saúde Pública*, 2001, vol. 17, pp. 133-140.
- Arthur R.R., El-Sharkawy M.S., Cope S.E., Botros B.A., Oun S., Morrill J.C., Shope R.E., Hibbs R.G., Darwish M.A., Imam I.Z.E. Recurrence of Rift Valley fever in Egypt. *Lancet*, 1993, vol. 342, pp. 1149-1150.
- Aubry P. Le renouveau des maladies infectieuses : l'exemple des maladies à virus (de la variole au sarcome de Kaposi). *Archives de l'Institut Pasteur de Madagascar*, 1996, vol. 63, pp. 48-52.
- Ba A. Elevage et potentialités pastorales sahéliennes; Synthèses cartographiques: Sénégal. Dakar/ Paris: CTA-IEMVT, 1989.
- Baddeley A., Turner R. Introduction to spatstat. Help manual for the R package "spatstat". 2003, 37 p.
- Bakis H., Bonin M. *La photographie aérienne et spatiale*. Paris: Que sais-je?, 2000, 127 p.
- Barnard B.J.H., Botha M.J. An inactivated Rift Valley fever vaccine. *Journal of the South African Veterinary Association*, 1977, vol. 48, n° 1, pp. 45-48.

- Beatty B.J., Marquardt W.C. *The biology of disease vectors*. Niwot, Colorado: University Press of Colorado, 1996, 632 p.
- Beck L.R., Rodriguez M.H., Dister S.W., Rodriguez A.D., Rejmankova E., Ulloa A., Meza R.A., Roberts D.R., Paris J.F., Spanner M.A., Washino R.K., Hacker C., Legters L.J. Remote sensing as landscape epidemiologic tool to identify villages at high risk for malaria transmission. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1994, vol. 51, n° 3, pp. 271-280.
- Beck L.R., Rodriguez M.H., Dister S.W., Rodriguez A.D., Washino R.K., Roberts D.R., Spanner M.A. Assessment of a remote sensing-based model for predicting malaria transmission risk in villages of Chiapas, Mexico. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1997, vol. 56, n° 1, pp. 99-106.
- Benz U.C., Hofmann P., Willhauck G., Lingenfelder I., Heynen M. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2004, vol. 58, n° 3-4, pp. 239-258.
- Bernard P.M., Bureau A. Régression logistique [en ligne]. Disponible sur: <http://www.quebec.ca/reglog/index2.htm> (consulté le 14 novembre 2005).
- Bernus E., Marchal J.Y., Poncet Y. Le Sahel oublié. *Revue Tiers Monde*, 1993, t. XXXIV, n°134, pp. 305-326.
- Besag J. Contribution to the discussion of Dr Ripley's paper. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1977, vol. B 39, pp. 193-195.
- Bishop D.H., Calisher C.H., Casals J., Chumakov M.P., Gaidamovich S.Y., Hannoun C., Lvov D.K., Marshall I.D., Oker-Blom N., Pettersson R.F., Porterfield J.S., Russell P.K., Shope R.E., Westaway E.G. Bunyaviridae. *Intervirolgy*, 1980, vol. 14, n° 3-4, pp. 125-143.
- Bonn F. *Précis de télédétection. Applications thématiques*. Montreal: AUPELF-UREF, 1996, 633 p.
- Bonn F., Rochon G. *Précis de télédétection. Principes et méthodes*. Montreal: AUPELF-UREF, 1992, 485 p.
- Boone J.D., McGwire K.C., Otteson E.W., DeBaca R.S., Kuhn E.A., Villard P., Brussard P.F., St Jeor S.C. Remote sensing and geographic information systems: charting Sin Nombre Virus infections in deer mice. *Emerging Infectious Diseases*, 2000, vol. 6, n° 3, pp. 248-258.
- Brillet P. Le Belize, nouvel oeil du cyclone? Appréciation du risque malarien en Amérique centrale. **In** : Espaces tropicaux et risques: du local au global; Actes des X^{es} journées de géographie tropicale, 24-26 septembre 2003, Orléans. Orléans: Presses Universitaires d'Orléans/ I.R.D., 2004, pp. 107-115.
- Center for Diseases Control. Update: Outbreak of Rift Valley Fever, Saudi Arabia, August-November 2000. *Mortality and Morbidity Weekly Report*, 2000, vol. 49, pp. 905-908.
- Chambers P.G., Swanepoel R. Rift Valley fever in abattoir workers. *The Central African Journal of Medicine*, 1980, vol. 26, pp. 122-126.
- Chevalier V., Lancelot R., Thiongane Y., Sall B., Diaite A., Mondet B. Rift Valley fever in small ruminants, Senegal, 2003. *Emerging Infectious Diseases*, 2005, vol. 11, n° 11, pp. 1693-1700.
- Chevalier V., de La Rocque S., Baldet T., Vial L., Roger F. Epidemiological processes involved in the emergence of vector-borne diseases: West Nile fever, Rift Valley fever,

- Japanese encephalitis and Crimean-Congo haemorrhagic fever. *Revue Scientifique et Technique de l'Office International des Epizooties*, 2004, vol. 23, n° 2, pp. 535-555.
- Chrisman N.R., Cowen D.J., Fisher P.F., Goodchild M.F., Mark D.M. Geographic Information Systems. *Geography in America*. Columbus, Ohio: Gaile et Willmot, 1989, pp. 353-375.
- Cline B.L. New eyes for epidemiologists: aerial photography and other remote sensing techniques. *American Journal of Epidemiology*, 1970, vol. 92, n° 2, pp. 85-89.
- COMITAS. Glossaire des termes officiels de la télédétection aérospatiale. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 1988, vol. 112, pp. 1-63.
- Coetzer J.A.W. The pathology of Rift Valley fever. 1. Lesions occurring in natural cases in new-born lambs. *Onderstepoort Journal of Veterinary Research*, 1977, vol. 44, n° 4, pp. 205-211.
- Cordellier R. *Les vecteurs potentiels sauvages de la fièvre jaune en Afrique de l'ouest*. Bondy: Editions de l'ORSTOM., 1978, 258 p.
- Cross E.R., Bailey R.C. Prediction of areas endemic for schistosomiasis through use of discriminant analysis of environmental data. *Military Medicine*, 1984, vol. 149, pp. 28-29.
- Crucianu M., Asselin de Beauville J.P., Boné R. *Méthodes factorielles pour l'analyse des données*. Paris: Hermès-Lavoisier, 2004, 288p.
- Curasson G. La fièvre de la vallée du Rift existe-t-elle au Soudan français? *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 1934, vol. 27, pp. 599-602.
- Curran P.J., Atkinson P.M., Foody G.M., Milton E.J. Linking remote sensing, land cover and disease. *Advances in Parasitology*, 2000, vol. 47, pp. 37-80.
- Dale P.E.R., Morris C.D. *Culex annulirostris* breeding sites in urban sites: using remote sensing and digital image analysis to develop a rapid predictor of potential breeding areas. *Journal of the American Mosquito Control Association*, 1996, vol. 12, n° 2, pp. 316-320.
- Daubney R., Hudson J.R., Garnham P.C. Enzootic hepatitis or Rift Valley fever: an undescribed disease of sheep, cattle and man from East Africa. *Journal of Pathology and Bacteriology*, 1931, vol. 89, pp. 545-579.
- Davies F.G. Observations on the epidemiology of Rift Valley fever in Kenya. *The Journal of Hygiene*, 1975, vol. 75, pp. 219-230.
- Davies F.G., Kileulu E., Linthicum K.J., Pegram R.G. Patterns of Rift Valley fever activity in Zambia. *Epidemiology and Infections*, 1992, vol. 108, pp. 185-191.
- Davies F.G., Linthicum K.J., James A.D. Rainfall and epizootic Rift Valley fever. *Bulletin of the World Health Organisation*, 1985, vol. 63, pp. 941-963.
- de La Rocque S., Michel V., Plazanet D., Pin R. Remote sensing and epidemiology: examples of application for two vector-borne diseases. *Comparative Immunology, Microbiology and Infectious Diseases*, 2004, vol. 27, pp. 331-341.
- de La Rocque S., Michel J.F., Cuisance D. Les différentes potentialités d'un système d'information géographique pour les études en épidémiologie: l'exemple des trypanosomoses animales en zone soudanienne. *Médecine Tropicale*, 2001, vol. 61, pp. 365-371.
- D'Ercole R., Pigeon P. L'expertise internationale des risques dits naturels: intérêt géographique. *Annales de Géographie*, 1999, vol. 108, n° 608, pp. 339-357.

- Desjardins R. *La télédétection: perspective analytique*. Montreal : AUPELF-UREF, 2000, 226 p.
- Devaux N. Images très haute résolution et analyse spatiale pour localiser l'habitat rural des pays en développement. Thèse de doctorat. Orléans: Université d'Orléans, 2006, 319 p.
- Diallo M., Lochouarn L., Ba K., Sall A.A., Mondo M., Girault L., Mathiot C. First isolations of the Rift valley fever virus from *Culex poicilipes* (Diptera: Culicidae) in nature. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 2000, vol. 62, n° 6, pp. 702-704.
- Digoutte J.P., Peters C.J. General aspects of the 1987 Rift Valley fever epidemic in Mauritania. *Research in Virology*, 1989, vol. 140, pp. 27-30.
- Diop G., Thiongane Y., Thonnon J., Fontenille D., Diallo M., Sall A., Ruel T., Gonzalez J.P. The potential role of rodents in the enzootic cycle of Rift valley fever virus in Senegal. *Microbes and infection*, 2000, vol. 2, pp. 343-346.
- Durand J.P., Bouloy M., Richecoeur L., Peyrefitte C.N., Tolou H. Rift Valley fever infection among french troops in Chad. *Emerging Infectious Diseases*, 2003, vol. 9, pp. 751-752.
- Easterday B.C. Rift Valley fever. *Advances in Veterinary Science*, 1965, vol. 10, pp. 65-127.
- Easterday B.C., Murphy L.C., Bennett C.G. Experimental Rift Valley fever in calves, goats and pigs. *American Journal of Veterinary Research*, 1962a, vol. 23, pp. 1224-1230.
- Easterday B.C., Murphy L.C., Bennett C.G. Experimental Rift Valley fever in lambs and sheep. *American Journal of Veterinary Research*, 1962b, vol. 23, pp. 1231-1240.
- Eisa M., Obeid H.M.A., El Sawi A.S.A. Rift Valley fever in the Sudan. 1. Results of field investigations of the first epizootic in Kosti district. *Bulletin of Animal Health and Production in Africa*, 1977, vol. 24, pp. 343-347.
- El-Akkad A.M. Rift Valley fever outbreak in Egypt, October-December 1977. *Journal of the Egyptian Public Health Association*, 1978, vol. 53, pp. 137-146.
- EMPRES. Transboundary Animal Diseases Bulletin. Rome : F.A.O., 2000, pp.11-14
- EMPRES. Système sous régional d'alerte et de contrôle de la fièvre de la Vallée du Rift (FVR) en Afrique de l'Ouest. Bulletin d'information No. 7. Rome: F.A.O., 2003, 14 p.
- Escofier B., Pages J. *Analyses factorielles simples et multiples: objectifs, méthodes et interprétation*. Paris: Dunod, 1990, 267 p.
- Findlay G.M. Rift Valley fever or enzootic hepatitis. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 1932, vol. 25, pp. 229-265.
- Findlay G.M., Stefanopoulo G.J., McCallum F.O. Présence d'anticorps contre la fièvre de la vallée du Rift dans le sang des Africains. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 1936, vol. 29, pp. 986-996.
- Fontenille D., Traore-Lamizana M., Diallo M., Thonnon J., Digoutte J.P., Zeller H.G. New vectors of Rift Valley Fever in West Africa. *Emerging Infectious Diseases*, 1998, vol. 4, n° 2, pp. 289-293.
- Fontenille D., Traore-Lamizana M., Zeller H., Mondo M., Diallo M., Digoutte J.P. Short report: Rift Valley fever in western Africa: isolations from *Aedes* mosquitoes during an interepizootic period. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1995, vol. 52, n° 5, pp. 403-404.

- Gjullin C.M., Yates W.W., Stage H.H. Studies on *Aedes vexans* (Meig.) and *Aedes sticticus* (Meig.), flood-water mosquitoes, in the lower Columbia river valley. *Annals of the Entomological Society of America*, 1950, vol. 43, pp. 262-275.
- Glass G.E., Cheek J.E., Patz J.A., Shields T.M., Doyle T.J., Thoroughman D.A., Hunt D.K., Ensore R.E., Gage K.L., Irland C., Peters C.J., Bryan R. Using remotely sensed data to identify areas at risk for hantavirus pulmonary syndrome. *Emerging Infectious Diseases*, 2000, vol. 6, n° 3, pp. 238-247.
- Gonzalez J.P., Johnson E.D., Bouquety J.C., Lesbordes J.L., Madelon M.C., Mathiot C.C., Georges A.J. Rift Valley fever induce hemorrhagic fever in the Central African Republic. **In** : An international symposium: hemostatic impairment associated with hemorrhagic fever viruses, 26-29 mai 1987.
- Gonzalez J.P., Le Guenno B., Some M.J.R., Akakpo J.A. Serological evidence in sheep suggesting phlebovirus circulation in a Rift Valley fever enzootic area in Burkina Faso. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 1992, vol. 86, pp. 680-682.
- Gonzalez J.P., McCormick J.B., Saluzzo J.F., Georges A.J. Les fièvres hémorragiques africaines d'origine virale. Contribution à leur étude en République centrafricaine. *Cahiers de l'O.R.S.T.O.M. Série Entomologie Médicale et Parasitologie*, 1983, vol. 21, pp. 119-130.
- Green P.E., Carroll J.D. *Analyzing multivariate data*. Orlando: Harcourt School, 1978, 560 p.
- Guillaud M., Le Guenno B., Wilson M.L., Desoutter D., Gonzalez J.P., Digoutte J.P. Prévalence en anticorps contre le virus de la fièvre de la vallée du Rift chez les petits ruminants du Sénégal. *Annales de l'Institut Pasteur. Virologie*, 1988, vol. 139, pp. 455-459.
- Hassan A.N., Beck L.R., Dister S. Prediction of villages at risk for filariasis transmission in the Nile delta using remote sensing and geographic information system technologies. *Journal of Egyptian Society of Parasitology*, 1998, vol. 28, n° 1, pp. 75-87.
- Hay S.I. An overview of remote sensing and geodesy for epidemiology and public health application. *Advances in parasitology*, 2000, vol. 47, pp. 1-35.
- Hendrickx G., de La Rocque S., Reid R., Wint W. Spatial trypanosomosis management: from data-layers to decision making. *Trends in Parasitology*, 2001, vol. 17, n° 1, pp. 35-41.
- Hendrickx G., Napala A., Dao B., Batawui D., De Deken R., Vermeilen A., Slingenbergh J.H.W. A systematic approach to area-wide tsetse distribution and abundance maps. *Bulletin of Entomological Research*, 1989, vol. 89, pp. 231-244.
- Hendrickx G., Napala A., Dao B., Batawui K., Bastiaensen P., De Deken R., Vermeilen A., Vercruyse J., Slingenbergh J.H.W. The area-wide epidemiology of bovine trypanosomosis and its impact on mixed farming in subhumid West Africa; a case study in Togo. *Veterinary Parasitology*, 1999, vol. 84, pp. 13-31.
- Hoogstraal H., Meegan J.M., Khalil G.M., Adham F.K. The Rift Valley fever epizootic in Egypt 1977-78. 2- Ecological and entomological studies. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 1979, vol. 73, n° 6, pp. 624-629.
- Horsfall W.R., Novak R.J., Johnson F.L. *Aedes vexans* as a flood plain mosquito. *Environmental Entomology*, 1975, vol. 4, pp. 675-678.
- House J.A., Turell M.J., Mebus C.A. Rift Valley fever: present status and risk to the Western Hemisphere. *Annals of the New York Academy of Science*, 1992, vol. 653, pp. 233-242.

- Jeanne I. Paludisme et schistosomose: deux exemples d'utilisation des systèmes d'information géographique et de la télédétection à Madagascar. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 2000, vol. 93, n° 3, pp. 208-214.
- Jouan A., Adam F., Riou O., Philippe B., Merzoug N.O., Ksiazek T., Le Guenno B., Digoutte J.P. Evaluation des indicateurs de santé dans la région du Trarza lors de l'épidémie de fièvre de la vallée du Rift en 1987. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 1990, vol. 83, pp. 621-627.
- Jouan A., Coulibaly I., Adam F., Philippe B., Riou O., Le Guenno B., Christie R., Ould Merzoug N., Ksiazek T., Digoutte J.P. Analytical study of a Rift valley fever epidemic. *Research in Virology*, 1989, vol. 140, pp. 175-186.
- Joubert J., Ferguson A., Gear J. Rift Valley fever in South Africa. 2. The occurrence of human cases in the Orange Free State, the North-Western Cape Province, the Western and Southern Transvaal. A. Epidemiological and clinical findings. *South African Medical Journal*, 1951, vol. 25, pp. 890-891.
- Kitron U. Landscape ecology and epidemiology of vector-borne diseases: tools for spatial analysis. *Journal of Medical Entomology*, 1998, vol. 35, n° 4, pp. 435-445.
- Kokernot R.H., Casaca V.M.R., Weinbren M.P., McIntosh B.M. Survey for antibodies against arthropod-borne viruses in the sera of indigenous residents of Angola. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 1965a, vol. 59, pp. 563-570.
- Kokernot R.H., Szlamp E.L., Levitt J., McIntosh B.M. Survey for antibodies against arthropod-borne viruses in the sera of indigenous residents of the Caprivi strip and Bechuanaland Protectorate. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 1965b, vol. 59, pp. 553-562.
- Ksiazek T.G., Jouan A., Meegan J.M., Le Guenno B., Wilson M.L., Peters C.J., Digoutte J.P., Guillaud M., Merzoug N.O., Touray E.M. Rift Valley fever among domestic animals in the recent west african outbreak. *Research in Virology*, 1989, vol. 140, pp. 67-77.
- Ksiazek T.G., Meegan J.M., Morrill J.H., Peters C.J. An IgM class-specific antibody capture ELISA for Rift Valley fever diagnosis in sheep, cattle and goats. **In** : The 37th annual meeting of the American Society of Tropical Medicine and Hygiene, Washington D.C. 1988.
- Lancelot R., Gonzalez J.P., Le Guenno B., Diallo B.C., Gandega Y., Guillaud M. Epidémiologie descriptive de la fièvre de la vallée du Rift chez les petits ruminants dans le Sud de la Mauritanie après l'hivernage 1988. *Revue d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux*, 1989, vol. 42, n° 4, pp. 485-491.
- Larousse. Encyclopédie universelle Larousse [CD-ROM]. Paris: Larousse / VUEF, 2004.
- Le Houerou H.N. Introduction au Projet Ecosystèmes pastoraux sahéliens. Rome: F.A.O., 1988, 42 p.
- Lebart L., Morineau A., Fenelon J.-P. *Traitement des données statistiques. Méthodes et programmes*. Paris: Bordas, 1982, 510 p.
- Leroux M. Climat. *Atlas du Sénégal*. Paris: Les Editions Jeune Afrique, 1983, pp. 12-17.
- Linthicum K.J., Anyamba A., Tucker C.J., Kelley P.W., Myers M.F., Peters C.J. Climate and satellite indicators to forecast Rift Valley Fever epidemics in Kenya. *Science*, 1999, vol. 285, pp. 397-400.

- Linthicum K.J., Bailey C.L., Davies F.G., Tucker C.J. Detection of Rift Valley fever viral activity in Kenya by satellite remote sensing imagery. *Science*, 1987, vol. 235, n° 4796, pp. 1656-1659.
- Linthicum K.J., Bailey C.L., Tucker C.J., Mitchell K.D., Logan T.M., Davies F.G., Kamau C.W., Thande P.C., Wagatoh J.N. Application of polar-orbiting, meteorological satellite data to detect flooding of Rift Valley Fever virus vector mosquito habitats in Kenya. *Medical and Veterinary Entomology*, 1990, vol. 4, pp. 433-438.
- Linthicum K.J., Davies F.G., Bailey C.L., Kairo A. Mosquito species succession in a dambo in an East African forest. *Mosquito News*, 1983, vol. 43, pp. 464-470.
- Linthicum K.J., Davies F.G., Bailey C.L., Kairo A. Mosquito species encountered in a flooded grassland dambo in Kenya. *Mosquito News*, 1984, vol. 44, pp. 228-232.
- Linthicum K.J., Davies F.G., Kairo A., Bailey C.L. Rift Valley fever virus (family Bunyaviridae, genus Phlebovirus). Isolations from Diptera collected during an inter-epizootic period in Kenya. *The Journal of Hygiene*, 1985, vol. 95, pp. 197-209.
- Lointier M., Truc P., Drapeau L., Nanga S., Tarek M. Méthodologie de détermination des zones à risque de maladie du sommeil en Côte d'Ivoire par approche spatialisée. *Médecine tropicale*, 2001, vol. 61, pp. 390-396.
- Mackel R. Dambos: a study in morphodynamic activity on the plateau region regions of Zambia. *Catena*, 1974, vol. 1, pp. 327-365.
- Mathiot C.H., Ribot J.J., Clerc Y., Coulanges P., Rasolofonirina N. Fièvre de la vallée du Rift et virus Zinga, un arbovirus pathogène pour l'homme et l'animal nouveau pour Madagascar. *Archives de l'Institut Pasteur de Madagascar*, 1884, vol. 51, pp. 125-136.
- Maurice Y. Premières constatations sérologiques sur l'incidence de la maladie de Wesselsbron et de la Fièvre de la Vallée du Rift chez les ovins et les ruminants sauvages du Tchad et du Cameroun. *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays tropicaux*, 1967, vol. 20, pp. 395-405.
- Mbow R. Peuplement et ethnies. *Atlas du Sénégal*. Paris: Les Editions Jeune Afrique, 1983, pp. 20-21.
- McIntosh B.M., Jupp P.G. Epidemiological aspects of Rift Valley fever in South Africa with reference to vectors. *Contributions in Epidemiology and Biostatistics*, 1981, vol. 3, pp. 92-99.
- McIntosh B.M., Jupp P.G., Anderson D., Dickinson D.B. Rift Valley fever. 2. Attempts to transmit virus with seven species of mosquito. *Journal of the South African Veterinary Association*, 1973, vol. 44, n° 1, pp. 57-60.
- Meegan J.M. Rift Valley fever in Egypt. An overview of the epizootic in 1977 and 1978. *Contributions in Epidemiology and Biostatistics*, 1979, vol. 3, pp. 100-113.
- Meegan J.M., Bailey C.L. Rift Valley fever. *Arboviruses epidemiology and ecology*. Boca Raton, Florida : C.R.C. Press, 1989, pp. 51-76.
- Meegan J.M., Digoutte J.P., Peters C.J., Shope R.E. Monoclonal antibodies identify Zinga virus as Rift Valley fever virus. *Lancet*, 1983, vol. 1, n° 8325, pp. 641.
- Meegan J.M., Khalil G.M., Hoogstraal H., Adham F.K. Experimental transmission and field isolation studies implicating *Culex pipiens* as a vector of Rift Valley fever in Egypt. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1980, vol. 29, pp. 1405-1410.

- Meegan J.M., Yedloutschnig R.J., Peleg B.A., Shy J., Peters C.J., Walker J.S., Shope R.E. Enzyme-linked immunosorbent assay for detection of antibodies to Rift Valley fever virus in ovine and bovine sera. *American Journal of Veterinary Research*, 1987, vol. 48, pp. 1138-1141.
- Meunier D.M.Y., Johnson E.D., Gonzalez J.P., Georges-Courbot M.C., Madelon M.C., Georges A.J. Données sérologiques actuelles sur les fièvres hémorragiques virales en République centrafricaine. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 1987, vol. 80, pp. 51-61.
- Michel J.F. Dénombrements d'animaux domestiques: information géographique et statistiques spatiales sur un cas expérimental. Mémoire de D.E.A. Lyon: Université Claude Bernard Lyon 1, 1998, 58 p.
- Michel J.F. Les dénombrements d'animaux domestiques, une revue. *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays tropicaux*, 2000, vol. 53, n° 1, pp. 55-66.
- Michel J.F., Dray S., de La Rocque S., Desquesnes M., Solano P., De Wispelaere G., Cuisance D. Modelling bovine trypanosomosis spatial distribution by GIS in an agro-pastoral zone of Burkina Faso. *Preventive and Veterinary Medicine*, 2002, vol. 56, pp. 5-18.
- Michel J.F., Michel V., de La Rocque S., Toure I., Richard D. Modélisation de l'occupation de l'espace par les bovins. Applications à l'épidémiologie des trypanosomoses animales. *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays tropicaux*, 1999, vol. 52, n° 1, pp. 25-33.
- Miller B.R., Godsey M.S., Crabtree M.B., Savage H.M., Al-Mazrao Y., Al-Jeffri M.H., Abdoon A.M., Al-Seghayer S.M., Al-Shahrani A.M., Ksiazek T.G. Isolation and genetic characterization of Rift valley fever virus from *Aedes vexans arabiensis*, Kingdom of Saudi Arabia. *Emerging Infectious Diseases*, 2002, vol. 8, n° 12, pp. 1492-1494.
- Miller W.S., Demchak P., Rosenberger C.R., Dominik J.W., Bradshaw J.L. Stability and infectivity of airborne yellow fever and Rift Valley fever viruses. *American Journal of Hygiene*, 1963, vol. 77, pp. 114-121.
- Mondet B., Diaté A., Fall A.G., Chevalier V. Relations entre la pluviométrie et le risque de transmission virale par les moustiques: cas du virus de la *Rift Valley Fever* (RVF) dans le Ferlo (Sénégal). *Environnement, Risques et Santé*, 2005a, vol. 4, n° 2, pp. 125-129.
- Mondet B., Diaté A., Ndione J.A., Fall A.G., Chevalier V., Lancelot R., Ndiaye M., Ponçon N. Rainfall patterns and population dynamics of *Aedes (Aedimorphus) vexans arabiensis* Patton, 1905 (Diptera, Culicidae), a potential vector of Rift Valley Fever virus in Senegal. *Journal of Vector Ecology*, 2005b, vol. 30, n° 1, pp. 102-106.
- Monlun E., Zeller H., Le Guenno B., Traore-Lamizana M., Hervy J.P., Adam F., Ferrara L., Fontenille D., Sylla R., Mondo M., Digoutte J.P. Surveillance de la circulation des arbovirus d'intérêt médical dans la région du Sénégal oriental (1988-1991). *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 1993, vol. 86, pp. 21-28.
- Murphy F.A., Harrison A.K., Whitfield S.G. Bunyaviridae: morphologic and morphogenetic similarities of Bunyamwera serologic supergroup viruses and several other arthropod-borne viruses. *Intervirology*, 1973, vol. 1, n° 4, pp. 297-316.
- Ndione J.A., Besancenot J.P., Lacaux J.P., Sabatier P. Environnement et épidémiologie de la fièvre de la Vallée du Rift (FVR) dans le bassin inférieur du fleuve Sénégal. *Environnement, risques et santé*, 2003, vol. 2, n° 3, pp. 176-182.

- O'Malley C.M. *Aedes vexans* (Meigen): an old foe. *Proceedings of the New Jersey Mosquito Control Association*, 1990, vol.2, pp. 90-95.
- Peters C.J., Meegan J.M. Rift Valley Fever. *CRC Handbook Series in Zoonoses*. Boca Raton, Florida : C.R.C. Press, 1981, pp. 403-420.
- Piarroux R. Le choléra : épidémiologie et transmission. Expérience tirée de plusieurs interventions humanitaires réalisées en Afrique, dans l'Océan Indien et en Amérique centrale. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, 2001, vol. 95, pp. 345-350.
- Poncet Y. *Images spatiales et paysages sahéliens*. Bondy: Editions de l'ORSTOM, 1980, 235 p.
- Pope K.O., Sheffner E.J., Linthicum K.J., Bailey C.L., Logan T.M., Kasischke E.S., Birney K., Njogu A.R., Roberts C.R. Identification of central kenyan Rift Valley fever virus vector habitats with Landsat TM and evaluation of their flooding status with airborne imaging Radar. *Remote Sensing of Environment*, 1992, vol. 40, pp. 185-196.
- Pratt D.J., Greenway P.G., Gwynne M.D. A classification of East African rangeland, with an appendix on terminology. *Journal of Applied Ecology*, 1966, vol. 3, pp. 369-382.
- Pretorius A., Oelofsen J., Smith S., Van Der Ryt E. A seroepidemiologic study of small terrestrial vertebrates in South Africa. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1997, vol. 57, pp. 693-698.
- Raynal L., Dumolard P., D'Aubigny G., Weber C., Rigaux P., Scholl M., Larcena D. Gérer et générer des données spatiales hiérarchisées. *Revue Internationale de Géomatique*, 1996, vol. 6, pp. 365-382.
- Raynaud C., Gregoire E., Janin P., Koechlin J., Laville Delvigne P. *Sahels: diversité et dynamiques des relations sociétés-nature*. Paris: Karthala, 1997, 430 p.
- Remy G. *Paysages et milieux épidémiologiques dans l'espace ivoiro-burkinabé*. Paris: Editions du C.N.R.S. 1988, 268 p.
- Ripley B.D. Modelling spatial patterns. *Journal of the royal statistical society*, 1977, vol. B 39, pp. 172-212.
- Roberts D.R., Rodriguez M.H. The environment, remote sensing and malaria control. *Annals of the New York Academy of Science*, 1994, vol. 740, n° 4, pp. 896-402.
- Robinson T.P. Geographic information systems and the selection of priority areas for control of tsetse-transmitted trypanosomiasis in Africa. *Parasitology today*, 1998, vol. 14, n° 11, pp. 457-461.
- Robinson T.P., Rogers D.J., Williams B.G. Mapping tsetse habitat suitability in the common fly belt of Southern Africa using multivariate analysis of climate and remotely sensed vegetation data. *Medical and Veterinary Entomology*, 1997a, vol. 11, pp. 235-245.
- Robinson T.P., Rogers D.J., Williams B.G. Univariate analysis of tsetse habitat in the common fly belt of Southern Africa using climate and remotely sensed vegetation data. *Medical and Veterinary Entomology*, 1997b, vol. 11, pp. 223-234.
- Rodhain F., Perez C. *Précis d'entomologie médicale et vétérinaire*. Paris: Maloine. 1985, 458 p.
- Rogers D.J., Hay S.I., Packer M.J. Predicting the distribution of tsetse flies in West Africa using temporal Fourier processed meteorological satellite data. *Annals of Tropical Medicine and Parasitology*, 1996, vol. 90, pp. 225-241.

- Rogers D.J., Randolph S.E. Climate change and vector-borne diseases. *Advances in Parasitology*, 2006, vol. 62, pp. 348-380.
- Rogers D.J., Randolph S.E. Distribution of tsetse and ticks in Africa: past, present, future. *Parasitology today*, 1993, vol. 9, n° 7, pp. 266-271.
- Rogers D.J., Williams B.G. Monitoring trypanosomiasis in space and time. *Parasitology*, 1993, vol. 106, pp. S77-S92.
- Rohmer P. Approche spatio-temporelle par télédétection de la dynamique des mares impliquées dans la transmission de la FVR: région du Ferlo, Sénégal. Rapport de Master. Orléans: Université d'Orléans, 2005, 76 p.
- Saleh A.S., Mohammed K.A., Hassan M.M., Bucci T.J., Meegan J.M. Antibodies to Rift Valley fever virus in the human populations of Sudan. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 1981, vol. 75, pp. 129-130.
- Saluzzo J.F., Chartier C., Bada R., Martinez D., Digoutte J.P. La fièvre de la vallée du Rift en Afrique de l'Ouest. *Revue d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays tropicaux*, 1987a, vol. 40, n° 3, pp. 215-223.
- Saluzzo J.F., Digoutte J.P., Chartier C., Martinez D., Bada R. Focus of Rift Valley fever virus transmission in southern Mauritania. *Lancet*, 1987b, vol. 1, n° 8531, pp. 504.
- Saluzzo J.F., Vidal P., Gonzalez J.P. *Les virus émergents*. Paris: I.R.D., 2004, 188 p.
- Scott G.R., Weddel I.W., Reid D. Preliminary findings on the prevalence of Rift Valley fever in Kenya cattle. *Bulletin of Epizootic Diseases of Africa*, 1956, vol. 4, pp. 17-26.
- Sellers R.F., Pedgley D.E., Tucker M.R. Rift Valley fever, Egypt 1977: disease spread by windborne insect vectors? *Veterinary Record*, 1982, vol. 110, pp. 73-77.
- Shimshony A., Barzilai R. Rift Valley fever. *Advances in Veterinary Science and Comparative Medicine*, 1983, vol. 27, pp. 347-425.
- Shope R.E., Peters C.J., Walker J.S. Serological relation between Rift Valley fever virus and viruses of phlebotomus fever serogroup. *Lancet*, 1980, vol. 1, n° 8173, pp. 886-887.
- Smithburn K.C. Rift Valley fever: the neurotropic adaptation of the virus and the experimental use of the modified virus as a vaccine. *British Journal of Experimental Pathology*, 1949, vol. 30, pp. 1-16.
- Smithburn K.C., Mahaffy A.C., Haddow A.J., Kitchen S.F., Smith J.F. Rift Valley fever: accidental infections among laboratory workers. *Journal of Immunology*, 1949, vol. 62, pp. 213-227.
- Sorre M. *L'homme sur la terre*. Paris: Hachette, 1961.
- Swanepoel R. Observations on Rift Valley fever in Zimbabwe. *Contributions in Epidemiology and Biostatistics*, 1981, vol. 3, n° 83-91, pp. 83-91
- Thiongane Y., Thonnon J., Zeller H., Lo M.M., Faty A., Diagne F., Gonzalez J., Akakpo J.A., Fontenille D., Digoutte J.P. Données récentes de l'épidémiologie de la Fièvre de la Vallée du Rift (F.V.R.) au Sénégal. *Bulletin de la Société Médicale d'Afrique Noire de Langue Française*, 1996, volume spécial, pp. 1-6.
- Thomas C.J., Lindsay S.W. Local-scale variation in malaria infection amongst rural Gambian children estimated by satellite remote sensing. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 2000, vol. 94, pp. 159-163.

- Toma B., Dufour B., Sanaa M., Bénet J.J., Ellis P., Moutou F., Louzã A. *Epidémiologie appliquée à la lutte contre les maladies transmissibles majeures*. Maisons-Alfort, France: AEEMA, 1996, 549 p.
- Toure O., Arpaillage J. *Peul du Ferlo*. Paris: L'Harmattan, 1986, 77 p.
- Tran A. Télédétection et épidémiologie: modélisation de la dynamique de populations d'insectes et application au contrôle de maladies à transmission vectorielle. Thèse de doctorat. Strasbourg: Université Louis Pasteur-Strasbourg I, 2004, 199 p.
- Van Velden D.J.J., Meyer J.D., Oliver J., Gear J.H.S., McIntosh B.M. Rift Valley fever affecting humans in South Africa: a clinicopathological study. *South African Medical Journal*, 1977, vol. 51, pp. 867-871.
- Veyret Y., Bost F., Cambrézy L., Donze J., Glemarec Y., Heude J., Janin P., Meschinet de Richemond N., Pelletier P., Thouret J.C., Vieillard-Baron H. *Les risques*. Paris: SEDES, 2003, 255 p.
- Veyret Y., Meschinet de Richemond N. Risques naturels dans les pays tropicaux. Réflexions issues des travaux récents. **In** : Espaces tropicaux et risques: du local au global; Actes des X^{es} journées de géographie tropicale, 24-26 septembre 2003, Orléans. Orléans: Presses Universitaires d'Orléans/ I.R.D. 2003, pp. 25-35.
- Weicker M. *Nomades et sédentaires au Sénégal*. Dakar: E.N.D.A. 1993, 161 p.
- Wilson M., Chapman L., Hall D., Dykstra E., Ba K., Zeller H., Traore-Lamizana M., Hervy J.P., Linthicum K.J., Peters C. Rift valley fever in rural northern Senegal: human risks and potential vectors. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1994, vol. 50, n° 6, pp. 663-675.
- Wilson M.L. Rift Valley Fever virus ecology and the epidemiology of disease emergence. *Annals of the New York Academy of Science*, 1994, vol. 740, pp. 169-180.
- Wood B.L., Beck L.R., Washino R.K., Hibbard K.A., Salute J.S. Estimating high mosquito-producing rice fields using spectral data and spatial data. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, vol. 13, n° 15, pp. 2813-2826.
- Woods C.W., Karpati A.M., Grein T., McCarthy N., Gaturuku P., Muchiri E., Dunster L., Henderson A., Khan A.S., Swanepoel R., Bonmarin I., Martin L., Mann P., Smoak B.L., Ryan M., Ksiazek T.G., Arthur R.R., Ndikuyeze A., Agata N.N., Peters C.J. An outbreak of Rift valley fever in Northeastern Kenya, 1997-98. *Emerging Infectious Diseases*, 2002, vol. 8, n° 2, pp. 138-144.
- Yedloutschnig R.J., Dardiri A.H., Walker J.S. Persistence of Rift Valley fever virus in the spleen, liver and brain of sheep after experimental infection. *Contrib. Epidemiol. Biostat.*, 1981, vol. 3, pp. 72-76.
- Zeller H.G., Fontenille D., Traore-Lamizana M., Thiongane Y., Digoutte J.P. Enzootic activity of Rift Valley fever virus in Senegal. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 1997, vol. 56, n° 3, pp. 265-72.
- Zeller H.G., Rakotoharinadrasana H.T., Rakoto-Andrianarivelo M. La fièvre de la vallée du Rift à Madagascar: risques d'infection pour le personnel d'abattoir à Antananarivo. *Rev. Elev. Méd. vét. Pays trop.*, 1998, vol. 51, n° 1, pp. 17-20.

Table des figures

| | |
|---|-----|
| Figure 1 : Estimation de la charge mondiale de morbidité et de mortalité palustre (Source : OMS, http://www.who.int) | 9 |
| Figure 2 : Schéma simplifié du cycle épidémiologique du virus de la FVR | 21 |
| Figure 3 : Cinétique simplifiée de la réponse immunitaire après infection par le virus de la FVR..... | 26 |
| Figure 4 : Evolution de l'incidence selon la forme épidémiologique de la maladie (d'après Toma <i>et al.</i> , 1996) | 27 |
| Figure 5 : Distribution spatio-temporelle des épizoo-épidémies (a) et des enzooties (b) de FVR (sources : Shimshony et Barzilai, 1983 et bulletins de l'OIE) | 31 |
| Figure 6 : Profil type d'un <i>dambo</i> (d'après Linthicum <i>et al.</i> , 1983)..... | 32 |
| Figure 7 : Trois scénarios possibles de transmission de la FVR dans un écosystème à <i>dambos</i> | 35 |
| Figure 8 : Séroprévalence de la FVR chez les petits ruminants du Sénégal en 1988 (Source : Guillaud <i>et al.</i> , 1988)..... | 39 |
| Figure 9 : Schéma du complexe pathogène et cycle épidémiologique de la tuberculose..... | 51 |
| Figure 10 : Schéma du complexe pathogène et cycle épidémiologique de la dicrocoeliose ... | 52 |
| Figure 11 : Schéma du complexe pathogène défini par M. Sorre..... | 53 |
| Figure 12 : Carte administrative du Sénégal..... | 54 |
| Figure 13 : Carte climatique du Sénégal..... | 55 |
| Figure 14 : Pluviométrie relevée à Barkedji de 2001 à 2003, comparée à la normale (source : Ndione, CSE, Dakar)..... | 56 |
| Figure 15 : Complexe pathogène de la FVR à Barkedji..... | 65 |
| Figure 16 : Cycles de développement d' <i>Aedes vexans</i> (a) et de <i>Culex poicilipes</i> (b)..... | 67 |
| Figure 17 : Exemple de répartitions des pluies favorables à <i>Aedes</i> (série 1) et à <i>Culex</i> (série 2) | 68 |
| Figure 18 : Application de la télédétection à la prédiction de la distribution spatiale des vecteurs de maladies (adapté de Roberts, 1994) | 78 |
| Figure 19 : Répartition de <i>Glossina palpalis tachinoides</i> (à gauche) et <i>Glossina morsitans morsitans</i> (à droite) en Afrique (source : FAO, http://www.fao.org/paat/html/home.htm) | 83 |
| | 200 |

| | |
|--|-----|
| Figure 20 : Relation entre les épizooties de FVR et la pluviométrie au Kenya pour les années 1951-1982 (d'après Davies <i>et al.</i> , 1985)..... | 84 |
| Figure 21 : Représentation des valeurs de NDVI et PVAF, de la pluviométrie mensuelle et de la densité de moustiques de septembre 1982 à mars 1985, dans les zones écologiques II (a) et III (b) du Kenya (d'après Linthicum <i>et al.</i> , 1987)..... | 85 |
| Figure 22 : Graphique des valeurs de NDVI et de la pluviométrie mensuels, d'octobre 1981 à décembre 1988 (d'après Linthicum <i>et al.</i> , 1990)..... | 86 |
| Figure 23 : Cartes du risque d'épizooties de FVR prédit par Anyamba <i>et al.</i> , 2002..... | 88 |
| Figure 24 : Protocole de spatialisation du risque de la FVR au niveau local..... | 98 |
| Figure 25 : Etapes de la classification par voie dirigée (d'après Bonn et Rochon, 1992)..... | 104 |
| Figure 26 : Illustration du rehaussement linéaire du contraste..... | 105 |
| Figure 27 : Composition colorée « fausses-couleurs » (B2, V3, R4) de l'image LandSat de novembre 1999 (Source : Centre de Suivi Ecologique, Dakar ; Copyright : LandSat) | 105 |
| Figure 28 : Signatures des cinq classes identifiées sur l'image..... | 106 |
| Figure 29 : Exemple de localisation de parcelles d'apprentissage dans l'espace image et dans l'espace spectral (d'après Bonn et Rochon, 1992) | 106 |
| Figure 30 : Echantillonnage de la zone d'étude..... | 110 |
| Figure 31 : Carte d'occupation des sols de la zone d'étude en novembre 1999, issue d'une image LandSat7 (Source : Centre de Suivi Ecologique, Dakar ; copyright : LandSat) | 117 |
| Figure 32 : Variations du NDVI en saison des pluies 2001 | 118 |
| Figure 33 : Dendrogramme des pixels, découpé en 5 groupes ou <i>clusters</i> | 119 |
| Figure 34 : Répartition des <i>clusters</i> écologiques de la zone d'étude | 120 |
| Figure 35 : Répartition des campements dans les échantillons en début et milieu de saison des pluies 2001-2002 | 123 |
| Figure 36 : Campements et environnement en milieu de saison des pluies 2001..... | 125 |
| Figure 37 : Fonction de Ripley linéarisée pour les campements en saison des pluies 2001. 126 | |
| Figure 38 : Projection des modalités (encadrés) et des individus (points) sur les plans factoriels 1-2 et 2-3..... | 130 |
| Figure 39 : Dendrogramme des campements, divisé en 4 groupes ou <i>clusters</i> | 132 |
| Figure 40 : Projection des 4 <i>clusters</i> sur les plans factoriels 1-2 (a) et 2-3 (b)..... | 132 |

| | |
|--|-----|
| Figure 41 : Densité de troupeaux prédite par le modèle | 136 |
| Figure 42 : Position des relevés de terrain sur un extrait de la composition fausses couleurs (B1, V2, R3) de l'image SPOT du 26/08/03 (Source : Centre de Suivi Ecologique, Dakar ; Copyright : SpotImage)..... | 143 |
| Figure 43 : Signatures de l'eau, du sol et de la végétation chlorophyllienne dans le spectre électromagnétique (Source : Eduspace, adapté par Rohmer) | 144 |
| Figure 44 : Etapes de la caractérisation des mares temporaires | 148 |
| Figure 45 : Exemple de segmentation sur la mare de Barkedji et ses alentours au 26/08/03 (Source : P. Rohmer)..... | 150 |
| Figure 46 : Mares temporaires de la zone d'étude détectées sur la série d'images SPOT du 26/08/03, 27/10/03 et 18/11/03 | 157 |
| Figure 47 : Distribution spatiale des densités de végétation détectées sur l'image SPOT du 26/08/03..... | 159 |
| Figure 48 : Histogramme de la variable C | 160 |
| Figure 49 : Cartographie des mares au 26/08/03 et de leur capacité C à favoriser le développement des vecteurs | 162 |
| Figure 50 : Distribution spatiale de l'abondance vectorielle relative sur la zone d'étude avec une dispersion faible (a), moyenne (b) et élevée (c)..... | 164 |
| Figure 51 : Modèle du risque relatif de transmission de la FVR | 171 |
| Figure 52 : Cartographies du risque relatif de transmission de la FVR en saison des pluies dans la zone de Barkedji, selon la distance de dispersion des vecteurs : faible (a), moyenne (b) ou élevée (c)..... | 174 |
| Figure 53 : Histogramme de la surface de chaque niveau de risque, pour les trois modalités de dispersion | 175 |
| Figure 54 : Statut sérologique des campements suivis et niveau de risque prédit par le modèle avec une dispersion moyenne des vecteurs | 176 |

Table des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 1 : Hôtes potentiels du virus de la FVR, classés selon leur susceptibilité (d'après Shimshony et Barzilai, 1983)..... | 17 |
| Tableau 2 : Isolements de virus de la FVR sur des vecteurs arthropodes collectés sur le terrain, en Afrique (d'après Fontenille <i>et al.</i> , 1998, Linthicum <i>et al.</i> , 1985, Diallo <i>et al.</i> , 2000, Shimshony et Barzilai, 1983) | 19 |
| Tableau 3 : Enquête cas/témoins dans le district de Garissa au Kenya, suite à l'épizootie de 1997-98 : risques relatifs liés à l'exposition à différents facteurs de risque (d'après Woods <i>et al.</i> , 2002) | 23 |
| Tableau 4 : Diptères collectés en Egypte dans les zones d'épidémies de FVR, d'octobre 1977 à novembre 1978 (d'après Hoogstraal <i>et al.</i> , 1979)..... | 37 |
| Tableau 5 : Dictionnaire des variables caractérisant l'environnement géographique, retenues pour la division de la zone en <i>clusters</i> écologiques et pour la modélisation de la densité de troupeaux | 108 |
| Tableau 6 : Dictionnaire des variables retenues pour la typologie et de leurs modalités | 113 |
| Tableau 7 : Surfaces occupées par chaque classe d'occupation du sol en novembre 1999 .. | 118 |
| Tableau 8 : Nombre de campements et de troupeaux recensés dans les échantillons en saison des pluies 2001 et 2002 | 127 |
| Tableau 9 : Comparaison des variables liées à la composition et à l'emplacement du campement entre les sédentaires et les transhumants..... | 128 |
| Tableau 10 : Contribution des variables à la formation des 3 premiers axes factoriels et variables conservées pour l'interprétation | 129 |
| Tableau 11 : Moyennes par groupe des 7 variables conservées dans l'analyse discriminante | 135 |
| Tableau 12 : Critères d'identification des classes pour la classification orientée-objet | 151 |
| Tableau 13 : Modèle de décision de la capacité C des mares à favoriser le développement des vecteurs..... | 153 |
| Tableau 14 : Statistiques descriptives des mares temporaires détectées sur la série d'images SPOT | 158 |
| Tableau 15 : Superficies des classes de végétation détectées sur l'image SPOT du 26/08/03 | 160 |

Table des photographies

| | |
|---|-----|
| Planche photo 1 : Spécimens de moustiques vecteurs de la FVR..... | 18 |
| Planche photo 2 : Paysages caractéristiques du Sahel : le <i>seeno</i> (a), le <i>sangre</i> (b) et le <i>baldiol</i> (c) (Clichés : Pin-Diop 2002 et Mondet 2003)..... | 58 |
| Photo 3 : Vue partielle d'un campement peul (Cliché : Aubert 1998)..... | 59 |
| Planche photo 4 : Animaux de rente : zébus de race <i>gobra</i> (a), moutons peul-peul et chèvres sahéliennes (b), cheval attelé (c) (Clichés : Pin-Diop 2002) | 60 |
| Photo 5 : Mare temporaire de Niaka (Cliché : Mondet et Sibert 2003)..... | 62 |
| Planche photo 6 : Utilisation des mares temporaires pour les besoins ménagers (a) et l'abreuvement des animaux (b) (Clichés : Mondet et Sibert 2003) | 62 |
| Planche photo 7 : Différents profils de mares temporaires : la mare de Niaka (a) et la mare de Loumbel Lana (b) (Clichés : Mondet et Sibert 2003) | 69 |
| Planche photo 8 : Exemples de variations du signal des mares temporaires (Clichés : Mondet et Sibert 2003) | 145 |

Glossaire

| | |
|-----------------------------|--|
| Arbovirose | Toute maladie infectieuse due à un arbovirus, virus transmis à l'homme par un arthropode (insecte ou arachnide). |
| Acide Ribo-Nucléique | Macromolécule formée par la polymérisation de nombreux nucléotides dont le sucre est le ribose, présente dans le cytoplasme, les mitochondries ainsi que dans le noyau cellulaire et servant d'intermédiaire dans la synthèse des protéines. |
| Appareil de Golgi | Ensemble de granulations réunies en réseau, situées dans le cytoplasme cellulaire, près du noyau, et réduisant les sels d'argent. L'appareil de Golgi se rencontre plus typiquement dans les cellules animales et son rôle est controversé. |
| Arthropode | Animal constitué d'une suite d'anneaux durs extérieurement, souples et articulés entre eux et dont certains portent une paire d'appendices ventro-latéraux (pattes par exemple), eux-mêmes divisés en segments articulés. L'embranchement des arthropodes comprend entre autres la classe des insectes (poux, puces, punaises, phlébotomes, simulies, glossines, culicidés, anophèles, etc.) et des acariens (tiques, etc.). |
| Baldiol | Terme <i>fulani</i> désignant une steppe arborée poussant dans les dépressions hydromorphes, à substrat argilo-sableux et caractérisée par <i>Acacia seyal</i> , <i>Adansonia digitata</i> , <i>Balanites aegyptiaca</i> , <i>Boscia senegalensis</i> . La pression pastorale y est importante en saison des pluies. |
| Caducifolié | Se dit d'un arbre dont les feuilles tombent ou meurent au début de l'hiver sous les climats tempérés et froids, ou de la saison sèche sous les tropiques. |
| Céane | Trou d'eau de plusieurs mètres de diamètre, creusé dans le sol par les populations et alimenté par une nappe phréatique. |
| Céphalée | Toute douleur de la tête, quelle que soit sa cause. |
| Cytoplasme | Ensemble des éléments qui se trouvent à l'intérieur de la cellule, à l'exclusion du noyau. |
| Enzootie/endémie | Persistance habituelle, dans une région ou une collectivité donnée, d'une maladie particulière ou de son agent pathogène spécifique, et qui s'y manifeste de façon constante ou à des époques déterminées. Les termes d'enzootie et d'endémie s'appliquent respectivement à une maladie animale et humaine. |

| | |
|---------------------------|---|
| Epizootie/épidémie | Augmentation et propagation inhabituellement rapides, dans une collectivité ou un territoire donné et pendant une période limitée, du nombre de cas d'une maladie transmissible. Les termes d'épizootie et d'épidémie s'appliquent respectivement à une maladie animale et humaine. |
| Helminthe | Ver parasite de l'homme et des vertébrés appartenant à l'embranchement des vers plats (plathelminthes) ou des vers ronds (némathelminthes). |
| Hématophage | Se dit des animaux qui se nourrissent du sang d'autres animaux vivants. |
| Hôte intermédiaire | Etre vivant, vertébré ou invertébré, dans l'organisme duquel un parasite se développe à l'état larvaire ou dans une phase d'immaturité sexuelle et peut cependant se multiplier. |
| Ictère | Coloration jaune de la peau, de la sclérotique (blanc de l'œil) et des muqueuses, due à l'accumulation, dans le sang, de bilirubine (pigment dérivé de l'hémoglobine). L'ictère correspond au terme « jaunisse » du langage courant. |
| Immunogénicité | Capacité d'une substance à susciter une réponse immunitaire |
| Incidence | Nombre de cas ou de foyers nouveaux d'une maladie, dans une population déterminée, au cours d'une période donnée. |
| Létalité | Rapport entre le nombre de décès et l'ensemble des malades. |
| Mode vecteur | Mode de travail dans un Système d'Information Géographique, basé sur la description de la géométrie des objets, qui peuvent être ponctuels, linéaires ou surfaciques. |
| Mode raster | Mode de travail dans un Système d'Information Géographique, basé sur un fonctionnement matriciel ; l'image cartographique est décomposée en éléments jointifs (ou pixels) contenant une valeur numérique qualitative ou quantitative. |
| Mortalité | Rapport entre le nombre de décès et l'ensemble de la population. |
| Mouride | Membre de la confrérie musulmane des mourides, fondée par Cheikh Amadou Bamba |
| Myalgie | Douleur musculaire. |
| Naïveté | Une population est dite naïve lorsqu'elle n'a jamais été en contact avec un agent pathogène. Dans ce cas, aucun individu n'est immunisé, et l'introduction de l'agent pathogène peut faire des ravages. |

| | |
|------------------------------|---|
| Nucléocapside | Constituant viral composé de l'acide nucléique et de la capsule protéique qui l'entoure. |
| Pandémie | Épidémie qui s'étend au-delà des frontières internationales, soit à un continent, à un hémisphère ou au monde entier, et qui peut toucher un très grand nombre de personnes, quand elles ne sont pas immunisées contre la maladie ou quand la médecine ne dispose d'aucun médicament pour traiter les malades. |
| Percolation | Écoulement lent de l'eau libre, au travers des interstices d'un sol saturé. |
| Prévalence | Nombre total de cas ou de foyers d'une maladie, dans une population déterminée, au cours d'une période donnée ou à un instant donné. |
| Protozoaire | Organisme animal composé d'une cellule unique. Les agents du paludisme, de la trypanosomose, des leishmanioses, des amibiases, des coccidioses ou de la toxoplasmose sont des protozoaires. |
| Purpura | Symptôme caractérisé par l'apparition sur la peau de taches rouges dues au passage de globules rouges dans le derme. |
| Réceptivité d'un hôte | Aptitude à héberger un agent pathogène, à en permettre le développement ou la multiplication, sans forcément en souffrir. |
| Réservoir | Espèce, milieu ou mécanisme permettant la survie d'un agent pathogène considéré en tant qu'espèce. |
| Sangre | Terme <i>fulani</i> désignant une steppe arbustive croissant sur les affleurements de cuirasse latéritique ; <i>Pterocarpus lucens</i> , <i>Sterculia setigera</i> , <i>Commiphora africana</i> , <i>Grewia bicolor</i> sont les espèces dominantes. Ses faibles réserves hydriques, dues à la porosité du sol, le rendent impropres à l'agriculture, mais pas au pâturage. |
| Seeno | Terme <i>fulani</i> désignant est une steppe arbustive sur dune et inter-dune (substrat sableux), dominée par les espèces ligneuses soudaniennes <i>Balanites aegyptiaca</i> , <i>Guiera senegalensis</i> , <i>Combretum glutinosum</i> et <i>Sclerocarya birrea</i> . Cette formation est propice à l'agriculture et offre une productivité fourragère élevée, grâce aux bonnes propriétés hydriques des sols sableux. Elle est cependant sensible à l'érosion éolienne et au surpâturage. |
| Sensibilité d'un hôte | Aptitude à exprimer cliniquement l'action d'un agent pathogène. |
| Sensibilité d'un test | Aptitude d'un test à fournir une réponse positive chez un individu infecté. |

| | |
|---|---|
| Soudure | Période qui sépare la fin de la consommation de la récolte de l'année précédente et l'épuisement des réserves, de la récolte suivante. |
| Spécificité d'un test | Aptitude d'un test à fournir une réponse négative chez un individu indemne. |
| Tératogène | Se dit d'un agent mécanique, chimique, physique ou microbien qui, appliqué à l'œuf ou à l'embryon en cours de développement, provoque des malformations. |
| Vecteur | Être vivant qui, à l'occasion de relations écologiques, acquiert un agent pathogène sur un hôte et le transmet ensuite à un autre hôte. |
| Virémie | Présence d'un virus dans le sang. |
| Virion | Être intermédiaire entre les êtres vivants et les molécules inanimées, correspondant au stade de la multiplication d'un virus où tous les constituants de celui-ci sont assemblés. |
| Zone de convergence intertropicale | Anglais : <i>InterTropical Convergence Zone</i> ou ITCZ Zone où les vents du nord de l'hémisphère nord rencontrent les vents du sud de l'hémisphère sud. A partir du mois d'avril, l'ITCZ se déplace vers le nord et atteint son point extrême, entre 18°N et 20°N, en juillet-août. Il redescend ensuite vers le sud. |
| Zoonose | Maladie ou infection transmissible naturellement des animaux vertébrés à l'homme et réciproquement. |

Liste des sigles et acronymes

| | |
|--------------|---|
| ACI | Action Concertée Incitative |
| ACP | Analyse en Composantes Principales |
| AFCM | Analyse Factorielle des Correspondances Multiples |
| CAH | Classification Ascendante Hiérarchique |
| CIRAD | Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement |
| CSE | Centre de Suivi Ecologique |
| EDEN | Emerging Diseases in a European changing eNvironment |
| FVR | Fièvre de la Vallée du Rift |
| IRD | Institut de Recherche pour le Développement |
| ISRA | Institut Sénégalais de Recherche Agricole |
| LST | Land Surface Temperature |
| MNT | Modèle Numérique de Terrain |
| NDVI | Normalized Difference Vegetation Index |
| OIE | Office International des Epizooties |
| OMS | Organisation Mondiale de la Santé |
| PIR | Proche Infra Rouge |
| PVAF | Potential Viral Activity Factor |
| RADAR | RAdio Detection And Ranging |
| SIG | Système d'Information Géographique |
| SPOT | Satellite Pour l'Observation de la Terre |

Annexe 1 : Caractéristiques des capteurs de LandSat et de SPOT, par ordre chronologique décroissant

| | | | | | |
|--|---|---------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| LANDSAT | Capteur Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) | Landsat 7 | Domaine spectral | Longueur d'onde (µm) | Résolution (m) |
| | | Bande 1 | Bleu | 0.45-0.52 | 30 |
| | | Bande 2 | Vert | 0.53-0.61 | 30 |
| | | Bande 3 | Rouge | 0.63-0.69 | 30 |
| | | Bande 4 | Proche IR | 0.78-0.90 | 30 |
| | | Bande 5 | IR moyen | 1.55-1.75 | 30 |
| | | Bande 6 | IR thermique | 10.40-12.50 | 60 |
| | | Bande 7 | IR lointain | 2.09-2.35 | 30 |
| | Bande P | Panchromatique | 0.52-0.90 | 15 | |
| | Capteur Thematic Mapper (TM) | Landsats 4-5 | Domaine spectral | Longueur d'onde (µm) | Résolution (m) |
| Bande 1 | | Bleu | 0.45-0.52 | 30 | |
| Bande 2 | | Vert | 0.52-0.60 | 30 | |
| Bande 3 | | Rouge | 0.63-0.69 | 30 | |
| Bande 4 | | Proche IR | 0.76-0.90 | 30 | |
| Bande 5 | | IR moyen | 1.55-1.75 | 30 | |
| Bande 6 | | IR thermique | 10.40-12.50 | 120 | |
| Bande 7 | | IR lointain | 2.08-2.35 | 30 | |
| Capteur Multispectral Scanner (MSS) | Landsats 1-3 | Landsats 4-5 | Domaine spectral | Longueur d'onde (µm) | Résolution (m) |
| | Bande 1 | Bande 1 | Vert | 0.5-0.6 | 68×83 |
| | Bande 2 | Bande 2 | Rouge | 0.6-0.7 | 68×83 |
| | Bande 3 | Bande 3 | Rouge-proche IR | 0.7-0.8 | 68×83 |
| | Bande 4 | Bande 4 | Proche IR | 0.8-1.1 | 68×83 |
| | Bande 5 | | IR thermique | 10.41-12.6 | 237 |
| SPOT | Spot 5 | | Domaine spectral | Longueur d'onde (µm) | Résolution (m) |
| | | Bande 1 | Vert | 0.50-0.59 | 10 |
| | | Bande 2 | Rouge | 0.61-0.68 | 10 |
| | | Bande 3 | Proche IR | 0.78-0.89 | 10 |
| | | Bande 4 | Moyen IR | 1.58-1.75 | 20 |
| | Bande P | Panchromatique | 0.48-0.71 | 2.5 ou 5 | |
| | Spot 4 | Bande 1 | Vert | 0.50-0.59 | 20 |
| | | Bande 2 | Rouge | 0.61-0.68 | 20 |
| | | Bande 3 | Proche IR | 0.78-0.89 | 20 |
| | | Bande 4 | Moyen IR | 1.58-1.75 | 20 |
| | | Bande P | Panchromatique | 0.61-0.68 | 10 |
| | Spot 1-2-3 | Bande 1 | Vert | 0.50-0.59 | 20 |
| | | Bande 2 | Rouge | 0.61-0.68 | 20 |
| | | Bande 3 | Proche IR | 0.78-0.89 | 20 |
| | | Bande P | Panchromatique | 0.50-0.73 | 10 |

Annexe 2 : Métadonnées du Système d'Information Géographique

| Nom | Description | Mode | Résolution (si raster) ou format (si vecteur) |
|---------------------------|--|---------|---|
| cadre | Limites de la zone d'étude | Vecteur | Polygone |
| landsat99_2 | Canal 2 Landsat ETM+ de novembre 1999 | Raster | 15m |
| landsat99_3 | Canal 3 Landsat ETM+ de novembre 1999 | Raster | 15m |
| landsat99_4 | Canal 4 Landsat ETM+ de novembre 1999 | Raster | 15m |
| landsat99_7 | Canal 7 Landsat ETM+ de novembre 1999 | Raster | 15m |
| landsat99_classup_filtrée | Classes d'occupation du sol issues de l'image LandSat7 de novembre 1999 | Vecteur | Polygone |
| pistes | Pistes digitalisées à partir de l'image LandSat7 | Vecteur | Polyligne |
| hydro | Réseau hydrographique fossile digitalisé à partir de l'image LandSat7 | Vecteur | Polyligne |
| escarpement | Escarpements digitalisés à partir de l'image LandSat7 | Vecteur | Polyligne |
| pts_eau_perm | Points d'eau permanents relevés sur le terrain par GPS | Vecteur | Ponctuel |
| disthydro | Distance au réseau hydrographique | Raster | 1km |
| distfoss | Distance à la vallée fossile | Raster | 1km |
| distperm | Distance au point d'eau permanent le plus proche | Raster | 1km |
| cultures | Zones cultivées ou en jachère digitalisés à partir de l'image LandSat7 | Vecteur | Polygone |
| ndvi_2001 | 1 ^{ère} composante de l'ACP sur les valeurs de NDVI de juin à décembre 2001 | Raster | 1km |
| camps_2001 | Campements recensés dans les échantillons lors des 4 enquêtes de 2001 | Vecteur | Ponctuel |
| camps_2002 | Campements recensés dans les échantillons lors des 4 enquêtes de 2002 | Vecteur | Ponctuel |
| grille1km | Grille couvrant la zone d'étude, composée de 1600 pixels de 1km de côté | Vecteur | Polygone |
| spot260803_1 | Canal XS1(vert) de Spot5 du 26/08/03 | Raster | 5m |
| spot260803_2 | Canal XS2 (rouge) de Spot5 du 26/08/03 | Raster | 5m |
| spot260803_3 | Canal XS3 (PIR) de Spot5 du 26/08/03 | Raster | 5m |
| spot271003_1 | Canal XS1(vert) de Spot5 du 27/10/03 | Raster | 5m |
| spot271003_2 | Canal XS2 (rouge) de Spot5 du 27/10/03 | Raster | 5m |
| spot271003_3 | Canal XS3 (PIR) de Spot5 du 27/10/03 | Raster | 5m |
| spot181103_1 | Canal XS1(vert) de Spot5 du 18/11/03 | Raster | 5m |
| spot181103_2 | Canal XS2 (rouge) de Spot5 du 18/11/03 | Raster | 5m |
| spot181103_3 | Canal XS3 (PIR) de Spot5 du 18/11/03 | Raster | 5m |
| mares_260803 | Mares temporaires au 26/08/03, issues de l'image Spot5 de la même date | Vecteur | Polygone |
| mares_271003 | Mares temporaires au 27/10/03, issues de l'image Spot5 de la même date | Vecteur | Polygone |
| mares_181103 | Mares temporaires au 18/11/03, issues de l'image Spot5 de la même date | Vecteur | Polygone |
| veg_faible | Végétation de faible densité au 26/08/03, issue de l'image Spot5 de la même date | Vecteur | Polygone |
| veg_intermédiaire | Végétation de densité moyenne au 26/08/03, issue de l'image Spot5 de la même date | Vecteur | Polygone |
| veg_dense | Végétation de densité importante au 26/08/03, issue de l'image Spot5 de la même date | Vecteur | Polygone |
| veg_terr_dense | Végétation terrestre de densité importante au 26/08/03 | Vecteur | Polygone |
| seros2003 | Résultats des enquêtes sérologiques de 2003 sur 16 campements | Vecteur | Ponctuel |

Annexe 3 : Scripts des analyses statistiques sous R

Annexe 3.1 : Classification ascendante hiérarchique des pixels de la zone d'étude

```
tab <- read.table("C:/couches_arcgis/modele_camps/couches_mapinfo/Grille1km_camps.txt", header
= TRUE, sep = "\t", quote="", na.strings = "")
"

df <- data.frame(tab[,c(11:13,23:30)], row.names = tab$DESCRIPTIO)
names(df) <- c("dhy","dpi","dpe","mcl","sdcl","vrcl","ndvi","pse","psa","pba","pde")

library(mva)
d <- dist(df, method = "euclidean", diag = FALSE, upper = FALSE)
c <- hclust(d, method = "complete", members=NULL)
plot(c, hang = 0.1, axes = TRUE, frame.plot = FALSE, ann = TRUE, font.main = 1, cex = 0.4, sub
= NULL, xlab = NULL, ylab = NULL)

clas2 <- cutree(c, k = 5)
clas2 <- as.data.frame(clas2)
names(clas2) <- c("classe")

classif <- cbind(df, clas2)
classif$classe <- factor(classif$classe)

statsclasses <- by(classif, list(classif$classe), summary)
moyclasses <- aggregate.data.frame(classif, list(classif$classe), mean)
moyenne <- mean(classif)

write.table(moyclasses, file =
"C:/couches_arcgis/modele_camps/couches_mapinfo/classif2_écolo_moy_par_classe.txt",
append = F, sep = "\t")
write.table(moyenne, file =
"C:/couches_arcgis/modele_camps/couches_mapinfo/classif2_écolo_moy_totale.txt",
append = F, sep = "\t")
```

Annexe 3.2 : Typologie des campements en saison des pluies

```

# Tri à plat des données et mise en classes des variables quantitatives
tab <- read.table("C:/Documents and Settings/Raphy/Mes documents/Senegal_rift/SIG/
MapInfo_Bark/Typologie_camps01-02/camps_0102_typo_ss_dbblons.txt", header = TRUE, sep = "\t",
quote="\\"", na.strings = "")
"

tab$statut <- factor(tab$statut)
tab$origine <- factor(tab$origine)
attach(tab)

# Variables de description du campement:
h <- hist(moy.nbconc)
tab$conc <- factor(ifelse(moy.nbconc < 3, "1",
                          ifelse(moy.nbconc >= 3 & moy.nbconc <= 5, "2", "3"
                                )))
h <- hist(moy.nbtrpbo)
tab$bo <- factor(ifelse(moy.nbtrpbo <= 0, "0",
                        ifelse(moy.nbtrpbo > 0 & moy.nbtrpbo <= 1, "1", "2"
                              )))
h <- hist(moy.nbtrppr)
tab$ppr <- factor(ifelse(moy.nbtrppr <= 1, "1",
                          ifelse(moy.nbtrppr > 1 & moy.nbtrppr <= 3, "2", "3"
                                )))

# Variables de description de l'environnement:
win.graph()
par(mfrow = c(2,3))
hist(distperm)
hist(distfoss)
hist(distpist)
hist(distmare)
hist(surfmare)
hist(surfmare.2km)
tab$perm <- factor(ifelse(distperm <= 2000, "1",
                          ifelse(distperm > 2000 & distperm <= 3500, "2", "3"
                                )))
tab$foss <- factor(ifelse(distfoss <= 500, "1",
                          ifelse(distfoss > 500 & distfoss <= 1500, "2", "3"
                                )))
tab$pist <- factor(ifelse(distpist <= 1000, "1",
                          ifelse(distpist > 1000 & distpist <= 2000, "2", "3"
                                )))
tab$dmare <- factor(ifelse(distmare <= 100, "1",
                            ifelse(distmare > 100 & distmare <= 300, "2", "3"
                                    )))
tab$smare <- factor(ifelse(surfmare <= 200, "1",
                            ifelse(surfmare > 200 & surfmare <= 1000, "2",
                                    ifelse(surfmare > 1000 & surfmare <= 10000, "3", "4"
                                            ))))
tab$smare2 <- factor(ifelse(surfmare.2km <= 50000, "1",
                            ifelse(surfmare.2km > 50000 & surfmare.2km <= 150000, "2",
                                    ifelse(surfmare.2km > 150000 & surfmare.2km <= 350000, "3", "4"
                                            ))))
hist(tab$moy.propsee)
hist(tab$moy.propsan)
hist(tab$moy.propbal)
hist(tab$moy.propdeg)

b <- quantile(moy.propsee, probs = c(0.33,0.66))
tab$see <- factor(ifelse(moy.propsee < b[1], "1",
                          ifelse(moy.propsee >= b[1] & moy.propsee < b[2], "2", "3"
                                )))
b <- quantile(moy.propsan, probs = c(0.33,0.66))
tab$san <- factor(ifelse(moy.propsan < b[1], "1",
                          ifelse(moy.propsan >= b[1] & moy.propsan < b[2], "2", "3"
                                )))
b <- quantile(moy.propbal, probs = c(0.33,0.66))
tab$bal <- factor(ifelse(moy.propbal < b[1], "1",
                          ifelse(moy.propbal >= b[1] & moy.propbal < b[2], "2", "3"
                                )))
b <- quantile(moy.propdeg, probs = c(0.33,0.66))
tab$deg <- factor(ifelse(moy.propdeg < b[1], "1",
                          ifelse(moy.propdeg >= b[1] & moy.propdeg < b[2], "2", "3")))

```

```

# Mise en forme des tables finales destinées à l'ACM et ACM proprement dite:
daf <- data.frame(tab[,c(20:25, 29:32)], row.names = tab$lieu)

# ACM et graphiques d'interprétation
library(ade4)
typo <- dudi.acm(daf, scannf = F, nf = 3)

typo$eig
contrib <- inertia.dudi(typo, row.inertia = T, col.inertia = T)$col.rel
part <- typo$scr

graphics.off()
par(mfrow = c(1,1), col = 1)
s.label(typo$li, xax = 1, yax = 2, clabel = 0, xlim = c(-1,1.3), ylim = c(-1.5,0.9))
s.label(typo$co, xax = 1, yax = 2, label = row.names(typo$co), clabel = 0.7, sub = "axes 1-2",
add.plot = T)

win.graph()
s.label(typo$li, xax = 2, yax = 3, clabel = 0, xlim = c(-1.5, 0.9))
s.label(typo$co, xax = 2, yax = 3, label = row.names(typo$co), clabel = 0.7, sub = "axes 2-3",
add.plot = T)

# CAH des individus à partir des coordonnées factorielles
dis <- dist(typo$ll, method = "euclidean", diag = FALSE, upper = FALSE)
library(mva)
clust <- hclust(dis, method = "complete", members=NULL)
plot(clust, hang = 0.1, axes = TRUE, frame.plot = FALSE, ann = TRUE,
main = "Dendrogramme des campements", font.main = 1,
cex = 0.4, sub = NULL, xlab = NULL, ylab = NULL)

clas <- cutree(clust, k = 4)
clas <- as.data.frame(clas)
names(clas) <- c("classe")

# Représentation graphique des individus et des classes
fac <- as.factor(clas$classe)
par(col = 1)
s.class(typo$ll, fac, wt = rep(1, length(fac)), xax = 1,
yax = 2, cstar = 1, cellipse = 1, axesell = TRUE,
label = levels(fac), clabel = 1, cpoint = 1, pch = 20, xlim = NULL,
ylim = NULL, grid = TRUE, addaxes = TRUE, origin = c(0,0),
include.origin = TRUE, sub = "axes 1-2", csub = 1, possub = "bottomleft",
cgrid = 1, pixmap = NULL, contour = NULL, area = NULL, add.plot = FALSE)
par(col = 2)
s.label(typo$co, xax = 1, yax = 2, add.plot = T, label = row.names(typo$co), clabel = 0.5)

win.graph()
par(col = 1)
s.class(typo$ll, fac, wt = rep(1, length(fac)), xax = 2,
yax = 3, cstar = 1, cellipse = 1, axesell = TRUE,
label = levels(fac), clabel = 1, cpoint = 1, pch = 20, xlim = NULL,
ylim = NULL, grid = TRUE, addaxes = TRUE, origin = c(0,0),
include.origin = TRUE, sub = "axes 2-3", csub = 1, possub = "bottomleft",
cgrid = 1, pixmap = NULL, contour = NULL, area = NULL, add.plot = FALSE)
par(col = 2)
s.label(typo$co, xax = 2, yax = 3, add.plot = T, label = row.names(typo$co), clabel = 0.5)

```

Annexe 3.3 : Calcul de la fonction de Ripley pour les campements en saison des pluies

2001

```

library(spatial)
camps <- ppinit("coord_camps01utm.dat")
Lpp <- Kfn(camps, 5000, 10000)

plot((Lpp$y - Lpp$x), type = "l", xlab="Distance (m)", ylab="L(r)", col = 3, xlim = c(0,5000))

for(i in 0:20) lines(Kfn(Psim(244), 5000)$x, (Kfn(Psim(244), 5000)$y - Kfn(Psim(244),
5000)$x), lty = 3)

lims <- Kenvl(5000, 100, Psim(244))
lines(lims$x, (lims$l - lims$x), lty=2, col="red")
lines(lims$x, (lims$u - lims$x), lty=2, col="red")
av <- Kaver(5000, 100, Psim(244))
lines(av$x, (av$y - av$x), col = "red")

#zoom
win.graph()
plot((Lpp$y - Lpp$x), type = "l", xlab="Distance (m)", ylab="L(r)", col = 3, xlim = c(0,1000),
ylim = c(-500,1000))
for(i in 0:20) lines(Kfn(Psim(244), 5000)$x, (Kfn(Psim(244), 5000)$y - Kfn(Psim(244),
5000)$x), lty = 3)
lims <- Kenvl(5000, 100, Psim(244))
lines(lims$x, (lims$l - lims$x), lty=2, col="red")
lines(lims$x, (lims$u - lims$x), lty=2, col="red")
av <- Kaver(5000, 100, Psim(244))
lines(av$x, (av$y - av$x), col = "red")

```

Annexe 3.4 : Analyse discriminante pour prédire la densité de troupeaux en saison des pluies 2001

```

train <- read.table("C:/couches_arcgis/modele_camps/couches_mapinfo/Grille1km_camps_ech.txt",
header = TRUE, sep = "\t", quote="", na.strings = "")
"
test <- read.table("C:/couches_arcgis/modele_camps/couches_mapinfo/
Grille1km_camps_hors_ech.txt", header = TRUE, sep = "\t", quote="", na.strings = "")
"

df <- train[,c(10:31)]
names(df) <- c("classe", "dhy", "dpi", "dpe", "m2", "sd2", "m3", "sd3", "m4", "sd4", "m7", "sd7", "mcl",
"sdcl", "vrcl", "ndvi", "pse", "psa", "pba", "pde", "pcu", "zone")
df$psem <- asin((df$pse)^(1/2))
df$psam <- asin((df$psa)^(1/2))
df$pbam <- asin((df$pba)^(1/2))
df$pdem <- asin((df$pde)^(1/2))
df$pcum <- asin((df$pcu)^(1/2))

df$classe <- factor(df$classe, levels = c("très faible", "faible", "eveeve"))
df <- df[,c(1:16,22:26)]

dfctest <- test[,c(10:25,30:35)]
names(dfctest) <- c("classe", "dhy", "dpi", "dpe", "m2", "sd2", "m3", "sd3", "m4", "sd4", "m7", "sd7",
"mcl", "sdcl", "vrcl", "ndvi", "pse", "psa", "pba", "pde", "pcu", "zone")
dfctest$psem <- asin((dfctest$pse)^(1/2))
dfctest$psam <- asin((dfctest$psa)^(1/2))
dfctest$pbam <- asin((dfctest$pba)^(1/2))
dfctest$pdem <- asin((dfctest$pde)^(1/2))
dfctest$pcum <- asin((dfctest$pcu)^(1/2))

library(MASS)
attach(df)

z <- lda(classe ~ ., df, prior = c(6,5,5)/16)

df2 <- df[,c(1,6,13,14,17,19:21)]
train <- sample(1:588,294)

z2 <- lda(classe ~ .,df2, prior = c(6,5,5)/16, subset = train)
p2 <- predict(z2, df2[-train,])
pred2 <- as.vector(p2$class)

verif2 <- as.data.frame(cbind(pred2, as.vector(df2$classe[-train])))
names(verif2) <- c("predit", "reel")
verif2$errtot <- as.factor(ifelse(verif2$predit == verif2$reel, "N", "O"))
verif2$errcl <- as.factor(ifelse(verif2$predit == "faible" & verif2$reel == "eveeve", "O",
ifelse(verif2$predit == "eveeve" & verif2$reel == "faible", "O", "N")))
verif2$errrom <- as.factor(ifelse(verif2$predit == "très faible" & verif2$reel == "faible",
"O",
ifelse(verif2$predit == "très faible" & verif2$reel == "eveeve", "O",
"N")))
verif2$errcom <- as.factor(ifelse(verif2$predit == "faible" & verif2$reel == "très faible",
"O",
ifelse(verif2$predit == "eveeve" & verif2$reel == "très faible", "O",
"N")))
summary(verif2)

z2t <- lda(classe ~ ., df2, prior = c(6,5,5)/16)
p2t <- (predict(z2t, dfctest))$class
summary(p2t)
pred2t <- cbind(as.vector(test$DESCRIPTIO), as.vector(p2t))

```


Projet Emercase – Modélisation - Collaboration ISRA / Direl / CIRAD
Fiche Troupeau

Identification

Nom de l'éleveur : _____ Ethnie : _____

Code GPS du lieu de résidence : _____

Code Échantillon spatial : _____

Troupeau enquêté : _____ Bovin / Petits ruminants

Mobilité du troupeau (mouvements de transhumance)

Présence sur le lieu d'enquête : Permanente (sédentaire) / Temporaire (transhumant)

Date d'arrivée : ___ / ___ / ___ (si transhumance)

Lieu d'origine :

Nom du lieu : _____ Code lieu (si dans zone d'enquête) : _____

Communauté rurale : _____ Département : _____

Exploitation du milieu par le troupeau enquêté

Position géographique du parc de nuit: Latitude Nord : ___ ° ___ ' ___ " . ___

Longitude Ouest: ___ ° ___ ' ___ " .

Points d'eau utilisés par ce troupeau:

| | Nom | Code | Type ¹ | Localisation | | Période | |
|---|-----|------|-------------------|-------------------------|-------------------------|---------|--------|
| | | | | Latitude Nord | Longitude Ouest | arrivée | départ |
| 1 | | | | ___ ° ___ ' ___ " . ___ | ___ ° ___ ' ___ " . ___ | | |
| 2 | | | | ___ ° ___ ' ___ " . ___ | ___ ° ___ ' ___ " . ___ | | |
| 3 | | | | ___ ° ___ ' ___ " . ___ | ___ ° ___ ' ___ " . ___ | | |
| 4 | | | | ___ ° ___ ' ___ " . ___ | ___ ° ___ ' ___ " . ___ | | |
| 5 | | | | ___ ° ___ ' ___ " . ___ | ___ ° ___ ' ___ " . ___ | | |

¹ Puits, mare, forage ou céane

Distance maximale des pâturages exploités par ce troupeau (km) : _____

ACI ECOLOGIE QUANTITATIVE
QUESTIONNAIRE "COMPORTEMENT DES ELEVEURS"- HIVERNAGE 2003

Identification

Nom campement: _____ Code camp.: _____

Coordonnées du campement: _____ / _____

Nom éleveur: _____ Ethnie: _____ Statut: SED /TRANS

Emplacement du campement

Quels sont les avantages de votre emplacement actuel?

Quels en sont les inconvénients?

Changez vous le campement de place au cours de la saison des pluies? Si oui, pour quelle raison?

Utilisation des mares

Préférez vous vous installer près ou loin de la mare que vous utilisez? Pourquoi?

Y a t'il des mares que vous évitez? Si oui, pourquoi et quelles sont les caractéristiques (physiques) de ces mares?

Utilisez-vous la même mare pour vos besoins domestiques et pour l'abreuvement des animaux?

Changez vous de mare au cours de l'hivernage? Si oui, pourquoi?

Fréquentation des pâturages

Quels sont les meilleurs pâturages en :

DSP: _____

MSP: _____

FSP: _____

Préférez-vous faire boire les animaux avant de les emmener au pâturage ou l'inverse?

Comportement par rapport aux autres habitants de la zone

Préférez-vous vous installer dans des endroits isolés ou plutôt fréquentés? Pourquoi?

Si regroupement: vous installez vous à proximité de campements de sédentaires? de transhumants? _____

Annexe 5 : Publications

- De La Rocque S., Michel V., Plazanet D., Pin R., 2004. Remote sensing and epidemiology: examples of applications for two vector-borne diseases. *Comparative Immunology, Microbiology and Infectious Diseases*. vol. 27, n° 5, pp. 331-41.
- Chevalier V., Mondet B., Diaité A., Lancelot R., Pin R., 2003. Influence of the pond type, the distance to the pond and host density on the abundance of *Aedes vexans*, vector of Rift Valley Fever in Senegal: consequences on the risk of transmission to sheep flocks. ISVEE, Vina del Mar, Chili, Novembre 2003.
- Pin R., 2001. Contribution à la mise en place d'un Système d'Information Géographique appliqué à l'épidémiologie et à la modélisation d'une pathologie réémergente: la Péripleumonie Contagieuse Bovine. Thèse de doctorat vétérinaire (autorisation de diffusion étendue). Toulouse : Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, 2001, 94p.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Sommaire | 8 |
| Introduction générale | 9 |
| Première partie. Cadrage scientifique..... | 14 |
| Chapitre 1. Considérations générales sur la Fièvre de la Vallée du Rift .. | 15 |
| 1.1. Présentation de la FVR..... | 15 |
| <i>1.1.1. Etiologie de la FVR.....</i> | <i>15</i> |
| 1.1.1.1. Classification du virus | 15 |
| 1.1.1.2. Propriétés physiques et chimiques du virion | 16 |
| 1.1.1.3. Biosynthèse et morphogenèse du virus | 16 |
| <i>1.1.2. Epidémiologie de la FVR.....</i> | <i>17</i> |
| 1.1.2.1. Hôtes potentiels du virus | 17 |
| 1.1.2.2. Vecteurs et notions de transmission horizontale-verticale | 17 |
| 1.1.2.3. Mécanismes de transmission aux hôtes..... | 20 |
| 1.1.2.4. Réservoirs naturels du virus | 23 |
| <i>1.1.3. Symptômes de la maladie.....</i> | <i>24</i> |
| 1.1.3.1. Chez les ruminants domestiques | 24 |
| 1.1.3.2. Chez l'homme | 24 |
| <i>1.1.4. Méthodes de diagnostic.....</i> | <i>25</i> |
| 1.1.4.1. Diagnostic clinique et anatomo-pathologique | 25 |
| 1.1.4.2. Isolement viral | 25 |
| 1.1.4.3. Diagnostic sérologique | 26 |
| <i>1.1.5. Traitement et prévention de la FVR.....</i> | <i>28</i> |
| 1.2. Les milieux favorables à la FVR..... | 29 |
| <i>1.2.1. Historique de la maladie.....</i> | <i>29</i> |
| <i>1.2.2. Les écosystèmes à « dambos »</i> | <i>32</i> |
| 1.2.2.1. Caractéristiques d'un « dambo » | 32 |
| 1.2.2.2. Dynamique des vecteurs autour d'un dambo et cycle de la FVR..... | 33 |
| <i>1.2.3. Les autres écosystèmes.....</i> | <i>36</i> |

| | |
|---|-----------|
| 1.2.3.1. Les vallées du Nil et du fleuve Sénégal..... | 36 |
| 1.2.3.2. Les écosystèmes semi-arides et arides | 38 |
| 1.2.3.2.1. Au Moyen-Orient..... | 38 |
| 1.2.3.2.2. En Afrique de l’Ouest..... | 38 |
| Chapitre 2. Cadres conceptuel et géographique | 42 |
| 2.1. Les concepts fondateurs de l’étude..... | 42 |
| 2.1.1. <i>Le risque ou les risques</i> | 42 |
| 2.1.1.1. Le risque des géographes et des épidémiologistes | 42 |
| 2.1.1.2. Les types de risque | 45 |
| 2.1.2. <i>Santé et espace : quelles relations ?</i> | 46 |
| 2.1.2.1. Qu’est-ce que la santé ?..... | 46 |
| 2.1.2.2. Comment l’espace influence-t’il la santé ? | 48 |
| 2.1.3. <i>Le complexe pathogène</i> | 49 |
| 2.1.3.1. Définition du complexe pathogène..... | 49 |
| 2.1.3.2. Exemples de complexes pathogènes | 50 |
| 2.1.3.3. Complexe pathogène et répartition spatiale des maladies..... | 52 |
| 2.2. La zone sahélienne de Barkedji | 54 |
| 2.2.1. <i>Le milieu naturel</i> | 54 |
| 2.2.2. <i>Peuplement et activités rurales</i> | 59 |
| 2.2.2.1. Les peuls et le pastoralisme..... | 59 |
| 2.2.2.2. Les ethnies de cultivateurs..... | 62 |
| 2.2.3. <i>Ressources ou santé : cruel dilemme !</i> | 63 |
| 2.3. Le complexe pathogène de la FVR à Barkedji | 64 |
| 2.3.1. <i>Les hôtes</i> | 64 |
| 2.3.2. <i>Le virus</i> | 66 |
| 2.3.3. <i>Les vecteurs</i> | 66 |
| 2.3.4. <i>Bilan</i> | 69 |
| 2.4. Définition du risque de transmission de la FVR à Barkedji | 70 |
| Chapitre 3. Outils et méthodes de spatialisation du risque | 73 |
| 3.1. Panorama des méthodes d’analyse spatiale des problèmes de santé | 73 |
| 3.1.1. <i>Les outils d’analyse spatiale</i> | 73 |
| 3.1.1.1. Définitions | 74 |
| 3.1.1.2. Outils spatiaux et santé..... | 75 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1.2. Les études à petite échelle (niveau national, régional ou continental)..... | 79 |
| 3.1.2.1. Principe des études à petite échelle | 79 |
| 3.1.2.2. Exemple de la trypanosomose | 80 |
| 3.1.2.3. Exemple de la Fièvre de la Vallée du Rift en Afrique de l'Est et du Sud | 83 |
| 3.1.2.3.1. Etudes préliminaires : FVR et pluviométrie | 83 |
| 3.1.2.3.2. Modélisations de la FVR | 84 |
| 3.1.3. Les études à grande échelle (niveau local)..... | 89 |
| 3.1.3.1. Principe des études à grande échelle | 89 |
| 3.1.3.2. Exemples de travaux sur les maladies vectorielles au niveau local | 91 |
| 3.1.4. Bilan et critiques | 93 |
| 3.2. Protocole de recherche pour l'étude de la FVR à Barkedji..... | 95 |
| 3.2.1. Hypothèses préalables | 95 |
| 3.2.1.1. Ecologie vectorielle | 95 |
| 3.2.1.2. Comportement des troupeaux..... | 96 |
| 3.2.1.3. Règles du contact hôtes-vecteurs..... | 97 |
| 3.2.2. Etapes du protocole de recherche..... | 97 |

Deuxième partie. Spatialisation du risque de FVR à Barkedji...101

Chapitre 4. Organisation spatiale des hôtes de la FVR 102

| | |
|---|------------|
| 4.1. Matériels et méthodes..... | 102 |
| 4.1.1. Caractérisation de l'occupation du sol..... | 102 |
| 4.1.1.1. Acquisition des données satellitales | 102 |
| 4.1.1.2. Etablissement de la carte d'occupation du sol..... | 103 |
| 4.1.1.3. Division de la zone en clusters écologiques..... | 107 |
| 4.1.2. Modélisation spatiale de la densité de troupeaux..... | 109 |
| 4.1.2.1. Echantillonnage et acquisition des données | 109 |
| 4.1.2.1.1. Mise en œuvre des enquêtes | 109 |
| 4.1.2.1.2. Organisation des données | 111 |
| 4.1.2.2. Analyses statistiques descriptives des données | 111 |
| 4.1.2.2.1. Statistiques univariées | 111 |
| 4.1.2.2.2. Typologie des campements..... | 112 |
| 4.1.2.2.3. Analyse de la répartition spatiale des campements | 114 |
| 4.1.2.3. Prédiction de la densité de troupeaux en saison des pluies | 115 |

| | |
|---|------------|
| 4.1.2.3.1. Choix du modèle et des variables à tester..... | 115 |
| 4.1.2.3.2. Mise en œuvre de l'analyse discriminante..... | 115 |
| 4.2. Résultats..... | 116 |
| 4.2.1. <i>Cartographie des grands paysages.....</i> | <i>116</i> |
| 4.2.1.1. Carte d'occupation des sols | 116 |
| 4.2.1.2. Dynamique de la végétation | 118 |
| 4.2.1.3. Répartition des clusters écologiques | 119 |
| 4.2.2. <i>Répartition spatiale des campements recensés sur le terrain.....</i> | <i>121</i> |
| 4.2.2.1. Interprétation des enquêtes d'opinion | 121 |
| 4.2.2.2. Projection des campements aux différentes dates | 123 |
| 4.2.2.3. Distribution du processus ponctuel « campements » | 126 |
| 4.2.3. <i>Typologie des campements.....</i> | <i>127</i> |
| 4.2.3.1. Comparaison de la composition et de l'emplacement des campements sédentaires et transhumants, en 2001 et 2002 | 127 |
| 4.2.3.2. Les différents types de campements..... | 129 |
| 4.2.3.3. Bilan des analyses statistiques exploratoires..... | 134 |
| 4.2.4. <i>Prédiction de la densité de troupeaux sur l'ensemble de la zone d'étude.....</i> | <i>134</i> |
| 4.2.4.1. Paramètres du modèle | 134 |
| 4.2.4.2. Distribution spatiale de la densité de troupeaux sur la zone de Barkedji | 135 |
| 4.3. Discussion | 137 |
| 4.3.1. <i>Critiques du modèle</i> | <i>137</i> |
| 4.3.2. <i>Possibilités d'amélioration du modèle.....</i> | <i>138</i> |
| Chapitre 5. Caractérisation des mares temporaires et spatialisation de l'abondance relative des vecteurs..... | 141 |
| 5.1. Matériels et méthodes..... | 141 |
| 5.1.1. <i>Détection des mares temporaires et de la végétation à partir d'une série d'images SPOT5</i> | <i>141</i> |
| 5.1.1.1. Données satellitales et relevés de terrain..... | 141 |
| 5.1.1.2. Traitement des images SPOT | 143 |
| 5.1.1.2.1. Indications préalables | 143 |
| 5.1.1.2.2. Pré-traitements des images | 144 |
| 5.1.1.2.3. Classification supervisée | 146 |
| 5.1.1.2.4. Classification orientée-objet | 148 |

| | |
|--|------------|
| 5.1.2. <i>Caractérisation de la capacité des mares à favoriser le développement des vecteurs</i> | 152 |
| 5.1.2.1. Définition des règles de décision..... | 152 |
| 5.1.2.2. Mise en œuvre du modèle de décision | 153 |
| 5.1.3. <i>Estimation de l'abondance relative des vecteurs</i> | 154 |
| 5.2. Résultats | 156 |
| 5.2.1. <i>Cartographie des mares temporaires et de la végétation</i> | 156 |
| 5.2.1.1. Evolution des mares temporaires au cours de la saison des pluies | 156 |
| 5.2.1.2. Cartographie de la densité de végétation au 26/08/03..... | 159 |
| 5.2.2. <i>Attribution aux mares d'un indicateur C de développement des vecteurs</i> | 160 |
| 5.2.3. <i>Cartographie de l'abondance relative des vecteurs</i> | 163 |
| 5.3. Discussion | 165 |
| 5.3.1. <i>Détection des mares temporaires</i> | 165 |
| 5.3.2. <i>Détection de la végétation</i> | 166 |
| 5.3.3. <i>Calcul de l'indicateur C</i> | 166 |
| 5.3.4. <i>Estimation de l'abondance vectorielle</i> | 167 |
| Chapitre 6. Modélisation du risque relatif de transmission de la FVR... | 169 |
| 6.1. Matériel et méthodes | 169 |
| 6.1.1. <i>Rappel des hypothèses régissant le contact hôtes-vecteurs</i> | 169 |
| 6.1.2. <i>Mise en œuvre du modèle spatial</i> | 170 |
| 6.1.2.1. Calcul des variables dans le SIG | 170 |
| 6.1.2.2. Combinaison des variables dans le modèle | 170 |
| 6.1.2.3. Comparaison avec les données sérologiques disponibles | 172 |
| 6.2. Résultats | 173 |
| 6.2.1. <i>Spatialisation du risque de transmission de la FVR en saison des pluies</i> | 173 |
| 6.2.2. <i>Comparaison avec les données d'incidence sérologique</i> | 176 |
| 6.3. Discussion | 178 |
| 6.3.1. <i>Critiques du modèle proposé</i> | 178 |
| 6.3.2. <i>Perspectives</i> | 179 |
| 6.3.2.1. Comment améliorer le modèle ? | 179 |
| 6.3.2.1.1. Perspectives à court terme | 179 |
| 6.3.2.1.2. Perspectives à moyen terme..... | 181 |
| 6.3.2.2. Applications pratiques | 182 |

| | |
|---|------------|
| Conclusion générale..... | 185 |
| Bibliographie..... | 189 |
| Table des figures..... | 200 |
| Table des tableaux..... | 203 |
| Table des photographies..... | 204 |
| Glossaire..... | 205 |
| Liste des sigles et acronymes..... | 209 |
| Annexe 1 : Caractéristiques des capteurs de LandSat et de SPOT, par ordre chronologique décroissant..... | 210 |
| Annexe 2 : Métadonnées du Système d’Information Géographique..... | 211 |
| Annexe 3 : Scripts des analyses statistiques sous R..... | 212 |
| Annexe 4 : Questionnaires pour les enquêtes dans les campements..... | 217 |
| Annexe 5 : Publications..... | 220 |

Spatialisation du risque de transmission de la fièvre de la vallée du Rift en milieu agropastoral sahélien du Sénégal septentrional

Résumé

La fièvre de la vallée du Rift (FVR) est une arbovirose zoonotique émergente, touchant principalement l'homme et les ruminants. En l'absence de traitement spécifique et de moyen de prévention efficace, la prédiction des lieux à risque est un enjeu important de la lutte contre cette maladie. En milieu agropastoral sahélien du Sénégal, la période à risque est la saison des pluies, lorsque hôtes et vecteurs se rencontrent autour de mares temporairement inondées. La transmission du virus est complexe, car elle implique au moins deux espèces de vecteurs d'écologies différentes (*Aedes vexans* et *Culex poicilipes*) et des hôtes sédentaires ou nomades. Le virus est enzootique dans la communauté rurale de Barkedji. Afin d'y prédire le niveau de risque, défini comme l'intensité du contact hôtes-vecteurs en saison des pluies, nous avons mis en place un modèle prédictif de la répartition spatiale des troupeaux, à partir de données satellitales et de terrain. Puis les mares temporaires, gîtes des vecteurs, ont été détectées sur une série d'images SPOT5 et utilisées pour estimer l'abondance vectorielle relative. Ces données ont ensuite été synthétisées dans un modèle attribuant à chaque pixel de la zone d'étude un niveau de risque relatif. Les résultats obtenus sont encourageants, quoi que le modèle doive être amélioré et validé. L'intérêt majeur de notre travail est de présenter une approche méthodologique spécifique aux problématiques de santé-environnement, basée sur l'étude des interactions entre les éléments du cycle épidémiologique et le milieu. Nous espérons également qu'à moyen terme, il constituera une aide appréciable pour le réseau de surveillance sénégalais de la FVR.

Mots-clefs : fièvre de la vallée du Rift, télédétection, système d'information géographique, bétail, Sénégal, système agropastoral, vecteur de maladie, estimation du risque.

Spatial modelling of Rift valley fever transmission risk in an sahelian agropastoral area of northern Senegal

Summary

Rift valley fever (RVF) is an emerging zoonotic arbovirose, mainly affecting man and ruminants. Predicting high risk areas is an important stake of this disease's control, as neither specific treatments nor efficient prevention programs exist. In the agropastoral sahelian area of Senegal, the rainy season is the high-risk period, when hosts and vectors gather around temporary flooded ponds. Virus transmission mechanisms are complex, since they imply at least two different vector species with particular ecologies (*Aedes vexans* and *Culex poicilipes*), and sedentary or transhumant hosts. The Barkedji district is an enzootic area. In order to assess the risk level, defined as host-vector contact intensity during the rainy season, we set up a model predicting livestock herds spatial distribution, from satellite and field data. Then temporary ponds, the vectors' biotope, were detected on a series of SPOT5 images and used to assess relative vector abundance. Those data were then assembled in a model, allotting to each pixel of the study zone a relative risk level, accounting to herds density, vector abundance and vegetation cover. Our results are encouraging, although the model has to be improved and validated. The main interest of our study is to present a specific methodological approach, applied to health-environment matters and based on the study of the interactions between the epidemiological cycle elements and the environment. We also hope that, in a close future, it will become helpful to the senegalese RVF monitoring network.

Keywords : Rift valley fever, remote-sensing, geographical information system, livestock, Senegal, agropastoral systems, disease vector, risk evaluation.

Laboratoire National d'Elevage et de Recherches Vétérinaires
Institut Sénégalais de Recherches Agricoles
BP 2057
Dakar-Hann
SENEGAL

Centre IRD d'Orléans, US140
5 rue du Carbone
45072 Orléans Cedex 2
FRANCE

