

Epidémiologie et modélisation : Exemple de la fièvre de la vallée du Rift au Sénégal

Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Présenté par
Jérémy Bouyer

Remerciements

A Monsieur le Professeur Patrice Massip,
de l'université Paul-Sabatier de Toulouse,
qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de notre jury de thèse,
hommage très respectueux.

A Monsieur le Professeur Jean Chantal,
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse,
qui a accepté de corriger ce travail,
qu'il trouve ici l'expression de notre profond respect.

A Madame Frédérique Messud-Petit,
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse,
qui a accepté de participer à notre jury de thèse,
qu'elle trouve ici l'expression de notre sincère reconnaissance.

A Monsieur le Professeur Philippe Sabatier,
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon,
pour son aide et ses précieuses explications en modélisation,
qu'il trouve ici l'expression de mes sentiments respectueux.

A Messieurs M. Konté, M. Ndiaye, A. Diaïtté, D. Sow, R. Maboudou,
de l'Institut Sénégalais de Recherche en Agriculture,
avec qui j'ai eu le plaisir de travailler et qui ont su me conseiller
et m'aider à découvrir les charmes du travail au Sénégal,
qu'ils trouvent ici l'expression de ma grande gratitude
pour l'accueil chaleureux qu'ils m'ont réservé.

A Messieurs R. Coly, M. Lo et B. Sall,
de la Direction de l'élevage
ainsi que les agents vétérinaires, **Messieurs T. Manga et A. Fall,**
pour leur hospitalité et leur connaissance du terrain, sans laquelle rien n'eut été possible,
qu'ils trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements.

A Messieurs A. Ickowick, I. Touré et P. Hendrikx,
Du Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le
Développement,
que je remercie beaucoup pour leurs conseils et leur aide,
qu'ils trouvent ici l'expression de mon agréable souvenir.

A Monsieur Renaud Lancelot,
du Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le
Développement,
qui a été pour moi plus qu'un maître de stage et que je tiens à remercier tout
particulièrement, non seulement pour l'attention, les conseils et l'aide qu'il m'a apportés
lors de mon séjour au Sénégal mais aussi dans la rédaction de ce document,
qu'il trouve, ici, l'expression de ma profonde gratitude et de mon amitié sincère.

A Mes parents,

pour leur éducation, pour les études qu'ils m'ont permis d'effectuer
et surtout pour leur soutien permanent, même à distance,
qu'ils trouvent ici le témoignage de ma très grande reconnaissance.

A ma femme,

qui me suit et m'encourage dans tous mes projets,
qu'elle trouve ici l'expression de mes sentiments les plus profonds.

A mes frères et sœurs,

pour leur amitié et leur complicité.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

Table des matières

<i>Table des illustrations</i>	7
<i>Introduction</i>	9
<i>Première partie : Présentation bibliographique de la Fièvre de la vallée du Rift au Sénégal</i>	11
Chapitre I Généralités : le virus et la maladie	11
I.1 Définition	11
I.2 Historique et Répartition géographique	11
I.3 Virologie	12
I.3.1 Description et classification de l'agent pathogène	12
I.3.2 Structure physico-chimique	12
I.3.3 Pouvoir antigénique et immunogène	13
I.3.4 Pouvoir pathogène	13
I.3.5 Résistance	13
I.4 Manifestations	13
I.4.1 Espèces affectées	13
I.4.2 Pathogénie	14
I.4.3 Symptômes	14
I.4.4 Lésions	15
I.5 Diagnostic	15
I.5.1 Diagnostic clinique et épidémiologique	15
I.5.2 Diagnostic expérimental	15
I.6 Lutte	16
Chapitre II Epidémiologie	17
II.1 Epidémiologie moléculaire	17
II.2 Epidémiologie descriptive	18
II.3 Epidémiologie analytique	19
II.3.1 Modes de transmission	19
II.3.2 Vecteurs	20
II.3.3 Réservoirs	23
II.4 Conséquences pour la modélisation	24
II.4.1 Cas de l'Afrique de l'Est	24
II.4.2 Cas de l'Afrique de l'Ouest	26
<i>Deuxième partie : Partie expérimentale : Modélisation de la FVR au Sénégal</i>	<i>28</i>
Chapitre I Objectifs	28
Chapitre II Description des modèles développés	28
II.1 Modèle intra-troupeau	28
II.1.1 Modèle CEA	28
II.1.2 Modèle INRA-ENVL	31
II.2 Spatialisation	32
Chapitre III Enquêtes de terrain	33
III.1 Besoins en informations	34
III.1.1 Informations zootechniques et sanitaires	34
III.1.2 Informations entomologiques	34
III.1.3 Données environnementales	35
III.2 Protocoles d'enquêtes	35
III.2.1 Entomologie	35
III.2.2 Choix des mares étudiées	38
III.2.3 Cartographie	39

III.2.4	Enquêtes démographiques et zootechniques	39
III.2.5	Epidémiosurveillance	41
III.2.6	Relevés climatiques et hydrologiques	42
Chapitre IV	Gestion des données	42
IV.1	Modèle conceptuel des données	42
IV.2	Structure de la base de données	43
IV.2.1	Table T_RecEch : recensement des troupeaux dans les unités spatiales échantillonnées	43
IV.2.2	Table T_ProvTroup : localisation du parc de nuit et provenance des troupeaux enquêtés	44
IV.2.3	Table T_Mare : description de la localisation des mares	46
IV.2.4	Table T_DescriMare : description physique des mares	46
IV.2.5	Table T_PhytoMare : description phytosociologique des mares	47
IV.2.6	Table T_PatuDate : description physique des pâturages	48
IV.2.7	Table T_PhytoPatu : description phytosociologique des pâturages	49
IV.2.8	Table T_Piege : description des séance de piégeage de moustiques	49
IV.2.9	Table T_Moustique : description des moustiques capturés lors des séance de piégeage	50
Chapitre V	Résultats préliminaires	51
V.1	Cartographie	51
V.2	Hydrologie et climatologie	53
V.3	Données phyto-sociologiques	57
V.4	Enquêtes « troupeaux »	58
V.4.1	Enquête préliminaire (10 juin 2001)	58
V.4.2	Enquête du 20 au 30 juillet 2001	58
V.5	Entomologie	62
Chapitre VI	Discussion : Perspectives et conclusions	62
VI.1	Cartographie	62
VI.2	Enquêtes troupeaux	62
VI.3	Entomologie	63
VI.4	Hydrologie et climatologie	63
VI.5	Données phyto-sociologiques	64
VI.6	Intérêts et contraintes de la modélisation	64
Conclusion		65
Bibliographie		66
Annexes : fiches d'enquêtes		69
❖	Fiche Lieu de Résidence	69
❖	Fiche Troupeau	70
❖	Fiche Pâturages	71
❖	Fiche Mares	73
❖	Fiche Entomologie	74
Résumé		75
Abstract		75

Remarque : Pour des raisons de lisibilité, la table des matières ne présente que les quatre premiers niveaux d'indentation.

Table des illustrations

❖ Figures :

<i>Fig. 1) Modes de transmission probables du virus de la FVR. Les lignes épaisses représentent des transferts viraux alors que les lignes fines représentent les cycles biologiques, sans rapport avec le virus. TOT = transmission trans-ovarienne. [Wilson, 1994].</i>	20
<i>Fig. 2) Schéma du modèle INRA - ENVL</i>	31
<i>Fig. 3) Modèle à deux dimensions sans diffusion distante ($\beta = 0$)</i>	33
<i>Fig. 4) Modèle à 2 dimensions avec diffusion distante ($\beta = 0.1$)</i>	33
<i>Fig. 5) Piège à émergence utilisé dans l'étude de la FVR au Sénégal</i>	36
<i>Fig. 6) Modèle conceptuel des données global pour la gestion des informations de l'enquête sur la FVR à Barkédji pendant l'hivernage 2001</i>	43
<i>Fig. 7) Modèle conceptuel des données de la table T_RecEch</i>	44
<i>Fig. 8) Modèle conceptuel des données de la table T_ProvTroup</i>	45
<i>Fig. 9) Modèle conceptuel des données de la table T_Mare</i>	46
<i>Fig. 10) Modèle conceptuel des données de la table T_DescriMare</i>	46
<i>Fig. 11) Modèle conceptuel des données de la table T_PhytoMare</i>	47
<i>Fig. 12) Modèle conceptuel des données de la table T_PatuDate</i>	48
<i>Fig. 13) Modèle conceptuel des données de la table T_PhytoPatu</i>	49
<i>Fig. 14) Modèle conceptuel des données de la table T_Piege</i>	50
<i>Fig. 15) Modèle conceptuel des données de la table T_Moustique</i>	51

❖ Graphiques :

<i>Graph. 1) Séroprévalence (IgG) contre le virus de la FVR chez les petits ruminants de la vallée du Sénégal (Dagana, Matam, et Podor), de 1988 à 1995 [Thiongane, Zeller et al., 1994].</i>	19
<i>Graph. 2) Evolution des anomalies SOI de janvier 1950 à mai 1998 et périodes d'activité de la FVR au Kenya. Les valeurs SOI sont présentées comme des déviations standardisées par rapport à une moyenne calculée entre 1951 et 1980.</i>	25
<i>Graph. 3) Evolution des anomalies SST et SOI de janvier 1982 à mai 1998.</i>	25
<i>Graph. 4) Variation du NDVI et activité FVR (\downarrow) de 1987 à 2000 en Mauritanie (Hodh El Gharbi).</i>	26
<i>Graph. 5) Présentation des 4 profils d'infection de FVR obtenus par le modèle.</i>	30
<i>Graph. 6) Abondance mensuelle des populations d'A. vexans et de C. poicilipes, Barkédji, Sénégal, 1991-1996 d'après [Fontenille, Traore-Lamizana et al., 1998]</i>	31
<i>Graph. 7) Evolution du taux d'animaux infectés I(t) en fonction du taux d'animaux sensibles sur une période de 5 ans.</i>	32
<i>Graph. 8) Evolution du niveau de la mare de Barkédji (Mous1) en fonction de la pluviométrie</i>	55
<i>Graph. 9) Evolution du niveau de la mare de Mous2 en fonction de la pluviométrie</i>	56
<i>Graph. 10) Régression polynomiale de degré 2 de la surface d'une mare selon sa hauteur</i>	57
<i>Graph. 11) Fréquence des espèces végétales ligneuses dans la région d'étude</i>	58

❖ Tableaux :

Tab. 1) Isolements du virus de la FVR en Afrique de l'Ouest [Fontenille, Traore-Lamizana et al., 1998]	21
Tab. 2) Isolements du virus de la FVR chez les insectes au Sénégal de 1991 à 1996, [Fontenille, Traore-Lamizana et al., 1998].	22
Tab. 3) Abondance et densité des populations de moustiques à Diawara (Vallée du Sénégal) en novembre 1998 [Diallo, 2000].	23
Tab. 4) Séroprévalence de la FVR chez les rongeurs au Sénégal [Gora, Thiongane et al., 2000].	24
Tab. 5) Centres des échantillons retenus pour l'étude de la FVR à Barkédji (l'échantillon est défini par un cercle de 5 km de rayon autour du centre).	41
Tab. 6) Structure de la table T_RecEch	44
Tab. 7) Structure de la table T_ProvTroup	45
Tab. 8) Structure de la table T_Mare	46
Tab. 9) Structure de la table T_DescriMare	47
Tab. 10) Structure de la table T_PhytoMare	47
Tab. 11) Structure de la table T_PatuDate	48
Tab. 12) Structure de la table T_PhytoPatu	49
Tab. 13) Structure de la table T_Piege	50
Tab. 14) Structure de la table T_Moustique	51

❖ Photographies :

Photo. 1) Disposition des pièges à émergence autour d'une mare	37
Photo. 2) Pose d'un piège CDC au bord de la mare de Furdu	37
Photo. 3) Identification et comptage des moustiques capturés	38

❖ Cartes :

Carte 1) Localisation des mares suivies à Barkédji	39
Carte 2) Echantillonnage de la zone de Barkédji pour l'étude des mouvements de troupeaux pendant la saison des pluies 2001	40
Carte 3) Carte d'occupation des sols de la région de Barkédji	52
Carte 4) Pluviométrie de la 2 ^{ème} décade de juin 2001 au Sénégal	53
Carte 5) Pluviométrie de la 3 ^{ème} décade de juin 2001 au Sénégal	53
Carte 6) Pluviométrie de la 1 ^{ère} décade de juillet 2001 au Sénégal	54
Carte 7) Pluviométrie de la 2 ^{ème} décade du mois de juillet 2001 au Sénégal	54
Carte 8) Pluviométrie de la 3 ^{ème} décade de juillet 2001 au Sénégal	55
Carte 9) Représentation de 4 surfaces de la mare de Barkédji à des dates différentes	57
Carte 10) Densité humaine dans les échantillons, enquête du 20 au 30 juillet 2001	59
Carte 11) Densité de troupeaux de bovins, enquête du 20 au 30 juillet 2001	59
Carte 12) Densité de troupeaux de petits ruminants, enquête du 20 au 30 juillet 2001	60
Carte 13) Utilisation de l'espace par les troupeaux situés dans les échantillon entre le 20 et le 30 juillet 2001, exemple des petits ruminants	61
Carte 14) Trajets de transhumance des troupeaux enquêtés dans les échantillon de la zone d'étude de Barkédji, 20 au 30 juillet 2001	61

Introduction

Ce travail est constitué d'une recherche bibliographique et d'une partie expérimentale sur l'étude de l'épidémiologie et de la modélisation d'une maladie émergente de grande importance économique et médicale : la Fièvre de la Vallée du Rift. La partie expérimentale a été réalisée au cours d'un stage de CEAV « Pathologie en régions chaudes » de 4 mois à Dakar.

Ce stage s'inscrit dans le cadre du projet Emercase sur la fièvre de la vallée du Rift (FVR). Il s'agit d'un programme de Recherche / Développement coordonné par l'ENVL¹ (P. Sabatier). Le partenaire principal au Sénégal est la Direction de l'Élevage, les aspects recherche de terrain ayant été confiés à l'ISRA² et au CIRAD³. D'autres équipes françaises sont impliquées dans le projet, notamment au CEA (modélisation) et au CNES (filiales MEDIAS-France : environnement et imagerie spatiale et MEDES : réseaux informatiques). Ce projet a deux grands objectifs au Sénégal :

- le renforcement du réseau d'épidémiosurveillance de la FVR ;
- la modélisation de l'occurrence et de la diffusion de la FVR chez les ruminants, dans le but de mettre au point un outil d'aide à la décision pour les programmes de lutte (évaluation du niveau de risque, test de stratégies de lutte).

L'épidémiosurveillance vétérinaire de la FVR est mise en œuvre par la Direction de l'élevage avec l'appui technique de l'ISRA-LNERV⁴ et de l'Institut Pasteur de Dakar. Le dispositif de terrain comporte une douzaine de postes vétérinaires (PV) répartis en Casamance, dans le Ferlo et la vallée du fleuve Sénégal.

Ces Postes vétérinaires :

- réalisent les prélèvements sanguins nécessaires à un suivi sérologique de troupeaux sentinelles (recherche active de circulation occulte du virus),
- signalent toute suspicion clinique de FVR (avortements des femelles et mortalité néonatale des ruminants) et font les prélèvements nécessaires au diagnostic expérimental,
- sensibilisent les éleveurs à l'aide de matériel de communication (réunions, affiches, etc.).

Le service de virologie de l'ISRA-LNERV (Dr Y. Thiongane) effectue les analyses sérologiques et confie à l'Institut Pasteur de Dakar les isolations de virus.

Le projet Emercase a récemment équipé la Direction de l'élevage et les services régionaux en matériel informatique et de communication pour standardiser les déclarations de suspicions de foyer et accélérer la circulation de l'information. Tous les chefs de postes ont été équipés d'assistants numériques personnels (Palm Pilot ®) qui permettent la transmission rapide de fiches de suspicion, de fiches foyers et de fiches de prélèvement via un réseau sécurisé connecté au réseau téléphonique. Ils sont également

¹ ENVL : Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon

² ISRA : Institut Sénégalais de recherches agricoles.

³ CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement.

⁴ LNERV : Laboratoire national d'études et de recherches vétérinaires.

équipés de GPS¹ et les coordonnées des élevages concernés par une suspicion sont précisées sur les fiches.

En plus d'un appui logistique et technique la présence permanente de ces chefs de PV facilite les rapports avec les éleveurs, les autorités administratives et traditionnelles.

Afin d'avoir une idée plus dynamique et synchrone des moyens de survie et / ou de dispersion du virus dans les périodes inter-épidémiques et le cas échéant, pendant les poussées épidémiques, la prise en compte des facteurs environnementaux est incontournable.

En effet leur rôle sur la distribution et l'abondance des vecteurs et / ou réservoirs potentiels est encore mal connu alors que nous allons voir que ces paramètres sont fondamentaux pour la modélisation de cette arbovirose.

En collaboration avec des équipes de climatologues, entomologistes, hydrologues et agro-pastoralistes, nous avons décidé la mise en commun d'informations très variées. Cette mise en commun se fera par l'intermédiaire de la constitution d'une base de données relationnelles et d'un Système d'information géographique (SIG), ou la superposition des couches d'information est un outil précieux pour la mise en évidence d'indices de modélisation.

En effet, la superposition de couches variées au sein d'un SIG dynamique permet de mettre en évidence des périodes et des situations à risques, où se conjuguent différents facteurs de risques en un même point et au même moment. Parmi ces couches d'information, nous représenterons entre autre les densités animales et humaines, les mouvements animaux, la qualité des pâturages, les points d'eau utilisés, la végétation et les taux de contaminations des vecteurs et du bétail.

Dans un premier temps, nous présentons la FVR au Sénégal , en s'intéressant plus particulièrement à l'aspect épidémiologie et modélisation. Nous présentons ensuite les enquêtes de terrain destinées à mesurer certains paramètres du modèle : interfaces moustiques – ruminants (où, quand et comment peut se produire l'infection du bétail) et diffusion spatiale de la maladie (mouvements des troupeaux à petite échelle : de mare à mare et à grande échelle : transhumance).

¹ GPS : Global Positionning System.

Première partie : Présentation bibliographique de la Fièvre de la vallée du Rift au Sénégal

Chapitre I Généralités : le virus et la maladie

I.1 Définition

La fièvre de la vallée du Rift est une maladie infectieuse, commune à l'homme et aux animaux, transmise par des arthropodes et due à un virus de la famille des *Bunyaviridae*, genre *Phlebovirus*. Il s'agit donc d'une zoonose et d'une arbovirose. Maladie à déclaration obligatoire, elle est inscrite sur la liste A de l'OIE. Elle est également connue sous le nom d'hépatite enzootique du mouton, en raison des lésions caractéristiques d'hépatite observées et de la sensibilité particulière des ovins à cette infection.

Longtemps considérée comme affection relativement secondaire, elle a suscité récemment l'intérêt des vétérinaires et des médecins en raison des flambées épizootiques survenues au Soudan, en Egypte, en Mauritanie et au Sénégal, où elle s'est révélée une zoonose majeure [IEMVT-CIRAD, 12/1990].

I.2 Historique et Répartition géographique

Elle fut décrite pour la première fois en 1931 par Montgomery au Kenya, dans la région de la vallée du Rift, près du lac de Naivasha.

Elle fut responsable de nombreuses épizooties limitées au bétail et à l'Afrique subsaharienne jusqu' en 1976. Ces épizooties, de grande importance économique (100 000 moutons tués en Afrique du Sud en 1951, 60 000 avortements au Zimbabwe en 1978), atteignaient principalement l'Afrique de l'Est et du Sud. Elle était alors considérée comme peu dangereuse pour l'homme.

En 1976, le virus passe des régions d'altitude aux grandes vallées fluviales, en commençant par le Soudan. En 1977, l'Egypte fut la première grande victime de la FVR, au plan humain. L'épizootie débuta au niveau du bétail en avril dans la Province d'Aswan, probablement liée aux importations régulières de bétail et ou à des transferts de moustiques infectés par le vent à partir du Soudan, alors infecté par la maladie [Abd El-Rahim, Abd El-Hakim et al., 1999]. Les premiers cas humains furent signalés en octobre dans la province de Shargiya, au nord-est du Caire. Dans les semaines suivantes, l'épidémie a progressé le long du canal d'Ismailiya qui rejoint le Nil au niveau du Caire.

Des études sérologiques rétrospectives ont permis de retracer l'évolution de la maladie, qui est arrivée du Soudan en descendant le Nil. La maladie animale a précédé l'épidémie, et les cas humains ont éclaté au cours de l'été, moment le plus favorable à la multiplication des vecteurs. En tout, elle aura touché au moins un million de personnes et provoqué 2000 cas cliniques dont 600 fatals [Lefevre, 1997]. Depuis, la FVR persiste en Egypte sous forme d'enzootie, avec des résurgences régulières chez le bétail (1978, 1993 et 1997) et quelques cas humains.

La communauté scientifique considéra dès lors la FVR comme une dangereuse zoonose, et les travaux se multiplièrent. Mais la détection de la maladie à bas bruit dans de nombreuses localités et l'absence de cas cliniques humains, du moins détectés et déclarés, pendant une dizaine d'années conduisit à un relâchement de la surveillance.

En 1979, le virus de la FVR fut mis en évidence à Madagascar. Il n'y eut aucun impact sur la santé humaine ou animale avant 1990 et 1991, où il provoqua plusieurs épizooties marquées par des avortements massifs chez les bovins.

C'est dans ce contexte que survint l'épidémie de 1987 en Mauritanie. Le premier cas humain fut détecté à l'hôpital de Rosso en octobre. L'incidence augmenta alors rapidement dans les semaines qui suivirent et les pertes humaines en Mauritanie furent évaluées à 224 sur 1264 cas [Walsh, 06/1988]. La maladie avait été détectée de longue date dans la région par des enquêtes sérologiques qui montraient une augmentation de la prévalence en anticorps, et notamment en IgM dans le triangle Kaédi – Sélibaby - Aïoun El Atrouss. De plus, la réunion de nombreux facteurs favorisant la pullulation des insectes vecteurs (en particulier la mise en eau du barrage de Diama en août) avait amené les chercheurs à annoncer le risque d'épidémie. Cette épidémie est à l'origine d'un vaste système de surveillance établi dans la région, dans lequel s'inscrit le projet Emercase.

Une seconde épidémie a touché le sud et le sud-ouest de la Mauritanie en septembre 1998, provoquant de nombreux avortements parmi les troupeaux, et le décès officiel de six personnes, enregistrés à l'hôpital d'Aïoun El Atrouss.

Récemment, les épidémies qui ont touché l'Arabie Saoudite et le Yémen en Août et Novembre 2000, provoquant 516 cas sévères dont 87 morts prouvent que la FVR peut sortir des territoires africains et représente une menace majeure pour un grand nombre de pays du Moyen-Orient et de la péninsule arabo-persique, voire d'Europe, d'autant que le nombre d'espèces d'insectes potentiellement vecteurs est très important [CDC., 11/2000].

I.3 Virologie

I.3.1 Description et classification de l'agent pathogène

Les particules virales, de 90 à 120 nm de diamètre, sont sphériques, à symétrie hélicoïdale et pourvus d'une enveloppe lipidique d'origine cellulaire portant à sa surface des projections de 5 à 10 nm formées de deux glycoprotéines (G1 et G2). C'est un virus à ARN segmenté composé de 3 trois ARN simple brin de polarité négative. Ses caractéristiques physico-chimiques et antigéniques le placent dans le genre *Phlebovirus*, de la famille des *Bunyaviridae*.

I.3.2 Structure physico-chimique

Les trois molécules d'ARN sont dénommées selon leur taille relative, L, M et S pour *large, medium et small*. Chaque ARN se trouve sous forme de ribonucléoprotéine de forme circulaire (RNP), où sont associées de nombreuses copies de la protéine N et quelques copies de la protéine L qui a une activité d'ARN-polymérase ARN-dépendante [Prehaud and Bouloy, 07-08/1998]. Les séquences aux extrémités 3' et 5' sont complémentaires et peuvent s'apparier de façon stable en « queue de poêle » et sont communes à tous les *Phlebovirus*. Le segment L code pour la polymérase L, le segment M pour une polyprotéine qui subit un clivage co-translationnel pour donner les deux protéines d'enveloppe (G1 et G2) ainsi que deux protéines non structurales. Le segment S code pour la nucléoprotéine et pour une protéine non structurales (NSs). Pour une raison encore inconnue, la protéine NSs s'accumule sous forme phosphorylée dans le noyau alors que tout le cycle a lieu dans le cytoplasme, ce qui est observable au microscope électronique. Elle est également présente dans le cytoplasme, associée à la protéine N des RNP intracellulaires. Elle pourrait intervenir soit dans l'encapsidation, soit comme cofacteur modifiant l'activité de la polymérase de transcriptase en réplique. Les glycoprotéines G1 et G2 (respectivement 65 et 56 kDA) sont responsables de la fixation du virus par reconnaissance de récepteurs existant à la surface des cellules sensibles.

I.3.3 Pouvoir antigénique et immunogène

Tous les souches virales isolées sont regroupées au sein d'un même type antigénique, y compris celles qui ne présentent pas d'activité hémagglutinante (Lunyo, Ouganda, 1955 et Zinga, RCA, 1969). Les protéines G1 et G2, responsables de l'activité hémagglutinante du virus, sont la cible de la défense immunitaire humorale, les anticorps protecteurs étant dirigés contre elles. Ces anticorps, ainsi que ceux détectés par inhibition de l'hémagglutination ou l'ELISA (IgG) persistent longtemps alors que les anticorps fixant le complément (IgM), induits par la protéine N, diminuent très vite.

Dans les formes suraiguës et aiguës de la maladie, la réponse immune n'a pas le temps d'apparaître avant la destruction massive des organes lymphoïdes et du foie. Chez les animaux qui guérissent, les anticorps de classe M (IgM) apparaissent les premiers, dès le 3^{ème} jour après l'infection, mais ils disparaissent en 2 mois chez 75% des bovins lors de l'infection naturelle et chez à peu près tous les animaux en 6 mois. En revanche, les anticorps de classe G (IgG), durent au moins 4 à 5 ans chez les ovins et bovins, et vraisemblablement toute la vie de l'animal. Si un animal possédant des IgG est ré-infecté, des Igm apparaissent à nouveau mais sont de plus courte durée ce qui présente un intérêt pour le dépistage des infections récentes lors de suivis sérologiques.

I.3.4 Pouvoir pathogène

Il est très variable que ce soit qualitativement ou quantitativement, ce qui peut en partie expliquer les différences de gravité observées entre les épidémies d'Afrique australe et les épidémies égyptienne et mauritanienne. D'autres facteurs interviennent, comme des facteurs écologiques, ou la présence de maladies intercurrentes comme la bilharziose.

On distingue qualitativement les souches en fonction des organes infectés et des lésions produites. Ainsi, les souches d'Afrique australe sont dites pantropes, avec en premier lieu un viscérotropisme marqué tandis que d'autres souches (souche Lunyo) sont prioritairement neurotropes.

I.3.5 Résistance

Le virus est sensible aux solvants des lipides (éther, chloroforme). Il est également inactivé par les désinfectants usuels (formol, β -propionolactone, désochylate de soude, solution forte d'hypochlorite de sodium avec chlore résiduel dépassant 5 ppm). Il est stable pour les pH compris entre 6.2 et 8. Il résiste relativement bien à la chaleur et il faut appliquer une température de 56°C pendant 3H pour l'inactiver. Il survit 8 mois à +4°C quand il est stocké en suspension dans du sang ou du sérum. Il se conserve très bien aux températures faibles : un mois à -20°C et un an à -40°C.

Le virus résiste bien dans le milieu extérieur et il a été reporté une contamination de personnes ayant travaillé dans des locaux (pourtant nettoyés) où des animaux infectés avaient séjourné trois mois auparavant.

I.4 Manifestations

I.4.1 Espèces affectées

Parmi les espèces domestiques, les petits ruminants puis les bovins sont les plus sensibles. Le cheval, l'âne, le porc, le chien et le chat ne font qu'une virémie transitoire avec séroconversion et sont considérés comme des culs de sac épidémiologiques. Par contre, les chiots et les chatons âgés de moins d'une semaine sont très sensibles.

Parmi les espèces sauvages africaines, les ruminants manifestent un syndrome fruste alors qu'on ne note qu'une virémie passagère chez les singes. Chez les rongeurs, la sensibilité est variable selon les espèces. Leur rôle de réservoir de virus reste controversé.

I.4.2 Pathogénie

Le virus se réplique au site d'inoculation puis infecte différents organes cibles comme la rate, le foie et le cerveau. Ces organes peuvent soit guérir grâce à la réponse immunitaire spécifique ou non-spécifique de l'hôte, soit subir des effets lytiques d'origine virale ou immunopathologiques. Cette contamination a lieu par voie sanguine sous forme d'une virémie primaire, comme c'est le cas pour la plupart des autres arboviroses mais celle-ci est indétectable. Il est également possible qu'elle ait lieu via le drainage lymphatique, le virus se multipliant dans les nœuds lymphatiques satellites avant de rejoindre la circulation sanguine. La virémie détectable correspond à un relargage secondaire de virus dans le sang suite à une multiplication massive dans les organes cibles. Dans ce cadre général, la durée et la localisation des différentes phases, ainsi que les effets immunopathologiques, dépendent de l'espèce et même de l'individu ce qui entraîne une expression clinique et lésionnelle variable de la maladie.

I.4.3 Symptômes

Les symptômes varient en fonction de l'âge et de l'espèce atteinte avec toutefois une certaine uniformité interspécifique.

Chez l'homme, la période d'incubation est de 2 à 6 j, au bout desquels se développe un syndrome grippal, avec installation brutale de fièvre, céphalées, myalgies et douleurs dorsales. Une raideur du cou, une photophobie et des vomissements peuvent apparaître. On peut alors confondre la FVR avec une méningite. Ces symptômes durent en général 4 à 7 j. Dans un petit nombre de cas, cette phase peut s'aggraver par trois autres formes :

- pathologie oculaire avec lésions rétinienne en 1 à 3 semaines après les premiers symptômes dans 0.5% des cas. Si la tache jaune est atteinte, une baisse permanente de l'acuité visuelle peut survenir. La létalité est faible pour cette forme.
- méningo-encéphalite dans moins de 1% des cas, entre 1 et 3 semaines après le début des symptômes également. La létalité est rare chez les patients atteints uniquement par cette forme.
- fièvre hémorragique 2 à 4 j après l'apparition de la maladie dans moins de 1% des cas. On constate alors des signes d'atteinte hépatique grave avec ictère et phénomènes hémorragiques : hématomèse, méléna, purpura, saignements des gencives. La virémie peut alors durer 10 j et la létalité s'élève à 50%.

Chez les ovins, on distingue quatre formes :

- La forme suraiguë chez les agneaux nouveaux nés, où l'incubation est courte (12 à 72 h) et les symptômes peu évocateurs en raison de la rapidité d'évolution : forte hyperthermie, inappétence, faiblesse, douleurs abdominales, décubitus et mort en 24 h. La mortalité atteint 90%.
- La forme aiguë chez les adultes et les jeunes de plus de trois semaines, dont l'incubation est de 2 à 5 j et qui se traduit par des symptômes plus caractéristiques apparaissant peu de temps avant la mort de l'animal : forte hyperthermie, jetage mucopurulent strié de sang, vomissement, diarrhée putride hémorragique et parfois ictère. La mortalité est de 20 à 30%.
- Les formes subaiguës se traduisent par des avortements nombreux dans les troupeaux deux semaines après l'infection.

- Les formes inapparentes sont vraisemblablement fréquentes étant donné le grand nombre de séroconversions n'ayant donné lieu à aucun symptôme.

Chez les caprins, les chevreaux présentent une maladie analogue à celle des agneaux et un même taux de mortalité. En revanche, les adultes ne font qu'une forme subaiguë rarement mortelle. Par contre, le taux d'avortements peut atteindre 80%. Il faut toutefois mettre en avant des différences en fonction des souches virales comme le suggère l'épizootie de 1973 au Soudan où la mortalité chez les adultes a atteint 50%.

Chez les bovins, la maladie évolue différemment selon l'âge des animaux. Chez les veaux la forme aiguë est fréquente avec hyperthermie, faiblesse générale, refus de se déplacer, diarrhée fétide et souvent polypnée et dyspnée. Chez les adultes l'avortement est souvent le seul symptôme mais peut toucher 80 à 90% des femelles gestantes. Lorsqu'ils sont atteints par une forme aiguë, les bovins adultes présentent de l'hyperthermie pendant 2 à 4 j, de l'anorexie, du jetage mucopurulent, une diarrhée hémorragique. Quand la maladie évolue sur une à deux semaines, un ictère net apparaît. La mortalité varie de 10 à 70% chez les jeunes mais dépasse rarement 10% chez les adultes.

Chez les dromadaires, on observe des avortements sans autre signe clinique. Les chevaux, les chiens et les chats sont réceptifs (virémie transitoire) mais ne présentent aucun symptôme. Chez les rongeurs infectés expérimentalement, la mortalité est variable en fonction des espèces : 95 à 100% chez la souris blanche en fonction de la souche virale, alors que des rongeurs sauvages sénégalais tels que *Arvicantis niloticus* et *Mastomys erythroleucus* semblent insensibles à la maladie avec une simple séroconversion dans seulement 25% des cas [Diop, Y. et al., 2000].

I.4.4 Lésions

Dans le cas aigu, la principale lésion observée chez toutes les espèces est une nécrose du parenchyme hépatique qui apparaît parsemé de petits foyers de nécrose grisâtres de 1 à 2 mm de diamètre. Ils sont parfois difficiles à observer en raison de la décoloration de l'organe qui est hypertrophié. Chez les adultes, le foie est congestionné, friable, de couleur orange ou marron avec présence de pétéchies sous-capsulaires. La muqueuse de la vésicule biliaire est souvent œdémateuse et hémorragique. Des pétéchies sous-capsulaires sont visibles à la surface de la rate mais pas en profondeur. Les organes du tractus digestif, en particulier la caillette et l'intestin grêle, sont le siège de lésions d'œdème ou d'hémorragies (entérite hémorragique). L'ictère de la carcasse n'est visible que lorsque les animaux ont survécu suffisamment longtemps et n'est présent que chez 10% des agneaux atteints d'une forme suraiguë.

I.5 Diagnostic

I.5.1 Diagnostic clinique et épidémiologique

Il est basé sur l'association des éléments suivants : épizootie avec avortements, mortalités néonatales élevées, lésions hépatiques chez les petits ruminants et les bovins (les ovins étant les plus affectés) dans une région à forte pression vectorielle éventuellement associée à un syndrome pseudo-grippal chez l'homme en contact avec ce cheptel. Un diagnostic différentiel doit être fait d'avec la maladie de Wesselsbron.

I.5.2 Diagnostic expérimental

Les prélèvements de choix sont :

- le sang entier, la rate, le foie obtenus pendant la phase fébrile et conservés à +4°C ou congelés pour la virologie;

- des sérums couplés ou du sang entier obtenus pendant l'acmé thermique et la phase de convalescence et conservés à +4°C ou congelés pour la sérologie;
- le foie conservé dans du formol à 10% pour l'histopathologie.

Les tissus des animaux infectés présentent un risque élevé de contamination et des mesures de précaution drastiques doivent être prises pour leur prélèvement et leur transport, effectué dans des paquets aux normes internationales afin d'éviter tout risque de diffusion du virus. Les prélèvements sont envoyés à des laboratoires spécialisés et si possible aux centres collaborateurs de l'OMS : Institut Pasteur de Dakar par exemple.

En virologie, on pratique l'isolement et l'identification du virus sur souris, hamster, agneau nouveau-né ou cultures cellulaires. L'immunofluorescence sur étalement de foie, de rate ou cerveau d'animal sacrifié en période d'hyperthermie fournit des résultats rapides.

En sérologie, on utilise différents tests : ELISA, séroneutralisation, immunofluorescence, inhibition de plaque, inhibition de l'hémagglutination ou fixation du complément. Le test ELISA est très spécifique et sensible. Les tests de séroneutralisation et d'inhibition de plaque sont des tests de référence spécifiques et utilisables dès le 3^{ème} jour de l'infection, mais nécessitent l'utilisation de virus vivant : leur emploi n'est pas préconisé dans les régions non endémiques, ou on préfère le test d'inhibition de l'hémagglutination. Des réactions croisées ont été signalées avec d'autres phlébovirus et une confirmation par un laboratoire de référence est nécessaire.

En histopathologie on recherche des inclusions nucléaires acidophiles dans les cellules hépatiques, caractéristiques de la FVR.

I.6 Lutte

Il n'existe pas de traitement spécifique et un traitement symptomatique est instauré dans les formes graves d'atteinte humaine.

Un vaccin vétérinaire (souche Smithburn) est employé depuis de nombreuses années, en Afrique orientale et australe. Il s'agit d'un vaccin modifié neuro-adapté, administrable en une injection, très efficace et peu coûteux à produire mais qui possède un pouvoir pathogène résiduel. Celui-ci se traduit par des effets tératogènes, abortifs et des encéphalites sur les agneaux. Ce vaccin n'est utilisable que dans les zones infectées. De plus, le risque de recombinaison avec des virus sauvages est élevé.

Des vaccins inactivés par le formol ont été utilisés en Afrique pour la vaccination animale et humaine mais plusieurs injections sont nécessaires en raison de leur faible pouvoir immunogène, ce qui rend leur coût prohibitif en vaccination vétérinaire.

Enfin, une souche atténuée par mutations (souche MP-12) s'est avérée immunogène avec une injection et sans effet pathogène ou tératogène, le seul symptôme observé étant une hyperthermie sans conséquence sur la survie embryonnaire. Cette souche serait utilisable chez le bétail et présenterait le double avantage d'un faible risque de transfert vectoriel (virémie faible et de courte durée) et de recombinaison avec les virus sauvages, les trois segments génomiques ayant subi des mutations. Les résultats préliminaires d'une expérimentation en Afrique de l'Ouest (Sénégal et Mauritanie) sont encourageants : les animaux présentent une montée d'anticorps et aucun avortement n'a été constaté dans les espèces bovine, ovine, caprine et cameline [Morril, 08/1997; Morril, 08/1997].

La prophylaxie sanitaire est limitée, la lutte anti-vectorielle étant coûteuse et difficile à réaliser. La méthode la plus efficace est de déplacer les troupeaux hors des zones infestées par les vecteurs, mais elle est difficile à mettre en œuvre et l'identification de périodes et de zones à risque est fondamentale pour le contrôle de la maladie.

II.1 Epidémiologie moléculaire

Le séquençage de la région du segment S codant pour NSs a permis de différencier 3 lignées majeures, ce que n'avaient pas permis les tests sérologiques. Cette classification a été confirmée par le séquençage partiel des segments M et L qui montrent une variabilité faible. [Sall, Zanotto et al., 09-10/1998; Sall, Zanotto et al., 10/1999]. Ces 3 lignées recourent à peu près la répartition géographique :

- Ia pour la lignée d'Afrique Centrale et de l'Est,
- Ib pour la lignée d'Afrique de l'Ouest,
- II pour la lignée égyptienne.

Ces études ont permis de montrer que les souches virales des épidémies égyptiennes de 1977 et 1993 sont proches ce qui suggère que la RFV se maintient sous forme endémique en Egypte. De plus les souches de l'Afrique Centrale et de l'Est restent apparentées à travers le temps, ce qui montre une grande stabilité de souche en un même lieu, malgré le passage de cycles endémiques en cycles épidémiques. L'absence de corrélation évidente entre les souches groupées par espèce hôte souligne certainement des échanges fréquents de virus entre les différentes espèces.

Le séquençage des souches responsables des épidémies malgaches permet de supposer deux introductions différentes à partir de la côte Est-Africaine.

La mise en évidence de souches appartenant à un groupe donné dans une zone géographique où prédomine un autre groupe prouve une certaine circulation des souches selon deux mécanismes possibles :

- la circulation dans la forêt tropicale humide par un hypothétique cycle sylvatique (la mise en évidence du virus chez des moustiques sylvatiques, des singes et des rongeurs est un argument indéniable),
- les migrations ou le transport d'animaux ou vecteurs infectés comme cela a été établi chez certaines souches de *Brucella*.

Enfin certaines souches paraissent issues de la recombinaison de segments S, M et L de souches de groupes différents, ce qui prouve l'existence d'échanges génétiques par réassortiment de segments. Ceci a lieu lorsqu'une cellule est co-infectée par 2 souches virales grâce à la segmentation du génome, ce qui a été montré expérimentalement tant en culture cellulaire que sur des moustiques co-infectés. La probabilité d'apparition d'une tel phénomène dans la nature est inconnue, mais il peut avoir lieu soit chez l'espèce hôte, soit chez le vecteur. Cette propriété permet une double évolution par les mutations ponctuelles et les réassortiments de segments alors qu'on sait que les arbovirus évoluent en moyenne 10 fois moins vite que les virus ayant un seul hôte. Il est probable que la vitesse d'évolution du virus de la FVR dépende du nombre d'hôtes potentiels mais on ignore encore l'importance respective des 2 mécanismes.

Ce résultat est à rapprocher de l'isolement d'une souche potentiellement réassortante d'un cas humain fatal lors de l'épidémie mauritanienne de 1987. Cela pose le problème de l'utilisation des vaccins à virus atténué qui pourraient entraîner l'apparition de chimères pathogènes après réassortiment avec des souches sauvages. Il est nécessaire d'utiliser des souches vaccinales dont l'atténuation est due à des altérations portant sur plusieurs segments génomiques, pour minimiser le risque d'apparition de telles chimères.

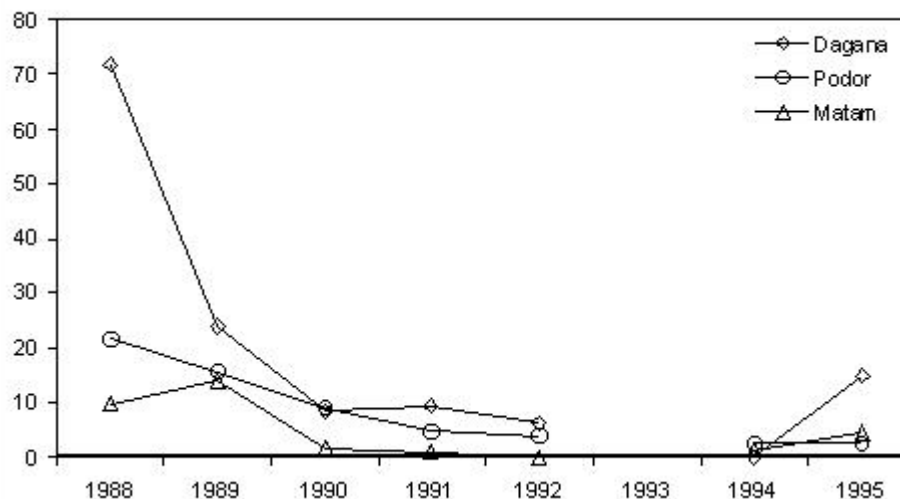
II.2 Epidémiologie descriptive

La FVR se présente sous forme de poussées épidémiques entrecoupées de longues périodes inter-épidémiques silencieuses. On peut n'en trouver aucune trace ou détecter seulement une circulation à bas bruit, révélée par des études sérologiques sur des troupeaux sentinelles. Lors de flambées épizootiques, elle provoque avortements et mortinatalité dans les troupeaux de ruminants ce qui entraîne de graves pertes économiques. Ceci se déroule en cours ou en fin de saison des pluies, suite à une pullulation des vecteurs. Dans certains cas, après à un premier cycle d'amplification animale, elle peut atteindre la population humaine et peut se révéler mortelle [Lefevre, 1997].

Au Sénégal, le virus FVR a été isolé pour la première fois en 1974 à partir de lots d'*Aedes dalzieli* capturés dans la région de Kédougou [Digoutte, Cordellier et al., 1974]. Les études sérologiques réalisées entre 1981 et 1986 ont mis en évidence une importante circulation du virus FVR dans le Sud de la Mauritanie : 17,8 % des petits ruminants (83 sérums positifs / 466 testés) présentaient des anticorps pour le virus FVR [Saluzzo, Digoutte et al., 1987]. En outre dans cette région, 13,3% des éleveurs (32 sérums positifs / 240 testés) se sont révélés séropositifs. Une épidémie se déclara à l'automne 1987 au sud de la Mauritanie dans la région de Trarza [Saluzzo, Digoutte et al., 1987]. Le premier cas a été diagnostiqué en octobre 1987 à Rosso, et 284 cas se sont déclarés les jours suivants (confirmés au laboratoire). On a dénombré parmi ces 284 cas 28 décès (9,9%). L'épidémie s'est propagée vers le Nord, jusqu'à 102 km de Rosso, sur la route menant à Nouakchott ; à l'Ouest, elle a été limitée par Keur Massène (65 km à l'ouest) et à l'Est par Tosso (65 km à l'est). Le nombre de cas humains a été estimé à 1009.

Une enquête menée en période post-épidémique (Février-Mai 1989) dans le Centre-Nord du Sénégal chez des Peuls semi-nomades a montré que 22,7% de 273 personnes testées avaient des anticorps anti-FVR, avec un effet positif de l'âge (1/3 des sujets de plus de 60 ans) [Jouan, 1989]. Une enquête rétrospective a permis d'estimer à une douzaine les cas de mortalité humaine due à la FVR dans les deux années précédentes. En parallèle, un programme de sérosurveillance animale a été mis en place dans les vallées du Sénégal et du Ferlo [Thiongane, Gonzalez et al., 1991]. Sur les 173 sérums (moutons et chèvres) examinés, 65% possédaient des anticorps spécifiques dont la moitié de type IgM. La séroprévalence moyenne chez les petits ruminants du Sénégal a été estimée entre 7 et 15%. Ces données ont confirmé l'existence d'une épizootie associée de FVR parmi les populations animales dans lesquelles on avait constaté des avortements.

Entre 1989 et 1993, aucun cas clinique de FVR n'a été observé au niveau des troupeaux sentinelles de la vallée du Sénégal (300 à 400 sérologies annuelles dans 10 troupeaux) [Thiongane, Zeller et al., 1994]. L'absence d'anticorps de classe M dans les prélèvements effectués entre 1989 et 1992 confirme l'absence de circulation virale dans les troupeaux suivis dans cette zone. Par ailleurs, la séroprévalence des anticorps neutralisant le virus de la FVR a décliné régulièrement : de 24,4% (1988) à 1% (1993). Dans la figure suivante, il apparaît que la prévalence générale la plus forte était localisée dans le delta (Dagana) et qu'elle décroissait en remontant le fleuve jusqu'à Matam.



Graph. 1) Séroprévalence (IgG) contre le virus de la FVR chez les petits ruminants de la vallée du Sénégal (Dagana, Matam, et Podor), de 1988 à 1995 [Thiongane, Zeller et al., 1994].

Deux foyers de FVR ont été observés en 1993 dans des troupeaux de petits ruminants de Kaédi et du Guidimakha (Mauritanie) et de la région de St-Louis (Sénégal). Un an plus tard, en Octobre-Décembre 1994, deux autres foyers ont été mis en évidence chez petits ruminants dans la vallée du Sénégal à Ross Béthio et dans la vallée du Ferlo à Barkédji. Parallèlement une étude de prévalence de la FVR, conduite en Mauritanie en 1993, conclut à une reprise de la circulation du virus dans les régions du Gorgol, de l'Assaba et du Hodh El Gharbi [Schneegans, 1999]]. Ces foyers suggèrent la fin de la période post-enzootique que connaissent les troupeaux de petits ruminants depuis 1988. Le Ferlo apparaît comme une zone d'enzootie marquée par une circulation virale saisonnière et de faible ampleur. En 1992, la séroprévalence de la vallée du Ferlo était supérieure à celle de la vallée du Sénégal (7,5 % vs 4%) et à cette date un animal appartenant à un troupeau transhumant de la vallée du Sénégal a été trouvé porteur d'anticorps de classe M (séropositif en IgM), ce qui signait une infection récente.

Une seconde épidémie de FVR est survenue en Septembre 1998 dans le Sud et le Sud-Est de la Mauritanie. Six personnes sont décédées à l'hôpital d'Aïoun El Atrouss entre le 15 Septembre et le 1 Octobre 1998. Une forte séroprévalence a été observée chez les populations humaines de la région de Sélibaby (9 sérums positifs sur 35 testés) et de Kaédi (23 sérums positifs sur 181 testés). Par ailleurs, des avortements dus au virus de la FVR (confirmé par l'Institut Pasteur de Dakar) ont été observés chez des animaux, en particulier des moutons, dans les wilayas Su sud mauritanien. Une forte atteinte sérologique a été constatée : 45% d'IgM positifs dans la région du Hodh El Gharbi ; 14 % dans l'Assaba ; 5% dans le Brakhna [Schneegans, 1999].

II.3 Epidémiologie analytique

II.3.1 Modes de transmission

Les sources de virus sont constituées par tous les mammifères en phase de virémie. Toutes les espèces n'ont pas le même rôle, les petits ruminants étant responsables de l'amplification virale et représentant une source de contamination majeure pour l'homme.

Chez les ruminants, la transmission est vectorielle et de nombreux moustiques sont mis en cause. Il convient de distinguer 2 types de vecteurs. Les moustiques du genre *Culex* jouent un rôle important dans l'amplification virale et la contamination humaine mais la transmission verticale n'est pas possible. Ceux du genre *Aedes* assureraient aussi la survie du virus d'une saison humide à l'autre par le biais d'une transmission verticale [Diallo, 1995; Fontenille, 1998; Fontenille, 1995; Diallo, 2000].

Chez l'homme la transmission est vectorielle ou directe suite à la manipulation d'avortons ou au contact d'aérosols viraux occasionnés par l'abattage des animaux. Un vide sanitaire prolongé suivi d'un nouveau cycle de nettoyage / désinfection des locaux est indispensable lorsqu'ils sont soumis à une telle contamination. Ce dernier mode de contamination a été mis en évidence à diverses occasions par l'identification de métiers (vétérinaires, éleveurs, tueurs...), de lieux (abattoirs, tueries, salles de mise bas), voire d'ethnies à risque en fonction de l'importance relative de l'élevage et de l'agriculture. En ce qui concerne le sexe, des observations apparemment opposées ont été rapportées : si dans la plupart des cas les hommes s'avéraient être plus exposés au risque de transmission directe, ce ne fut pas le cas lors de l'épidémie de Rosso où les femmes, qui gèrent l'élevage des animaux dans les communautés péri-urbaines, ont payé un plus lourd tribut à l'épidémie.

Le schéma suivant illustre le mécanisme de transmission de la maladie.

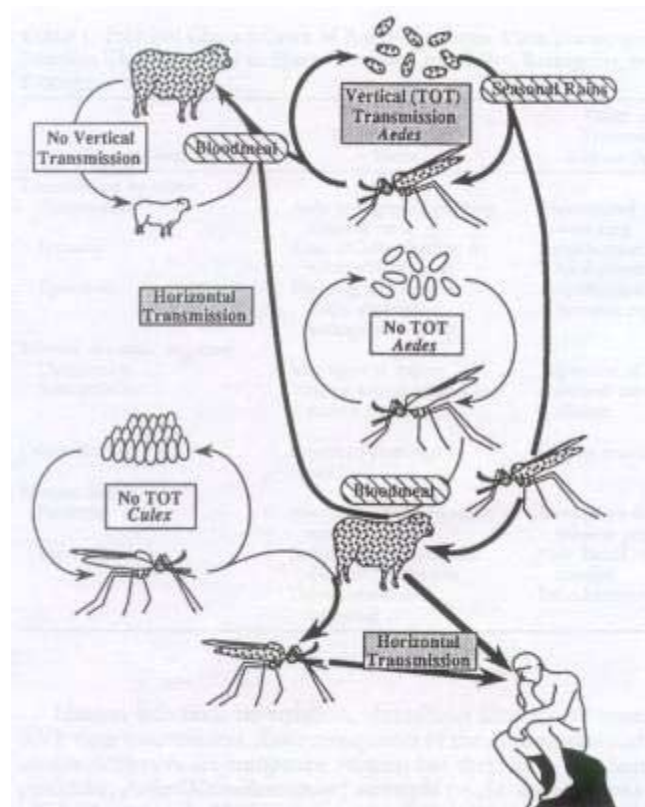


Fig. 1) Modes de transmission probables du virus de la FVR. Les lignes épaisses représentent des transferts viraux alors que les lignes fines représentent les cycles biologiques, sans rapport avec le virus. TOT = transmission trans-ovarienne. [Wilson, 1994].

II.3.2 Vecteurs

En Afrique de l'Est et du Sud, le virus est transmis par des *Aedes* (sous-genres *Aedimorphus* et *Neomelanicion*). Les vecteurs (*A. cumminsii*, *A. circumluteolus*, et *A. mcintoshi*) utilisent les mares temporaires remplies à l'occasion des fortes pluies. leur pullulation peut entraîner des cycles épidémiques pendant lesquels d'autres espèces de moustiques prennent le relais [Turell and Bailey, 1987; Logan, Linthicum et al., 1991].

En Afrique de l'Ouest, le virus de la FVR a été trouvé chez de nombreuses espèces d'insectes hématophages.

Host	No. of isolates	Location	Year(s)
<i>Aedes dalzieli</i>	3	Kédougou, Sénégal	1974
<i>Ae. dalzieli</i>	1	Kédougou, Sénégal	1983
<i>Ae. ochraceus</i>	3	Barkedji, Sénégal	1993
<i>Ae. vexans</i>	10	Barkedji, Sénégal	1993
<i>Ae. cumminsi</i>	1	Burkina-Faso	1983
<i>Ae. furcifer</i>	1	Burkina-Faso	1983
<i>Culex antennatus</i>	1	Nigeria	1967-70
<i>Culicoides sp.</i>	2	Nigeria	1967
<i>Ae. palpalis</i>	1	Central African Republic	1969
<i>Mansonia africana</i>	1	Central African Republic	1969
<i>Amblyomma variegatum</i> (on cattle in a slaughterhouse)	1	Central African Republic	1983
Humans	2	Sénégal	1975
	1	Sénégal	1980
	201	Mauritania	1987
	12	Central African Republic	1971-90
Bats	2	Guinea	1981-83
Sheep	1	Barkedji, Sénégal	1993
Bovine	1	Kolda, Sénégal	1993

Tab. 1) Isolements du virus de la FVR en Afrique de l'Ouest [Fontenille, Traore-Lamizana et al., 1998]

Suite à l'épidémie de 1987, des études entomologiques ont été menées afin d'identifier les vecteurs dans différentes zones bioclimatiques au Sénégal, en particulier à Kédougou et à Barkédji [Zeller, 1997; Fontenille, 1998; Diallo, 1995; Fontenille, 1995; Diallo, 2000]. La zone de Kédougou, de climat soudano-guinéen (Sud-Est du Sénégal), présente une saison des pluies s'étendant de Mai à Octobre, avec une moyenne pluviométrique annuelle de 1 100 mm. La zone de Barkédji, de climat sahélien, est située dans le Nord du Sénégal et présente une saison pluvieuse courte (Juillet à septembre), avec une moyenne pluviométrique annuelle de 250 à 350 mm. A Barkédji, les mares temporaires se remplissent dès les premières pluies et sont utilisées pour l'abreuvement des animaux jusqu'à leur assèchement en janvier.

Des insectes hématophages ont été collectés de 1991 à 1996, en Juillet, Octobre et Novembre à Kédougou et mensuellement à Barkédji. Quatre méthodes de capture ont été utilisées. Il s'agit de captures sur appâts humains de 17 h 30 à 22 h 30, de pièges CDC (Centers for Disease Control and Prevention) associés à de la glace carbonique, de CDC placés dans les enclos à bétail et de pièges à appâts animaux associés à des pièges lumineux par intermittence. A Kédougou, les arthropodes furent capturés dans les villages et les forêts et à Barkédji, au bord des mares temporaires. Les prises étaient allotées par espèce, sexe, localisation et date.

Plus de 228 000 moustiques (52 espèces) à Barkédji et 250 000 moustiques (102 espèces) à Kédougou furent collectés ; 233 000 phlébotomes (11 espèces) et 35 000 phlébotomes (25 espèces) furent capturés respectivement de Barkédji et Kédougou. A Barkédji, le genre *Aedes* représentait 29% des captures. *Aedes vexans* était le plus abondant, suivi par *A. ochraceus* ; *A. mcintoshi* et *A. dalzieli* étaient rares. A Kédougou, le genre *Aedes* représentait 50% des captures : *A. dalzieli* était prédominant alors que *A. vexans*, *A. mcintoshi* et *A. ochraceus* étaient beaucoup moins abondants.

A Barkédji, 10 isolements du virus FVR concernaient *A. vexans* et 3 *A. ochraceus*. A Kédougou aucun virus FVR ne fut isolé pendant la période d'étude. Cinq autres virus furent isolés. Le tableau suivant présente les résultats détaillés :

Lieu	Espèces	Effectifs	Nb de lots	Isolements de virus (nb de souches)
Barkédji	<i>Aedes vexans</i>	42.055	1.428	WN-NRI (1), FVR (10), WN (2)
	<i>Ae. mcintoshi</i>	758	88	NRI (1)
	<i>Ae. ochraceus</i>	3.672	228	WSL (1), FVR (3)
	<i>Ae. dalzieli</i>	105	34	(0 virus)
	<i>Phlebotominae spp</i>	233.895	2.251	SAB (63), CHP (7), GF (5), Ar D 88909 (1), Ar D 95737 (12)
Kédougou	<i>Ae. vexans</i>	1.194	81	(0 virus)
	<i>Ae. mcintoshi</i>	536	107	(0) virus)
	<i>Ae. ochraceus</i>	915	110	WSL (1)
	<i>Ae. dalzielib</i>	31.809	821	CHIK (8), BBK (1), WSL (2), KED (6), BOU (1), PGA (2), ZIKA (22)
	<i>Phlebotominae spp</i>	35.569	364	SAB (11), CHP (4), TETE (1), Ar D 111740 (1), Ar D 95737 (2)

WN: virus West-Nile, NRI: virus Ngari, FVR: virus de la vallée du Rift V, WSL: virus Wesselsbron, SAB: virus Saboya, CHP: virus Chandipura, GF: virus Gabek Forest, CHIK: virus Chikungunya, BBK: virus Babanki, KED: virus Kédougou, BOU: virus Bouboui, PGA: virus Pongola, ZIKA: virus Zika, TETE: virus Tete . Ar D 88909, Ar D 95737, et Ar D 111740: virus non identifiés à ce jour. b4 Les souches de la fièvre de la vallée du Rift ont été isolées en 1974 et 1982.

Tab. 2) Isolements du virus de la FVR chez les insectes au Sénégal de 1991 à 1996, [Fontenille, Traore-Lamizana et al., 1998].

Même si la compétence vectorielle d'*A. dalzieli*, *A. vexans* et *A. ochraceus* n'a pas été confirmée expérimentalement, ce sont de bons candidats vecteurs pour la FVR au Sénégal. Ils diffèrent des vecteurs Est-Africains (*A. cumminsii*, *A. circumluteolus*, et *A. mcintoshi*), également présents en Afrique de l'Ouest mais dont le rôle dans la transmission de la FVR n'a pas été démontré au Sénégal. L'abondance des premiers est bien supérieure à celle de ces derniers. Ainsi, lors des enquêtes de 1993 à Barkédji, seulement 58 *A. mcintoshi* avaient été capturés, contre 6 958 *A. vexans* et 1069 *A. ochraceus*.

Suite à la ré-émergence de la FVR en Mauritanie en 1998, d'autres enquêtes entomologiques ont été menées dans la zone du Hodh El Gharbi ainsi que le long de la vallée du fleuve Sénégal afin d'évaluer les possibilités d'extension de la maladie au Sénégal. Les localités concernées ont été Thillé Boubacar, Kanel, Dembankané et Diawara. Les mêmes méthodes de capture que dans l'étude précédente furent utilisées. Parmi les 31 944 moustiques capturés appartenant à 20 espèces et 6 genres, *Culex* et *Mansonia* furent les genres les plus représentés. *Culex* constituait 50% des prélèvements et *Mansonia* 45%. *Culex. poicilipes* et *M. uniformis* ont été les espèces les plus abondantes avec respectivement 47 et 45% de l'ensemble des moustiques capturés. Les *Aedes* étaient représentés seulement par 2 spécimens d'*A. vexans* et *A. sudanensis*.

Au total, 36 souches de FVR furent isolées, toutes à partir de *Culex poicilipes* et sur le site de Diawara. Ces résultats portent à 53 le nombre de souches de ce virus isolé chez *Culex poicilipes* au Sénégal. Le tableau suivant reprend l'ensemble des captures effectuées sur le site de Diawara, ainsi que les isolements viraux.

Espèce	Moustiques capturés/type de piège		Total moustiques capturés				Virus isolés	TRI (%)
	PL (CO2)	PL (Etables)	N	N lots	Densité	%		
<i>An. ziemanni</i>	536	0	536	12	107,2	3,69	-	-
<i>An. pharoensis</i>	101	0	101	4	20,2	0,70	-	-
<i>An. rufipes</i>	95	7	102	3	20,4	0,70	-	-
<i>Ae. vexans</i>	1	0	1	1	0,2	0,01	-	-
<i>Cx. antennatus</i>	12	3	15	3	3	0,10	-	-
<i>Cx. bitaeniorhynchus</i>	2	0	2	1	0,4	0,01	-	-
<i>Cx. ethiopicus</i>	3	0	3	1	0,6	0,02	-	-
<i>Cx. neavei</i>	67	0	67	4	13,4	0,46	-	-
<i>Cx. poicilipes</i>	10662	0	10662	212	2132,4	73,40	36 RVF 24 Sanar	0,37(0,06) 0,24 (0,04)
<i>Ma. africana</i>	13	0	13	2	2,6	0,09	-	-
<i>Ma. uniformis</i>	3023	0	3023	61	604,6	20,81	1 Sanar	0,03 (0,03)
<i>Mi. splendens</i>	1	0	1	1	0,2	0,01	-	-
Total	14516	10	14519	305	2905,2	100	-	-

N: Nombre de moustiques capturés ; (%): rapport en % du nombre capturés de l'espèce/ nombre total ; PL: Pièges Lumineux

RVF: virus de la fièvre de la Vallée du Rift ; Sanar: virus ArD 66707 (Sanar).

TRI: Taux Réel d'Infection: nombre de moustiques estimés infectés pour 100 moustiques testés, selon Chiang & Reeves (1962).

Tab. 3) Abondance et densité des populations de moustiques à Diawara (Vallée du Sénégal) en novembre 1998 [Diallo, 2000].

Quatre espèces de moustiques ont été trouvées porteuses du virus de la FVR au Sénégal. Nous avons déjà vu que les 2 genres concernés (*Aedes* et *Culex*) ont des rôles différents dans la transmission de la maladie. Ceci pourrait s'expliquer par des dynamiques de population très différentes, les premiers étant capables de coloniser le milieu dès l'arrivée des pluies alors que les seconds arrivent plus progressivement mais effectuent un nombre de cycles intra-annuels plus important.

II.3.3 Réservoirs

Certaines espèces d'*Aedes* pourraient entretenir le virus en lui permettant de passer la saison sèche dans leurs œufs en dormance. Ces moustiques seraient un véritable réservoir de la maladie, mais la preuve expérimentale reste à faire.

Le rôle des ruminants sauvages et des oiseaux n'a pu être établi mais la participation de rongeurs sauvages au cycle naturel de la FVR n'est pas exclue [Gora, Thiongane et al., 2000]. De juin 1996 à avril 1998, 290 rongeurs appartenant à 14 espèces furent capturés dans 7 localités sénégalaises. La prévalence des anticorps anti-FVR était de 3,8% sur l'ensemble des rongeurs capturés (c.f. tableau ci-dessous). Quatre espèces de la famille des *Muridae* furent trouvées porteuses d'anticorps. Il s'agit de *Rattus rattus*, *Mastomys huberti*, *Arvicanthus niloticus* et *Mastomys erythroleucus*. Le plus fort taux de séropositivité fut trouvé à Richard-Toll dans des zones de cultures irriguées de la vallée du Sénégal. Les épizooties de FVR ont une cyclicité associée à des changements bioclimatiques favorisant la pullulation des vecteurs et sont suivies d'une période d'immunité chez le bétail qui le protège de la ré-infection. Il est possible que pendant ces périodes, *A. niloticus* et *M. erythroleucus* jouent le rôle d'hôtes amplificateurs et de maintien de l'infection. Cependant, la virémie étant plus courte chez les rongeurs que chez les ruminants, leur rôle dans la propagation de la maladie est sans doute limité.

Sites de capture	Nombre de positifs	Nombre de testés	%
Richard Toll	7	73	9.6
Pout	1	25	4.0
Dakar-Niayes	1	18	5.5
Mbour-Bandia	2	61	3.3
Koungheul	0	13	0.0
Barkédji	0	38	0.0
Kédougou	0	62	0.0
Total	11	290	3.8

Tab. 4) Séroprévalence de la FVR chez les rongeurs au Sénégal [Gora, Thiongane et al., 2000].

II.4 Conséquences pour la modélisation

II.4.1 Cas de l'Afrique de l'Est

La corrélation entre précipitations locales et activité du virus FVR au Kenya n'est pas évidente, avec des années à fortes pluies sans épidémie et des épidémies lors d'années à pluviométrie modérée. En calculant un indice basé sur le surplus des moyennes mensuelles par rapport aux moyennes calculées sur une période de 33 ans, pondéré du nombre de jours pluvieux par mois, une corrélation a été observée avec l'occurrence des foyers de FVR [Davies, Linthicum et al., 1985]. Si cette étude met en évidence l'influence des pluies abondantes et répétées à grande échelle et sur une longue période, l'absence de corrélation entre prévisions locales et épidémies montre l'intervention d'autres facteurs. Dans la région étudiée, les pluies sont induites par la remontée de la zone de convergence intertropicale (ICTZ) qui correspond à une zone de confluence de courants provenant du Nord et du Sud et qui détermine l'importance et la durée des pluies et du couvert nuageux. Les pluies abondantes entraînent une remontée de la nappe phréatique qui inonde les bas-fonds des herbages, gîtes larvaires de certaines espèces vectrices de FVR (notamment du genre *Aedes*), ce qui entraîne l'émergence de fortes populations d'adultes. Le couvert nuageux favorise la survie des moustiques adultes, facteur clef dans la propagation des épizooties. Les vents induits par les lignes de grain et les effets de convection ont peut-être un rôle dans le transport passif des vecteurs. L'effet mesuré par l'ICTZ est semblable sur l'Est et le Sud-Est du continent Africain et les épidémies de FVR ont souvent lieu en même temps au Kenya, Tanzanie, Zambie et Afrique du sud. La corrélation de cet indice à des données satellitaires permet de surveiller de grandes régions et d'optimiser le travail au sol.

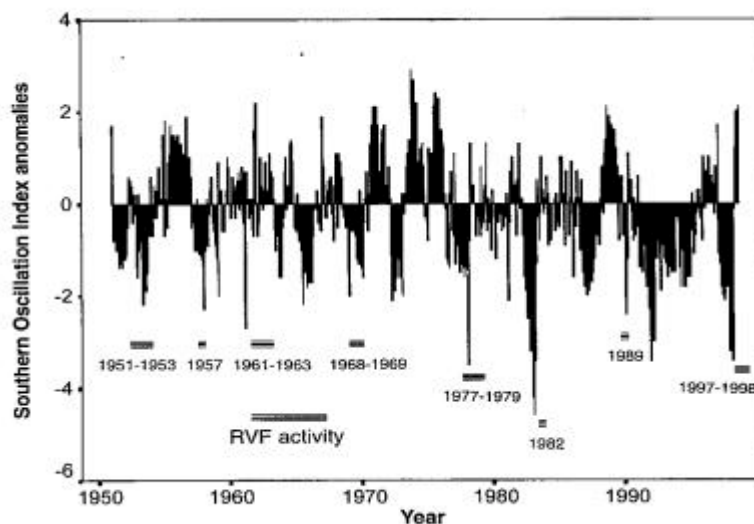
Le phénomène ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) est une cause principale de variabilité climatique inter-annuelle. Il est quantifié par l'index d'oscillation SOI (*Southern Oscillation Index*), utilisé depuis le 19^{ème} siècle. Cet index compare la pression atmosphérique de Tahiti avec celle de Darwin, en Australie et il est exprimé comme une déviation standard par rapport à la norme. Des déviations négatives importantes sont associées aux évènements *El Niño* provoquant des anomalies climatiques, comme des précipitations anormalement élevées. Ces phénomènes ont été mis en rapport avec plusieurs maladies humaines et animales dans de nombreux pays.

Le niveau des précipitations est associé au développement de la végétation, détectable par des satellites équipés de radiomètres à haute résolution. Ces informations sont traduites en différents indices mesurant l'activité photosynthétique, proportionnelle au développement de la végétation. Le plus connu est le NDVI (*Normalized difference*

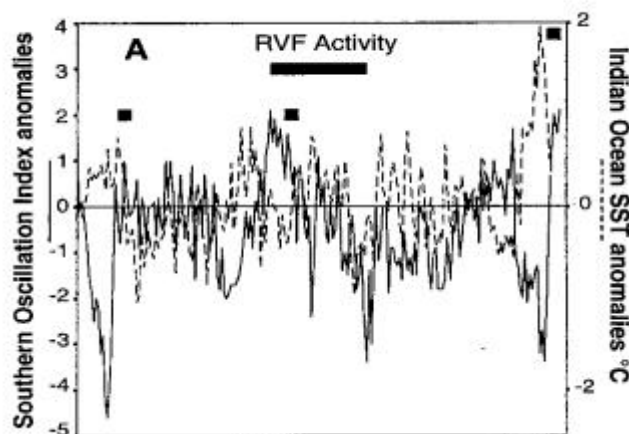
vegetation index). Ces données sont relatives à une situation et à une période données et doivent être étalonnées par des mesures au sol [Linthicum, A. et al., 06/99].

Un autre index (Températures de Surface de la mer : SST) mesurant la différence de températures de surface de l'eau entre 2 point fixes situés dans des régions équatoriales de l'Océan Pacifique et l'Océan Indien s'est révélé utile dans la prévision d'anomalies climatiques au niveau du continent africain. Ces 3 indices (SST, SOI et NDVI) sont corrélés aux précipitations de l'Est africain et plus particulièrement du Kenya. Sur une période de 48 ans (1950-1998), leur utilisation isolée ne permet pas de prévoir les épizooties de FVR, mais différentes combinaisons ont été testées et c'est l'utilisation simultanée des SST et des NDVI qui permet la meilleure prévision du risque, avec une prédiction de 100% des épizooties et aucune fausse alerte.

L'utilisation de ce modèle aurait pu éviter ou limiter des épizooties, par des moyens de lutte ciblés comme la vaccination des troupeaux ou la désinsectisation des sites de ponte des vecteurs. Les figures suivantes montrent l'activité du virus de la FVR au cours du temps, en fonction de l'évolution de ces différents indices.



Graph. 2) Evolution des anomalies SOI de janvier 1950 à mai 1998 et périodes d'activité de la FVR au Kenya. Les valeurs SOI sont présentées comme des déviations standardisées par rapport à une moyenne calculée entre 1951 et 1980.

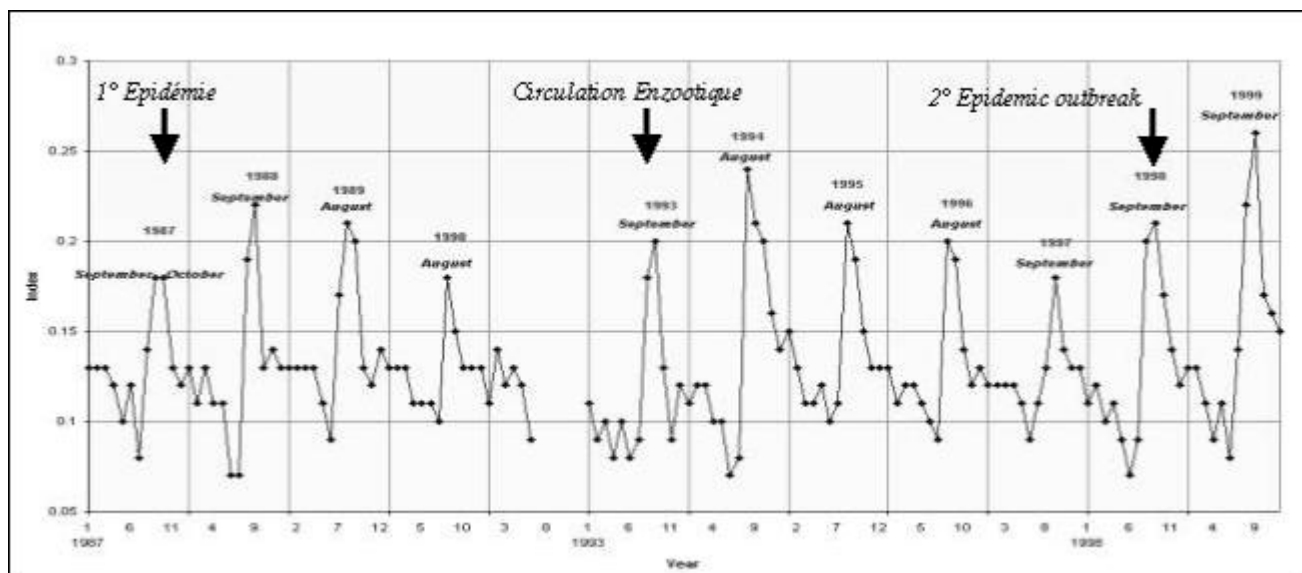


Graph. 3) Evolution des anomalies SST et SOI de janvier 1982 à mai 1998.

II.4.2 Cas de l'Afrique de l'Ouest

Les différences de situation entre les parties orientale et occidentale de l'Afrique laisse penser que l'utilisation des précipitations et des NDVI pour la prévision des épisodes de FVR serait difficile (cf figure suivante) :

- En 1993, la circulation du virus à Barkédji et en Mauritanie apparut en l'absence de fortes pluies ou de NDVI élevés alors que des années comme 1994 et 1999, où les NDVI étaient forts, n'ont pas donné lieu à une circulation virale détectable.



Graph. 4) Variation du NDVI et activité FVR (↓) de 1987 à 2000 en Mauritanie (Hodh El Gharbi).

- L'activité FVR décrite dans le sud de la Mauritanie en 1982-1985 s'est produite pendant une période de grande sécheresse, en l'absence de pluies importantes [Zeller, Fontenille et al., 1997].
- L'influence du phénomène *El Niño* sur les précipitations est faible par rapport à l'Afrique de l'Est et à les conditions édaphiques favorables semblent différentes. Une étude de prévalence réalisée en novembre 1989 dans le Sud mauritanien a montré une influence significative de la pluviométrie sur la circulation virale mais a souligné l'importance de la nature de l'eau libre : les zones de lacs et grands oueds étaient associés à une prévalence plus élevée que les autres (vallée du Sénégal, mares temporaires et zone à forte humidité mais sans eau libre). Seules des études entomologiques poussées sur la production qualitative et quantitative des différentes zones permettraient de préciser ces résultats [Lancelot, Gonzalez et al., 1989].
- Les observations récentes en péninsule arabe ont montré que la FVR peut apparaître dans des zones où le virus n'avait pas été détecté auparavant. L'extension de l'irrigation dans la vallée du Sénégal avec les barrages de Diama et Manantali pourrait être un facteur d'augmentation du risque de transmission, comme cela a été observé en Egypte avec le barrage d'Assouan et les projets d'irrigation du delta du Nil. Il a été suggéré que les altérations écologiques qu'entraînent de tels aménagements hydrauliques pourraient être responsables de l'épidémie mauritanienne de 1987 par la création de nouveaux biotopes favorables aux vecteurs potentiels [Digoutte and Peters, 1989]. La mise en eau limitée du barrage en 1987 (relevés hydrologiques de l'OMVS) et la médiocre saison pluvieuse de cette même année semblent donner peu de poids à cette hypothèse.
- La décroissance rapide de la prévalence en anticorps anti-FVRV de 1987 à 1992 suggère le passage à une période inter-épizootique, avec une persistance du virus

cantonnée aux zones humides. Les moustiques infectés capturés en 1993 près des mares de Barkédji suggèrent la présence de foyers enzootiques au niveau de cette zone sahélienne. Les suivis sérologiques chez des moutons ont indiqué que le virus a circulé en Octobre ou Novembre 1993. A l'opposé, l'absence de circulation virale détectable en 1991 et 1992 indique que les conditions environnementales étaient insuffisantes pour permettre son développement.

- Enfin, l'élevage sahélien est basé sur les petites et grandes transhumances contrairement à l'élevage intensif de races améliorées en Afrique du Sud.

L'absence de modèle statistique disponible a conduit à envisager la mise au point de modèles dynamiques, qui intègrent les caractéristiques épidémiologiques de la FVR en Afrique de l'ouest : passage trans-ovarien du virus chez certains vecteurs, dynamique saisonnière des vecteurs, immunité du bétail et mouvements de troupeaux.

Deuxième partie : Partie expérimentale : Modélisation de la FVR au Sénégal

L'utilisation de modèles épidémiologiques a été initiée par Kermack et McKendrick [Kermack and McKendrick, 1927] et développée par Anderson et May [Anderson and May, 1979; May and Anderson, 1979]]. De nombreuses approches sont possibles. La démarche retenue ici est de type descendante : on part d'un petit ensemble d'hypothèses, nécessairement simplificatrices, sur les mécanismes épidémiologiques de l'occurrence et de la diffusion de la FVR. La difficulté consiste à retenir les facteurs principaux conditionnant l'allure épidémiologique de la maladie et à éliminer ceux jugés moins importants. L'application pertinente de ce principe de parcimonie passe par une revue détaillée de la bibliographie et l'instauration d'un dialogue interdisciplinaire entre des scientifiques d'horizons variés. Le modèle est ensuite construit puis confronté aux données disponibles. En cas d'inadéquation du modèle et des observations, de nouvelles hypothèses sont introduites et le processus est itéré.

Le modèle est un outil d'évaluation des connaissances épidémiologiques, en appliquant le principe du rasoir d'Ockham¹ (*Shave away what is unnecessary*) et en identifiant d'autre part, le cas échéant, les domaines où elles sont insuffisantes.

Chapitre I Objectifs

L'objectif central est de simuler l'évolution temporelle et spatiale de la FVR dans un environnement ayant des caractéristiques données. Un tel modèle pourrait être utilisé pour étudier différents scénarios climatiques et environnementaux, ou évaluer des stratégies de lutte contre la maladie (vaccination, lutte anti-vectorielles, etc.).

La recherche d'indicateurs du milieu, corrélés à l'abondance des vecteurs et observables par télédétection, permettrait de coupler le modèle à des indicateurs environnementaux et en faire un outil d'alerte précoce (déclenchement d'opérations de surveillance ou de prophylaxie ciblées sur des zones ou des périodes à risque).

Chapitre II Description des modèles développés

Dans cette étude, deux modèles « concurrents » ont été développés, l'un étant volontairement simpliste (équipe CEA) et l'autre intégrant un niveau supplémentaire de complexité (équipe INRA-ENVL).

II.1 Modèle intra-troupeau

II.1.1 Modèle CEA

Ce modèle simule la dynamique de la FVR au sein d'un troupeau ou d'une petite population homogène, sans représentation explicite des vecteurs. Cette approche a fait ses preuves avec la bluetongue en Australie [Ward and Carpenter, 1996; Ward and Carpenter, 1997; Bishop, Barchia et al., 2000]. Les hypothèses de base sont les suivantes:

- *Aedes vexans* est un des vecteurs principaux, au moins en début d'épidémie ;
- un foyer se déclenche quand des œufs infectés d'*Aedes vexans* éclosent et que les moustiques nouveaux nés piquent des ruminants sensibles et réceptifs.

¹ William of Ockham, né dans le village d'Ockham, dans le Surrey (Angleterre) vers 1285, fut un philosophe important du 14^{ème} siècle.

Les facteurs conditionnant l'éclosion de moustiques infectants sont :

- la survie des œufs infectés (intervalle de temps depuis les derniers foyers);
- les paramètres environnementaux atteignant un niveau compatible avec l'éclosion des œufs : pluviosité, hygrométrie, niveau d'eau dans des mares servant de gîtes larvaires;
- la présence de ruminants sensibles et réceptifs (densité de population, immunité).

Ces hypothèses sont traduites en équations mathématiques. On considère un petit groupe d'animaux infectés et infectieux placés dans une population sensible et on décrit l'expansion de l'infection dans cette population.

Considérons une population de ruminants distribuée en N classes d'âge contenant chacune z_α individus, $\alpha \in \{1, \dots, N\}$. Pour simplifier la présentation, on fixe $z_\alpha = 1$ (la taille de la population est N). Le statut sanitaire $p(\alpha, t)$ de la classe d'âge α au temps t est représenté par :

$$p(\alpha, t) = \begin{cases} 0; & \text{IgM positif (résistant)} \\ 1; & \text{séronégatif (sensible)} \end{cases}$$

Considérons une mare stratifiée en L classes de profondeur contenant $o(s, t)$ œufs infectés dans la strate s au temps t . Nous considérons que la valeur de $o(s, t)$ est comprise entre 0 et V , i.e. $0 \leq O(s, t) \leq V$. Cette mare peut être remplie jusqu'au niveau h par les chutes de pluies. Pour mimer le caractère aléatoire de l'abondance des chutes de pluies, $h(t)$ est considérée comme une fonction aléatoire de distribution uniforme sur l'intervalle $[H_{min}, L]$.

L'évolution du système au cours du temps, avec un incrément Δt , est décrite par :

$$\begin{cases} p(\alpha, t + \Delta t) = [1 - f_1(t)] p(\alpha - 1, t); & \alpha \in [2; \dots, N] \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} o(s, t + \Delta t) = (k \Delta t - 1)H[s - h(t)] o(s, t) + \{1 - H[s - h(t)]\} f_1(t) f_2(t) V; & s \in [1, \dots, L] \end{cases} \quad (2)$$

Aux conditions limites, $p(1, t) = 1 \forall t$, et $k \Delta t > 1$.

Soient deux fonctions du temps $f_1; f_2$:

$$f_1(t) = H \left[\sum_{s=1}^{h(t)} o(s, t) - \theta \right] \quad (3)$$

$$f_2(t) = H \left[\sum_{\alpha=2}^N p(\alpha, t) \right] \quad (4)$$

où θ représente le seuil déclenchant l'infection d'une population animale, et $H(x)$ une fonction définie telle que $H(x) = 0$ pour $x < 0$ et $H(x) = 1$ pour $x > 0$. (5)

Notons que $f_1(t)$ est une fonction aléatoire du temps par l'intermédiaire de $h(t)$.

Les données résultantes du système dynamique (1, 2), contrôlées par le niveau d'hivernage $h(t)$, i.e. le remplissage de la mare, sont :

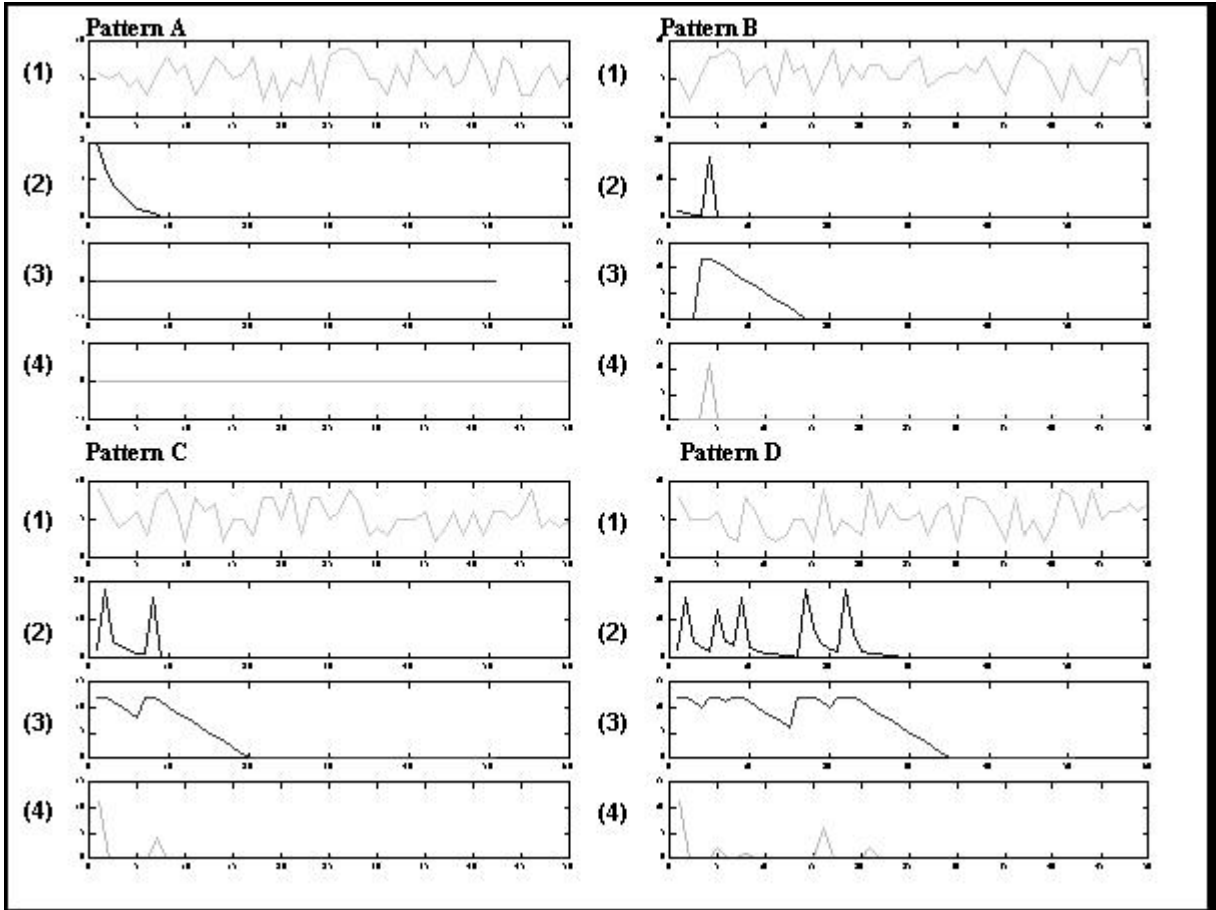
$$O(t) = \sum_{s=1}^h O(s, t) \text{ pour le nombre d'œufs infectés au niveau de la mare.} \quad (6)$$

$$P(t) = N - \sum_{\alpha=1}^N p(\alpha, t) \text{ pour le nombre d'animaux infectés dans la zone de la mare.} \quad (7)$$

$$A(t) = f_1(t) \sum_{\alpha=2}^N p(\alpha, t) \text{ pour le nombre total d'avortements dans la zone de la mare.} \quad (8)$$

Pour θ fixé et des conditions initiales données, $h(0)$, $o(s, 0) \mid s \in \{1, \dots, L\}$, et $p(\alpha, 0) \mid \alpha \in \{2, \dots, N\}$, l'évolution du système en fonction du temps est calculée par incrément de $\Delta t = 1$ an.

Pour étudier le comportement du système, des simulations numériques ont été réalisées en faisant varier le niveau d'hivernage $h(t)$. On trouve alors quatre profils d'infection de FVR, présentés sur la figure suivante: (A) pas d'infection: absence de cas secondaires; (B) infection sporadique: une seule épidémie; (C) infection épizootique avec oscillations amorties; (D) infection épizootique avec oscillations périodiques.



Graph. 5) Présentation des 4 profils d'infection de FVR obtenus par le modèle.

(1) Fluctuations du remplissage de la mare suivie ($h(t)$) ; (2) Quantité d'œufs infectés dans la zone ϑ à proximité de la mare ($O(t)$) ; (3) Séroprévalence des animaux dans la zone ϑ ($P(t)$); (4) Prévalence des avortements ovins dans la zone ϑ ($A(t)$).

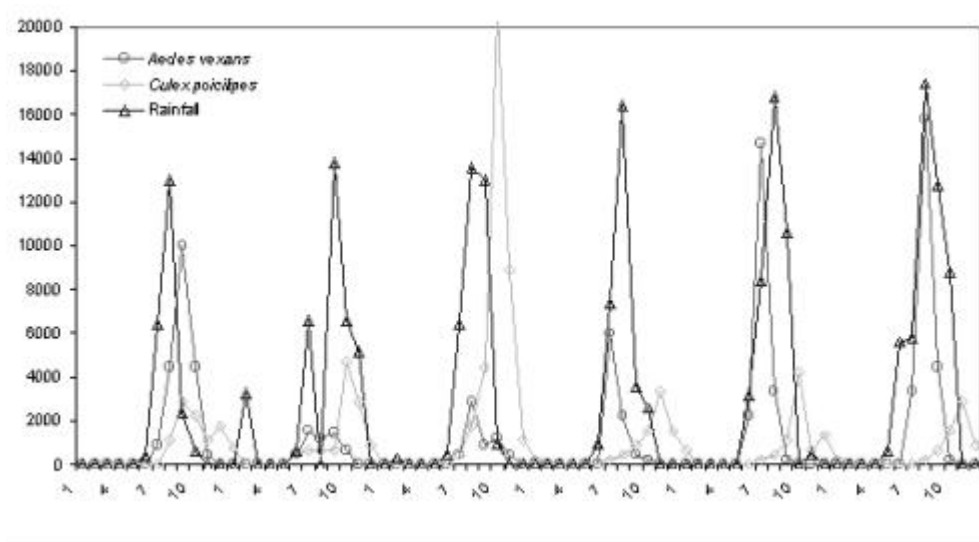
Ce modèle ne prend pas en compte la durée de virémie des animaux, ce qui est critiquable par exemple dans les équations (4) et (8):

Equation (4): $f_2(t) = H \left[\sum_{\alpha=2}^N p(\alpha, t) \right]$ parce que cela signifie que le nombre d'œufs infectés $O(t)$ ne peut pas augmenter en l'absence d'animaux sensibles.

Equation (8): $A(t) = f_1(t) \sum_{\alpha=2}^N p(\alpha, t)$ parce que cela signifie que le nombre d'avortements est proportionnel à la population d'animaux sensibles (au lieu d'animaux virémiques).

II.1.2 Modèle INRA-ENVL

En plus des éléments précédents, ce modèle représente la dynamique saisonnière de l'abondance de 2 vecteurs (*A. vexans* et *C. poicilipes*). Il s'appuie sur des résultats obtenus sur le site de Barkédji à partir du piégeage d'adultes en activité [Diallo, 1995; Diallo, 2000; Fontenille, 1998]. *Aedes vexans* est une espèce abondante en début de saison des pluies alors que *C. poicilipes* prend le relais par la suite.



Graph. 6) Abondance mensuelle des populations d'*A. vexans* et de *C. poicilipes*, Barkédji, Sénégal, 1991-1996 d'après [Fontenille, Traore-Lamizana et al., 1998]

Sur un plan technique, le modèle utilisé est un modèle à compartiments SEIR (sensible, exposé, infecté, résistant), classiquement utilisé en épidémiologie, auquel a été couplée une partie du modèle précédent. Il peut être schématisé de la manière suivante :

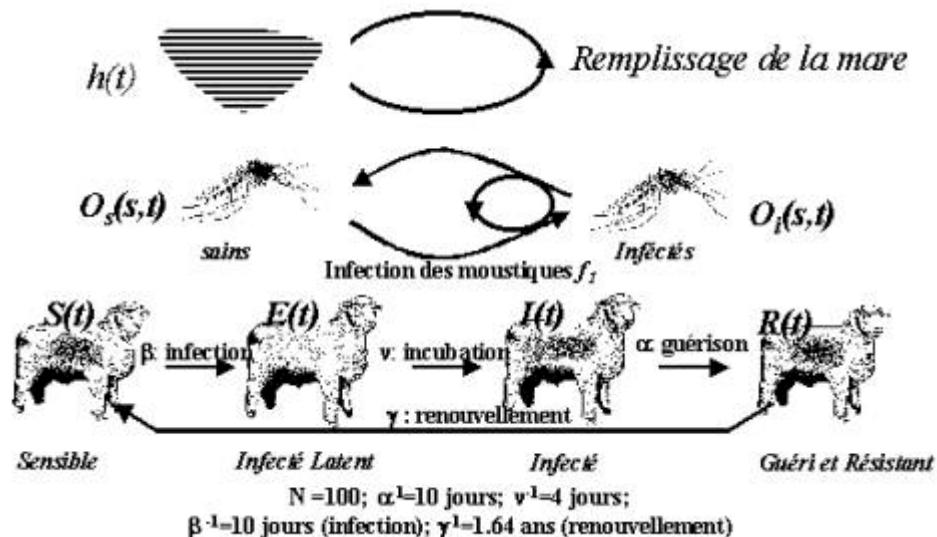


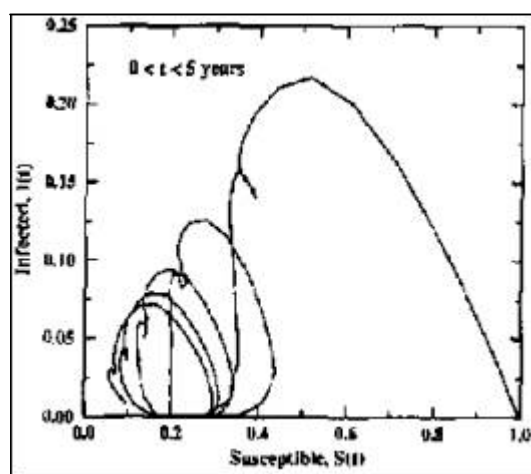
Fig. 2) Schéma du modèle INRA - ENVL

En première approche, les valeurs suivantes, compilées d'après la littérature disponible, ont été données aux paramètres :

- la durée d'infection (β) qui fait passer l'animal du statut sensible $S(t)$ au statut infecté latent $E(t)$ (animal non contagieux) suite à la piqûre d'un moustique infecté est estimée à 10 j ;

- la durée d'incubation (ν) pendant laquelle l'animal passe du statut latent au statut infecté $I(t)$ (animal contagieux), est estimée à 4 j ;
- la durée de guérison (α) pendant laquelle l'animal passe du statut infecté au statut guéri et résistant à une nouvelle infection $R(t)$, est estimée à 10 j ;
- la durée de renouvellement de la sensibilité (γ), faisant passer l'animal du statut résistant au statut sensible, est estimée à 1.6 ans. Cette valeur est un paramètre de renouvellement du troupeau. La valeur moyenne appliquée ci-dessus pourrait être remplacée par des valeurs estimées : en effet, plusieurs études ont été réalisées au Sénégal et l'on dispose d'estimations précises pour les paramètres démographiques des bovins, ovins et caprins [Lesnoff, 1999; Lancelot, 1998].

Ces paramètres permettent de simuler l'évolution de l'infection dans le temps. Le schéma présente le taux d'animaux infectés en fonction du taux d'animaux sensibles. Chaque boucle représente une année et on observe une évolution cyclique, suivi d'un emballement, qui pourrait représenter une épizootie :



Graph. 7) Evolution du taux d'animaux infectés $I(t)$ en fonction du taux d'animaux sensibles sur une période de 5 ans.

II.2 Spatialisation

Les modèles décrits simulent la dynamique d'un foyer de FVR autour d'une mare. Pour rendre compte de la diffusion spatiale (contagion à d'autres troupeaux des environs et d'autres régions plus ou moins éloignées), un modèle a été développé qui comporte deux paramètres principaux :

- diffusion de proximité (α) : contamination de nouveaux troupeaux par des moustiques infectés : troupeaux s'abreuvant à une mare « infectée » ;
- diffusion distante (β) : dissémination de la FVR à d'autres régions : mouvements de transhumance du bétail et mouvements actifs (vol) ou passifs (vent) des moustiques.

Les schémas suivants présentent l'effet de ces paramètres sur la vitesse de propagation de la maladie :

$\alpha=.3, t=1$ et $t=50$



$\alpha=.7, t=1$ et $t=50$



Fig. 3) Modèle à deux dimensions sans diffusion distante ($\beta = 0$).

Ce premier cas pourrait représenter la diffusion par contact d'une maladie contagieuse comme la rage par exemple.

$\alpha=.3, t=1, t=10, t=20$ et $t=50$

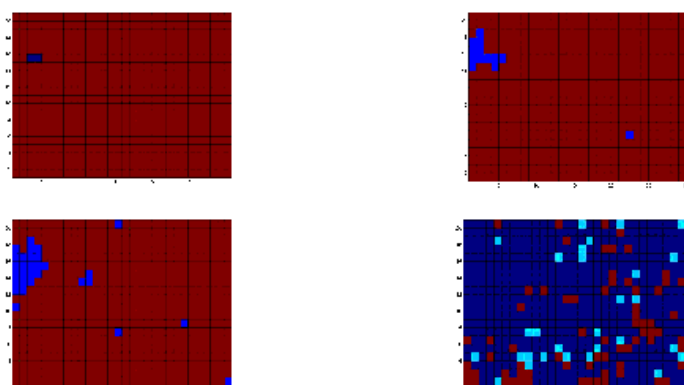


Fig. 4) Modèle à 2 dimensions avec diffusion distante ($\beta = 0.1$).

Dans le second cas, des foyers secondaires apparaissent à grande distance du foyer primaire, comme cela a déjà été rencontré dans l'historique de la FVR.

Chapitre III Enquêtes de terrain

Pour valider de telles simulations et intégrer les niveaux entomologique et hydrologique, il est nécessaire de disposer de données observées sur le terrain. Par ailleurs, le modèle de spatialisation nécessite des données sur les mouvements animaux. Il a donc fallu déterminer un endroit où l'ensemble des observations pourrait être réalisées, dans de bonnes conditions matérielles et sur une durée suffisamment longue pour espérer observer un épisode de FVR.

Compte tenu des acquis en virologie et en entomologie, le choix s'est porté sur le site de Barkédji, à 30 km au Sud-Est de Linguère dans la région pastorale du Ferlo. La zone d'étude est un cercle de 20 km de rayon centré sur le bourg de Barkédji : c'est

approximativement la zone d'influence de cette sous-préfecture, et une unité pastorale cohérente.

Cette région présente un climat sahélien typique avec des mares temporaires dont la persistance est conditionnée par la pluviométrie. En saison pluvieuse le pâturage est abondant et l'eau de surface est disponible : les concentrations de ruminants sont élevées. En saison sèche, seuls les points d'eau souterraine subsistent (forages, puits, céanes), et une grande partie des troupeaux transhume à la recherche d'eau et de pâturage.

III.1 Besoins en informations

III.1.1 Informations zootechniques et sanitaires

Pour comprendre et modéliser la diffusion de proximité de la FVR dans une population, il est nécessaire de connaître la localisation des troupeaux et des éleveurs, de la dynamique de la densité animale, de la composition de ces troupeaux et de leurs déplacements quotidiens pour la recherche de points d'eau et de pâturages. En ce qui concerne la diffusion à distance, il est nécessaire de prendre en compte les mouvements de transhumance en évaluant leur importance et leur nature.

La vérification des hypothèses de diffusion en périodes endémiques et épidémiques suppose que le suivi du statut sérologique des troupeaux vis à vis de la FVR ainsi que la déclaration des cas de suspicion soient réalisés en parallèle avec le relevé systématique des coordonnées géographiques des troupeaux concernés.

La représentation de ces informations passe par une cartographie précise de la zone d'étude et la superposition, grâce à un système d'information géographique, des informations sur les mouvements animaux et le statut sanitaire.

III.1.2 Informations entomologiques

Les études effectuées à Barkédji ont mis en évidence un pic d'abondance d'*A. vexans* en début de saison des pluies et un relais par *C. poicilipes* en fin de saison des pluies. En comparant ces résultats à d'autres travaux entrepris en Afrique de l'Est sur le genre *Aedes*, l'hypothèse d'un rôle d'initiation des épizooties par les *Aedes* et d'amplification par les *Culex* a été avancée [Diallo, 2000; Fontenille, 1998].

Il faut préciser la dynamique des populations de ces 3 espèces à Barkédji, identifier les biotopes et les événements climatiques favorables à leur prolifération et caractériser les caractéristiques spatio-temporelles du contact ruminants - vecteurs. Il serait pertinent de mener parallèlement des essais en laboratoire pour estimer certains paramètres biologiques des vecteurs. Les plus importants à déterminer sont :

- le pourcentage des œufs pondus qui entrent en dormance. On ne sait pas si ce pourcentage est constant au cours du temps, ou s'il dépend du moment de ponte : faible en début saison des pluies et élevé en fin de saison des pluies « en préparation » de la saison sèche. Cette dernière hypothèse est actuellement privilégiée et va de paire avec le caractère monocyclique supposé de l'espèce.
- les facteurs influençant la survie des œufs (ex : rigueur et durée de la saison sèche) ;
- les conditions de maturation et d'éclosion des œufs : certains œufs devant être déshydratés plusieurs fois pour éclore ce qui permet à l'espèce de survivre en cas d'une durée de mise en eau inférieure au cycle larvaire ;
- la survie des larves écloses, qui dépend des caractéristiques physico-chimiques de l'eau (salinité, dureté, pH) mais aussi des caractéristiques biologiques de la mare (ressources nutritives, compétition, prédation).

III.1.3 Données environnementales

Le niveau d'hivernage $h(t)$ i.e. le remplissage de la mare, est un paramètre de contrôle des modèles utilisés. Dans l'exemple présenté, $h(t)$ est uniformément distribuée dans l'intervalle $[H_{min}, L]$: la moyenne est $(L + H_{min}) / 2$. Pour des simulations plus réalistes, il faut déterminer la distribution de $h(t)$ au cours de la saison des pluies.

Un dispositif simple consiste à équiper des mares en échelles limnimétriques et à instaurer un suivi pluviométrique en parallèle au relevé des niveaux d'eau. Cette simplicité est toutefois coûteuse en matériel, observateurs et transmission des données, dans un milieu où les déplacements sont difficiles en saison pluvieuse. Une alternative, permettant d'envisager de travailler sur des surfaces plus vastes, est de coupler les mesures au sol à une détection spatiale des ressources en eau de surface. L'eau a la particularité d'avoir une réflectance moyenne dans le domaine du visible qui chute brutalement dans le proche et moyen infra-rouge, contrairement à la plupart des autres corps (végétation, sols nus) qui ont une réflectance moyenne ou forte dans cette gamme de longueurs d'onde. Ainsi la séparation « eau / non eau » pose peu de problèmes en télédétection si l'on travaille dans le domaine du proche ou moyen infra-rouge, et il est facile de l'isoler de son contexte.

La cartographie de l'eau libre et des zones inondables peut être réalisée par l'utilisation des données VEGETATION-SPOT 4 à basse résolution et haute répétitivité: on obtient un masque d'eau, c'est-à-dire une cartographie de l'eau de surface à un instant donné. Le suivi du niveau et de la surface d'un échantillon de mares temporaires instrumentées devrait permettre d'établir une relation entre surface et hauteur d'eau et d'étalonner les mesures de surface par images satellitaires.

La direction des vents dominants et les épisodes marquants (fréquence et orientation des lignes de grain en saison pluvieuse) sont importantes à prendre en compte car ils pourraient entraîner le déplacement passif des vecteurs, et être à l'origine d'une diffusion à distance du virus.

III.2 Protocoles d'enquêtes

III.2.1 Entomologie

☆ Matériel utilisé

- *Capture des moustiques néonates*

Le piège utilisé a été créé pour les besoins de l'étude, sur les conseils de B. Mondet, laboratoire d'entomologie médicale, IRD / Institut Pasteur de Dakar. Inspiré du modèle conique de Pritchard & Scholfield, (1980), il s'en distingue par un diamètre plus important (0.5 m), et la particularité d'être flottant : fixé par un axe en acier inoxydable à l'endroit désiré, il coulisse sur cet axe et son flotteur lui permet de suivre le niveau de l'eau. Il est présenté par le schéma suivant :

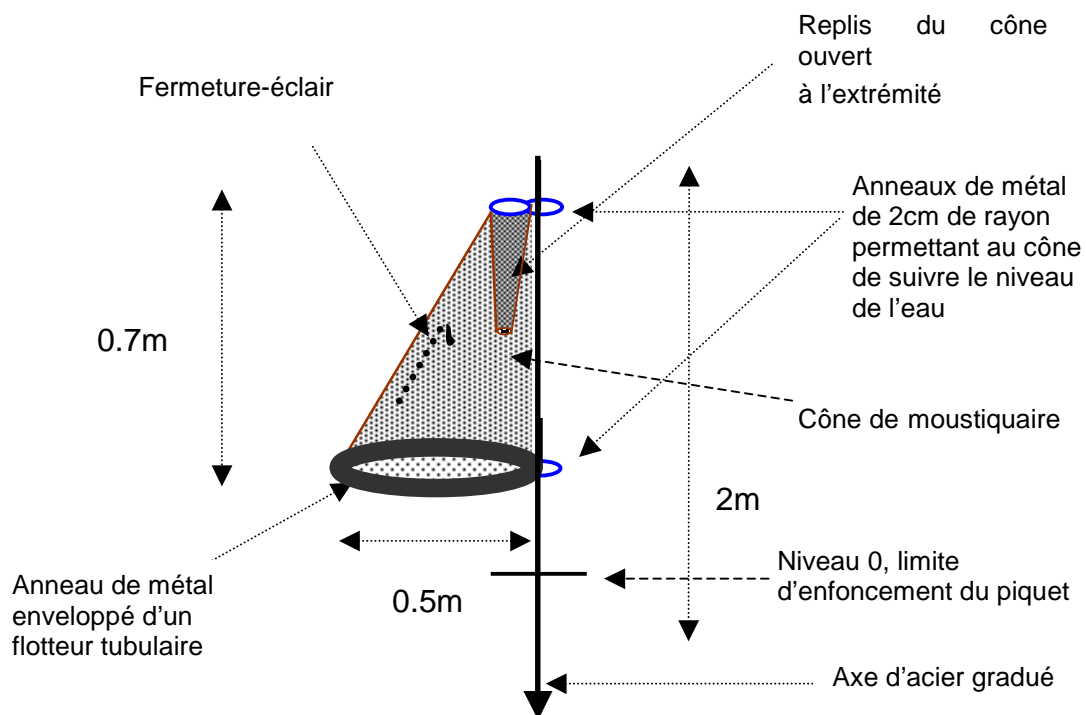


Fig. 5) Piège à émergence utilisé dans l'étude de la FVR au Sénégal

- Capture des moustiques adultes.
Les moustiques adultes ont été capturés à l'aide de pièges lumineux de type CDC.

☆ Méthodes de capture

- Récolte et traitement des moustiques émergents

Les pièges sont disposés à la périphérie et à différents niveaux des mares, en fonction de l'observation des répartitions larvaires et de la variabilité des biotopes. La moyenne est de 5 pièges par mare. Ils sont relevés tous les matins entre 8 et 10 h pendant toute la durée de la mise en eau des mares: les moustiques sont prélevés à l'aspirateur, tués à l'éther, identifiés et comptés au moyen d'une loupe binoculaire. *A. vexans*, *A. ochraceus* et *C. poicilipes* sont identifiés, comptés et stockés séparément des autres espèces, qui sont regroupées par genres. Tous les moustiques collectés et triés sont stockés dans des tubes secs avec dessiccateur pour une vérification ultérieure de leur identification (voir fiche entomologie en annexe).



Photo. 1) Disposition des pièges à émergence autour d'une mare.

- Récolte et traitement des moustiques adultes

Les moustiques étudiés ont une activité de prédation nocturne, exercée sur les animaux et les humains fréquentant la mare ou séjournant à proximité. Les pièges CDC sont placés simultanément à des distances variables des mares ainsi que dans les campements et parcs de nuits, 3 j de suite aux mêmes endroits, de 19 h à 24 h.



Photo. 2) Pose d'un piège CDC au bord de la mare de Furdu

Les moustiques sont identifiés, comptés et allotés pour suivre l'évolution de l'activité de prédation et mieux préciser les zones de rencontre vecteur / hôte.

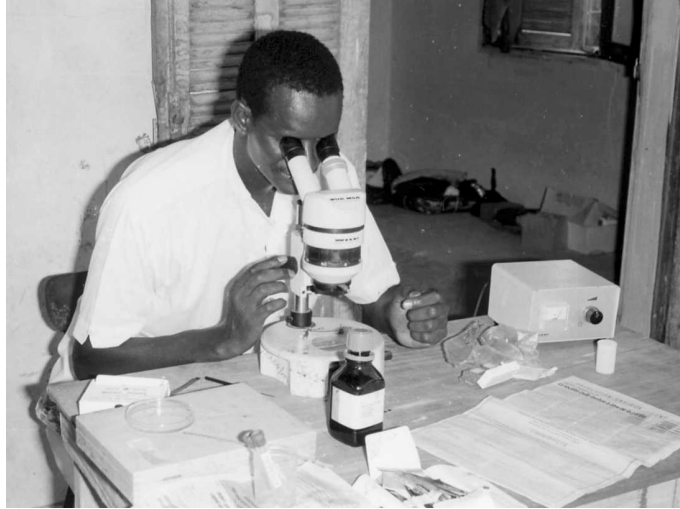


Photo. 3) Identification et comptage des moustiques capturés

III.2.2 Choix des mares étudiées

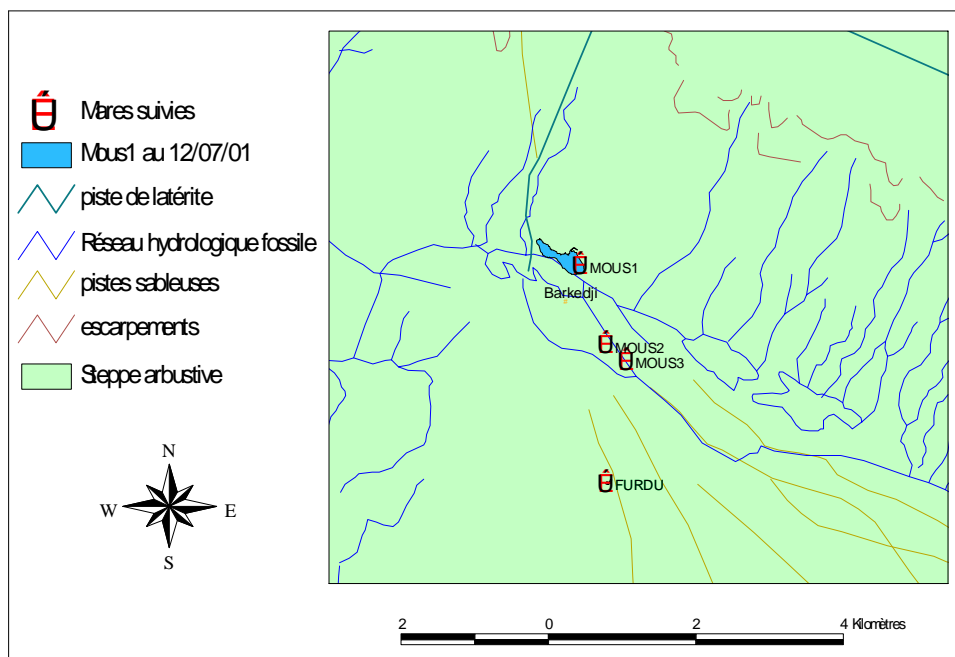
Un relevé de la situation géographique des mares et de leurs caractéristiques édaphiques et écologiques (durée de mise en eau après chaque pluie, sol, végétation, surface) des principales mares situées dans un rayon de 20 km autour de Barkédji (130), nous a permis de distinguer 2 grandes catégories de mares :

- les mares à cuvette argileuse, généralement de grande taille (diamètre > 100 m) qui restent en eau pendant toute la saison des pluies et une partie de la saison sèche et qui présentent une végétation ligneuse dense. Au cours de la saison des pluies, ces mares sont colonisées par une végétation aquatique à vaisseaux aérifères indispensables à l'oxygénation de certaines larves de moustique comme celles du genre *Mansonia* (pistias, nénuphars, lentilles d'eau).
- les mares à sol sableux à sablo-argileux, plus petites (diamètre < 100 m) et situées à proximité des premières, dont le niveau fluctue beaucoup et où la végétation ligneuse est faible. Les plantes aquatiques qui ne peuvent s'y établir à cause des assèchements répétés. En revanche, en raison de ces assèchements, la végétation herbacée colonise la périphérie et une partie de la mare en saison des pluies.

Nous avons donc décidé d'étudier deux grandes mares :

- la mare de Barkédji, située dans le lit du Ferlo, est en continuité avec d'autres mares du même lit et collecte donc l'eau de pluie sur une grande surface par gravité (étant donné la grande taille de cette mare, le site d'étude a été baptisé MOUS1;
- la mare de Fourdou, située hors du lit du Ferlo, est remplie par son bassin versant.

Nous avons également choisi deux petites mares situées à proximité de la première et ayant une durée de vie de 7 à 10 j (MOUS2) et de 10 à 15 j (MOUS3) après chaque pluie. La carte suivante présente la localisation des mares suivies:



Carte 1) Localisation des mares suivies à Barkédji.

III.2.3 Cartographie

En collaboration avec le Pôle Pastoral Zones Sèches de l'ISRA-LNERV, nous avons réalisé une carte d'occupation des sols par l'interprétation de photographies aériennes datant de fin 1979 et début 1980. Cette carte a été intégrée dans un système d'information géographique (SIG). Les principaux éléments qu'elle comporte sont le réseau hydrographique fossile, les mares, les zones inondables, les cultures, les localités, les pistes principales et secondaires, la savane arbustive et la savane herbeuse. Cette carte sera actualisée à l'aide d'images du satellite Spot prises en fin d'hivernage 2001.

III.2.4 Enquêtes démographiques et zootechniques

Une enquête préliminaire a permis de recenser les points d'eau, les campements et les troupeaux présents en fin de saison sèche (juin). Sur la base de ces informations et de la cartographie établie à partir des photographies aériennes, un plan de sondage a été établi pour les enquêtes menées en saison pluvieuse.

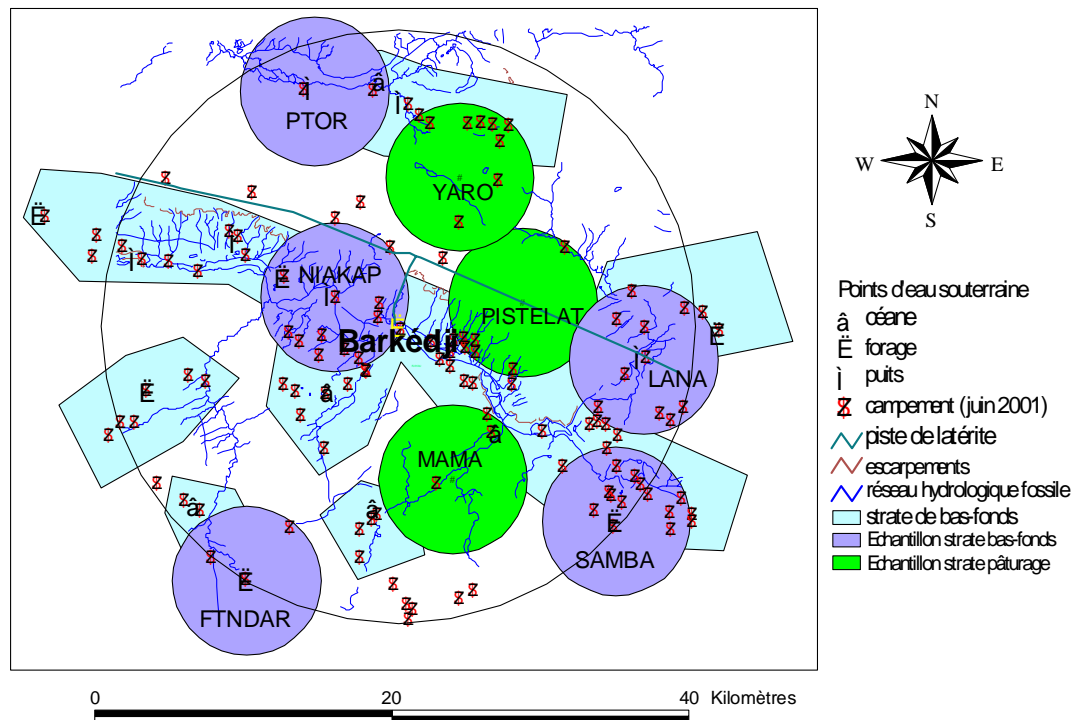
☆ Echantillonnage

L'enquête préliminaire a montré que la région d'étude était trop vaste pour être enquêtée de manière exhaustive. Nous avons choisi de travailler par sondage stratifié. Deux strates ont été définies sur la base de la densité des campements en saison sèche :

- la strate « Ferlo », qui présente une forte densité de campements regroupés autour de points d'eau permanents (forages, puits, céanes) et dont la vallée du Ferlo et ses affluents constituent la majeure partie,
- la strate « Pâturage », plus éloignée de la vallée du Ferlo et des forages, utilisée principalement comme zones de pâturages et très fréquentées en saison pluvieuse.

Une fraction de sondage de 50% est nécessaire car les hétérogénéités spatiales sont fortes. Par exemple, dans la strate « Pâturage », les éleveurs ont signalé l'existence de lieux peu fréquentés car envahis par les *Zornia spp.*, responsables de météorisations pendant la saison pluvieuse.

Nous avons défini des unités spatiales, par des cercles de 5 km de rayon centrés sur des points tirés au sort dans chacune des strates. Nous n'avons pas exclu les cercles débordant des strates ni de la zone d'étude, mais nous avons imposé une surface de recoupement des cercles échantillonnés inférieure à 5%. Nous avons retenu une fraction de sondage plus forte dans la strate « Ferlo », plus peuplée que la zone « Pâturage » : 5 unités ont été échantillonnées dans la strate « Ferlo » et 3 dans la zone « Pâturage ».



Carte 2) Echantillonnage de la zone de Barkédji pour l'étude des mouvements de troupeaux pendant la saison des pluies 2001.

Le cercle vide représente la zone d'étude, d'un rayon de 20 km centré sur Barkédji. Les zones bleu ciel représentent la strate « Ferlo » et le reste la strate « Pâturage ». Les cercles bleu foncé sont les unités échantillonnées dans la strate « Ferlo » et les cercles verts celles provenant de la strate « Pâturage ».

★ Informations récoltées

- Chaque unité est visitée une fois par mois (dernière décade), de juillet à décembre, au cours d'une tournée de 10 j faite avec un véhicule 4 x 4. Au cours de ces tournées, l'ensemble des concessions et campements situés à l'intérieur d'un des cercles échantillonnés sont systématiquement enquêtés.
- A cet égard, les coordonnées des centres des échantillons sont mémorisées dans les GPS et la fonction « GoTo » est utilisée pour connaître la distance du campement au centre de l'échantillon. Le tableau suivant donne le code de chaque échantillon, sa strate et ses coordonnées géographiques.

Echantillon	Centre (d° décimaux)	
	Latitude N	Longitude W
<i>Strate Ferlo</i>		
PTOR	15.42	-14.92
NIAKAP	15.30	-14.91
FTNDAR	15.12	-14.96
SAMBA	15.16	-14.74
LANA	15.26	-14.72
<i>Strate Pâturage</i>		
YARO	15.37	-14.83
PISTELAT	15.29	-14.79
MAMA	15.19	-14.83

Tab. 5) Centres des échantillons retenus pour l'étude de la FVR à Barkédji (l'échantillon est défini par un cercle de 5 km de rayon autour du centre).

- Un jeu de fiches (voir annexe) sera rempli pour chaque concession possédant au moins un troupeau de grands ou de petits ruminants :
 - **Fiche Lieu de résidence**, remplie à chaque passage. En effet, un lieu de campement peut ne pas être habité en début de saison, et très fréquenté quand les pâturages sont installés et réciproquement.
 - **Fiche troupeau**, pour caractériser le troupeau enquêté, ses mouvements éventuels de transhumance et l'exploitation du milieu (mares et pâturages fréquentés). En cas de transhumance, les lieux de provenance et de destination seront déterminés au mieux sur les cartes au 1 / 200.000^{ème} disponibles ou au minimum par le nom de la communauté rurale et du département. Si un éleveur enquêté possède plusieurs troupeaux (bovins, petits ruminants) et que ces troupeaux ont des modes de conduite différents (mouvements de transhumance, parcours utilisés, points d'eau fréquentés), une fiche doit être remplie pour chaque troupeau.
 - **Fiche pâturage**, pour caractériser le pâturage fréquenté par les animaux au moment de l'enquête : localisation, caractères édaphiques, données phytosociologiques. Cette fiche sera remplie sur le lieu de pâturage, comme indiqué par l'éleveur ou le berger s'occupant des animaux.
 - **Fiche mare**, pour caractériser le point d'eau fréquenté par les animaux : localisation, type de point d'eau, végétation, etc.

III.2.5 Epidémiosurveillance

Le protocole général d'épidémiosurveillance de la FVR retenu par la Direction de l'élevage a été appliqué. Mis en œuvre par le chef de poste vétérinaire, il doit mettre en évidence toute activité virale clinique ou silencieuse.

☆ Sensibilisation des éleveurs

Il est demandé au chef de poste vétérinaire d'organiser au moins une réunion hebdomadaire pour informer les éleveurs, à l'occasion des marchés ou campagnes de vaccinations. Le chef de poste dispose du matériel pédagogique nécessaire à ces réunions (affiches, cassette vidéo). Les informations concernant ces réunions (date, nombre d'éleveurs présents, événements signalés par les éleveurs, etc.) sont renseignées sur la fiche « Visite » disponible sur les Palm Pilots du réseau FVR et envoyées par modem sur le serveur Domino de la Direction de l'élevage.

☆ Surveillance clinique et sérologique

- Fiche foyer : une suspicion clinique de FVR est rencontrée quand des fréquences anormalement élevées d'avortements et / ou de mortalités néonatales sont rencontrées dans les troupeaux de ruminants pendant la saison pluvieuse (juillet à novembre). Pour les grands troupeaux, une fréquence élevée est atteinte si les avortements et les mortalités néonatales dépassent 10% des naissances observées pendant la semaine écoulée. Pour les petits troupeaux, on fixe arbitrairement le seuil à 2 avortements ou mortalités néonatales survenant en au plus une semaine.
- Fiche prélèvement : des prélèvements sanguins (sur tube sec) sont effectués sur les troupeaux atteints (au mieux une trentaine de prélèvements). Les produits d'avortements sont envoyés en l'état s'ils ne sont pas trop souillés, dans des pots prévus à cet effet. Les agneaux ou chevreaux nouveaux nés morts sont autopsiés et des fragments de foie sont placés dans du formol à 10% pour analyses histologiques. Les prélèvements sont placés sur glace dans des glacières fermées hermétiquement et acheminées vers le LNERV.

☆ Surveillance sérologique

Quatre troupeaux sentinelles ont été choisis. Une première série de prélèvements a été effectuée en juillet 2001. Sur la base des résultats sérologiques, les animaux négatifs ont été identifiés à l'aide de boucles auriculaires lors du second passage qui a eu lieu début août 2001. Ce rythme mensuel est maintenu jusqu'à la fin de la saison des pluies.

III.2.6 Relevés climatiques et hydrologiques

- ☆ Un pluviographe numérique a été posé dans le poste vétérinaire de Barkédji par l'équipe du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère de l'Ecole Supérieure Polytechnique. Il enregistre à la seconde près tous les basculements d'augets à partir de sa mise en fonctionnement. Il permet un relevé précis de l'importance des chutes de pluies et de leur intensité.
- ☆ Nous disposons également des champs de pluies décadaires, élaborés au moyen du logiciel Surfer à partir des données recueillies au niveau des stations synoptiques et des postes pluviométriques répartis sur le territoire sénégalais (prévisions par krigeage obtenues à partir des données des stations synoptiques).
- ☆ Des échelles limnimétriques ont été placées avec l'aide de l'équipe d'hydrologie de l'IRD de Dakar dans les 4 mares d'étude et les niveaux sont relevés bi-quotidiennement pendant toute la durée de la saison des pluies.
- ☆ La surface des mares est relevée par GPS pour différents niveaux de remplissage afin d'établir une corrélation entre ces deux mesures.

Chapitre IV Gestion des données

IV.1 Modèle conceptuel des données

Nous présentons ici la gestion des données de dynamique des populations de ruminants, l'exploitation du milieu par les troupeaux (mares, pâturages) et l'entomologie. Les données sérologiques et virologiques sont gérées par la base de données Lotus Notes installée sur le serveur Domino de la Direction de l'élevage.

Nous avons utilisé la méthode MERISE [Tardieu, Rochfeld et al., 1983] pour construire le modèle conceptuel des données (MCD). Les informations sont représentées par des entités (figurées par des rectangles) reliées entre elles par des relations (lignes et

ovale portant le nom de la relation). Les entités sont porteuses d'au moins une propriété : l'identifiant. Les relations peuvent également être porteuses de propriétés.

Cette méthode a été utilisée au Sénégal pour construire la base de données Baobab et l'application de suivi de troupeaux Laser [Juanès, 1999 ; Lancelot, 1998]. Le modèle complet est présenté sur la figure 18. Seules les propriétés des entités ont été représentées. Les relations porteuses ont été indiquées par un trait horizontal barrant la propriété. Plusieurs entités identiques sont dupliquées sur le MCD (DATE, ECHANTILLON) afin d'éviter le croisement des lignes reliant entités et relations.

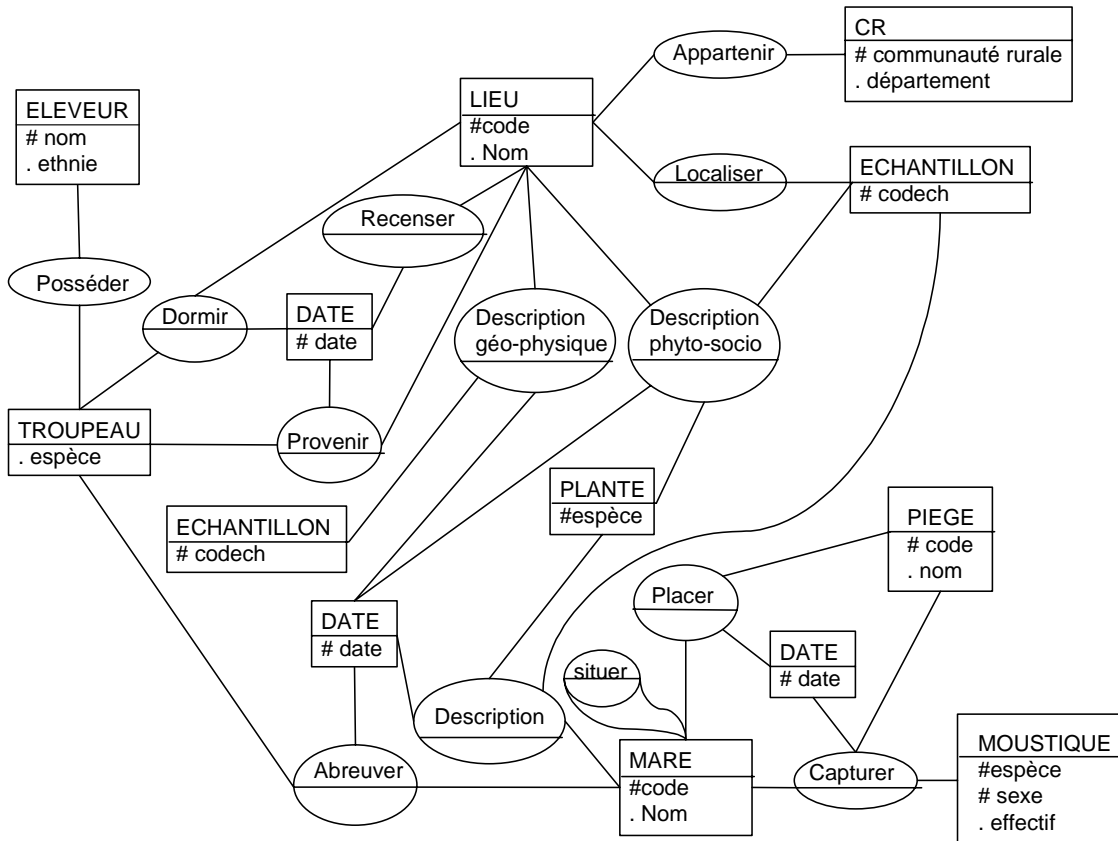


Fig. 6) *Modèle conceptuel des données global pour la gestion des informations de l'enquête sur la FVR à Barkédji pendant l'hivernage 2001*

D'une manière générale, les relations porteuses de propriétés donnent des tables dans le modèle physique des données (passage du MCD aux tables pouvant être intégrées dans l'implantation physique de la base de données).

Dans la suite de ce paragraphe, nous présentons la structure de la base de données dérivée du MCD.

IV.2 Structure de la base de données

IV.2.1 Table T_RecEch : recensement des troupeaux dans les unités spatiales échantillonnées

IV.2.1.1 Modèle conceptuel des données

L'entité *LIEU* représente chaque lieu de résidence (village, campement) enquêté. Les enquêtes étant répétées dans le temps, éventuellement aux mêmes endroits, il est nécessaire de préciser la date de passage (entité *DATE*). La propriété *Recenser* est porteuse de tous les attributs relatifs aux peuplements humain et animal. Une seconde relation a été incluse dans la table RecEch : *Localiser*, porteuse des coordonnées

géographiques du *LIEU*. Elle relie ce dernier à l'entité *ECHANTILLON* qui donne le code de l'échantillon spatial auquel se réfère le *LIEU*.

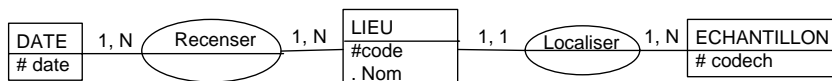


Fig. 7) Modèle conceptuel des données de la table *T_RecEch*

IV.2.1.2 Structure de la table *T_RecEch*

Clé	Champ	Signification	Type	Longueur
→	R_codelieu	Code du lieu utilisé avec le GPS	Caractère	10
	R_nomlieu	Nom du lieu	Caractère	25
→	R_date	Date de l'enquête	Date	-
→	R_codech	Code de l'échantillon : PTOR, YARO, NIAKAP, PISTELAT, LANA, MAMA, SAMBA, FTNDAR	Caractère	8
	R_latitude	Latitude du lieu enquêté, en degrés décimaux	Numérique	Flottant
	R_longitude	Longitude du lieu enquêté, en degrés décimaux	Numérique	Flottant
	R_NbConc	Nombre de concessions	Numérique	Entier
	R_NbHab	Nombre d'habitants	Numérique	Entier
	R_NbBo	Nombre de troupeaux de bovins	Numérique	Entier
	R_NbPR	Nombre de troupeaux de petits ruminants	Numérique	Entier

Tab. 6) Structure de la table *T_RecEch*

IV.2.1.3 Règles de gestion

Il ne peut pas y avoir 2 lignes de la table *T_RecEch* avec le même code de lieu (*R_Codelieu*), la même date (*R_date*) et le même code échantillon (*R_codech*).

IV.2.2 Table *T_ProvTroup* : localisation du parc de nuit et provenance des troupeaux enquêtés

IV.2.2.1 Modèle conceptuel des données

Le troupeau est caractérisé par sa composition et par son appartenance à un éleveur. Le lieu de séjour à la date de l'enquête est défini par la relation *Dormir*, porteuse entre autres des coordonnées géographiques du parc de nuit. Le lieu de séjour en saison sèche et la date d'arrivée sur le lieu de séjour en saison des pluies sont décrits par la relation *Provenir*. On ne connaît pas avec précision le lieu de séjour en saison sèche. On demande aux éleveurs d'indiquer la communauté rurale et le département.

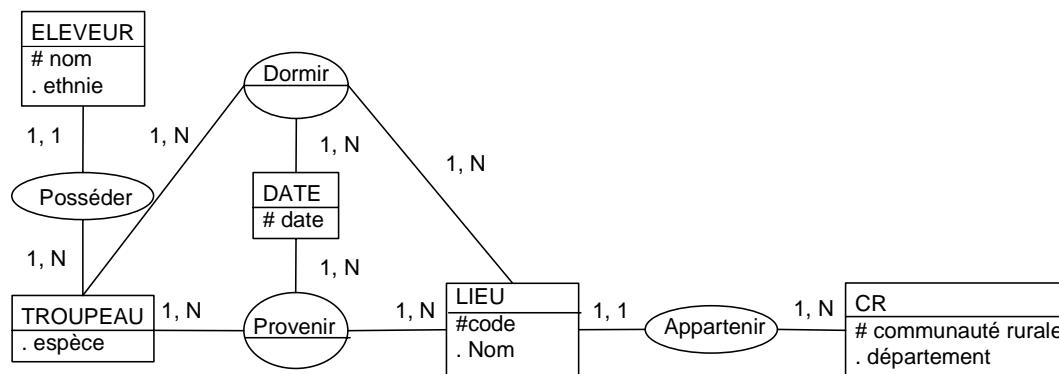


Fig. 8) Modèle conceptuel des données de la table T_ProvTroup

IV.2.2.2 Structure de la table T_ProvTroup

Clé	Champ	Signification	Type	Longueur
→	P_nomelev	Nom de l'éleveur	Caractère	25
	P_ethnie	Ethnie de l'éleveur	Caractère	10
→	P_espece	Espèce du troupeau (Bo : bovins, PR : petits ruminants)	Caractère	2
→	P_date	Date de l'enquête	Date	-
	P_latitude	Latitude du parc de nuit, en degrés décimaux	Numérique	Flottant
	P_longitude	Longitude du parc de nuit, en degrés décimaux	Numérique	Flottant
	P_codelieu	Code du lieu du parc de nuit (code GPS) : même code que celui du champ R_codelieu de la table T_RecEch	Caractère	10
	P_dist	Distance maximale des pâturages exploités par ce troupeau à cette date, en km	Numérique	Flottant
	P_arrive	Date d'arrivée sur le lieu de séjour de saison pluvieuse	Date	-
	P_lieuSS	Code du lieu de séjour en saison sèche	Caractère	10
	P_nomlieuSS	Nom du lieu de séjour en saison sèche	Caractère	25
	P_CR	Communauté rurale du lieu de séjour de saison sèche	Caractère	25
	P_dep	Département du lieu de séjour de saison sèche	Caractère	25

Tab. 7) Structure de la table T_ProvTroup

IV.2.2.3 Règles de gestion

- Il ne peut pas y avoir 2 lignes de la table T_ProvTroup avec le même nom d'éleveur, la même espèce et la même date..
- Le code du lieu du parc de nuit est le même que celui du champ R_codelieu de la table T_RecEch. En revanche, les coordonnées géographiques sont celles du parc de nuit. Ces coordonnées permettront de tracer des zones tampons autour du parc de nuit, pour déterminer les pâturages exploités.

IV.2.3 Table T_Mare : description de la localisation des mares

IV.2.3.1 Modèle conceptuel des données

Cette table donne une description approximative de la position de toutes les mares utilisées par les troupeaux. Une description plus précise est donnée dans la table T_DescriMare, qui ne concerne toutefois qu'une partie des mares de la zone de Barkédji.

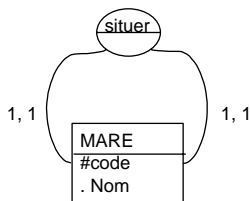


Fig. 9) Modèle conceptuel des données de la table T_Mare

IV.2.3.2 Structure de la table T_Mare

Clé	Champ	Signification	Type	Longueur
→	M_codemare	Code de la mare	Caractère	10
	M_nommare	Nom de la mare	Caractère	25
	M_type	Type de sol de la mare (SAB : sableux ; SAR : sablo-argileux ; ARG : agrileux)	Caractère	3
	M_latitude	Latitude de la mare, en degrés décimaux	Numérique	Flottant
	M_longitude	Longitude de la mare, en degrés décimaux	Numérique	Flottant

Tab. 8) Structure de la table T_Mare

IV.2.3.3 Règles de gestion

- Il ne peut pas y avoir 2 lignes de la table T_Mare avec le même champ M_codemare.
- La latitude et la longitude sont indiquées de manière approximative (les plus grandes mares font plusieurs km de long). On prend comme point soit le centre de la mare si celle-ci a été identifiée en saison sèche, soit un abord très fréquenté par le bétail en saison pluvieuse.

IV.2.4 Table T_DescriMare : description physique des mares

IV.2.4.1 Modèle conceptuel des données

Cette table décrit les caractéristiques physiques et phytosociologiques d'un sous-échantillon des mares répertoriées dans T_Mare.

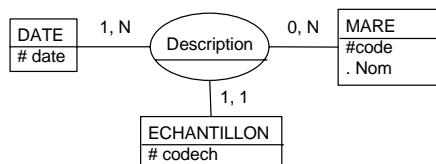


Fig. 10) Modèle conceptuel des données de la table T_DescriMare

IV.2.4.2 Structure de la table T_DescriMare

Clé	Champ	Signification	Type	Longueur
☞	D_codemare	Code de la mare	Caractère	10
☞	D_date	Date de l'enquête	Date	-
☞	D_codech	Code échantillon spatial de la mare	Caractère	10
	D_eaulibre	Existence d'eau de surface dans la mare à la date de l'enquête (O : oui ; N : non)	Caractère	1
	D_surf	Surface de l'eau libre (m ²) à la date de l'enquête	Numérique	flottant
	D_mesure	Outil de mesure de la surface de la mare (GPS : appareil GPS, DEC : décamètre ; AUC : aucun)	Caractère	3
	D_hauteur	Hauteur d'eau (m) lue à l'échelle limnimétrique	Numérique	Flottant

Tab. 9) Structure de la table T_DescriMare

IV.2.4.3 Règles de gestion

Il ne peut pas y avoir 2 lignes de la table avec le même code de mare, le même code échantillon et la même date de visite.

IV.2.5 Table T_PhytoMare : description phytosociologique des mares

IV.2.5.1 Modèle conceptuel des données

Cette table donne une description de la dynamique phytosociologique d'un sous-échantillon de mares répertoriées dans T_Mare. L'objectif est d'étudier la diversité des espèces végétales et des dynamiques saisonnières pouvant être liées à l'abondance des moustiques vecteurs de la FVR.

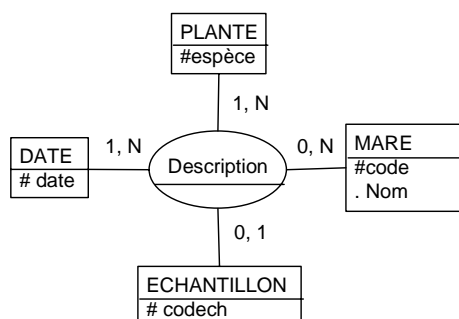


Fig. 11) Modèle conceptuel des données de la table T_PhytoMare

IV.2.5.2 Structure de la table T_PhytoMare

Clé	Champ	Signification	Type	Longueur
☞	PM_codemare	Code de la mare	Caractère	10
☞	PM_date	Date de l'enquête	Date	-
☞	PM_codech	Code échantillon spatial de la mare	Caractère	10
☞	PM_espece	Nom de l'espèce végétale	Caractère	50
	PM_strate	Strate végétale : code numérique de 1 à 10	Numérique	Entier
	PM_cotad	Cote abondance – dominance : code numérique de 0 à 5	Numérique	Entier

Tab. 10) Structure de la table T_PhytoMare

IV.2.5.3 Règles de gestion

Il ne peut pas y avoir 2 lignes de la table T_PhytoMare avec le même code de mare, le même code échantillon, la même date de visite et le même nom d'espèce végétale.

IV.2.6 Table T_PatuDate : description physique des pâturages

IV.2.6.1 Modèle conceptuel des données

Cette table donne une description physique des lieux de pâturages. Ces lieux sont choisis dans chaque échantillon spatial dans le but de faciliter l'interprétation des images satellitaires recueillies sur le site de Barkédji pour réaliser la carte d'occupation des sols en fin d'hivernage 2001.

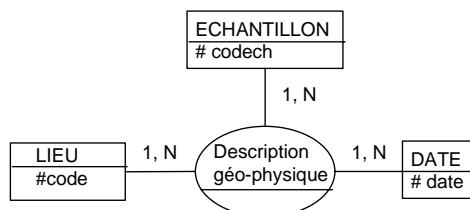


Fig. 12) Modèle conceptuel des données de la table T_PatuDate

IV.2.6.2 Structure de la table T_PatuDate

Clé	Champ	Signification	Type	Longueur
→	PD_codelieu	Code du lieu enquêté	Caractère	10
→	PD_codech	Code de l'échantillon	Caractère	10
→	PD_date	Date de l'enquête	Date	-
	PD_latitude	Latitude du lieu enquêté, en degrés décimaux	Numérique	Flottant
	PD_longitude	Longitude du lieu enquêté, en degrés décimaux	Numérique	Flottant
	PD_topo	Topographie du lieu enquêté : voire la fiche Pâturages pour les modalités	Caractère	25
	PD_substrat	Substrat du lieu enquêté : voir la fiche Pâturages pour les modalités.	Caractère	25
	PD_anthro	Anthropisation du lieu enquêté : voir la fiche Pâturages pour les modalités	Caractère	25
	PD_pasto	Pression pastorale sur le lieu enquêté : F faible, M moyenne, I importante	Caractère	1
	PD_vegeglob	Etat apparent global de la végétation sur le lieu enquêté	Caractère	25
	PD_vegetype	Type de végétation sur le lieu enquêté : voir la fiche Pâturages pour les modalités	Caractère	25
	PD_formlig	Formation ligneuse sur le lieu enquêté : voir la fiche Pâturages pour les modalités	Caractère	25
	PD_formherb1	Première espèce dominante dans la formation herbacée	Caractère	50
	PD_formherb2	Seconde espèce dominante dans la formation herbacée	Caractère	50
	PD_formarb1	Première espèce dominante dans la formation arbustive	Caractère	50
	PD_formarb2	Seconde espèce dominante dans la formation arbustive	Caractère	50

Tab. 11) Structure de la table T_PatuDate

IV.2.6.3 Règles de gestion

Il ne peut pas y avoir 2 lignes de la table T_PatuDate avec le même code de lieu et le même code d'échantillon à la même date de visite.

IV.2.7 Table T_PhytoPatu : description phytosociologique des pâturages

IV.2.7.1 Modèle conceptuel des données

Cette table donne une description de la dynamique phytosociologique de quelques pâturages choisis dans chaque échantillon spatial, afin de faciliter l'interprétation d'images satellitaires recueillies sur le site de Barkédji pour réaliser la carte d'occupation des sols en fin d'hivernage 2001.

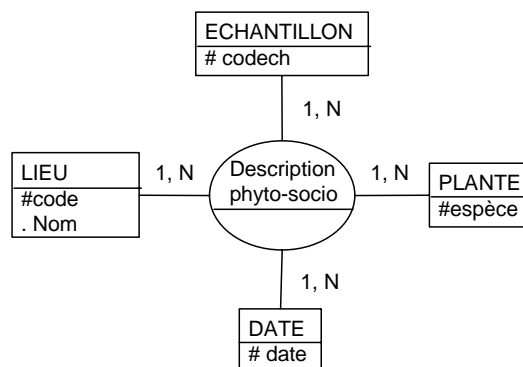


Fig. 13) Modèle conceptuel des données de la table T_PhytoPatu

IV.2.7.2 Structure de la table T_PhytoPatu

Clé	Champ	Signification	Type	Longueur
→	PP_codelieu	Code du pâturage enquêté	Caractère	10
→	PP_date	Date de l'enquête	Date	-
→	PP_codech	Code échantillon spatial de la mare	Caractère	10
→	PP_espece	Nom de l'espèce végétale	Caractère	50
	PP_strate	Strate végétale : code numérique de 1 à 10	Numérique	Entier
	PP_cotad	Cote abondance – dominance : code numérique de 0 à 5	Numérique	Entier

Tab. 12) Structure de la table T_PhytoPatu

IV.2.7.3 Règles de gestion

- Il ne peut pas y avoir 2 lignes de la table T_PhytoPatu avec le même code de lieu, le même code échantillon, la même date de visite et le même nom d'espèce végétale.
- Cette table a la même structure que la table T_PhytoMare. Ces 2 tables peuvent être gérées par des écrans de saisie identiques. Elles pourraient être rassemblées en une seule en y ajoutant un champ décrivant le type (mare ou pâturage).

IV.2.8 Table T_Piege : description des séances de piégeage de moustiques

IV.2.8.1 Modèle conceptuel des données

Cette table donne une description des séances de piégeage de moustiques. La description des moustiques capturés dans la table T_Moustique.

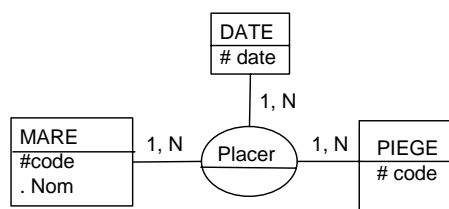


Fig. 14) Modèle conceptuel des données de la table T_Piege

IV.2.8.2 Structure de la table T_Piege

Clé	Champ	Signification	Type	Longueur
→	PI_codemare	Code de la mare près de laquelle le piège est posé	Caractère	10
→	PI_date	Date de la séance de capture	Date	-
→	PI_piege	Code constitué du type de piège utilisé (E émergence, C CDC, A CDC + appât) et d'un numéro d'ordre de 1 à n. Exemple : E1, E2, A1...	Caractère	2
	PI_nom	Nom du site de capture	Caractère	50
	PI_latitude	Latitude du site de capture en degrés décimaux	Numérique	Flottant
	PI_longitude	Longitude du site de capture en degrés décimaux	Numérique	Flottant
	PI_type	Type de site de capture (M mare, C campement, E enclos, A autre)	Caractère	1
	PI_dist	Distance (en mètres) entre le piège et la rive de la mare la plus proche	Numérique	Flottant
	PI_descri	Description de la localisation du piège (si nécessaire)	Caractère	256

Tab. 13) Structure de la table T_Piege

IV.2.8.3 Règles de gestion

- Il ne peut pas y avoir 2 lignes de la table T_Piege avec le même code de mare, le même code de piège et la même date de capture.
- Pour toute ligne de T_Moustique, il y a exactement une ligne de T_Piege correspondante avec le même index.
- En revanche, il est possible d'avoir une ligne de T_Piege sans enregistrement correspondant dans T_Moustique (séance de capture avec aucun moustique pris).

IV.2.9 Table T_Moustique : description des moustiques capturés lors des séances de piégeage

IV.2.9.1 Modèle conceptuel des données

Cette table donne les espèces, sexes et effectifs des moustiques piégés lors des séances de capture. La description des pièges utilisés se trouve dans la table T_Piege.

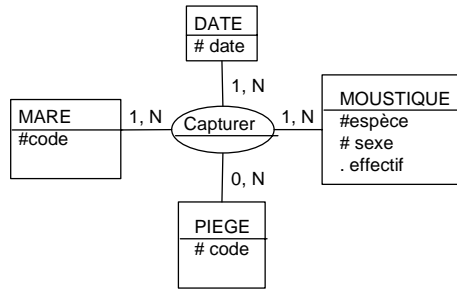


Fig. 15) Modèle conceptuel des données de la table T_Moustique

IV.2.9.2 Structure de la table T_Moustique

Clé	Champ	Signification	Type	Longueur
→	M_codemare	Code de la mare près de laquelle le piège est posé	Caractère	10
→	M_date	Date de la séance de capture	Date	-
→	M_piege	Code constitué du type de piège utilisé (E émergence, C CDC, A CDC + appât) et d'un numéro d'ordre de 1 à n. Exemple : E1, E2, A1...	Caractère	2
→	M_espece	Nom de l'espèce de moustique capturée	Caractère	50
→	M_sexe	Sexe de l'espèce de moustique capturée (M mâle, F femelle)	Caractère	1
	M_eff	Nombre de moustiques de même espèce et de même sexe	Numérique	Entier

Tab. 14) Structure de la table T_Moustique

IV.2.9.3 Règles de gestion

- Il ne peut pas y avoir 2 lignes de la table T_Moustique avec le même code de mare, le même code de piège, la même date de capture, la même espèce de moustique et le même sexe.
- Pour toute ligne de T_Moustique, il y a exactement une ligne de T_Piege correspondante avec le même index.
- En revanche, il est possible d'avoir une ligne de T_Piege sans enregistrement correspondant dans T_Moustique (séance de capture avec aucun moustique pris).

Chapitre V Résultats préliminaires

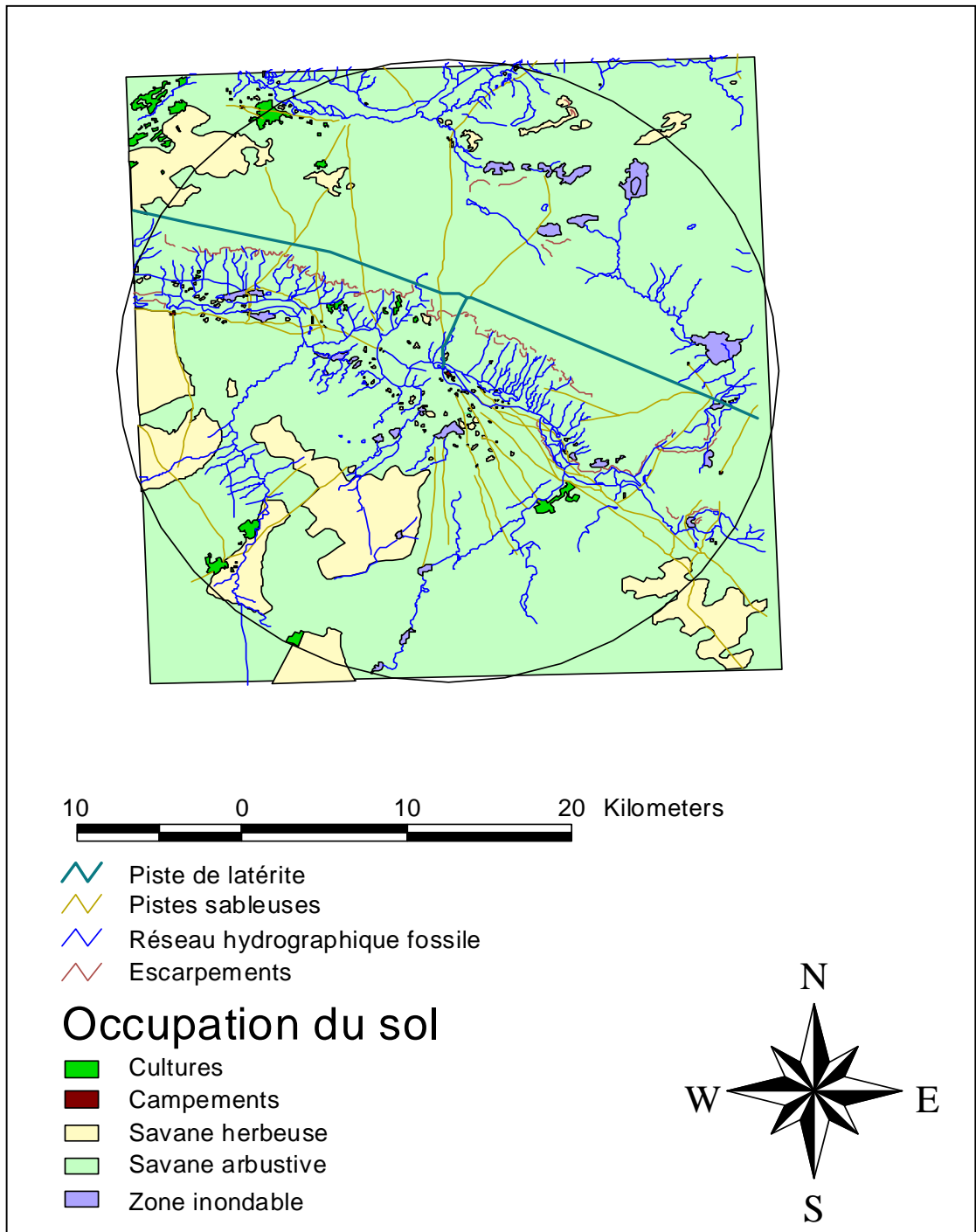
V.1 Cartographie

La carte d'occupation des sols présente les couches thématiques suivantes :

- le réseau hydrographique : mares temporaires ou aménagées, cours d'eau fossiles et leurs affluents, bas-fonds et zones humides;
- les implantations humaines : localités, campements, villages, villes...
- les infrastructures d'aménagement : puits, forages, pare feux, pistes principales et secondaires;

- les formations végétales : typologie des unités de végétation (stratification, recouvrement, production...);
- les zones agricoles : champs cultivés et jachères.

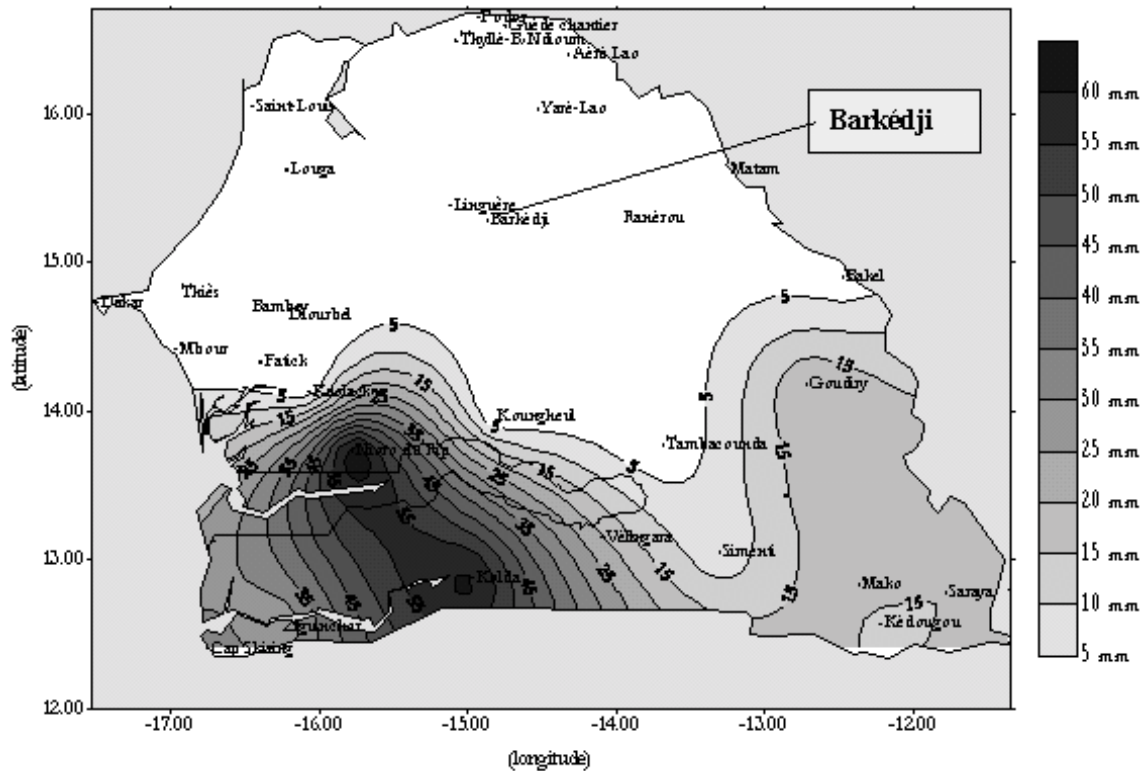
Cette carte est présentée par la figure suivante. Le cercle délimite la zone de 20 km de rayon à l'intérieur de laquelle nous avons travaillé.



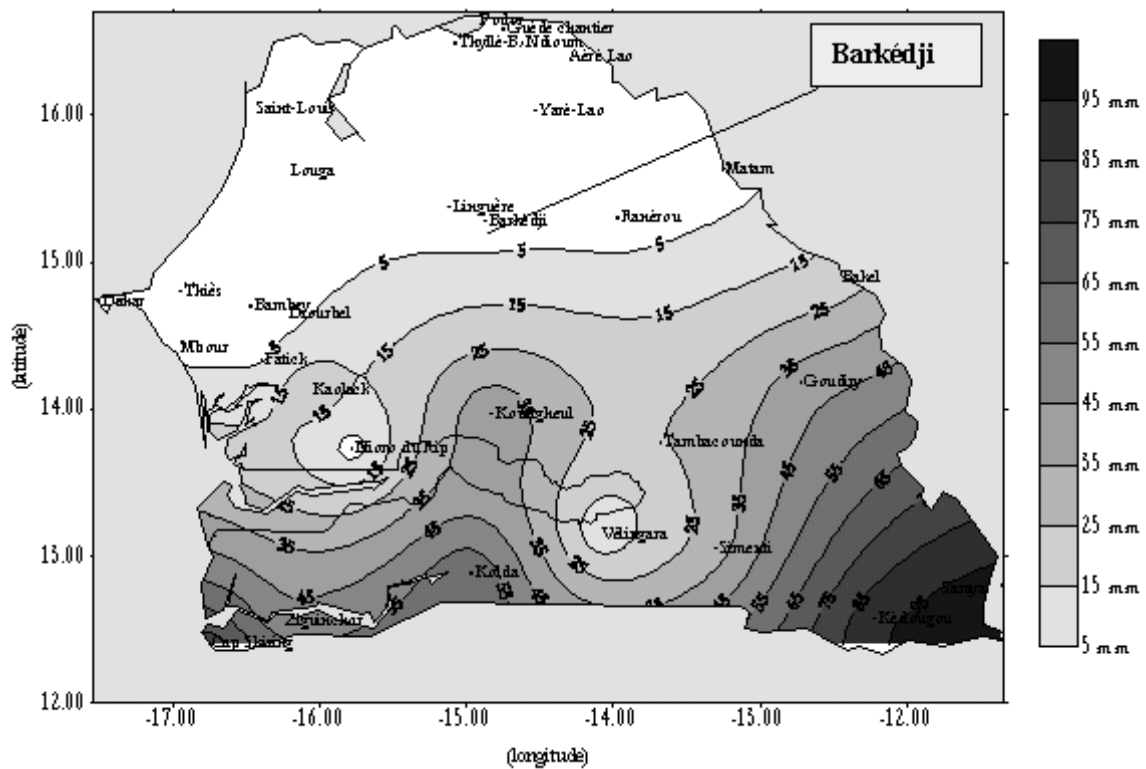
Carte 3) Carte d'occupation des sols de la région de Barkédji

V.2 Hydrologie et climatologie

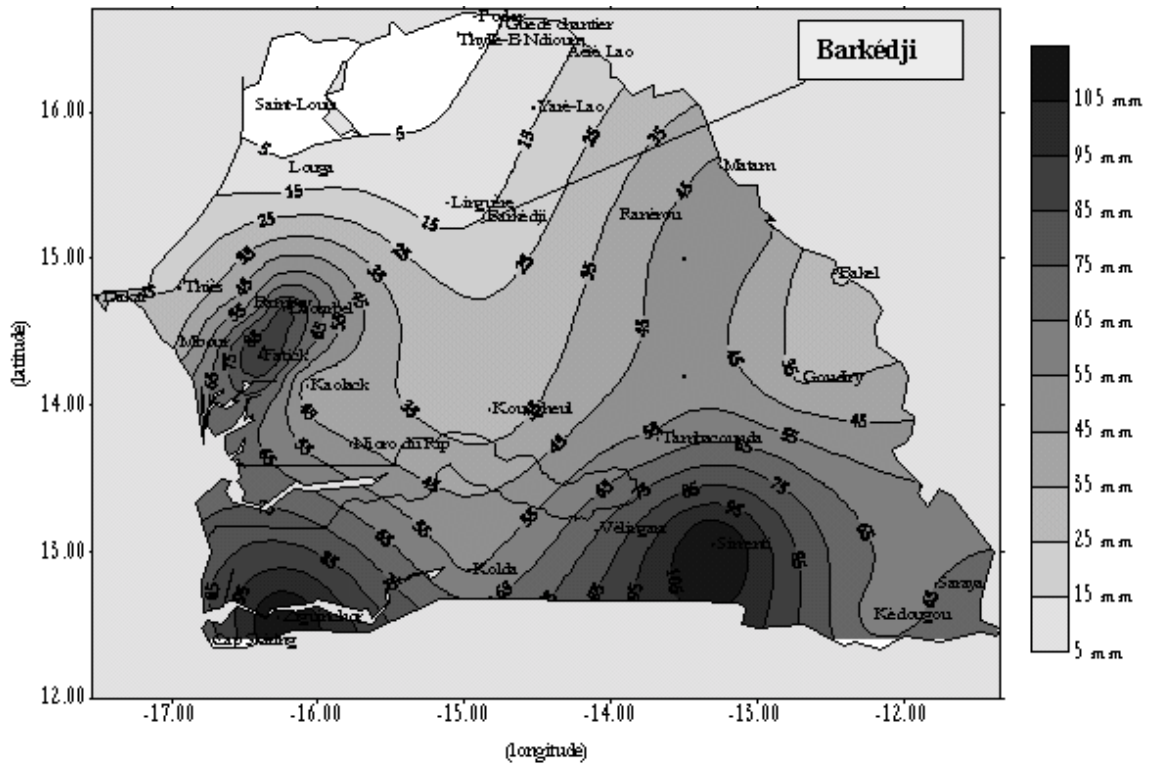
A titre d'exemple, Les figures suivantes présentent les champs de pluie décadaires des 2 dernières décades de juin et des 3 premières décades de juillet.



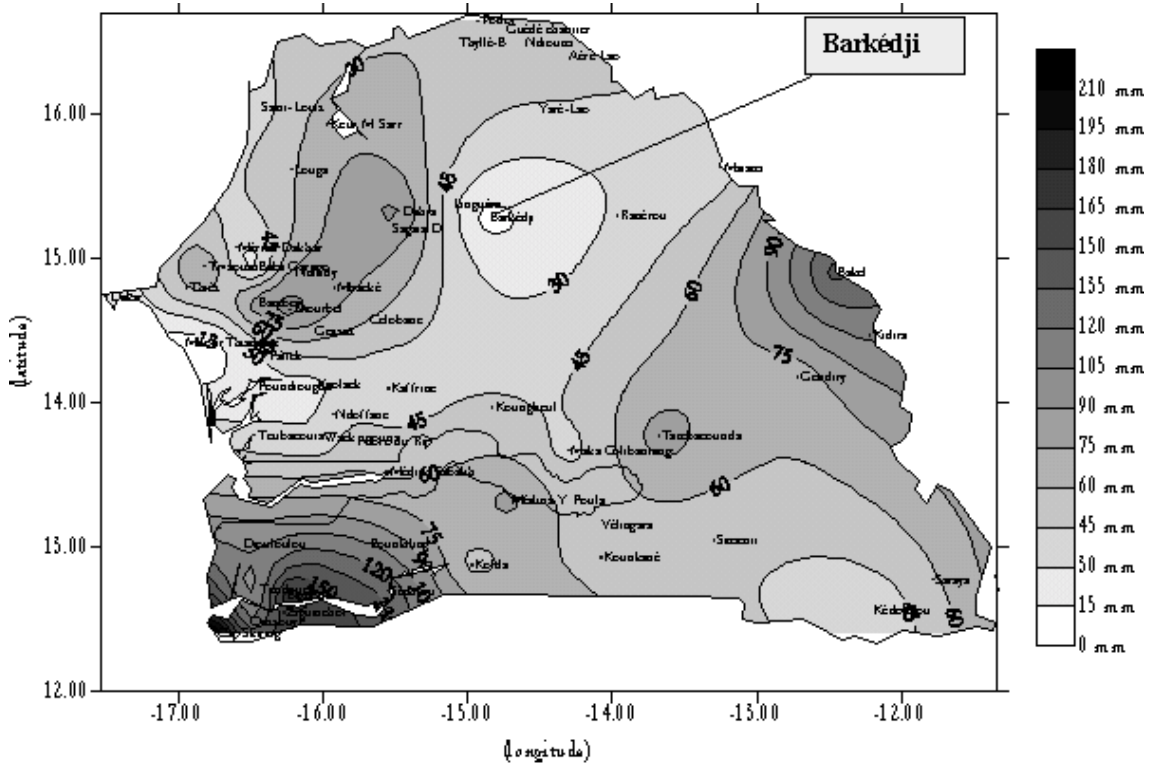
Carte 4) Pluviométrie de la 2^{ème} décade de juin 2001 au Sénégal.



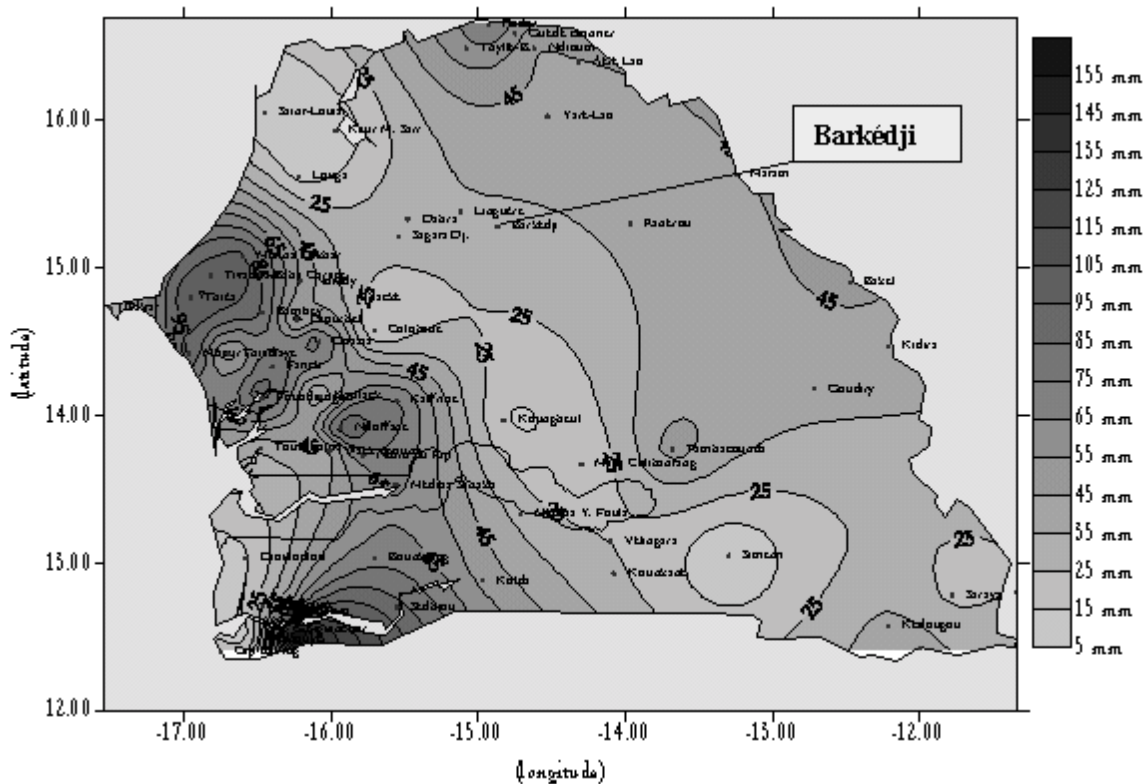
Carte 5) Pluviométrie de la 3^{ème} décade de juin 2001 au Sénégal



Carte 6) Pluviométrie de la 1^{ère} décennie de juillet 2001 au Sénégal



Carte 7) Pluviométrie de la 2^{ème} décennie du mois de juillet 2001 au Sénégal

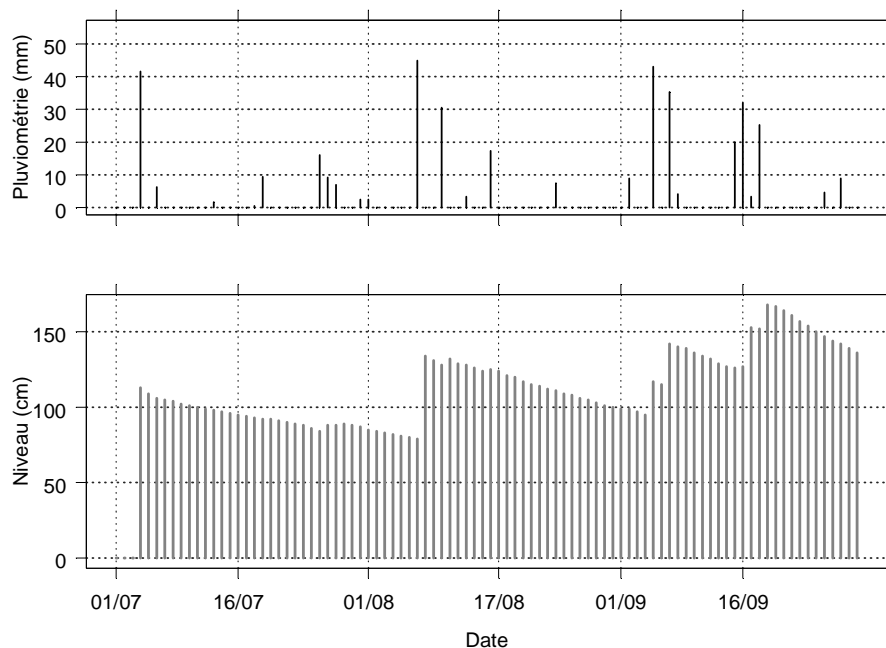


Carte 8) Pluviométrie de la 3^{ème} décennie de juillet 2001 au Sénégal.

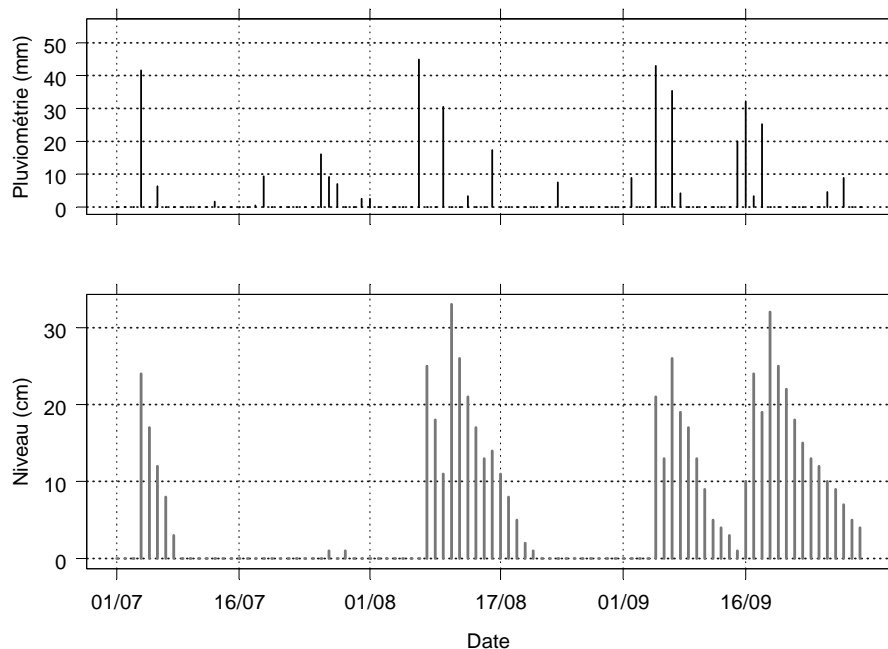
Sur ces champs de pluie décadaires, on peut constater que la pluviométrie a été très faible en début de saison des pluies à Barkédji. En conséquence, la pousse de l'herbe a été tardive ce qui a entravé le retour des animaux transhumants qui a été très tardif. De telles images sont disponibles avec une haute répétitivité et présentent de façon séduisante les résultats des stations pluviométriques. Leur dimension spatiale est intéressante puisqu'elle permet de les croiser aux couches du SIG, même si les échelles d'étude sont pour l'instant très différentes.

Les figures suivantes présentent l'évolution du niveau d'une grande mare (mare de Barkédji) et d'une petite mare (mous 2) en fonction des chutes de pluie.

Mare de Barkédji



Graph. 8) Evolution du niveau de la mare de Barkédji (Mous1) en fonction de la pluviométrie



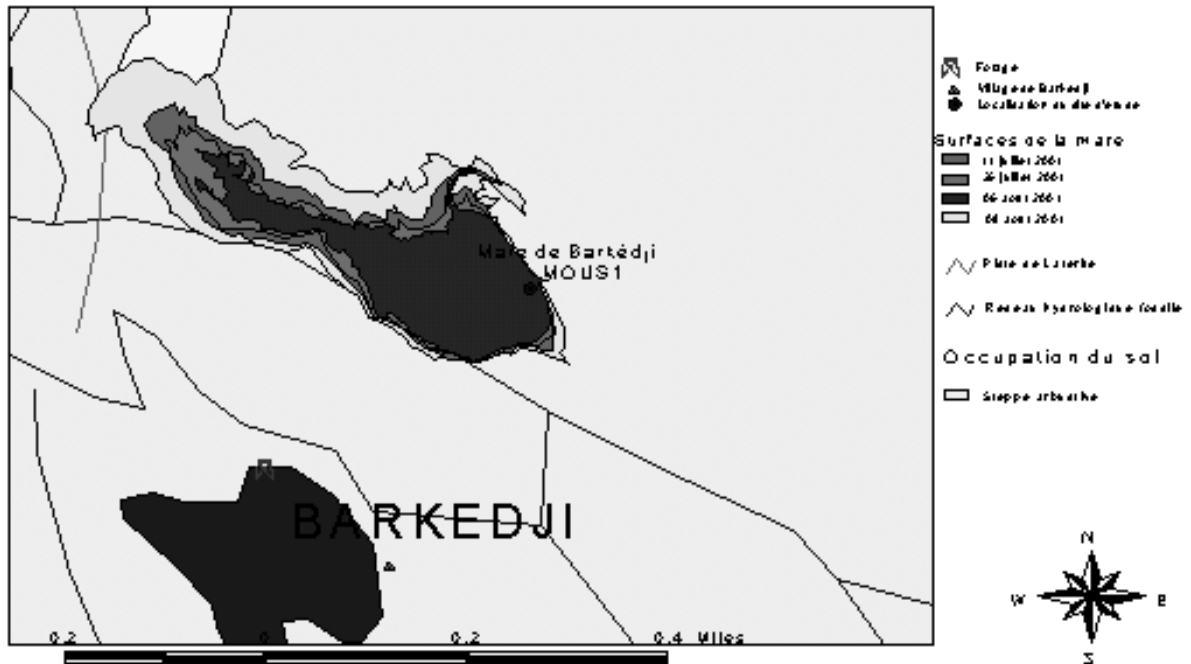
Graph. 9) Evolution du niveau de la mare de Mous2 en fonction de la pluviométrie

Sur ces figures, on peut constater que seules les pluies conséquentes (>30 mm) sont capables de « remplir » les mares, les autres (< 15mm) retardent seulement l'assèchement ou remplissent les petites mares pendant quelques heures.

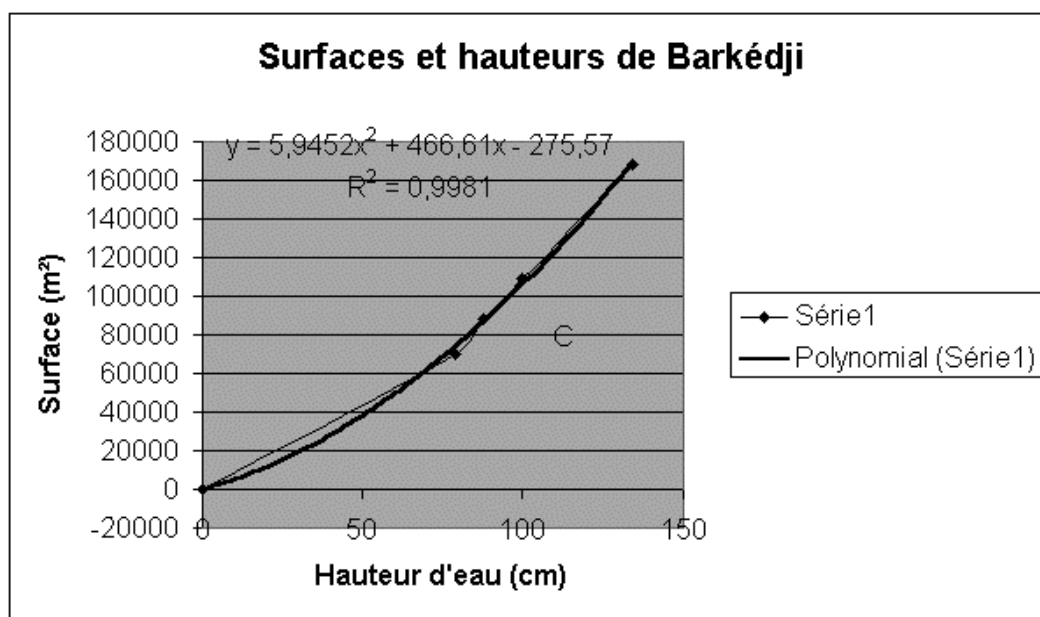
La taille des mares conditionne l'évolution de leur niveau : les grandes mares comme celle de Barkédji et dans une moindre mesure celle de Furdu ont un niveau stable, qui descend d'environ un cm par jour. En revanche, Mous3 et Mous2, qui sont de petites mares sablo-argileuses, ne restent en eau que de 5 à 10 j et 10 à 15 jours respectivement en l'absence de nouvelle pluie et leur niveau est très variable.

Le relevé des surfaces des mares aux GPS permet de comparer celles-ci aux hauteurs d'eau lues sur les échelles limnimétriques et d'établir une relation entre ces 2 valeurs, ce qui permettra à posteriori d'étalonner les images satellites.

Les figures suivantes présentent respectivement 4 surfaces de la mare de Barkédji (Mous1) la relation établie entre surface et hauteur d'eau. Cette relation sera de plus en plus précise au fur et à mesure de la répétition des mesures.



Carte 9) Représentation de 4 surfaces de la mare de Barkédji à des dates différentes.

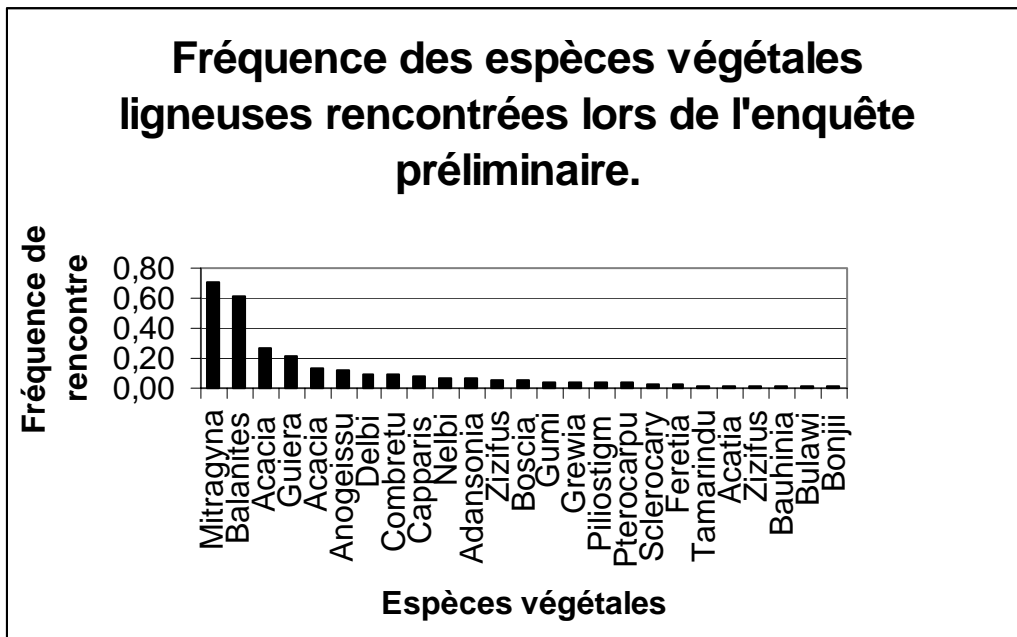


Graph. 10) Régression polynomiale de degré 2 de la surface d'une mare selon sa hauteur

V.3 Données phyto-sociologiques

Lors de l'enquête préliminaire, les espèces ligneuses présente au niveau des mares temporaires ont été relevées.

Sur 101 sites, 25 espèces végétales au total on été relevées. Certaines espèces sont rencontrées très fréquemment (c'est le cas de *Mitragyna inermis* et *Balanites aegyptiaca* présentes respectivement dans 70 et 61% des mares) alors que d'autres n'ont été rencontrées que dans une ou deux mares. La figure suivante présente la fréquence des différentes espèces rencontrées (seuls les genres sont figurés pour des raisons de lisibilité).



Graph. 11) Fréquence des espèces végétales ligneuses dans la région d'étude

Cette étude nous a permis de constater que la plus grande richesse spécifique se situe dans les mares du lit fossile du Ferlo, zone la plus humide, alors que les mares situées hors du lit du Ferlo, à durée de vie moindre, ne présentent que les espèces les plus xérotolérantes (déjà présentes en périphérie des mares du lit du Ferlo).

La constatation d'une hétérogénéité de la répartition qualitative et quantitative des espèces ligneuses présentes dans les mares dans une zone pourtant assez restreinte a conduit à suivre mensuellement un certain nombre de mares (5 à 10) dans chaque échantillon. Un nombre de pâturages équivalent a également été suivi. Le relevé phytosociologique, réalisé par strates et en terme d'abondance / dominance (voir fiche mares et pâturages en annexe) a concerné les espèces ligneuses et herbacées.

Les résultats sont en cours de saisie et de dépouillement.

V.4 Enquêtes « troupeaux »

V.4.1 Enquête préliminaire (10 juin 2001)

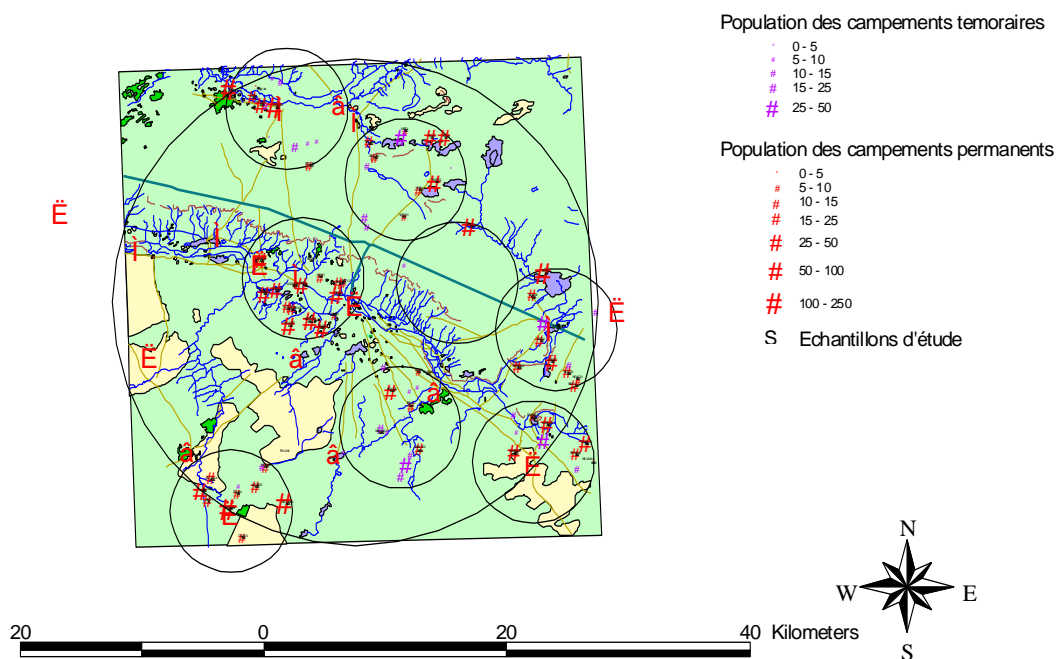
Dix-neuf points d'eau souterraine, 104 mares temporaires et 120 lieux d'habitation ont été enquêtés en 11 j de tournée. La visite régulière de la totalité de ces points en une dizaine de jours et surtout pendant la saison des pluies, où les pistes sont beaucoup moins praticables, est impossible, d'où la nécessité de procéder par échantillonnage.

Hormis une mare aménagée (Moguéré), toutes les mares étaient asséchées. Il s'est avéré que seules les mares présentant une calotte argileuse sont importantes pour les éleveurs, en raison d'une mise en eau plus longue, alors que les mares sableuses à sablo-argileuses, souvent satellites des premières, sont éphémères. Cela ne présage pas de l'implication de ces mares dans la production en vecteurs, dont certains, comme *A. vexans*, peuvent passer de l'œuf en dormance à l'adulte en 4 à 5 j.

V.4.2 Enquête du 20 au 30 juillet 2001

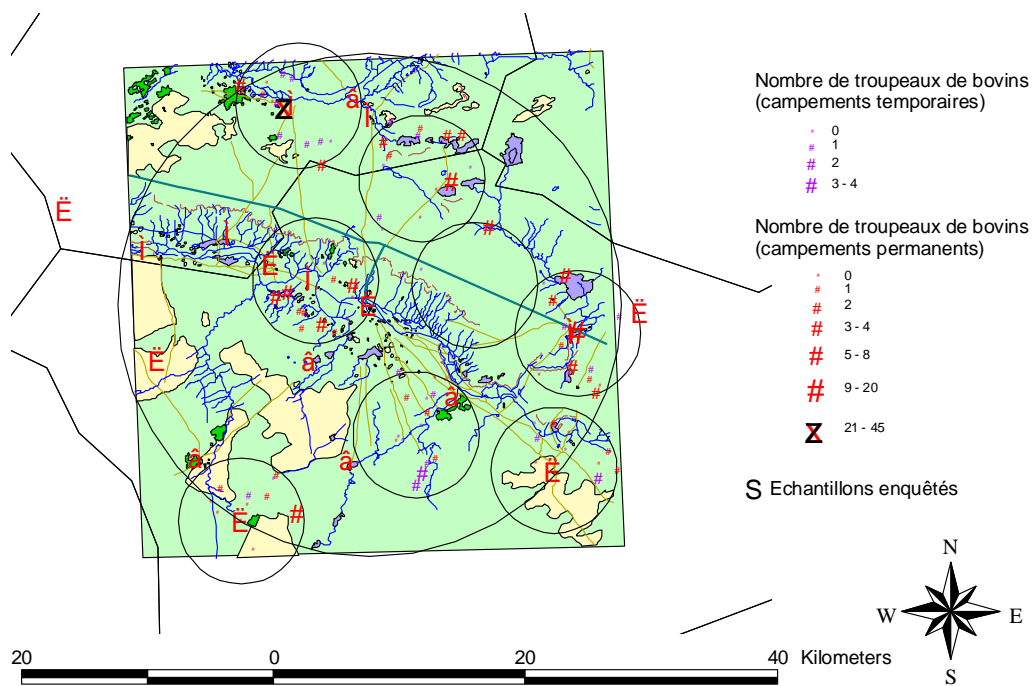
Cette enquête a permis de faire le relevé exhaustif des campements permanents (65) et temporaires (38) situés à l'intérieur des échantillons, ainsi que des mares utilisées par les troupeaux et un échantillon de pâturages (41) utilisés dans chaque échantillon.

Nous avons également relevé la densité humaine, la densité de troupeaux de petits ruminants et de bovins. Les figures suivantes présentent la densité humaine et la densité de troupeaux de petits ruminants et de bovins dans les échantillons d'étude.



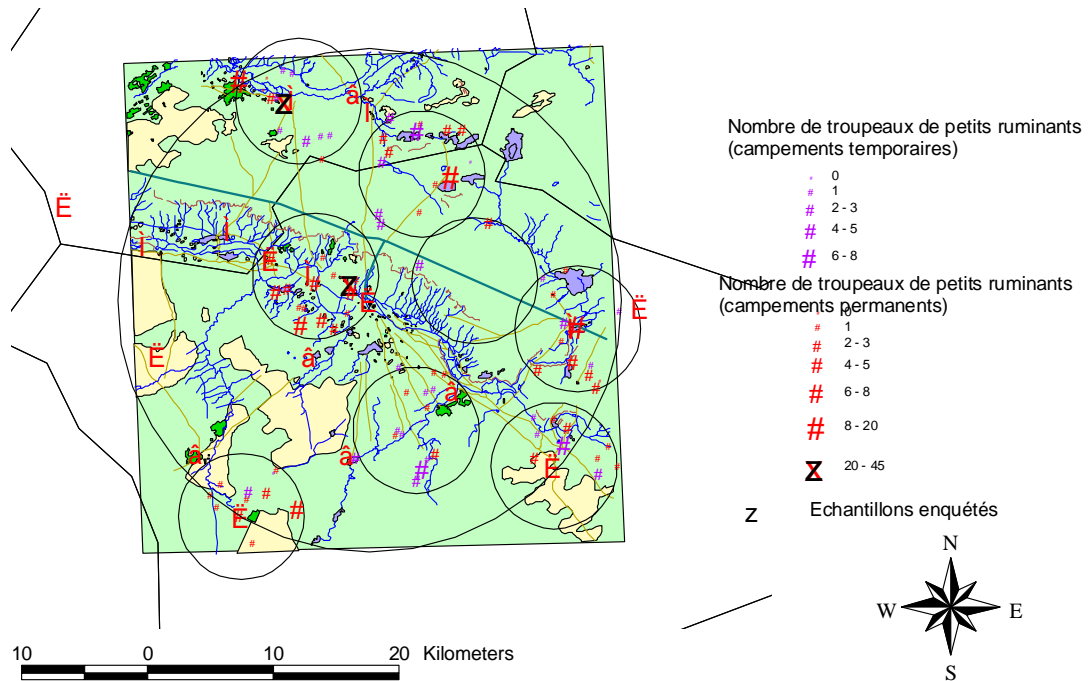
Carte 10) Densité humaine dans les échantillons, enquête du 20 au 30 juillet 2001

Densité de troupeaux de bovins



Carte 11) Densité de troupeaux de bovins, enquête du 20 au 30 juillet 2001.

Densité de troupeaux de petits ruminants



Carte 12) Densité de troupeaux de petits ruminants, enquête du 20 au 30 juillet 2001.

Lors de cette première enquête, le nombre d'habitants était bien inférieur dans les campements temporaires (14 +/- 9) que dans les campements permanents (38 +/- 50). A cette période, les campements temporaires (transhumants) regroupent 18% de la population humaine (530 contre 2452) dans nos échantillons.

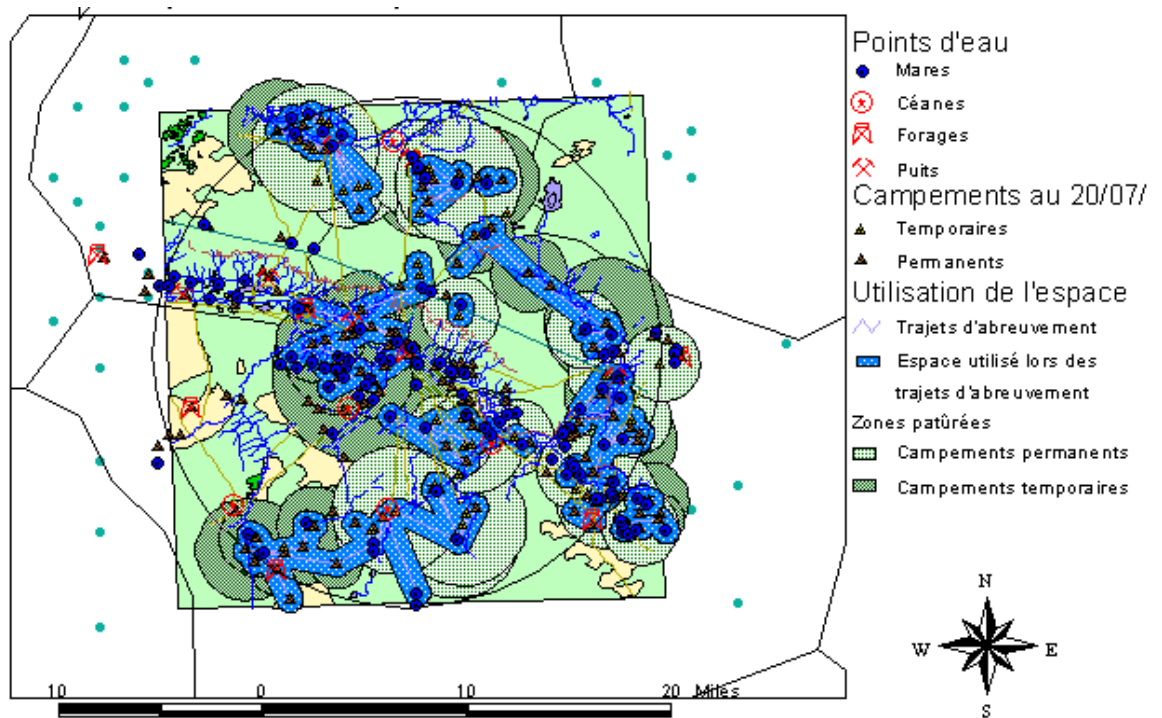
Ils possèdent 16% des troupeaux de bovins (27 contre 137), et 23% des troupeaux de petits ruminants (69 contre 226).

Deux types de mouvements d'animaux ont été relevés :

- les mouvements à grande échelle (origine et destination),
- les mouvements à petite échelle (distance des pâturages et trajets d'abreuvements).

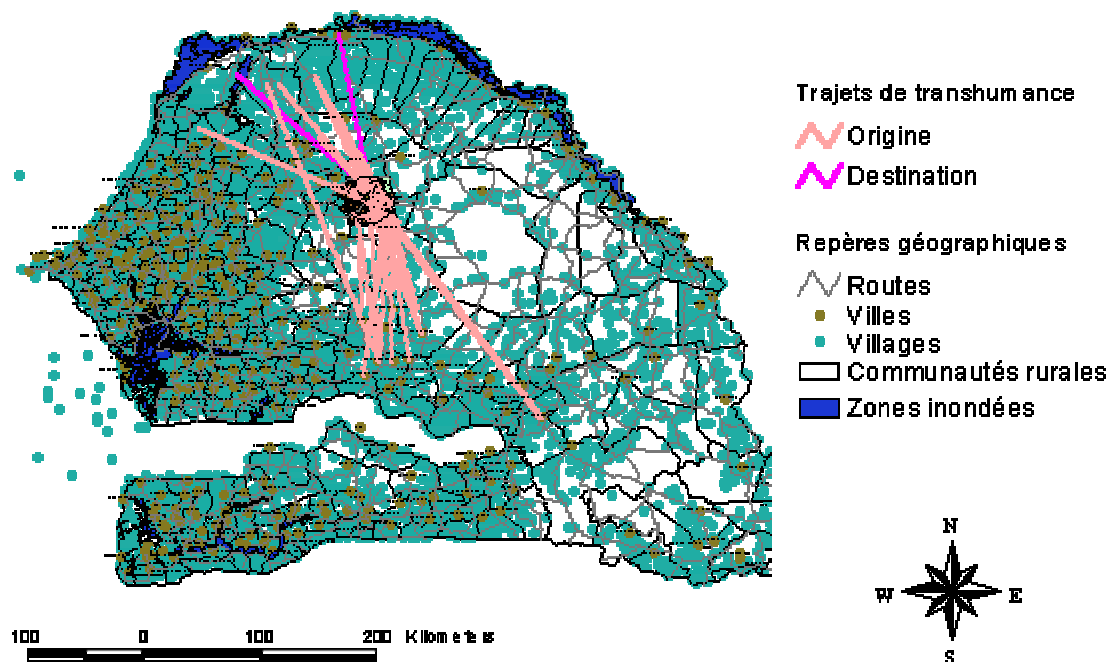
Ces mouvements peuvent être à l'origine du transport du virus ; cependant, l'abreuvement ayant lieu pendant la journée, le contact hôte / vecteur n'a pas lieu à ce moment là. En revanche, une partie du pâturage est nocturne mais dans ce cas les distances de pâturages sont beaucoup plus faibles (comprises entre 1 et 2 km).

La figure suivante présente les mouvements à petite échelle. Il s'agit d'une part des trajets d'abreuvement entourés d'un tampon d'un kilomètre, qui correspond à la zone d'influence des troupeaux lors de ces trajets et d'autre part des zones pâturées par les troupeaux, aux dires des éleveurs.



Carte 13) Utilisation de l'espace par les troupeaux situés dans les échantillon entre le 20 et le 30 juillet 2001, exemple des petits ruminants.

La figure suivante présente les mouvements à grande échelle :



Carte 14) Trajets de transhumance des troupeaux enquêtés dans les échantillon de la zone d'étude de Barkédji, 20 au 30 juillet 2001.

On constate que les troupeaux transhument selon un axe Nord-Ouest / Sud-Est, dans les deux sens, sur des distances allant jusqu'à 250 km.

Ce type d'enquête, réalisées mensuellement tout au long de la saison des pluies, ont permis d'apprécier l'évolution des densités animales et humaines ainsi que les mouvements au cours de la saison des pluies. Ces données, encore en cours de saisie et d'analyse, ne sont cependant pas encore disponibles.

V.5 Entomologie

La pluviométrie ayant été faible, la densité de moustiques l'a été également en début de saison des pluies. Nous avons observé la présence de larves d'*Aedes* suite aux 2 pluies les plus importantes dans des zones sableuses lors de la première pluie, puis envahie par la végétation herbacée lors de la seconde. Toutes les larves ont été observées en zone peu profonde et en périphérie de mare. Dix jours après la première pluie (4 juillet), aucune larve n'a été observée jusqu'au lendemain de la seconde (7 août).

Les pièges à émergence ont permis la capture de moustiques entre 7 (1^{er} j de capture) et 9 j après la première pluie (du 11 au 13 juillet). Des pièges CDC ont permis de capturer des adultes en activité pendant la même période (14 au 16 juillet). Cependant, les captures sont restées modestes (5 et 10 moustiques / j et par piège à émergence et CDC respectivement). La totalité des moustiques capturés et la majorité des larves d'*Aedes* observées l'ont été au niveau de la mare de Furdu.

Les données entomologiques concernant le reste de la saison des pluies sont également en cours de saisie et de dépouillement.

Chapitre VI Discussion : Perspectives et conclusions

VI.1 Cartographie

La carte d'occupation des sols n'est qu'une étape pour la mise en place rapide des enquêtes préliminaires. L'interprétation d'images SPOT prises pendant la saison des pluies permettra de préciser et d'actualiser cette carte d'occupation des sols. Elle permettra également de retrouver les mares déjà repérées et de comparer les mesures de surfaces par satellite aux surfaces déduites du suivi des hauteurs d'eau.

VI.2 Enquêtes troupeaux

Les résultats préliminaires montrent des mouvements importants à petite échelle et à grande échelle. Cependant, la première enquête se situe en tout début de saison des pluies et la végétation herbacée était peu développée. Cela a entraîné un retard du retour des transhumants, en particulier des troupeaux bovins.

Les résultats portant sur le reste de la période d'étude ne sont pas encore disponibles.

L'intérêt de cette étude repose sur le suivi des mouvements au cours de la saison des pluies, et la comparaison des cartes de répartition mensuelles. La compréhension du déplacement des animaux est indispensable pour évaluer les paramètres de diffusion à proximité et à distance. Cette étude mettra en évidence différentes situations et zones qui serviront de base d'échantillonnage pour des études plus fines comme des suivis individuels de troupeaux. Ces suivis pourraient être effectués à l'aide de balises Argos qui permettraient de localiser les troupeaux dans tous leurs déplacements (y compris nocturnes).

VI.3 Entomologie

L'étude de la production des mares au cours de cette saison des pluies précisera la dynamique de population et les conditions écologiques favorables aux vecteurs potentiels.

L'étude de leurs déplacements actifs permettra de définir des zones tampons autour des mares contaminés, à éviter non seulement pour la construction d'enclos, mais aussi pour le pâturage nocturne.

Dans le modèle dynamique, $O(s, t)$ représente un nombre d'œufs par unité de surface. Le modèle repose sur l'hypothèse que les œufs déposés à un endroit y restent en majorité, alors que cela n'a pas été démontré. On pourrait opposer 2 arguments à cette hypothèse :

- Les mares temporaires sont piétinées par les animaux à la fin de la saison des pluies ce qui pourrait les déplacer,
- les œufs sont déposés dans une couche de boue très superficielle qui pourrait être réduite en poussière pendant la saison sèche, et qui serait entraînée vers le fond de la mare dès la première pluie. Tous les œufs seraient alors immergés...

Cela simplifierait les calculs puisqu'il suffirait de relier le niveau initial de la population de l'année $n + 1$ à celle de l'année n indépendamment du niveau de l'eau.

Le nombre de moustiques adultes atteint un maximum en début de saison des pluies pour diminuer assez rapidement. Il est important de déterminer si le temps qui sépare la première grosse pluie (qui entraîne une réplétion des mares suffisante pour assurer un premier cycle larvaire) et le moment où la population moustiques est la plus importante est constant en fonction de l'espèce ou si, au contraire, il est plutôt conditionné par l'abondance et la répartition des pluies.

Il est également important de déterminer si *A. vexans* est une espèce monocyclique, c'est-à-dire si tous les œufs éclosant l'année n ont été pondus l'année $n - 1$. Cela peut être fait par l'étude de l'âge des moustiques femelles capturés au cours de la saison des pluies (par dissection de l'appareil génital) ou par l'étude des cycles d'une souche d'élevage.

De même, nous considérons qu'une femelle *Aedes* pond à l'interface eau / air au niveau du sol. Il faut connaître les gîtes larvaires potentiels (végétation péri-aquatique, trous d'arbres, flaques) afin de mieux comprendre l'influence des profils de chutes de pluies sur la production en vecteurs. Au cours de notre étude, nous avons constaté que seule une faible partie de la mare est colonisée par les larves. Il s'agit de zones peu profondes, à végétation herbacée, qui sont présentes uniquement en dehors de la cuvette argileuse de la mare. Ces zones ne sont inondées qu'en cas de fortes pluies, ou de pluies moyennes rapprochées. Il sera intéressant de déterminer avec précision les conditions pluviométriques d'inondation de ces zones (fréquence et abondance des pluies).

VI.4 Hydrologie et climatologie

Le suivi simultané de la pluviométrie et du niveau de l'eau au cours de la saison des pluies permettra d'estimer les paramètres conditionnant $h(t)$, et d'identifier les facteurs climatiques favorables à la production des mares en vecteurs.

La comparaison des masques d'eau obtenus par imagerie satellite aux surfaces et hauteurs d'eau mesurées au sol est fondamentale pour leur étalonnage. Les images satellitaires permettraient de dresser une cartographie dynamique des gîtes larvaires.

Un modèle d'estimation de la pluviométrie en fonction de la surface (satellite) et de l'épaisseur (radar) des nuages est à l'étude par l'équipe du Laboratoire de Physique de l'Atmosphère. Ce modèle estime les chutes de pluies en se passant des mesures au sol.

VI.5 Données phyto-sociologiques

Les relevés phytosociologiques mensuels devraient permettre de distinguer des grandes catégories de mares et de pâturages. Il sera alors intéressant de comparer respectivement leur production en moustiques et leur effet attractif sur le bétail au cours du temps. L'intégration de ces données phytosociologiques est fondamentale pour avoir une vision dynamique des interactions spatiales entre les vecteurs et les hôtes : elle permet la définition de paysages épidémiologiquement dangereux. En outre, la position géographique des sites d'étude est relevée systématiquement, ce qui permettra leur localisation sur les images satellitaires de la région prises au cours de la saison des pluies 2001 (livraison fin décembre 2001). Cette dernière étape est fondamentale car elle pourrait permettre l'extension des résultats obtenus dans notre zone d'étude à des zones périphériques. En effet, le travail effectué à échelle locale est très coûteux en terme d'enquêtes de terrain et sa valorisation nécessite l'extension de ses résultats à une échelle beaucoup plus grande. L'utilisation de l'imagerie satellitaire est un des moyens d'étendre ces résultats, mais il paraît difficile de s'affranchir d'une part importante « d'enquêtes terrain ».

VI.6 Intérêts et contraintes de la modélisation

Nous avons constaté la nécessité d'une approche pluridisciplinaire pour cerner l'ensemble des paramètres influant sur l'épidémiologie de la FVR. Cela nécessite en particulier la réalisation d'une base de données relationnelles permettant le partage de l'information. Cette approche n'est pas sans poser de problème, tant au niveau de la communication entre les équipes que de la propriété et de l'utilisation de l'information. Une telle étude nécessite au préalable une définition claire du rôle et des intérêts de chacun.

Le but du travail de modélisation engagé ici est de fournir un outil de travail avec une interface conviviale utilisable par des non-spécialistes et qui combine un SIG intégrant des outils de simulation à des systèmes plus ou moins automatiques d'acquisition de données (météorologiques, d'épidémiosurveillance, entomologiques...). Le modèle peut servir à simuler différents types de scénarios en fonction d'hypothèses climatiques (saisonniers, annuels), mais aussi religieuses (exemple de la fête de la Tabaski) ou sociales (effet de la sédentarisation). Il constitue un outil d'aide à la décision, mais ne remplacera jamais les enquêtes de terrain en épidémiosurveillance et en entomologie.

Nous avons vu l'apport de la technologie spatiale avec l'imagerie satellitaire en terme de modélisation. L'utilisation de balises Argos pour connaître les mouvements du bétail offre de nouvelles perspectives à petite échelle (caractérisation fine des trajets d'abreuvement et de pâturage nocturne) et à grande échelle (itinéraire précis et nombre de kilomètres parcourus quotidiennement lors des mouvements de transhumances).

Conclusion

La FVR occasionne des pertes économiques importantes et présente des risques sanitaires pour les populations humaines. Dans un contexte de changements climatiques et écologiques dus à l'anthropisation de la planète, elle représente un danger réel comme le prouve son extension récente à la péninsule arabique. Il est nécessaire de cerner les paramètres environnementaux conditionnant son épidémiologie pour améliorer les capacités de prévention et disposer de nouveaux outils d'aide à la décision. La modélisation entre dans ce cadre en ouvrant de nouvelles perspectives et en posant de nouvelles questions.

Cette étude a pour but de préciser certaines caractéristiques des vecteurs potentiels et de comprendre l'effet de la répartition spatiale et temporelle du bétail sur la diffusion du virus, dans une zone d'élevage transhumant. En effet, la transhumance est une technique ancienne très bien adaptée au milieu sahélien et son utilisation rationnelle est toujours d'actualité puisqu'elle offre des capacités d'adaptation aux changements écologiques. La compréhension de l'effet d'une telle technique d'élevage sur la diffusion d'une maladie à épidémiologie complexe est un enjeu majeur pour les pays sahéliens.

La modélisation pourrait être couplée à des systèmes de télésurveillance des conditions climatiques d'émergence du virus (images satellitaires) et à un réseau d'épidémiosurveillance, permettant la mise en évidence de situations à risque et une meilleure gestion des mesures de lutte face aux situations épidémiques.

Bibliographie

Abd El-Rahim, I., U. Abd El-Hakim, et al. (1999). "An epizootic of Rift Valley Fever in Egypt in 1997." Rev .sci. tech. Off. Int. Epiz. **18(3)**: 741-748.

Anderson, R. M. and R. M. May (1979). "Population Biology of infectious diseases : Part I." Nature **280**: 361-367.

Bishop, A., I. Barchia, et al. (2000). "Models for the dispersal in Australia of the arbovirus vector, *Culicoides brevitarsis* Kieffer (*Diptera: Ceratopogonidae*)." Prev Vet Med **47**: 243-254.

CDC. (11/2000). "Outbreak of Rift Valley Fever---Saudi Arabia." MMWR 2000 **49(43)**: 982-985.

Davies, F. G., K. J. Linthicum, et al. (1985). "Rainfall and epizootic Rift Valley Fever." Bull. W.H.O. **63(5)**: 941-943.

Diallo, M., 1995. Dynamique comparée des populations de *Culicidae* à Kédougou (zone soudano-guinéenne) et à Barkédji (zone de savane sahélienne): conséquences dans la transmission des arbovirus. Dakar (Sénégal), Université Cheikh Anta Diop: 87.

Diallo, M. (2000). Ecologie et transmission d'arbovirus à vecteurs culicidiens au Sénégal. Faculté des Sciences et Techniques. Dakar (Sénégal), Cheikh Anta Diop: 126.

Digoutte, J. P., R. Cordellier, et al. (1974). "Le virus Zinga (ArB 1976) nouveau proptotype d'arbovirus isolé en République Centrafricaine." Annls. Inst. Pasteur **125(B)**: 107-118.

Digoutte, J. P. and C. J. Peters (1989). "General aspects of the 1987 Rift Valley fever epidemic in Mauritania." Res. Virol. **140(1)**: 27-30.

Diop, G., T. Y., et al. (2000). "The potential role of rodents in the enzootic cycle of Rift Valley fever virus in Senegal." Microb. Infect. **2**: 343-346.

Fontenille, D., M. Traore-Lamizana, et al. (1998). "New vectors of Rift Valley fever in West Africa." Emerg Infect Dis **4(2)**: 289-93.

Fontenille, D., M. Traore-Lamizana, et al., 1995. Short report: Rift Valley fever in western Africa: isolations from *Aedes* mosquitoes during an interepizootic period. Am J Trop Med Hyg **52(5)**: 403-4.

Gora, D., Y. Thiongane, et al. (2000). "The potential role of rodents in the enzootic cycle of Rift Valley Fever virus in Senegal." Microb. Infect. **2**: 343-346.

IEMVT-CIRAD (12/1990). "La fièvre de la vallée du Rift." Fiches techniques d'élevage tropical: fiche n°10.

- Jouan, A., 1989. Les formes cliniques bénignes de la fièvre de la Vallée du Rift pendant l'épidémie de Mauritanie. Bull. Soc. Path. Exot. **82**(5): 620-627.
- Jouan, A., I. Coulibaly, et al. (1989). Analytical study of a Rift Valley fever epidemic. Res. Virol. **140**(2): 175-86.
- Juanès, X. and R. Lancelot (1999). Laser: logiciel d'aide au suivi d'élevages de ruminants. Montpellier (France), CIRAD-Emvt.
- Kermack, W. O. and A. G. McKendrick (1927). "A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics." Proc. R. Soc. **A115**: 700-721.
- Lancelot R, Faye B, Juanès X, Ndiaye M, Pérochon L, Tillard E, 1998. La base de données BAOBAB: un outil pour modéliser la production et la santé des petits ruminants dans les systèmes d'élevage traditionnels au Sénégal. Revue Elev Méd vét Pays trop, 51 (2): 135-146.
- Lancelot, R., J. P. Gonzalez, et al. (1989). "Epidémiologie descriptive del a fièvre de la vallée du Rift chez les petits ruminants dans le sud de la Mauritanie après l'hivernage 1988." Revue Elev. Méd. vét. Pays trop. **42 (4)**: 485-491.
- Lefevre, P. C. (1997). "Actualité de la fièvre de la vallée du Rift. Quels enseignements tirer des épidémies de 1977 et 1987?" Med. Trop. **57**: 61-64.
- Linthicum, K. J., A. A., et al. (06/99). "Climate and Satellite Indicators to Forecast Rift Valley Fever Epidemics in Kenya." Science **285**: 397-400.
- Logan, T. M., K. J. Linthicum, et al. (1991). "Egg hatching of Aedes mosquitoes during successive floodings in a Rift Valley fever endemic area in Kenya." J. Am. Mosq. Control Assoc. **7**(1): 109-112.
- May, R. M. and R. M. Anderson (1979). "Population Biology of infectious diseases : Part II." Nature **280**: 455-461.
- Morril, J. C., M. C.A., et al., 1997. Safety and efficacy of a mutagen-attenuated Rift Valley Fever virus vaccine in cattle. Am J Vet Res **58**(10): 1104-1109.
- Morril, J. C., C. A. Mebus, et al., 1997. Safety of a mutagen-attenuated Rift Valley Fever virus vaccine in fetal and neonatal bovids. Am J Vet Res **58**(10): 1110-1114.
- Prehaud, C. and M. Bouloy (07-08/1998). "Les Bunyaviridae responsables de fièvres hémorragiques." Virologie **2**(4): 297-304.
- Sall, A. A., P. M. d. A. Zannotto, et al. (09-10/1998). "Molecular Epidemiologie and Emergence of Rift Valley Fever." Mem Inst Oswaldo Cruz **93**(5): 609-614.

Sall, A. A., P. M. d. A. Zanotto, et al. (10/1999). "Genetic reassortment of Rift Valley Fever Virus in Nature." Jour. Virol. **73**(10): 9196-8200.

Saluzzo, J. F., J. P. Digoutte, et al. (1987). "Focus of Rift Valley fever virus transmission in southern Mauritania [letter]." Lancet **1**(8531): 504.

Schneegans, F. (1999). "La fièvre de la Vallée du Rift en Mauritanie." CNERV Juin 1999.

Tardieu, H., A. Rochfeld, et al. (1983). La méthode MERISE. Tome I. Paris (France).

Thiongane, Y., e. al., et al. Données récentes de l'épidémiologie de la fièvre de la vallée du Rift (FVR) au Sénégal." Bull Soc. Med. Afrique Noire de Lang. Franç. Spécial Congrès: 1-5.

Thiongane, Y., J. P. Gonzalez, et al. (1991). "Changes in Rift Valley fever neutralizing antibody prevalence among small domestic ruminants following the 1987 outbreak in the Senegal River basin." Res. Virol. **142**(1): 67-70.

Thiongane, Y., H. Zeller, et al. (1994). "Baisse de l'immunité naturelle vis-à-vis de la fièvre de la Vallée du Rift chez les ruminants domestiques du Bassin versant du fleuve Sénégal après l'épizootie de 1987." Bull Soc Pathol Exot **87**(1): 5-6.

Turell, M. J. and C. L. Bailey (1987). "Transmission studies in mosquitoes (Diptera: Culicidae) with disseminated Rift Valley fever virus infections." J Med Entomol **24**(1): 8-11.

Walsh, J. (06/1988). "Rift Valley Fever rears its head." Science **247**: 1397-1399.

Ward, M. and T. Carpenter (1996). "Simulation modeling of the effect of climatic factors on bluetongue virus infection in Australian cattle herds. I. Model formulation, verification and validation." Prev Vet Med **27**(1, 2): 1-12.

Ward, M. and T. Carpenter (1997). "Simulation analysis of the effect of herd immunity and age structure on infection of a cattle herd with bluetongue viruses in Queensland, Australia." Prev Vet Med **29**(4): 299-309.

Wilson, M. L. (1994). "Rift Valley fever virus ecology and the epidemiology of disease emergence." Ann N y Acad Sci **740**: 169-80.

Zeller, H. G., D. Fontenille, et al. (1997). "Enzootic activity of Rift Valley fever virus in Senegal." Am J Trop Med Hyg **56**(3): 265-72.

Annexes : fiches d'enquêtes

❖ *Fiche Lieu de Résidence*

Projet Emercase – Modélisation - Collaboration ISRA / Direl / CIRAD Fiche Lieu de Résidence
--

Date de l'enquête : ___ / ___ / ___

Nom du lieu de résidence : _____

Code GPS : _____

Localisation géographique:

Latitude Nord : ___ ° ___ ' ___ « . ___

Longitude Ouest: ___ ° ___ ' ___ « . ___

Code Échantillon spatial : _____

Distance au centre (km) : _____

Population humaine:

Nombre de concessions: _____

Nombre d'habitants: _____

Population animale:

Nombre de troupeaux de bovins: _____

Nombre de troupeaux de petits ruminants: _____

❖ *Fiche Troupeau*

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 pendant la journée (km) : _____

Distance maximale des pâturages exploités par ce troupeau pendant la nuit (km) : _____

❖ **Fiche Pâturages**

Projet Emercase – Modélisation - Collaboration ISRA / Direl / CIRAD
Fiche Pâturages

Identification

Nom: _____ **Date:** ___ / ___ / ___ **Code:** _____
Localisation géographique: Latitude Nord: ___ ° ___ ' ___ « . ___
 Longitude Ouest: ___ ° ___ ' ___ « . ___
Code Échantillon spatial : _____

Topographie

dune
 inter dune
 terrain plat
 bas-fond
 haut de pente
 replat
 bas pente
 mi-pente
 butte de cuirasse

Substrat

argilo-sableux ou *baljol*
 sablo-argileux
 sableux ou *seeno*
 gravillonnaire ou *sangré*
 cuirassé ou *sangré*

Anthropisation

emprise agricole importante
 emprise agricole faible
 traces de feux de brousse
 ébranchage
 proximité d'une implantation humaine

Pression pastorale

faible
 moyenne
 importante

Etat apparent de la végétation

Type de végétation :

	herbacé e	arbustiv e	Arboré e	boisé e	claire	dens e
Steppe						
Savan e						
Forêt						

Type de formation :

Formation ligneuse

	LH	LB
Fermé		
Assez ouvert		
Ouvert		
Très ouvert		

LH = ligneux hauts (>2m)
 LB = ligneux bas (<2m)

Formation herbacée

1^{ère} Espèce herbacée dominante : _____

2^{ème} Espèce herbacée dominante : _____

Formation arbustive

1^{ère} Espèce arbustive dominante : _____

2^{ème} Espèce arbustive dominante : _____

Analyse phyto-sociologique :

	Espèce																									
	Nom Peul	Nom Latin	Appétence	Toxicité	Strate	Côte A-D																				
1																										
2																										
3																										
4																										
5																										
6																										
7																										
8																										
9																										
10																										
11																										
12																										
13																										
14																										
15																										
16																										
17																										
18																										
19																										
20																										
<p>Appétence</p> <ul style="list-style-type: none"> refus + - neutre + appété ++ très appété <p>Toxicité</p> <ul style="list-style-type: none"> non toxique + toxique 		<p>*Cote d'Abondance Dominance</p> <p>5 = recouvrement supérieur à 75%, abondance quelconque 4 = recouvrement de 50 à 75%, abondance quelconque 3 = recouvrement de 25 à 50%, abondance quelconque 2 = très abondant ou recouvrement supérieur à 5% 1 = abondant et recouvrement faible ou assez abondant avec un plus grand recouvrement 0 = simplement présent (recouvrement et abondance très faible)</p> <p>Cote de Stratification</p> <table> <tr> <td>Strate I</td> <td>0 - 5 cm</td> <td>Strate VI</td> <td>2 - 4 m</td> </tr> <tr> <td>Strate II</td> <td>5 - 25 cm</td> <td>Strate VII</td> <td>4 - 8 m</td> </tr> <tr> <td>Strate III</td> <td>25 - 50 cm</td> <td>Strate VIII</td> <td>8 - 16 m</td> </tr> <tr> <td>Strate IV</td> <td>50 - 1 m</td> <td>Strate IX</td> <td>16 - 32 m</td> </tr> <tr> <td>Strate V</td> <td>1 - 2 m</td> <td>Strate X</td> <td>32m et plus</td> </tr> </table>					Strate I	0 - 5 cm	Strate VI	2 - 4 m	Strate II	5 - 25 cm	Strate VII	4 - 8 m	Strate III	25 - 50 cm	Strate VIII	8 - 16 m	Strate IV	50 - 1 m	Strate IX	16 - 32 m	Strate V	1 - 2 m	Strate X	32m et plus
Strate I	0 - 5 cm	Strate VI	2 - 4 m																							
Strate II	5 - 25 cm	Strate VII	4 - 8 m																							
Strate III	25 - 50 cm	Strate VIII	8 - 16 m																							
Strate IV	50 - 1 m	Strate IX	16 - 32 m																							
Strate V	1 - 2 m	Strate X	32m et plus																							

❖ **Fiche Mares**

Projet Emercase – Modélisation - Collaboration ISRA / Direl / CIRAD
Fiche Mares

Identification de la mare

Date d'enquête : ___ / ___ / ___

Nom de la mare: _____

Code de la mare : _____

Localisation géographique: Latitude Nord: ___ ° ___ ' ___ « . ___
 Longitude Ouest: ___ ° ___ ' ___ « . ___

Code Échantillon spatial : _____

Type sol : sableux / sablo-argileux / argileux

Caractéristiques de la mare

Présence d'eau libre: O / N

Si existence d'eau libre, surface (m²): _____

Outil de mesure: GPS / Décamètre

Code polygone SIG	M	Année	Mois	jour	Code mare
		01	—	—	_____

Hauteur d'eau lue à l'échelle limnimétrique : m

Analyse phytosociologique :

	Espèce																									
	Nom Peul	Nom Latin	Type	Situation	Strate	Côte A-D																				
1																										
2																										
3																										
4																										
5																										
6																										
7																										
8																										
	Type 1 aquatique 2 herbacée 3 ligneuse Situation 1 pleine eau 2 bord de mare 3 hors de la mare	*Cote d'Abondance Dominance 5 = recouvrement supérieur à 75%, abondance quelconque 4 = recouvrement de 50 à 75%, abondance quelconque 3 = recouvrement de 25 à 50%, abondance quelconque 2 = très abondant ou recouvrement supérieur à 5% 1 = abondant et recouvrement faible ou assez abondant avec un plus grand recouvrement 0 = simplement présent (recouvrement et abondance très faible) Cote de Stratification <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td>Strate I</td><td>0 - 5 cm</td><td>Strate VI</td><td>2 - 4 m</td></tr> <tr> <td>Strate II</td><td>5 - 25 cm</td><td>Strate VII</td><td>4 - 8 m</td></tr> <tr> <td>Strate III</td><td>25 - 50 cm</td><td>Strate VIII</td><td>8 - 16 m</td></tr> <tr> <td>Strate IV</td><td>50 - 1 m</td><td>Strate IX</td><td>16 - 32 m</td></tr> <tr> <td>Strate V</td><td>1 - 2 m</td><td>Strate X</td><td>32m et plus</td></tr> </table>					Strate I	0 - 5 cm	Strate VI	2 - 4 m	Strate II	5 - 25 cm	Strate VII	4 - 8 m	Strate III	25 - 50 cm	Strate VIII	8 - 16 m	Strate IV	50 - 1 m	Strate IX	16 - 32 m	Strate V	1 - 2 m	Strate X	32m et plus
Strate I	0 - 5 cm	Strate VI	2 - 4 m																							
Strate II	5 - 25 cm	Strate VII	4 - 8 m																							
Strate III	25 - 50 cm	Strate VIII	8 - 16 m																							
Strate IV	50 - 1 m	Strate IX	16 - 32 m																							
Strate V	1 - 2 m	Strate X	32m et plus																							

❖ **Fiche Entomologie**

**Projet Emercase – Modélisation - Collaboration ISRA / Direl / CIRAD
Fiche Entomologie**

Localisation et identification du piège

Date: ___ / ___ / ___

Code lieu: _____

Nom du site : _____ Type : mare / campement / enclos / autre :

Si pas mare,

Code de la mare la plus proche : _____

Distance entre le piège et la rive la plus proche: _____ m

Description de la situation précise du piège :

Localisation géographique: Latitude Nord : ___ ° ___ ' ___ « . ___

Longitude Ouest: ___ ° ___ ' ___ « . ___

Type de piège : émergence / CDC / CDC+appât

Moustiques capturés

Espèce vecteurs potentiels			
	Nom de l'espèce	Nombre de mâles	Nombre de femelles
1	<i>Aedes vexans</i>		
2	<i>Aedes ochraceus</i>		
3	<i>Culex poicilipes</i>		
Autres espèces			
	Nom du genre	Nombre de mâles	Nombre de femelles
4	<i>Aedes</i>		
5	<i>Culex</i>		
6	<i>Mimomyia</i>		
7	<i>Mansonia</i>		
8	<i>Anopheles</i>		
9	<i>Aedeomyia</i>		
10	<i>Ficalbia</i>		
11	<i>Uranotaenia</i>		
12	Autre :		
13	Indéterminé		

Résumé

La fièvre de la vallée du Rift est une maladie infectieuse, commune à l'homme et aux animaux, transmise par des arthropodes et due à un virus de la famille des *Bunyaviridae*, genre *Phlebovirus*. Il s'agit donc d'une zoonose et d'une arbovirose. Elle peut occasionner des pertes économiques élevées chez les ruminants domestiques (avortements, mortalité néonatale) et représente un risque sanitaire majeur pour les populations humaines.

Dans un contexte de changements climatiques et écologiques liés à l'anthropisation croissante des écosystèmes naturels, elle représente un danger réel comme le prouve son extension récente à la péninsule arabique.

Ce document présente la maladie et son épidémiologie en Afrique du l'Ouest, puis les modèles épidémiologiques en cours d'élaboration avant d'exposer l'étude de certains paramètres de modélisation réalisée au Sénégal durant la saison des pluies 2001.

Cette étude a pour but de préciser certaines caractéristiques biologiques des vecteurs potentiels et de comprendre l'effet de la répartition spatiale et temporelle du bétail sur la diffusion du virus, dans une zone d'élevage transhumant de 20 km de rayon autour de Barkédji, village situé dans la vallée fossile du Ferlo.

La modélisation, couplée à des systèmes de télésurveillance des conditions climatiques d'émergence du virus (images satellitaires) et à un réseau d'épidémiosurveillance, peut contribuer à la mise en évidence de situations à risque et à une meilleure gestion des mesures de lutte face aux épidémies.

Abstract

Rift Valley Fever is an infectious disease which affects both humans and animals, transmitted by arthropods and caused by a virus of the *Bunyaviridae* family, genus *Phlebovirus*. It is thus an arbovirose and a zoonosis. It can cause important economic losses in domestic ruminant herds (abortions, mortinatality) and it is a major threat for human populations.

In a context of climatic and ecological changes linked to the growing anthropisation of natural ecosystems, it represents a real danger as demonstrated by its recent extension to the Arabic peninsula.

This document presents the disease, its epidemiology in West Africa and the epidemiological models being developed before discussing some parameters of a model which were tested in a study achieved in Senegal during the rainy season in year 2001.

The aim of this study is to specify some biological characteristics of potential vectors and to understand the effect of the spatial and temporal distribution of herds on the virus spread, in a transhumant breeding area 20 km around the village of Barkedji, located in the fossil valley of the Ferlo river.

Mathematical modeling, combined with remote sensing of the bioclimatic conditions which allow viral emergence and with an epidemiosurveillance network can help revealing high risk situations and improve managing measures to fight epidemics.