



**HAL**  
open science

## Persistence de la fièvre de la Vallée du Rift à Mayotte : surveillance, modélisation et perceptions

Lisa Cavalerie

► **To cite this version:**

Lisa Cavalerie. Persistence de la fièvre de la Vallée du Rift à Mayotte : surveillance, modélisation et perceptions. Santé. Université de la Réunion, 2017. Français. NNT : 2017LARE0027 . tel-01823470

**HAL Id: tel-01823470**

**<https://theses.hal.science/tel-01823470>**

Submitted on 26 Jun 2018

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

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



# Persistance de la fièvre de la Vallée du Rift à Mayotte : surveillance, modélisation et perceptions

---

## **THESE**

pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LA REUNION

Spécialité : Microbiologie et Epidémiologie

Ecole Doctorale des Sciences, Technologies et Santé

Présentée et soutenue publiquement par

**Lisa CAVALERIE**

Le 2 novembre 2017, devant le Jury composé de :

<b>Didier CALAVAS</b> , HDR, Anses, Laboratoire de Lyon	Rapporteur
<b>Claude SAEGERMAN</b> , Professeur, University of Liège	Rapporteur
<b>Philippe DESPRES</b> , Professeur, Université de la Réunion, UMR PIMIT	Examineur
<b>Gwenaëlle PENNOBER</b> , Professeur, Université de la Réunion, UMR ESPACE-DEV	Examineur
<b>Pauline EZANNO</b> , Directrice de recherche, INRA, UMR BIOEPAR	Encadrante
<b>Eric CARDINALE</b> , Directeur de recherche, Cirad, UMR ASTRE	Directeur



## Remerciements

Je dois une immense reconnaissance aux institutions qui m'ont permis de dérouler cette thèse dans de bonnes conditions : le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation pour m'avoir ouvert les portes de son dispositif de formation doctorale des ingénieurs des ponts, des eaux et des forêts (IPEF) ainsi que celles de la Direction de l'agriculture, l'alimentation et la forêt de Mayotte, le CIRAD pour son accueil au sein de sa communauté scientifique, l'Université de la Réunion pour tout ce que j'y ai appris, ainsi que la COOPADEM qui m'a permis de travailler sur le terrain dans les meilleures conditions possibles.

« L'Everest par la face Nord » m'avait-on prévenue dès le commencement. La finalisation de cette thèse a été permise par le soutien scientifique, technique, administratif ou psychologique de tant de guides et de compagnons de cordée que j'ai peur d'oublier ceux, qui, par une main tendue, une pause ou un encouragement, aux moments où le sommet semblait inaccessible pour de bon, m'ont pourtant permis de reprendre mon souffle, de faire un pas de plus et peu à peu d'atteindre la destination.

Je souhaite adresser tout d'abord mes remerciements les plus respectueux aux membres du jury pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de rapporter et d'examiner ce travail exotique et pour avoir fait preuve de patience et de disponibilité malgré des agendas chargés.

Je souhaite ensuite remercier aussi sincèrement que chaleureusement ...

... mon directeur de thèse, Eric Cardinale, pour sa motivation, son ouverture d'esprit et son énergie positive illimitée. L'Everest ça ne lui fait pas peur et il le fait avec le sourire ;

... ceux qui m'ont permis de débiter cette aventure : Cyril Kao et Karine Boquet à l'ENGREF, Julien Fosse et son équipe du bureau de l'appui scientifique et technique de la DGAL, Pascal Bonnet au CIRAD, Jacques Itlis, Vincent Herbreteau puis Gwenaëlle Pennober qui m'ont encouragée et soutenue dans la phase de préparation. Je souhaiterais rendre un hommage particulier à l'UMR ESPACE-DEV grâce à qui j'ai pu importer QGIS au bureau de la santé animale et y faire beaucoup d'adeptes, mais surtout pour avoir fait preuve de générosité et d'ouverture d'esprit à mon égard quand bien même les collaborations ne se sont pas concrétisées comme prévu ;

... Pauline Ezanno et Maud Charron pour leur accompagnement dans la découverte des modèles SIR, jusque sur la table de leur salle à manger, un vrai défi de patience et de rigueur! Mon tout premier article dans un « vrai » journal doit tout à leur persévérance ;

... les membres de mon comité de thèse : Renaud Lancelot et Barbara Dufour, pour le partage de leur vaste savoir en épidémiologie ;

... Catherine Cêtre-Sossah toujours réactive et prête à discuter de tout et sans qui nous n'aurions aucun résultat de FVR à présenter, ainsi que Johnny pour son appui au laboratoire ;

... Raphaëlle Junior Métras, experte de la cage à maki, top-modèle de la FVR, pour son soutien, son invitation à Londres et la LSHTM, Alf et ses relectures déterminantes pour la finalisation du manuscrit. Un grand merci ;

... Laure Dommergues, un vrai couteau suisse-Leatherman®, capable de faire un chi2, de la boue jusqu'aux genoux en attrapant des chèvres pour leur mettre un collier GPS, une solution à tout et un soutien inébranlable. Si elle l'avait voulu, elle aurait pu signer cette thèse à ma place, tant elle a été présente à chaque pas(ge). Il va falloir trouver une nouvelle aventure : les bottes sont dans la charrette à capsules, je répète, les capsules sont dans la charrette à bottes. Une dette éternelle ;

... tous les acteurs qui, à Mayotte, ont participé à la surveillance de la FVR : Philippe Mérot, les nombreux éleveurs, les vétérinaires, les employés de la COOPADEM qui ont permis d'avoir des données uniques sur la FVR; Siaka Daouirou qui a partagé tout ce qu'il savait de son île (de comment retrouver les élevages non référencés dans la brousse, à la contention du zébu en passant par la conduite sur tout type de pistes); Chef Marion Pannequin, André Gimenez puis Denis Nole pour m'avoir permis de travailler en toute confiance et avec une grande liberté à l'ADEM, Jérôme Jannelle et Emmanuel Tillard pour le partage des données sur la typologie des élevages mahorais ; Betty Zumbo et l'ARS, pour celui des données entomologiques, Eva Chauvet pour avoir conduit un stage passionnant ;

... tous ceux que j'ai côtoyés dans (et hors) les murs du CYROI et du CRVOI : l'équipe du bureau du fond : Marianne, Matt et Séverine ; les co-sardines du « bureau des sardines » et leurs associés, dans le désordre : ma co-thésarde Claire T., Julien M, Camille, Muriel, Yann, Marina, Claire B., Coralie, Camille Blondie, Beza ; mais aussi Pablo, Erwan, Céline, Célestine, Vanina, Imade, Greg et tous ceux qui ont apporté autant de conseils, de coups de pouces, de dépannage de code sous « R » que de convivialité avec des *dodos* bien méritées après le travail ;

... mes chefs, collègues et collaborateurs au Bureau de la Santé Animale et à la DGAL, pour leur soutien permanent pendant cette période difficile de crises sanitaires sur fond de fin de thèse, beaucoup sont devenus là aussi bien plus que des collègues.

\*\*\*

Alors que j'espère encore pouvoir lister de façon infaillible tous ceux qui ont contribué à la rédaction de ces lignes, je finirai en fait simplement par remercier pour leur patience tous ceux à qui je me souviens avoir dit un peu trop souvent : « ce soir/week-end, je peux pas j'ai thèse », « c'est une super idée mais d'abord j'ai une thèse à finir », mais qui ont continué de faire des invitations ☺ :

... toute ma famille à qui je suis extrêmement reconnaissante de m'avoir permis d'apprendre tant de choses avec autant de bienveillance, et en particulier mes grands-parents pour leur amour inconditionnel et auprès de qui il fait toujours bon être – quelle idée alors de partir à des centaines ou des milliers de km ? je cherche toujours la réponse- ; mes parents pour leur exigence mêlée d'un soutien permanent et entier, une chance inestimable, même s'ils sont toujours les premiers pour partir à des milliers de km ; mon trésor de sœur, la plus patiente et très méritante à qui je ne peux souhaiter que bonheur et réussite ;

... les amis de partout dont, les voisins de la Cité Houat, Manoj, Max, Gaëlle et Aurore, Julie, Shahnoo, Li-Peng pour les concerts privés et les repas improvisés ; les amis de prépa et d'école, d'Alfort, à qui j'ai vraiment beaucoup répété « J'peux pas, j'ai thèse » mais qui sont pourtant toujours là : Antoine, Alicia, Axelle, Elodie, Marine, Capu, Aurélien, Charlie, Benoît ; Manon, bien plus qu'une voisine de

bureau, qui m'a guidée vers la lumière ;) ; my Erasmus community : Jeannette, Colette, Andres, Nancy, Monica, Julia, always inspiring ☺ ☺ ☺ ;

... le SC Chaudron et ses joueurs-ses (Claire, Chuck, Flo et tou(te)s les autres) qui m'ont permis de rechausser les crampons pour tout oublier le temps de quelques ballons et de la troisième mi-temps ☺. Un bel esprit rugby ;

... la Team dressage (et Vitamine) qui a pris le relais, tardivement et brièvement mais heureusement, pour me faire oublier juste à temps et ce qu'il faut la thèse et le bureau. Une belle surprise et de belles rencontres ;

... ባል pour tellement de choses, si ce n'est tout, አመሰግናለሁ ለታላቅ ተዕግስት

*« Work expands so as to fill the time available for its completion » Parkinson's law*

*Post Tenebras Lux*



## SOMMAIRE

<b>Liste des abréviations et des sigles .....</b>	<b>7</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>8</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>11</b>
<b>Valorisation des travaux .....</b>	<b>12</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>15</b>
<b>I. Problématique – Objectifs de la thèse .....</b>	<b>15</b>
<b>II. Présentation de la fièvre de la Vallée du Rift .....</b>	<b>18</b>
<b>A. Le virus de la FVR (Etiologie) .....</b>	<b>18</b>
<b>B. Expression de la maladie (chez les vertébrés) .....</b>	<b>20</b>
1. Chez l’Homme .....	20
2. Chez les mammifères domestiques .....	21
3. Dans la faune sauvage.....	22
<b>C. Diagnostic .....</b>	<b>22</b>
1. Diagnostic clinique et diagnostic différentiel.....	22
2. Diagnostic de laboratoire.....	23
a. Généralités .....	23
b. Méthodes de détection directes .....	24
c. Méthode de détection indirectes .....	24
<b>D. Distribution spatio-temporelle du virus .....</b>	<b>27</b>
1. La découverte du Virus au Kenya en 1930.....	28
2. Principales épidémies et épizooties.....	28
3. Circulation enzootique.....	29
4. Apport de la phylogénie pour expliquer la diffusion du virus.....	29
<b>E. Cycle de transmission du virus de la FVR .....</b>	<b>29</b>
1. La transmission directe horizontale.....	30
2. La transmission vectorielle.....	31
3. La transmission verticale.....	32
4. Mécanismes d’émergence .....	32
a. Facteurs climatiques.....	32
b. Facteurs anthropiques .....	33
c. Autres facteurs .....	34
<b>F. Prévention et Lutte .....</b>	<b>35</b>
1. Enjeux.....	35
2. Actions à coordonner.....	36
a. Préparation – plan d’urgence .....	36
b. Analyse de risque .....	37
c. Alerte précoce : Modèles prédictifs du risque.....	37
d. Surveillance (Alerte précoce et suivi).....	38
e. Traitement.....	39
f. Vaccination.....	39
i. Vaccins disponibles .....	39



ii.	Déploiement de la vaccination .....	40
g.	Contrôle des mouvements d'animaux .....	40
h.	Lutte anti-vectorielle.....	41
i.	Prévention des cas humains.....	41
<b>III.</b>	<b>Mayotte et la FVR .....</b>	<b>43</b>
<b>A.</b>	<b>Géographie .....</b>	<b>43</b>
<b>B.</b>	<b>Climat .....</b>	<b>43</b>
<b>C.</b>	<b>Histoire .....</b>	<b>44</b>
<b>D.</b>	<b>Situation socio-économique et culturelle .....</b>	<b>45</b>
<b>E.</b>	<b>Agriculture .....</b>	<b>45</b>
1.	Aspects généraux .....	45
2.	Les pratiques d'élevage.....	46
3.	Les produits de l'élevage.....	48
<b>F.</b>	<b>La FVR dans l'archipel des Comores .....</b>	<b>49</b>
1.	La FVR dans l'Union des Comores.....	49
a.	Cas humains (2007-2012).....	49
b.	Situation épidémiologique chez les ruminants (2007-2011).....	50
c.	Cycle épidémiologique de la FVR dans l'Union des Comores.....	50
d.	Actions mises en œuvre .....	51
2.	La FVR à Mayotte .....	52
a.	Cas humains (2007-2011).....	52
b.	Situation épidémiologique chez les ruminants (2004-2011).....	53
c.	Cycle épidémiologique à Mayotte .....	54
d.	Actions mises en œuvre .....	55
i.	Evaluation du risque .....	55
ii.	Communication préventive .....	56
iii.	Renforcement de la surveillance humaine et animale .....	57
iv.	Autres mesures .....	58
<b>I -</b>	<b>Contexte de l'étude .....</b>	<b>61</b>
<b>II -</b>	<b>Matériel et méthodes.....</b>	<b>62</b>
<b>A.</b>	<b>Séroprévalence et incidence sérologique de la FVR à Mayotte .....</b>	<b>62</b>
1.	Population d'étude .....	62
2.	Méthode d'analyse sérologique en laboratoire.....	64
3.	Taux de séroprévalence .....	64
a.	Taux de séroprévalence observé globalement, par campagne et par strate (type d'élevage ou zone géographique).....	64
b.	Taux de séroprévalence « réel » tenant compte de la sensibilité et de la spécificité du test sérologique .....	64
c.	Correction de l'intervalle de confiance du taux de séroprévalence observé pour tenir compte de « l'effet troupeau » de l'échantillonnage.....	65
1.	Taux d'incidence .....	65
a.	Taux d'incidence observé par campagne et par strate .....	65
b.	Correction de l'intervalle de confiance du taux d'incidence observé pour tenir compte de « l'effet troupeau » de l'échantillonnage .....	66
<b>B.</b>	<b>Impacts de la FVR .....</b>	<b>66</b>

1. Surveillance événementielle des avortements : déclaration obligatoire des avortements et recherche de la FVR par RT-PCR.....	66
2. Comparaison des données de séroconversions avec les données de production laitières et les pesées réalisées par le projet PAZEM dans le premier groupe d'éleveurs.....	67
<b>III - Résultats.....</b>	<b>68</b>
<b>A. Séroprévalence et incidence sérologique de la FVR à Mayotte.....</b>	<b>68</b>
1. Population d'étude .....	68
2. Taux de séroprévalence.....	68
a. Taux de séroprévalence « observé » .....	68
b. Taux de séroprévalence « réel » tenant compte de la sensibilité et de la spécificité du test sérologique .....	71
c. Correction de l'intervalle de confiance du taux de séroprévalence observé pour tenir compte de « l'effet troupeau » .....	72
3. Taux d'incidence .....	72
a. Taux d'incidence « observé » .....	72
b. Correction de l'intervalle de confiance du taux d'incidence observé pour tenir compte de « l'effet troupeau » .....	76
<b>B. Impacts de la FVR.....</b>	<b>77</b>
1. Surveillance événementielle des avortements : déclaration obligatoire des avortements et recherche de la FVR par RT-PCR.....	77
2. Comparaison des données de séroconversions avec les données de production laitières et les pesées réalisées par le projet PAZEM dans le premier groupe d'éleveurs.....	78
<b>IV - Discussion.....</b>	<b>79</b>
<b>A. Difficultés du suivi sentinelle.....</b>	<b>80</b>
<b>B. Taux de séroprévalence et d'incidence observé par zone géographique et par type d'élevage</b>	<b>81</b>
<b>C. Interprétation des séroconversions et de la persistance de la FVR.....</b>	<b>81</b>
<b>D. Impact de la FVR en élevage.....</b>	<b>83</b>
<b>E. Conclusion, recommandations et perspectives.....</b>	<b>84</b>
<b>CHAPITRE II : Evaluation du dispositif de surveillance de la FVR du SESAM.....</b>	<b>86</b>
<b>I. Introduction.....</b>	<b>87</b>
<b>A. Contexte et objectifs de l'évaluation des performances du SESAM.....</b>	<b>87</b>
<b>B. Description du dispositif de surveillance de la FVR à Mayotte par le SESAM.....</b>	<b>89</b>
1. Protocole de surveillance de la FVR par le SESAM.....	89
a. Objet de la surveillance .....	89
b. Stratégies de surveillance.....	90
i. Surveillance programmée.....	90
ii. Surveillance événementielle.....	90
c. Analyses de laboratoire .....	92
d. Gestion des données.....	92
e. Diffusion des résultats.....	92
2. Organisation institutionnelle .....	92
a. Comité technique et comité de pilotage.....	92
b. Unité centrale.....	93
c. Laboratoire .....	93

d. Intervenants de terrain .....	93
e. Charte de fonctionnement .....	93
3. Financement du SESAM .....	93
4. Résultats de la surveillance de la FVR en 2012-2013.....	94
<b>II. Matériel et méthode .....</b>	<b>94</b>
<b>A. Qualité des données .....</b>	<b>94</b>
1. « Complétude ».....	94
a. Composante n°1 : Surveillance programmée, suivi sentinelle sérologique .....	94
b. Composante n°2 : surveillance événementielle des avortements .....	95
2. Validité des données.....	96
a. Composante n°1 : Surveillance programmée, suivi sentinelle sérologique .....	96
b. Composante n°2 : surveillance événementielle des avortements .....	96
<b>B. Sensibilité .....</b>	<b>97</b>
1. Méthode des arbres de scénarios et définitions .....	97
2. Méthode des arbres de scénarios appliquée à la surveillance de la FVR du SESAM.....	98
a. Composante n°1 : Surveillance programmée, suivi sentinelle sérologique .....	98
b. Composante n°2 : surveillance événementielle des avortements .....	100
<b>C. Acceptabilité : rapport coût-efficacité et efficience .....</b>	<b>102</b>
<b>D. Réactivité.....</b>	<b>103</b>
<b>III. Résultats.....</b>	<b>104</b>
<b>A. Qualité des données .....</b>	<b>104</b>
1. Complétude.....	104
a. Composante n°1 : surveillance programmée, suivi sentinelle sérologique.....	104
b. Composante n°2 : surveillance événementielle des avortements .....	105
2. Validité des données.....	105
a. Composante n°1 : surveillance programmée, suivi sentinelle sérologique.....	105
b. Composante n°2 : surveillance événementielle des avortements .....	106
<b>B. Sensibilité .....</b>	<b>107</b>
1. Composante n°1 : surveillance programmée, suivi sentinelle sérologique.....	107
2. Composante n°2 : surveillance événementielle des avortements .....	107
3. Sensibilité du dispositif de surveillance de la FVR .....	109
<b>C. Acceptabilité : rapport coût-efficacité et efficience .....</b>	<b>109</b>
<b>D. Réactivité.....</b>	<b>111</b>
1. Composante n°1 : surveillance programmée, suivi sentinelle sérologique.....	111
2. Composante n°2 : surveillance événementielle des avortements .....	111
<b>IV. Discussion.....</b>	<b>112</b>
<b>A. Qualité des données .....</b>	<b>113</b>
<b>B. Sensibilité .....</b>	<b>114</b>
<b>C. Acceptabilité : rapport coût-efficacité et efficience .....</b>	<b>116</b>
<b>D. Réactivité.....</b>	<b>118</b>
<b>E. Conclusion.....</b>	<b>119</b>
<b>CHAPITRE III : Modélisation de la persistance de la FVR à Mayotte .....</b>	<b>122</b>
<b>I. Préambule sur l'épidémiologie participative et les travaux conduits à Mayotte en santé animale .....</b>	<b>158</b>

<b>I. Contexte et objectif de l'étude .....</b>	<b>160</b>
<b>II. Matériel et Méthodes.....</b>	<b>161</b>
<b>A. Organisation des réunions participatives.....</b>	<b>161</b>
<b>B. Exercice de priorisation des maladies.....</b>	<b>162</b>
1. Etape 1 : Recensement des maladies rencontrées.....	162
2. Etape 2 : Sélection des cinq maladies les plus importantes par vote individuel .....	163
3. Etape 3 : Description de l'impact des cinq problèmes les plus importants.....	164
4. Etape 4 : Priorisation des cinq maladies par critère .....	164
<b>III. Résultats .....</b>	<b>164</b>
<b>A. Organisation des réunions participatives.....</b>	<b>164</b>
<b>B. Exercice de priorisation des maladies.....</b>	<b>165</b>
1. Etape 1 : Recensement des maladies rencontrées.....	165
2. Etape 2 : Sélection des cinq maladies les plus importantes par vote.....	168
3. Etape 3 : Description de l'impact des cinq problèmes les plus importants.....	169
4. Etape 4 : Priorisation des maladies.....	170
<b>IV. Discussion .....</b>	<b>173</b>
<b>A. Méthode.....</b>	<b>173</b>
<b>B. Résultats.....</b>	<b>175</b>
<b>C. Perspectives .....</b>	<b>179</b>
<b>DISCUSSION GENERALE.....</b>	<b>181</b>
<b>I. Principaux résultats .....</b>	<b>181</b>
<b>A. Persistance de la FVR à Mayotte en 2012-2013.....</b>	<b>181</b>
1. Observations .....	181
2. Modélisation .....	181
3. Etat de la situation épidémiologique mahoraise en matière de FVR .....	181
<b>B. Evaluation du dispositif de surveillance de la FVR du SESAM.....</b>	<b>183</b>
1. Indicateurs de performances.....	183
2. Propositions d'évolutions du dispositif.....	184
<b>C. Impact et perceptions de la FVR à Mayotte .....</b>	<b>184</b>
1. Impact clinique de la FVR.....	184
2. Place de la FVR dans les priorités sanitaires des éleveurs .....	185
<b>II. Perspectives générales .....</b>	<b>185</b>
<b>A. Gestion de la FVR à Mayotte.....</b>	<b>185</b>
<b>B. Les perspectives de l'élevage à Mayotte.....</b>	<b>186</b>
<b>C. L'avenir du SESAM.....</b>	<b>187</b>
<b>REFERENCES .....</b>	<b>189</b>
<b>Textes réglementaires.....</b>	<b>205</b>
<b>Sources de financements et constitution du comité de thèse.....</b>	<b>207</b>
<b>A. Méthode.....</b>	<b>209</b>
<b>B. Résultats.....</b>	<b>212</b>

**ANNEXE VII : Poster ICAHS 2014.....220**  
**Résumé .....221**  
**Summary .....222**



## Liste des abréviations et des sigles

Afssa : Agence française de sécurité sanitaire des aliments, devenue Anses en 2010

AMV : Acte médical vétérinaire

Anses : Agence nationale chargée de la sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement du travail

ADEM : Association des éleveurs mahorais, devenue COOPADEM en 2012

ARN : Acide ribonucléique

BDD : Base de données

BDNI : Base de Données Nationale de l'Identification

CAPAM : Chambre de l'agriculture, de la pêche et de l'aquaculture de Mayotte

Cirad : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

CDC : *Centers for Disease Control and prevention*, en anglais, Agence fédérale des Etats-Unis pour la santé publique

COOPADEM : Coopérative des éleveurs mahorais

DAAF : Direction de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt

DOM : Département d'Outre Mer

EHD : Maladie Hémorragique Epizootique

ELISA : *Enzyme-linked immunosorbent assay*, en anglais, ou « dosage d'immunoabsorption par enzyme liée »

EDE : Établissement départemental d'élevage

ENSO : El Niño- Southern Oscillation) est un phénomène climatique, principale cause des variabilités climatiques interannuelles

FAO : *Food and Agriculture Organization*, en anglais, ou Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

FCO : Fièvre Catarrhale Ovine

FVR : fièvre de la Vallée du Rift

GDS : Groupement de défense sanitaire

IA : insémination artificielle

IC<sub>95%</sub> : Intervalle de confiance à 95%

IgG : Immunoglobuline de type G

IgM : Immunoglobuline de type M

IPG : Identification pérenne généralisée des bovins

LVAD : Laboratoire vétérinaire d'analyses départemental

LNR : Laboratoire national de référence

MOT : micro-organismes et toxines

OIE : Organisation mondiale de la santé animale (Ex Office international des épizooties)

PAZEM : Programme d'Appui Zootechnique aux éleveurs Mahorais

PIB : Produit Intérieur Brut

PCR : *Polymerase chain reaction*, en anglais, ou amplification en chaîne par polymérase

RT-PCR : *Reverse transcription polymerase chain reaction*, en anglais, ou transcription inverse et amplification en chaîne par polymérase

SC : séroconversion

Se et Sp: Sensibilité et spécificité

SESAM : Système d'épidémio-surveillance animale à Mayotte

SIR : Sensible, Infecté, Guéri ou *recovered* en anglais

## Liste des figures

Figure 1. Structure de la thèse (« Chap » = chapitre).....	17
Figure 2. Arbre phylogénétique construit à partir de l'alignement des domaines polymérase du segment L des virus membres de la famille des Bunyaviridae et des protéines analogues chez d'autres virus à ARN simple brin à polarité négative (famille des Arenaviridae et Orthomyxoviridae) (Source : King et al. 2011).....	18
Figure 3. Image par microscopie électronique avec coloration négative de particules virales de FVR. La barre représente 50 nm (Source : King et al. 2011, courtesy of A. Freiburg and R. Flick).....	19
Figure 4. Organisation de la particule virale (A) du virus de la FVR et codage du génome (B) (Lorenzo et al., 2015).....	20
Figure 5. Evolution schématique de la virémie et de la réponse en anticorps chez les ruminants en réponse à une infection par le virus de la FVR. Le graphique indique la fenêtre temporelle optimale d'utilisation des méthodes de détection directe (RT-PCR) et indirectes (recherche d'IgM et IgG) en fonction du délai entre le début de l'infection et le prélèvement. L'abscisse indique le nombre de jours après l'infection, en ordonnées sont représentées : à gauche la virémie et à droite, la densité optique mesurée par l'ELISA donnant une indication sur la quantité d'anticorps présents (IgM ou IgG) (Bird et al., 2009).....	24
Figure 6. Distribution de la FVR et des principales épidémies/épizooties. En blanc : les pays où le virus n'a jamais été isolé ; en rose : les pays où soit le virus a été isolé, soit des traces sérologiques ont été mises en évidence ; en rouge : les pays ayant subi des épizooties et épidémies notables (Source : (Nanyingi et al., 2015)).....	27
Figure 7. Cycle de transmission de la FVR (Source : (FAO, 2012)). En situation d'endémie, la transmission est assurée entre les hôtes sensibles par un des vecteurs compétents (Aedes, Anopheles, Culex, etc.). Les situations épidémiques sont déclenchées soit par des phénomènes climatiques ou anthropiques permettant la prolifération exceptionnelle de vecteurs (les vecteurs les plus précoces à se développer sont ceux du genre Aedes, suivi des Culex et Anopheles ; les Aedes seraient capables de transmettre verticalement le virus à leur progéniture, permettant la persistance du virus pendant les périodes sèches) soit par l'introduction du virus dans une population naïve (généralement par le commerce de bétail). En situation épidémique, une transmission directe à partir d'animaux hautement virémiques renforce la circulation du virus.....	30
Figure 8. Mise en relation entre les périodes d'épizootie de FVR et la pluviométrie au Kenya (l'axe des ordonnées représente un indicateur composite d'anomalie de pluviométrie basé sur le nombre de jours de pluies par mois multiplié par la pluviométrie mensuelle à partir des données de cinq sites au Kenya où des épizooties de FVR ont été détectées).....	33
Figure 9. Localisation de Mayotte dans l'archipel des Comores (Gauche, Source : (Taglioni, 2009) et principaux lieux-dits et axes de communication (Droite, Source : (Cour des Comptes, 2016)).....	43
Figure 10. Carte de densité des ruminants à Mayotte (Source : (DAAF Mayotte, 2011b).....	46
Figure 11. Typologie synthétique des élevages mahorais (Source : (Tillard et al., 2013).....	47
Figure 12. Zébus dans un kwassa-kwassa saisi par la police aux frontières (Source : Journal de Mayotte du 08/09/2014).....	48
Figure 13. Nombre de cas humains de FVR identifiés à Mayotte entre Juin 2007 et Juillet 2009, le premier cas correspond au cas importé de Grande Comore (Source : (Lernout et al., 2011).....	53
Figure 14. Un des supports de la campagne de communication de la préfecture de Mayotte pour prévenir les cas humains de FVR.....	57
Figure 15. Répartition géographique des animaux suivis par élevage et par période (entre deux campagnes de prélèvements sanguins) : (I) Période 2010-A, (II) Période A-B, (III), Période B-C et (IV) Période C-D.....	63
Figure 16. Taux de séroprévalence observé tous types d'élevages confondus (et IC 95%).....	69
Figure 17. Taux de séroprévalence observé par type d'élevage (A) et par zone géographique (B) (et IC 95%).....	70

Figure 18. Taux de séroprévalence observé par zone géographique (Nord, Sud, Est, Ouest, Petite Terre) et par campagne de prélèvement (2010, A, B, C, D).....	71
Figure 19. Carte des évènements observés (séroconversions ou avortements) dans les élevages suivis entre 2010 et 2013 .....	75
Figure 20. Nombre de déclarations d'avortements à Mayotte entre 2010 et 2013, avec le type d'élevage pour les éleveurs dont la typologie est connue par leur inclusion dans l'étude.....	77
Figure 21. Comparaison de la production laitière d'animaux ayant séroconverti avec d'autres animaux du même type racial suivis par le PAZEM (nuage de points) en fonction de la période de séroconversion observée (Les lignes pointillées couvrent la période où la séroconversion observé a pu avoir lieu et sont de la même couleur que la production laitière pour un même animal).....	78
Figure 22. Comparaison des courbes de croissance d'animaux ayant séroconverti avec d'autres animaux de même type racial et de même sexe suivis par le PAZEM (Les lignes pointillées couvrent la période où la séroconversion observé a pu avoir lieu et sont de la même couleur que le poids pour un même animal) .....	79
Figure 23. Bilan des indicateurs de performances (à gauche : Données relatives à l'année 2010 ; à droite : données relatives à la campagne D pour la surveillance programmée et données relatives à l'année 2013 pour la surveillance événementielle concernant la complétude des données, la complétude de la réalisation, la validité des données et la réactivité. Pour l'efficacité et la sensibilité, les données sont globalisées sur la période d'étude 2012-2013 pour les deux composantes).....	86
Figure 24 : document d'information transmis aux éleveurs de l'ADEM en 2011 .....	91
Figure 25. Schéma de fonctionnement des deux composantes du dispositif de surveillance de la FVR du SESAM en 2012 et 2013 (PS = Prise de sang) .....	91
Figure 26. Présentation schématique d'un arbre de scénario pour une composante du système de surveillance (source : Rivière 2016).....	98
Figure 27. Arbre de scénario pour la sensibilité de la surveillance programmée de la FVR du SESAM.....	99
Figure 28. Arbre de scénario pour la sensibilité de la surveillance événementielle de la FVR du SESAM.....	102
Figure 29. Rosace bilan des indicateurs de performances des composantes du dispositif de surveillance de la FVR du SESAM. En A : Données relatives à l'année 2010. En B : données relatives à la campagne D pour la surveillance programmée et données relatives à l'année 2013 pour la surveillance événementielle concernant la complétude des données, la complétude de la réalisation, la validité des données et la réactivité. Pour l'efficacité et la sensibilité, les données sont globalisées sur la période d'étude 2012-2013 pour les deux composantes. ....	112
Figure 30. Le laboratoire du SESAM à l'ADEM. Cet investissement a permis en priorité de traiter et stocker les prises de sang des élevages sentinelles (©Lisa Cavalerie).....	121
Figure 32. Exemples de lieux de réunion (© Lisa Cavalerie).....	162
Figure 33 : Illustrations du vote pour les maladies les plus importantes (© Lisa Cavalerie).....	163
Figure 34. Illustrations des discussions entre éleveurs permettant de pondérer l'importance de cinq problèmes sanitaires retenus en fonction de critères définis (© Lisa Cavalerie) .....	164
Figure 35. Représentation des communes de Mayotte où les réunions ont été organisées .....	165
Figure 36 : Exemple d'illustrations des maladies décrites par les éleveurs avant l'étape de priorisation. Les traits présents autour des vaches résultent du vote issu de la seconde étape de priorisation .De Haut en bas et de gauche à droite : Bavite-grippe (Majongoma) ; Diarrhée (poudza) ; Tiques (Pambazi) ; Boîterie (Gobo); Problème de vêlage (Oudzazi et Asoudza nayi) ; Dermatophilose (tsoungou) ; Mammite (Mazimbaya bele) ; Non délivrance (Dzao) ; Charbon.....	168
Figure 37. Illustration d'un bovin atteint du syndrome « bavite » (© Chouanibou Youssouffi).....	176
Figure 38. Exemples de croûtes liées à la dermatophilose qui peuvent être confondues avec des « boutons » (© Laure Dommergues).....	177
Figure 39. Arbre permettant d'estimer le taux d'incidence réel à partir de données de séroconversions obtenues avec un test sérologique imparfait.....	211



Figure 40. Evolution du taux d'incidence réel (TIR) en fonction de la valeur de chacun des différents paramètres (Sp=spécificité, Se= sensibilité, SC\_obs=nombre de séroconversions observées, pR=prévalence réelle, SN\_obs=nombre de séronégativations observées) ..... 212



## Liste des tableaux

Tableau 1. Principaux tests ELISA développés et performances associées ( <sup>#</sup> détection des IgM théoriquement possible mais pas encore été validée ; en fonction des données disponibles dans la littérature, la sensibilité et la spécificité sont exprimées soit en fonction des valeurs minimales-maximales observés - $min_{obs}$ et $max_{obs}$ - soit en fonction de l'évaluation de l'intervalle de confiance à 95% : $IC_{95\%}$ ).....	26
Tableau 2. Taux de séroprévalence observé (ELISA IgG) par campagne de prélèvements (2010, A, B, C, D) et par type d'élevage .....	69
Tableau 3. Taux de séroprévalence observé (ELISA IgG) et intervalle de confiance à 95% par campagne de prélèvements (2010, A, B, C, D) et par zone géographique.....	70
Tableau 4. Taux de séroprévalence réel ( $pR$ ) en fonction des valeurs extrêmes de la sensibilité ( $Se$ ) et la spécificité ( $Sp$ ) du test ELISA.....	71
Tableau 5. Prise en compte du Design effect dans le calcul de l'intervalle de confiance du taux de prévalence observé.....	72
Tableau 6. Taux d'incidence observé (séroconversions) intervalle de confiance à 95% par période et par type d'élevage.....	73
Tableau 7. Taux d'incidence observé (séroconversions) intervalle de confiance à 95% par période et par zone géographique d'élevage.....	74
Tableau 8. Taux d'incidence observé des séronégativations à chaque période d'étude.....	76
Tableau 9. Prise en compte de l'effet troupeau dans le calcul de l'intervalle de confiance du taux d'incidence observé ( $\tau_{obs}$ =Taux d'incidence observé par période) .....	76
Tableau 10. Valeurs utilisées a priori pour le calcul de la sensibilité de la surveillance programmée .....	100
Tableau 11. Valeurs utilisées a priori pour le calcul de la sensibilité de la surveillance événementielle.....	102
Tableau 12. Complétude des données de la surveillance programmée des élevages sentinelles (NA=non applicable).....	104
Tableau 13. Complétude des données de la surveillance événementielle des avortements .....	105
Tableau 14. Validité des données de la surveillance programmée .....	106
Tableau 15. Validité des données de la surveillance événementielle.....	107
Tableau 16. Valeurs estimées a priori et a posteriori de sensibilité de la surveillance programmée.....	107
Tableau 17. Estimation de la proportion de déclaration parmi les avortements observés à Mayotte .....	108
Tableau 18. Valeurs estimées a priori et a posteriori de sensibilité de la surveillance événementielle .....	109
Tableau 19. Bilan en budget partiel des coûts et de l'efficacité des deux composantes du dispositif de surveillance de la FVR à Mayotte.....	110
Tableau 20. Délai de réalisation des analyses de la surveillance programmée et événementielle.....	111
Tableau 21. Détail des réunions organisées.....	165
Tableau 22 : Liste des maladies citées (Certaines maladies ont ensuite été regroupées en une seule entité pour l'analyse des données : elles sont marquées d'un même nombre d'astérisques : « * », « ** », « *** » ou « **** ») .....	167
Tableau 23 : Pourcentage de votes obtenu à chaque réunion et pour chaque maladie (« - » = maladie non citée au cours de cette réunion). Ne sont détaillés dans ce tableau que les problèmes sanitaires ayant été classés dans les cinq principaux problèmes lors d'au moins une des réunions. ....	169
Tableau 24. Evaluation de l'importance relative des principaux problèmes sanitaires en fonction de critères particuliers (coût, fréquence, risque, gêne, gravité) et des réunions (R=réunion). Les pourcentages représentent la proportion de jetons attribuée à chaque maladie pour un critère donné à chaque réunion. ....	172
Tableau 25. Calcul du taux d'incidence réel corrigé par les différentes valeurs possibles de sensibilité et de spécificité .....	212

## Valorisation des travaux

### Articles dans des revues scientifiques avec comité de lecture

Cavalerie L, Charron M, Ezanno P, Dommergues L, Cardinale E, (2015) « A Stochastic Model to Study Rift Valley Fever Persistence with Different Seasonal Patterns of Vector Abundance: New Insights on the Endemicity in the Tropical Island of Mayotte» *PLoS ONE* 10 (7): 2015 e0130838. doi:10.1371/journal.pone.0130838

Métras R, Cavalerie L, Dommergues L, Mérot P, Edmunds WJ, Keeling MJ, Cêtre-Sossah C, Cardinale E (2016) « The Epidemiology of Rift Valley Fever in Mayotte: Insights and Perspectives from 11 Years of Data ». *PLoS Negl Trop Dis* 10 (6): e0004783. doi:10.1371/journal.pntd.0004783

Métras R, Fournié G, Dommergues L, Camacho A, Cavalerie L, Mérot P, Keeling MJ, Cêtre-Sossah C, Cardinale E, Edmunds WJ, (2017) « Drivers for Rift Valley fever emergence in Mayotte: A Bayesian modelling approach ». *PLoS Negl Trop Dis* 11 (7): e0005767. doi:10.1371/journal.pntd.0005767

### Communications Orales

Cavalerie L, Ezanno P, Foray C, Roger M, Licciardi S, Maquart M, Cardinale E, « A metapopulation model for RVF virus circulation and persistence within the Comoros Archipelago », 2nd Run Emerge scientific days, 25-26 octobre 2012, Saint-Denis de la Réunion, France

Foray C, Cavalerie L, Beral M, Roger M, de la Roque S, Squarzone Diaw C, Cardinale E, « Spatial autocorrelation of seroprevalence of Rift Valley Fever in Indian ocean », 2nd Run Emerge scientific days, 25-26 octobre 2012, Saint-Denis de la Réunion, France

Cavalerie L, Charron MVP, Ezanno P, Cardinale E, « A metapopulation mechanistic model for Rift Valley fever virus persistence in the Comoros archipelago », AITVM 14th conference, 25-29 août 2013, Johannesburg, Afrique du Sud

Cavalerie L, Charron MVP, Ezanno P, Dommergues L, Cardinale E, « Modélisation et gestion de la Fièvre de la Vallée du Rift », 3<sup>ème</sup> Comité de pilotage Animalrisk, 27 février 2014, Saint-Denis de la Réunion

Cavalerie L, Charron M, Ezanno P, Dommergues L, Cardinale E, “Exploring Rift Valley fever virus persistence in a tropical insular ecosystem” vector-borne disease modelling day cmmid & LSHTM, 13<sup>th</sup> of November 2015, London, United Kingdom

### Posters

Cavalerie L, Charron MVP, Ezanno P, Cardinale E, “A metapopulation model to understand Rift Valley Fever persistence in the Comoros archipelago” Public Health surveillance and Response in island territories, 11-13 juin 2013, Saint-Denis de La Réunion, France

Cavalerie L, Dommergues L, Chauvet E, Pannequin M, Cêtre-Sossah C, Tillard E, Figuié M, Cardinale E, “RVF surveillance in Mayotte: Tracking an invisible disease from the society point of view”, 2<sup>nd</sup> International Conference on Animal Health Surveillance, 7-9 Mai 2014, Cuba

Dommergues L, Cavalerie L, Pannequin M, Duson A-M, Mérot P, Cêtre-Sossah C, Cardinale E, « SESAM: Animal Health Surveillance in Mayotte from 2012 », 2<sup>nd</sup> International Conference on Animal Health Surveillance, 7-9 Mai 2014, Cuba

Cardinale E, Lepec R, Biarmann M, Cavalerie L, Cêtre-Sossah S, Dommergues L, Faharoudine A, Garcia P, Jaumally MR, Héraud LM, Laurette S, Lasnes L, Licciardi S, Maquart M, Melanie J, Meenowa D, Olive MM,

Rakotoharinome M, Railiniana M, Ravaomanana J, Roger M, Soulé M, Flachet L, « From AnimalRisk-OI, a surveillance network dealing with animal health, to a « One Health » network in the Indian Ocean », 2<sup>nd</sup> International Conference on Animal Health Surveillance, 7-9 Mai 2014, Cuba

Metras R, Cavalerie L, Dommergues L, Keeling M, Cardinale E, Edmunds WJ, « Studying arboviral emergence: the case of Rift Valley fever (RVF) in Mayotte », Wellcome Trust - Bloomsbury Centre for Global Health Research scientific meeting, 10-12 Mars 2015, Harare, Zimbabwe

Cavalerie L, Dommergues L, Mérot P, Rasamoelina H, Cetre-Sossah C, Cardinale E, « Rift Valley fever in ruminants in Mayotte from 2010 to 2013: comparison of passive and active surveillance results and performances », ISVEE 14, 3-7 Novembre 2015, Mérida, Yucatan, Mexique

## Rapports et Vulgarisation

Chauvet, E. (2013). « Enquête sociologique sur les pratiques sanitaires des éleveurs mahorais et les contacts entre élevages ». CIRAD Rapport de MASTER 2 POLITIQUES DE L'ALIMENTATION ET GESTION DES RISQUES SANITAIRES (PAGERS) sous la direction d'Eric Cardinale et Lisa Cavalerie avec la collaboration de Muriel Figuié, 78p

Cavalerie L, Dommergues L, Chauvet, E., and Cardinale, E. (2017). « Connaissances, attitudes et pratiques en santé animale chez les éleveurs de ruminants à Mayotte en 2013-2014 : application à la FVR ». Mayotte, CIRAD, Rapport technique - version provisoire, 34p

Cavalerie L, Dommergues L, Beral M, Foray C, Cardinale E (2013). « Projet complémentaire - SESAM. Fièvre de la Vallée du Rift à Mayotte : Rapport d'activité 2012-2013. Financement Ministère de la Recherche. ». 18p

Cavalerie L, Dommergues L, Beral M, Chauvet E, Cardinale E (2014). « Projet complémentaire – SESAM 2. Fièvre de la Vallée du Rift à Mayotte : Rapport d'activité 2013-2014. Financement Ministère de la Recherche». 18p

Dommergues L, Cavalerie L, Pannequin M, Métras R, Mérot P, Cardinale E (2015). «Rapport SESAM 3. Fièvre de la Vallée du Rift à Mayotte ». 24p

Dommergues L, Pannequin M, Cavalerie L, Cardinale E (2015). « Etude épidémiologique sur le charbon symptomatique à Mayotte (2014) ». 68p

Cardinale E\*, Cavalerie L\*, Dommergues L\*, Mérot P\*, et Pannequin M\*. 2015. *Bulletin épidémiologique SESAM* Janvier 2015. \*Comité de rédaction par ordre alphabétique

Cardinale E\*, Cavalerie L\*, Dommergues L\*, Mérot P\*, et Pannequin M\*. 2015. *Bulletin épidémiologique SESAM* Avril 2015. \*Comité de rédaction par ordre alphabétique

Cardinale E\*, Cavalerie L\*, Dommergues L\*, Mérot P\*, et Pannequin M\*. 2015. *Bulletin épidémiologique SESAM* Novembre 2015. \*Comité de rédaction par ordre alphabétique

Poster « La fièvre de la Vallée du Rift (FVR) » Journées de l'élevage de Mayotte, 12 octobre 2013, Coconi, Mayotte, France

Poster Cavalerie L, « Aide à la décision en santé animale : dynamique épidémiologique et impact de la persistance de la Fièvre de la Vallée du Rift dans l'archipel des Comores » Journée des Formations Doctorales des IPEF, Janvier 2014, Paris, France



## INTRODUCTION

### I. Problématique – Objectifs de la thèse



Photo 1. Locaux du service de l'alimentation à Kawéni (Source : Defernez, Cardinale, et Girard 2010)

Notes sur un entretien lors de la première mission à Mayotte de ce projet de thèse :

« Entretien avec le chef du service de l'alimentation de la Direction de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt (DAAF) de Mayotte. Locaux du service de l'alimentation au bord de la Route Nationale 1 à Kawéni, quartier Nord de Mamoudzou. »

La voiture garée, le regard est attiré par un groupe de zébus qui broute en liberté, derrière le bâtiment, une corde autour du cou dont l'extrémité pend dans les hautes herbes. L'œil de fonctionnaire Mzungu<sup>1</sup> s'attarde sur leurs oreilles sans pouvoir distinguer les boucles d'identification obligatoires orange. À quelques mètres de hauteur, au-dessus des ruminants, des roussettes (*Pteropus seychellensis comorensis*) avec leur quasi-mètre d'envergure se disputent bruyamment dans un arbre. Un escalier en colimaçon et une coursive extérieurs mènent au bureau du chef de service, au premier étage, au-dessus du laboratoire vétérinaire d'analyse départemental. La sueur qui perle sur les avant-bras en montant cet unique étage indique une température de 30°C et un taux d'humidité d'au moins 90 %. La porte du bureau refermée, un air climatisé revigorant sèche et rafraîchit immédiatement les nouveaux entrants.

Présentation du projet de thèse : « Etude des impacts socio-économiques de la fièvre de la Vallée du Rift (FVR) à Mayotte [...], reprise/poursuite de la surveillance, premiers travaux sur la modélisation de la circulation du virus à Mayotte [...] ».

– *Doctorante* : « Grâce à la modélisation, nous souhaiterions à terme évaluer les stratégies d'intervention contre la FVR à Mayotte. Qu'est-ce qui est envisagé à l'heure actuelle ? Une campagne de vaccination pourrait-elle se mettre en place ? »

– *Chef du Service de l'Alimentation* « Aujourd'hui, il est possible que la maladie soit devenue endémique [...]. S'il y a un pic [épidémique] on devra réagir absolument car c'est une zoonose. On va continuer la surveillance des avortements pour pouvoir détecter un éventuel changement de situation épidémiologique. Pour une vaccination dans la situation actuelle, il faudrait que l'on confirme une circulation active du virus pour y réfléchir ».

La FVR ou fièvre de la Vallée du Rift, est une maladie due à un virus qui au cours des seules quinze dernières années a rendu malades des dizaines de milliers de personnes, entraîné des centaines de décès humains et provoqué la mort de plus de 100 000 animaux domestiques (Linthicum et al., 2016). A Mayotte, ce virus a suscité une vive attention des administrations publiques et des scientifiques depuis la découverte d'une dizaine de cas humains en 2007-2008 (Sissoko et al., 2009). Les investigations consécutives à cette découverte ont permis de révéler que le virus avait probablement atteint cette île par la voie maritime des échanges commerciaux depuis la Corne

<sup>1</sup> Mzungu = Européen à la peau blanche en langue mahoraise.

d’Afrique, où une importante épidémie sévissait en 2006-2007 et après des escales dans les autres îles de la Lune<sup>2</sup> (Grande Comore, Mohéli et Anjouan).

Ce virus est inquiétant à plusieurs titres : il est zoonotique avec des conséquences invalidantes pour l’Homme (cécité, troubles neurologiques, etc.) voire fatales dans 1 à 2% des cas. Son cycle de transmission entre les animaux sensibles et l’Homme est complexe et probablement varié. Il repose sur les piqûres de moustiques (le virus a été retrouvé chez plus de 50 espèces d’insectes différentes) mais aussi sur des pratiques à risque autour des animaux malades lors de leur abattage, la manipulation des cadavres, la consommation de lait ou de viande crue, les échanges commerciaux, etc. (Linthicum et al., 2016). Enfin, des épizooties régulières ont entraîné des vagues d’avortements massives dans les cheptels de ruminants et des fermetures de marché, pénalisant doublement les pays d’élevages concernés (Ethiopie, Afrique du Sud, etc.) avec des pertes économiques pouvant atteindre plusieurs centaines de millions d’euros (Peyre et al., 2015). Les changements globaux comme le réchauffement climatique et la globalisation des échanges commerciaux font craindre une extension de la maladie en dehors du continent africain et de la péninsule arabique, qui constituent sa zone actuelle de répartition, vers l’Asie, l’Europe ou l’Amérique (Afssa, 2005; Chevalier et al., 2010; Pepin et al., 2010).

En 2011, la FVR est considérée comme la maladie des ruminants la plus préoccupante en termes de santé publique pour le réseau « AnimalRisk-OI» qui rassemble les acteurs de la santé animale de l’océan Indien (Cardinale et al., 2011). D’après les premières enquêtes de prévalence, elle aurait contaminé un tiers du cheptel comorien et mahorais (Cardinale et al., 2011; Roger et al., 2011). La surveillance programmée<sup>3</sup> en cours, fonctionnant sur la base d’élevages sentinelles, révèle des taux de séroconversion dans les cheptels des îles de l’archipel des Comores inquiétants (Lernout et al., 2013; Roger et al., 2014), alors que la probabilité de « pérennisation » du virus avait été jugée en 2008 « faible » par l’agence française chargée de l’évaluation des risques sanitaires (l’Afssa, l’agence française de sécurité sanitaire des aliments, devenue l’Anses depuis) (Afssa, 2008a). Par ailleurs, aucun cas clinique animal n’a été confirmé dans le cadre de la surveillance événementielle, sans que l’on puisse savoir si cette situation reflète la réalité ou bien un défaut de qualité du système de surveillance. La question de la possibilité ou non d’une persistance et de l’impact de la FVR dans l’écosystème insulaire tropical des Comores après son introduction « accidentelle » est essentielle pour déployer d’éventuels moyens de prévention et de lutte. Enfin, Mayotte, devenue en 2011 le 101<sup>ème</sup> département français, comporte des caractéristiques socio-économiques et culturelles singulières qui doivent évidemment être prises en compte dans l’action publique qui y est conduite. On peut finalement s’interroger sur la perception de la FVR par les premiers touchés : les éleveurs mahorais.

---

<sup>2</sup> Îles de la Lune = archipel des Comores (Lune se *qamar* en Arabe)

<sup>3</sup> Types de surveillance (Dufour, 2007) :

Deux grandes stratégies de surveillance peuvent être envisagées : la surveillance événementielle ou passive (les sources d’information informent la structure chargée de centraliser les informations sans être relancées et l’information est générée par l’observation d’un événement ou cas dans un élevage par le collecteur de données) et la surveillance programmée, planifiée ou encore active (la structure chargée de centraliser les informations recueille directement les informations auprès des sources qui recueillent les données selon une programmation déterminée quant au nombre, à la localisation et à la nature des données collectées).

La surveillance événementielle est en général plus adaptée aux objectifs d’alerte précoce.

Le but de cette thèse a été de fournir à l'autorité administrative gestionnaire du risque et principal financeur de ces travaux, le ministère en charge de l'Agriculture, des éléments d'appréciation de la situation épidémiologique, des actions de surveillance mises en œuvre à Mayotte ainsi que d'initier une approche participative avec les éleveurs permettant de mieux comprendre leur perception de la FVR. Ces éléments pouvant ensuite alimenter une évaluation socio-économique complète des stratégies de gestion envisageables (vaccination et/ou surveillance, etc.) (Cavalerie, 2011).

Les objectifs de cette thèse ont été (1) d'étudier le système de surveillance de la FVR mis en place à Mayotte en 2012-2013 en analysant ses résultats et (2) ses performances pour répondre à la question de la persistance ou non du virus et de l'optimisation de ce dispositif ; (3) de modéliser la probabilité de persistance du virus à partir des connaissances éco-épidémiologiques disponibles ; (4) d'étudier la perception de cette maladie par les éleveurs mahorais à travers un exercice participatif de priorisation de leurs problèmes sanitaires ainsi qu'une approche basée sur des entretiens semi-dirigés et des questionnaires conduits en parallèle avec l'appui d'une stagiaire (cf. Figure 1).

Avant de traiter ces objectifs dans les chapitres I à IV, une présentation de la FVR et de Mayotte d'après la bibliographie est disponible dans les paragraphes II et III ci-après.

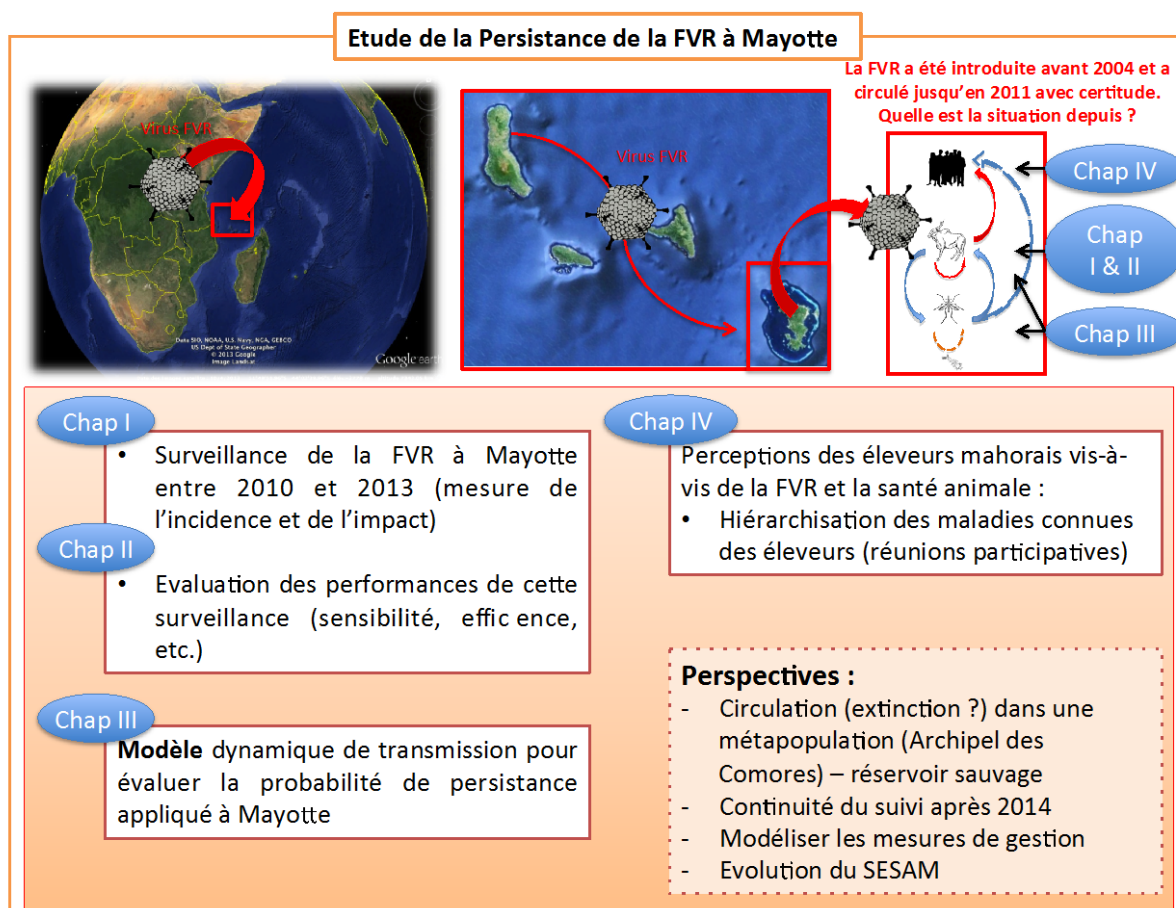


Figure 1. Structure de la thèse (« Chap » = chapitre)



## II. Présentation de la fièvre de la Vallée du Rift

### A. Le virus de la FVR (Etiologie)

La fièvre de la vallée du Rift (FVR) est une maladie due à un arbovirus<sup>4</sup> appartenant au genre *Phlebovirus* et à la famille des *Bunyaviridae*. Les virus de la famille des *Bunyaviridae* sont des virus à ARN simple brin de polarité négative (King et al., 2011). Cette famille comprend plus de 300 virus rassemblés en cinq genres (cf. Figure 2). Les quatre autres genres sont les suivants :

- *Orthobunyavirus* (comprenant notamment les virus La Crosse, Akabane, Schmollenberg),
- *Hantavirus* (en particulier, virus Andes, Puumala, contrairement aux autres genres de la famille, ces virus ne sont pas transmis par des arthropodes, en revanche des rongeurs en sont généralement des réservoirs),
- *Nairovirus* (transmis principalement par des tiques, en particulier virus zoonotique de la Fièvre hémorragique Crimée-Congo),
- *Tospovirus* (uniquement des virus végétaux) (King et al., 2011).

Les virus des genres *Phlebovirus*, *Orthobunyavirus*, et *Nairovirus* sont capables de se répliquer de façon alternative chez certains vertébrés et arthropodes. Chez les vertébrés, ils ont généralement une action cytotytique en ciblant un organe ou un type de cellulaire, cette action cytotytique est en général absente ou peu marquée chez les hôtes invertébrés (King et al., 2011). Le foie est le principal organe-cible de la FVR chez les mammifères qui y sont sensibles (Ikegami and Makino, 2011).

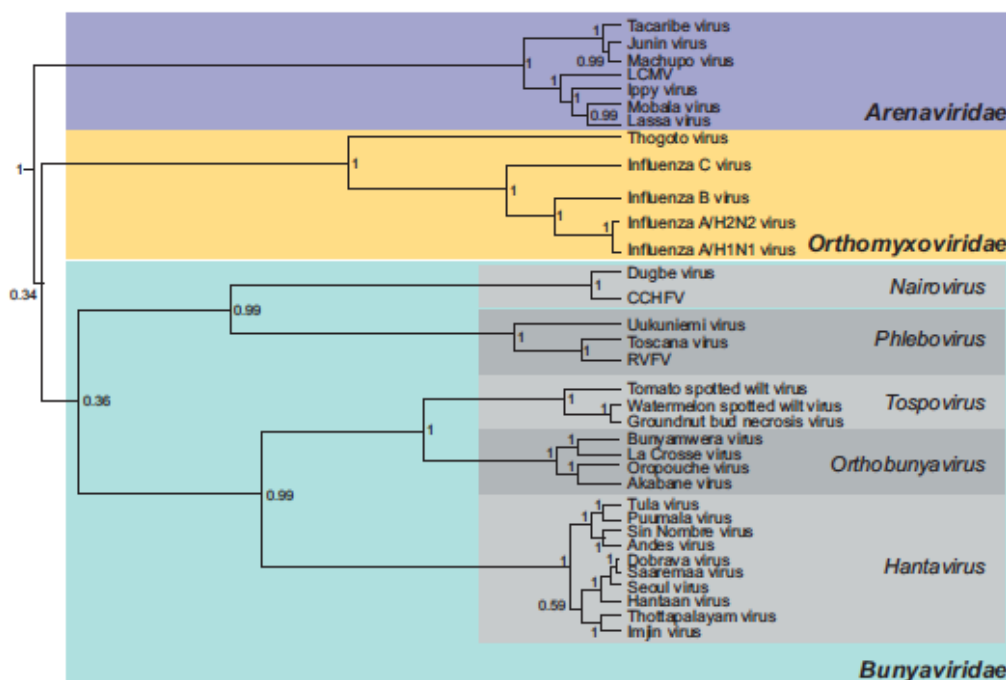


Figure 2. Arbre phylogénétique construit à partir de l'alignement des domaines polymérase du segment L des virus membres de la famille des *Bunyaviridae* et des protéines analogues chez d'autres virus à ARN simple brin à polarité négative (famille des *Arenaviridae* et *Orthomyxoviridae*) (Source : King et al. 2011)

Le virus de la FVR est un virus enveloppé, dont la particule virale est de forme icosaédrique (cf. Figure 3) (Pepin et al., 2010).

<sup>4</sup> Arbovirus = virus transmis par piqûre d'arthropode (contraction de l'anglais *arthropode-borne virus*)

Le génome du virus de la FVR est constitué de trois segments d'ARN polarité négative simple brin : un segment large, noté "L", de 6404 nucléotides, un segment moyen, noté "M" de 3885 nucléotides et petit segment, noté "S" (*small* en anglais) de 1690 nucléotides) (cf. Figure 4) (Lorenzo et al., 2015).

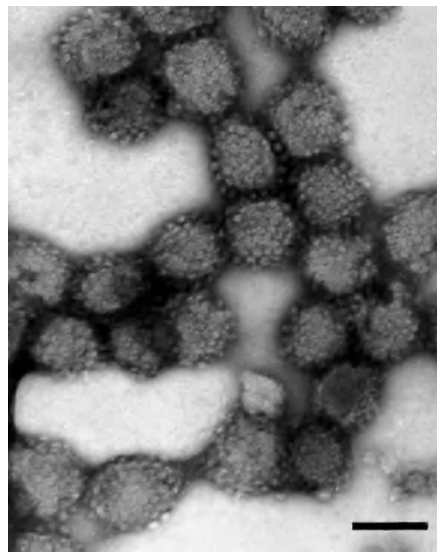


Figure 3. Image par microscopie électronique avec coloration négative de particules virales de FVR. La barre représente 50 nm (Source : King et al. 2011, courtesy of A. Freiburg and R. Flick)

Les segments *L* et *M* sont effectivement de polarité négative et codent respectivement pour la protéine *L* (ARN polymérase ARN-dépendante : *RdRp*) et pour plusieurs polypeptides (deux glycoprotéines de l'enveloppe *G<sub>c</sub>* et *G<sub>n</sub>* et deux protéines non structurales *NS<sub>m</sub>* et *78-kDa*, cette dernière protéine pourrait être structurale dans le cas d'infection de cellules d'insectes). Le segment *S* est lui ambisens, une caractéristique des *Phlebovirus*. Il code pour deux protéines : la protéine virale de la nucléocapside *N* et une protéine non structurale *NS<sub>s</sub>* qui semble être un important facteur de virulence, exprimée très tôt dans l'infection et responsable de la suppression de la réponse immunitaire innée de l'hôte selon plusieurs mécanismes (Bouloy and Weber, 2010; Ikegami and Makino, 2009; Lorenzo et al., 2015; Pepin et al., 2010).

Les particules virales de FVR sont sensibles au pH acide (<6,8) (Pepin et al., 2010). Elles sont inactivées par l'action de détergents et de solutions d'hypochlorite de sodium à 10% (javel) et par la fixation dans du formol (Bird et al., 2009). En revanche, les particules peuvent rester infectieuses pendant plusieurs semaines dans des prélèvements de sérum conservés à 4°C (et 120 minutes à 56°C) et quelques jours dans un environnement riche en protéines, comme des prélèvements d'organes ou dans une carcasse (Bird et al., 2009; Pepin et al., 2010). Les particules pourraient également rester stables sous forme d'aérosols à 23°C et 50-85% d'humidité ou bien congelées à - 80°C (Miller et al., 1963; Afssa, 2008b; OIE, 2017).

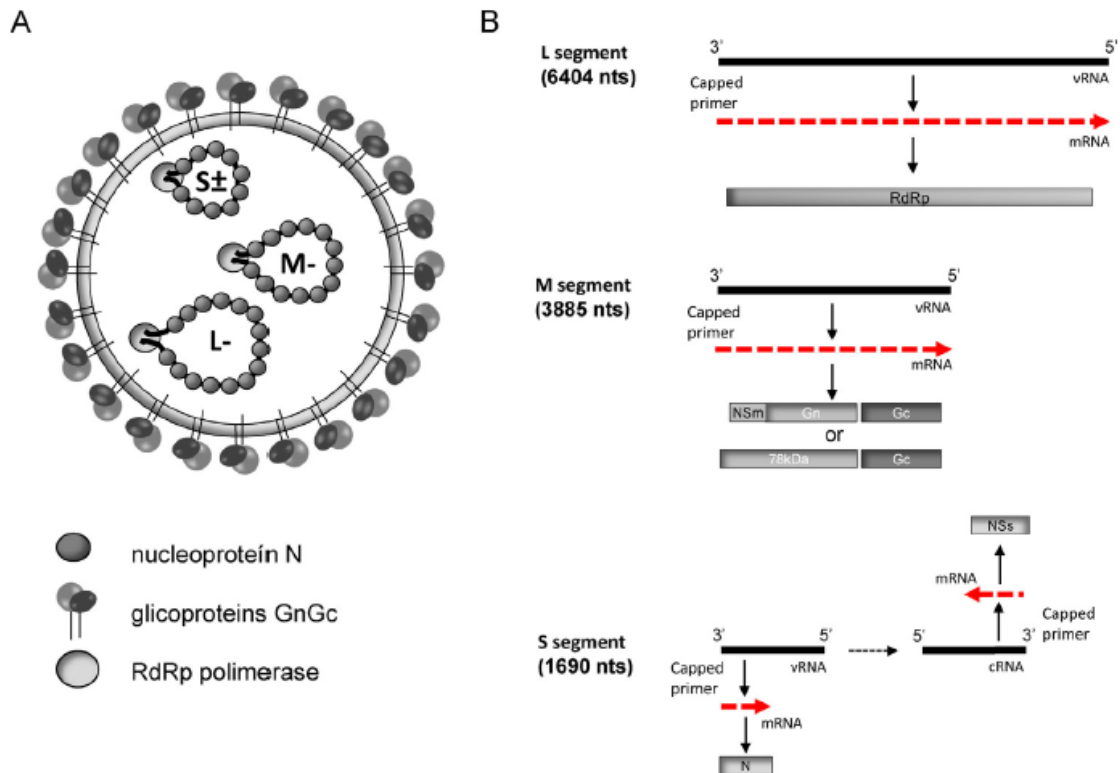


Figure 4. Organisation de la particule virale (A) du virus de la FVR et codage du génome (B) (Lorenzo et al., 2015)

## B. Expression de la maladie (chez les vertébrés)

Le virus de la FVR a été détecté chez l'Homme et de très nombreux mammifères entraînant des réponses physiologiques et manifestations cliniques variables en fonction des espèces (Bird et al., 2009).

### 1. Chez l'Homme

La période d'incubation est d'environ 2 à 6 jours (Bird et al., 2009). Généralement, un syndrome « dengue-like » se développe avec fièvre, maux de tête, douleurs articulaires et musculaires. Ces symptômes disparaissent dans la majorité des cas au bout d'une semaine environ avec une diminution de la virémie liée à la production d'anticorps neutralisants (cf. Figure 5). Certaines infections sont toutefois totalement asymptomatiques.

Chez certains individus cependant, (1 à 2% des cas) des formes plus sévères sont rencontrées avec une progression vers l'un ou une combinaison des trois syndromes suivants :

- oculaire (0,5 à 2% des patients) : des lésions rétiniennees sont observées avec une baisse ou une gêne visuelle qui apparaît une à trois semaines après l'infection et peut persister quelques mois avant généralement une guérison spontanée. Si uniquement ce syndrome se développe chez le patient, le pronostic vital n'est que rarement mis en danger ;
- méningo-encéphalite (moins de 1% des patients) : elle survient en général 1 à 4 semaines après le début des symptômes et peut persister plusieurs semaines. Chez les patients ne présentant que cette forme, les décès sont rares mais des séquelles neurologiques sont fréquentes ;

- fièvre hémorragique (moins de 1% des patients) : son évolution est rapide. Les symptômes surviennent rapidement après le début de la maladie, révélant une atteinte hépatique plus ou moins sévère (ictère consécutif à une nécrose hépatique aigue ou une hépatite) et des saignements divers (hématémèse, sang dans les selles, épistaxis, purpura, ecchymoses, ménorragies, saignement aux points de ponction veineuse, etc.). Ces symptômes sont la manifestation de troubles graves de la coagulation entraînant une anémie sévère et des dysfonctions de plusieurs fonctions vitales dont le système hépatique et rénal. La mort survient alors dans 10 à 20% des cas (Al-Hazmi et al., 2003; Bird et al., 2009; McIntosh et al., 1980; OMS, 2016).

## 2. Chez les mammifères domestiques

La manifestation la plus connue des épidémies de FVR est la survenue de vagues d'avortements (« *abortion storms* »), particulièrement marquées chez les ovins (comme lors de la découverte du virus en 1931 dans une ferme ovine du Kenya (Daubney et al., 1931)) et dans une moindre mesure les caprins et les bovins (Bird et al., 2009). Il existe une différence importante de sensibilité en fonction de l'âge des animaux et des espèces. Les taux de létalité les plus importants sont enregistrés sur les jeunes animaux et les petits ruminants (Pepin et al., 2010). Les races indigènes des zones tropicales et subtropicales semblent moins sensibles (Davies and Martin, 2003).

Chez les ovins de moins d'un mois, les taux de létalité peuvent ainsi atteindre 90-100% (Bird et al., 2009; Daubney et al., 1931). Après une période d'incubation rapide (12-24h), avec une fièvre marquée (41-42°C), la mort survient généralement au bout de 24-72h (Bird et al., 2009). Les taux de mortalité chez les adultes sont plus faibles (10-30%) et le temps d'incubation un peu plus long (24-72h) (Bird et al., 2009; Daubney et al., 1931). Le taux d'avortement peut atteindre 90-100%. D'autres signes généraux sont également présents : hyperthermie, hématémèse, perte d'appétit, jetage, diarrhée parfois hémorragique ou ictère. A l'autopsie, on trouve généralement un foie nécrosé, une splénomégalie et des hémorragies gastro-intestinales.

Le taux de létalité chez les veaux et les bovins adultes est plus faible que chez les ovins (10 à 70% et 5-10% respectivement), mais la maladie se développe de la même façon. Une importante diminution de la production laitière peut également être notée. Les avortements sont également fréquents et peuvent être le seul signe détectable. Ils peuvent survenir jusqu'à cinq semaines après la phase virémique (Ristic and McIntyre, 2013).

La maladie a été moins fréquemment décrite chez les chèvres. Elles sont sensibles à la FVR (Bird et al., 2009; Chevalier et al., 2005), mais la létalité semble moins importante que chez les ovins. En Mauritanie par exemple, en 1998, un taux de mortalité périnatale de plus de 47% avait été observé chez des chèvres (n= 223 avortements pour 471 femelles) (Nabeth et al., 2001).

Les dromadaires développent des anticorps contre la FVR : par exemple au Kenya en 1961-62 (Scott et al., 1963) ou en Mauritanie en 1998 (Nabeth et al., 2001). La détection du virus a aussi eu lieu chez cet hôte, notamment en Mauritanie en 2010 (Bird et al., 2009; El Mamy et al., 2011). Des descriptions de taux d'avortements (El Mamy et al., 2011; OIE, 2016a) et de mortalité importants ont parfois été faites (El Mamy et al., 2011; Meegan, 1979) alors que d'autres études ont plutôt conclu à une infection asymptomatique (Olive et al., 2012).

Les données sur les chevaux et les ânes sont rares. Même si des anticorps ont été détectés chez des chevaux (Olaleye et al., 1996), leur rôle épidémiologique et leur sensibilité semble limitée (Bird et al., 2009).

L'infection naturelle chez les carnivores domestiques (chien, chat, furet) est peu documentée, en revanche des infections expérimentales ont été conduites mettant en évidence leur sensibilité, avec une expression clinique pouvant conduire à la mort (Bird et al., 2009; Ikegami and Makino, 2011). Les lapins et les cochons ne semblent pas développer de signes cliniques (Ikegami and Makino, 2011).

### 3. Dans la faune sauvage

Des enquêtes sérologiques ont mis en évidence la présence d'anticorps contre le virus de la FVR chez un grand nombre d'espèces de mammifères sauvages présents en Afrique : buffle, éléphant, phacochère, rhinocéros, zèbre, gazelle, impala, kudu, lion, guépard, lycaon, chacal, etc. (Caron et al., 2013; Evans et al., 2008; House et al., 1996). Cependant l'expression clinique chez ces espèces reste mal connue (Bird et al., 2009). Des buffles (*Syncercus caffer*) ont fait l'objet d'infections expérimentales par le virus de la FVR. Un avortement fut observé, dans une de ces expériences, chez l'une des deux femelles inoculées, le foie de l'avorton présentait une nécrose caractéristique de l'infection par la FVR et le virus a pu y être isolé (Davies and Karstad, 1981). Une seconde étude chez le buffle a également mis en évidence des virémies importantes, similaires à celle chez les bovins (Bird et al., 2009; Davies and Karstad, 1981). Le virus a aussi été isolé chez des chiroptères (Bird et al., 2009; Boiro et al., 1987; Olive et al., 2012) mais des infections expérimentales chez deux espèces (*Miniopterus schreibersii* et *Eptesicus capensis*) n'ont pas montré d'expression malgré l'excrétion du virus (Oelofsen and Van der Ryst, 1999).

La circulation du virus chez plusieurs espèces de rongeurs sauvages a été démontrée, avec la mise en évidence expérimentale de taux de létalité et de virémie marqués chez certains (Olive et al., 2012). Certaines lignées de rongeurs de laboratoire (rats, souris, hamster) sont sensibles au virus de la FVR et développent rapidement des hépatites et des encéphalites pouvant entraîner leur mort (Ayari-Fakhfakh et al., 2012; Flick and Bouloy, 2005).

Le virus de la FVR n'a jamais été isolé chez des primates sauvages -Ordre des *primata*- (Olive et al., 2012). L'infection expérimentale de macaques rhésus (*Macaca mulatta*) a démontré une évolution semblable à l'infection chez l'Homme (Flick and Bouloy, 2005).

Les oiseaux se sont révélés réfractaires lors de plusieurs tentatives d'infections expérimentales (Olive et al., 2012).

## C. Diagnostic

### 1. Diagnostic clinique et diagnostic différentiel

Chez l'Homme, les premiers symptômes sont peu spécifiques, surtout en cas de syndrome *dengue-like* dans la forme bénigne. Il est difficile de distinguer la FVR des autres fièvres hémorragiques virales et des nombreuses autres maladies qui provoquent de la fièvre, notamment le paludisme, la shigellose, la fièvre typhoïde, la fièvre jaune et éventuellement le chikungunya en fonction de l'historique du patient. La FVR peut aussi être confondue avec une méningite (OMS, 2016).

Chez les ruminants domestiques, les épizooties de FVR sont généralement caractérisées par des vagues d'avortements. Le diagnostic différentiel des avortements comprend un large panel de maladies en fonction de la zone géographique et du type de production (fièvre Q, chlamydie, salmonellose, listériose, toxoplasmose, fièvre catarrhale ovine, maladie de Wesselsbron, entérototoxicité, fièvre éphémère bovine, brucellose, vibriose, trichomonose, maladie du mouton de Nairobi, cowdriose, intoxication, septicémie, peste des petits ruminants, anthrax, maladie de Schmollenberg, etc.) (OIE, 2016a; Pepin et al., 2010).

Chez l'Homme comme chez l'animal, le contexte épidémiologique peut également orienter vers un diagnostic de la FVR mais en raison des symptômes non spécifiques, un diagnostic de laboratoire reste impératif.

## 2. Diagnostic de laboratoire

### a. Généralités

La détection d'une infection par le virus de la FVR peut reposer sur la combinaison de plusieurs méthodes : les méthodes directes de détection du génome viral ou les méthodes indirectes permettant la détection d'anticorps dirigés contre le virus de la FVR. La confirmation de la présence du virus de la FVR doit se faire par l'isolement du virus après inoculation sur hamster, souris ou sur culture cellulaire (Bird et al., 2009; Pepin et al., 2010). Ces techniques sont détaillées dans le manuel des tests de diagnostic et des vaccins pour les animaux terrestres de l'OIE (Organisation mondiale de la santé animale) (OIE, 2008).

Actuellement, deux laboratoires ont été désignés comme laboratoires de référence par l'OIE : l'unité des stratégies antivirales, département de virologie, Institut Pasteur à Paris et le laboratoire de virologie de l'Onderstepoort Veterinary Institute à Onderstepoort en Afrique du Sud<sup>5</sup>. En France, pendant notre période d'étude, on comptait deux laboratoires nationaux de référence reconnus par le ministère en charge de l'agriculture (l'un à l'Anses, à Lyon, pour le diagnostic sérologique et l'autre, au Cirad, à Montpellier, pour le diagnostic virologique)<sup>6</sup>. Dans un avenir proche, il est prévu que ces activités soient rassemblées au Cirad. Le ministère en charge de la santé a désigné, pour le volet humain, l'équipe résidente de recherche d'infectiologie tropicale (ERRIT) à l'institut de recherche biologique des armées (IRBA) (Hôpital d'instruction des armées Laveran, Marseille) comme laboratoire coordonnateur du centre national de référence (CNR) des arbovirus, depuis 2012. Il existe deux laboratoires associés : le laboratoire de virologie à l'Institut Pasteur de Guyane (Cayenne, Guyane) et le laboratoire de microbiologie du centre hospitalier universitaire Félix Guyon (Saint-Denis, La Réunion)<sup>7</sup>.

---

<sup>5</sup> <http://www.oie.int/fr/notre-expertise-scientifique/laboratoires-de-referance/liste-de-laboratoires/> (consulté le 14/05/2017)

<sup>6</sup> Arrêté du 29 décembre 2009 désignant les laboratoires nationaux de référence dans le domaine de la santé publique vétérinaire et phytosanitaire

<sup>7</sup> Arrêté du 7 mars 2017 fixant la liste des centres nationaux de référence, des centres nationaux de référence-laboratoires associés et des centres nationaux de référence-laboratoires experts pour la lutte contre les maladies transmissibles

et Arrêté du 24 juillet 2014 fixant la liste des centres nationaux de référence pour la lutte contre les maladies transmissibles et des laboratoires associés

### b. Méthodes de détection directes

La détection du génome viral se fait classiquement par des techniques de RT-PCR (transcription inverse et amplification en chaîne par polymérase ou *reverse transcription polymerase chain reaction* en anglais) de type conventionnelle ou de type quantitative en temps réel. La RT-PCR peut être réalisée à partir de prélèvements de sang, d'organes sur les animaux morts ou les avortons (foie, rate, encéphale, etc.) (Bird et al., 2009; Drosten et al., 2002). La méthode de RT-PCR quantitative est très sensible, pouvant détecter le virus très précocement au cours de l'infection, à partir de 5-10 copies d'ARN/échantillon (Bird et al., 2009). Le recours à cette méthode est cependant limité par la durée courte de la virémie qui varie de quelques heures à une semaine environ (cf. Figure 5). Les échantillons détectés positifs par RT-PCR peuvent ensuite faire l'objet d'un séquençage permettant de confirmer le résultat positif mais aussi de comparer l'échantillon aux autres souches déjà séquencées par le passé par une approche phylogéographique. Une analyse histologique avec un immuno-marquage peut également être faite sur des prélèvements d'organes (en particulier le foie). Pour ce faire, les prélèvements peuvent être fixés sur le terrain dans du formaldéhyde, ce qui facilite leur transport sans respecter obligatoirement la chaîne du froid (OIE, 2016a). Des techniques de détection directe d'antigène viral par la technique ELISA (*enzyme-linked immunosorbent assay* en anglais ou dosage d'immuno-absorption par enzyme liée) ont aussi été développées mais leur usage reste limité et expérimental (Afssa, 2008b; Pepin et al., 2010).

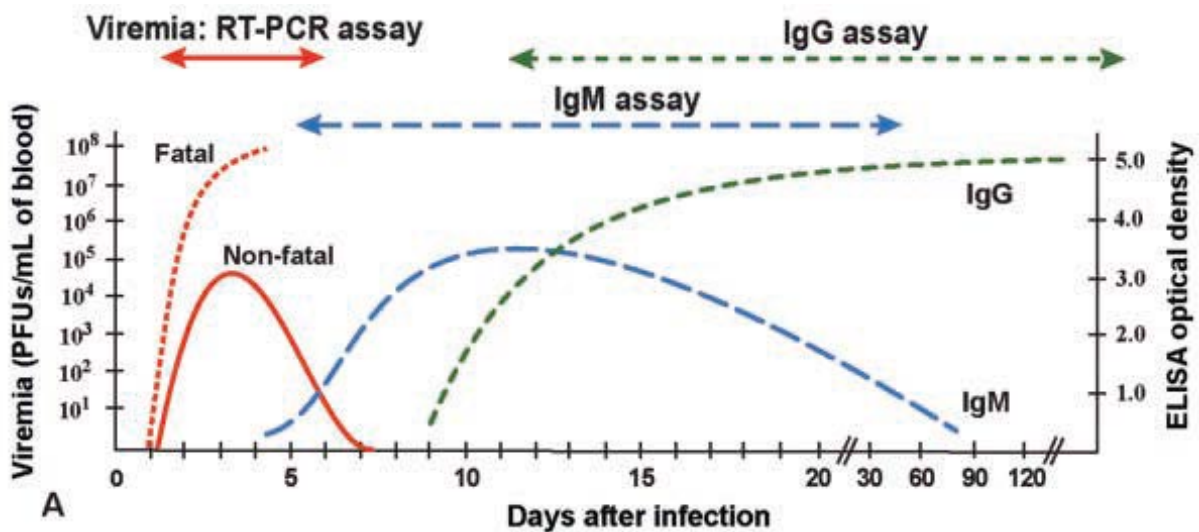


Figure 5. Evolution schématique de la virémie et de la réponse en anticorps chez les ruminants en réponse à une infection par le virus de la FVR. Le graphique indique la fenêtre temporelle optimale d'utilisation des méthodes de détection directe (RT-PCR) et indirectes (recherche d'IgM et IgG) en fonction du délai entre le début de l'infection et le prélèvement. L'abscisse indique le nombre de jours après l'infection, en ordonnées sont représentées : à gauche la virémie et à droite, la densité optique mesurée par l'ELISA donnant une indication sur la quantité d'anticorps présents (IgM ou IgG) (Bird et al., 2009)

### c. Méthode de détection indirectes

Les méthodes de détection indirectes permettent de détecter les anticorps dirigés contre le virus de la FVR produits par le système immunitaire des animaux infectés en réponse à l'infection. Ces méthodes s'appliquent à des échantillons de sérum. Deux méthodes sont utilisées : les ELISA et la séroneutralisation qui détecte spécifiquement les anticorps neutralisants. Une des limites de ces

méthodes indirectes est l'impossibilité de différencier une immunité acquise naturellement d'une immunité de type vaccinal.

Plusieurs kits commerciaux ELISA sont disponibles (cf. Tableau 1) et ont été testés chez plusieurs espèces essentiellement domestiques : des bovins, ovins et caprins (Cêtre-Sossah et al., 2009; Fafetine et al., 2007; Jansen van Vuren et al., 2007; Kortekaas et al., 2013; OIE, 2016a; Paweska et al., 2003, 2005, 2008; van Vuren and Paweska, 2010; Williams et al., 2011). Plusieurs études comparant leurs performances dans différents contextes ont été réalisées (Kortekaas et al., 2013; van Vuren and Paweska, 2010). La sensibilité (au moins 90%) et surtout la spécificité (au moins 95%) de ces tests est globalement très bonne (Comtet, 2010; Kortekaas et al., 2013; Pépin et al., 2010). Certains kits ELISA dits « ELISA de capture » détectent spécifiquement la présence d'immunoglobulines (Ig) de type M (IgM) et permettent la différenciation entre une infection récente et ancienne, puisque les IgM sont présents de façon transitoire et précoce (cf. Figure 5) : de 4 jours jusqu'à environ 60 à 90 jours après le début de l'infection (Bird et al., 2009; Morvan et al., 1992a). Les anticorps de type IgG (Immunoglobuline de type G) sont détectables pour la majorité d'entre eux par des kits ELISA dits de compétition qui sont valables quelle que soit l'espèce testée. Ces anticorps sont supposés persister à vie chez les animaux qui ont été infectés (Bird et al., 2009; Pepin et al., 2010). Les principaux avantages des méthodes sérologiques sur les méthodes de détection directe sont leur moindre coût et la fenêtre temporelle de détection plus large, les rendant particulièrement indiquées pour la démonstration du statut indemne d'une région.



**Tableau 1. Principaux tests ELISA développés et performances associées (<sup>#</sup> détection des IgM théoriquement possible mais pas encore été validée ; en fonction des données disponibles dans la littérature, la sensibilité et la spécificité sont exprimées soit en fonction des valeurs minimales-maximales observés -min<sub>obs</sub> et max<sub>obs</sub>- soit en fonction de l'évaluation de l'intervalle de confiance à 95% : IC<sub>95%</sub>)**

Fournisseur	Type ELISA	Caractéristiques générales	Performances de diagnostic		
			Sensibilité	Spécificité	Source
ARC-OVI (Onderstepoort, South Africa)	Capture IgM	Tests validés mais non encore commercialisés	100,0% IC <sub>95%</sub> [98,0 ; 100,0]	99,8% IC <sub>95%</sub> [98,8 ; 100,0]	(Williams et al., 2011)
	double-antigen ELISA (IgG + IgM)		98,4% IC <sub>95%</sub> [95,8 ; 99,6]	100% IC <sub>95%</sub> [98,7 ; 100,0]	(Ellis et al., 2014)
BDSL (Ayrshire, Scotland, UK) (activité interrompue depuis le 31/12/2014)	IgG competition # (Rift Valley Fever Inhibition ELISA for all species)	Durée de mise en oeuvre: environ 24h Prix indicatif : 2000 €/ 1000 réactions	Bovin : 96,3% IC <sub>95%</sub> [89,7 ; 99,2]* Caprin : 100,0% IC <sub>95%</sub> [99,0 ; 100,0]* Ovin : 99,1% IC <sub>95%</sub> [94,8 ; 100,0]*	Bovin : 99,7% IC <sub>95%</sub> [99,0 ; 99,9]* Caprin : 99,9% IC <sub>95%</sub> [99,5 ; 100,0]* Ovin : 99,1% IC <sub>95%</sub> [98,4 ; 99,6]*	(Paweska et al., 2003)
	Capture IgM (Rift Valley Fever IgM Detection by ELISA in Bovines, Sheep and Goats)	Pas approprié pour les camélidés Durée de mise en oeuvre : environ 24h Prix indicatif : 2750 € / 1000 échantillons	Bovin: NC Ovin: 100% chez 8 moutons testés 5 à 42 jours après une infection expérimentale Caprin: NC	Bovin: 99,2% IC <sub>95%</sub> [98,4 ; 99,7]* Ovin: 99,4% IC <sub>95%</sub> [98,8 ; 99,8]* Caprin: 97,4% IC <sub>95%</sub> [96,2 ; 98,2]*	(Paweska et al., 2003)
ID-VET (Montpellier, France)	Compétition # (cELISA) (ID Screen ®)	Toutes espèces Composants prêts à l'emploi Test rapide : résultats en 90 minutes Prix indicatif : 2500 €/ 1000 réactions	100% IC <sub>95%</sub> [91,24 ; 100]	100% IC <sub>95%</sub> [99,54 ; 100]	(Comtet, 2010)
	IgM capture (ID Screen ®)	Sérum et plasma de bovins, ovins et caprins Composants prêts à l'emploi Test rapide : de l'ordre de 2 heures Prix indicatif : 525 €/ 192 réactions	100% IC <sub>95%</sub> [92,9 ; 100,0]*	98% IC <sub>95%</sub> [89,5 ; 99,7]*	(Monaco et al., 2015)
INGENASA (Madrid, Spain)	Compétition (INgezim FVR COMPAC R.13.FVR.K3)	Sérum de toute espèce atteinte de FVR	97% IC <sub>95%</sub> [83,3 ; 99,9]*	100% IC <sub>95%</sub> [99,8 ; 100,0]*	(INGENASA, 2017a)
	IgM capture (INgezim FVR IgM R.13.FVR.K2)	Ruminants	95,7% IC <sub>95%</sub> [78,1-99,9]*	99,3% IC <sub>95%</sub> [98,8 ; 99,7]*	(INGENASA, 2017b)

\* <http://epitools.ausvet.com.au/content.php?page=CIPProportion>

NC : Non communiqué

La technique de séroneutralisation permet la mise en évidence d'anticorps de type neutralisants, qui persistent toute la vie de l'animal. C'est la plus spécifique des méthodes de détection indirectes mais elle requiert plus de temps que les tests ELISA (5-7 jours) et nécessite une manipulation en laboratoire de confinement de haute sécurité de niveau 3 (BSL-3 *Biosafety Level 3*) puisqu'elle nécessite d'utiliser du virus vivant, ce qui la rend plus difficile à mettre en œuvre (OIE, 2016a; Pepin et al., 2010).

#### D. Distribution spatio-temporelle du virus

Depuis sa description en 1930 au Kenya, le virus de la FVR a été détecté dans plus de 30 pays situés en Afrique et au Moyen-Orient et dans des écosystèmes différents (cf. Figure 6) : zones arides (Nord du Sénégal, Yémen), zones irriguées (barrage d'Assouan, vallée du fleuve Sénégal), forêts humides (Ouganda, République centrafricaine), savanes sèches (Afrique du Sud), *dambos* (zones humides « bas-fond » au Kenya), îles tropicales (Union des Comores, Madagascar) (Bird et al., 2009; Linthicum et al., 2016).

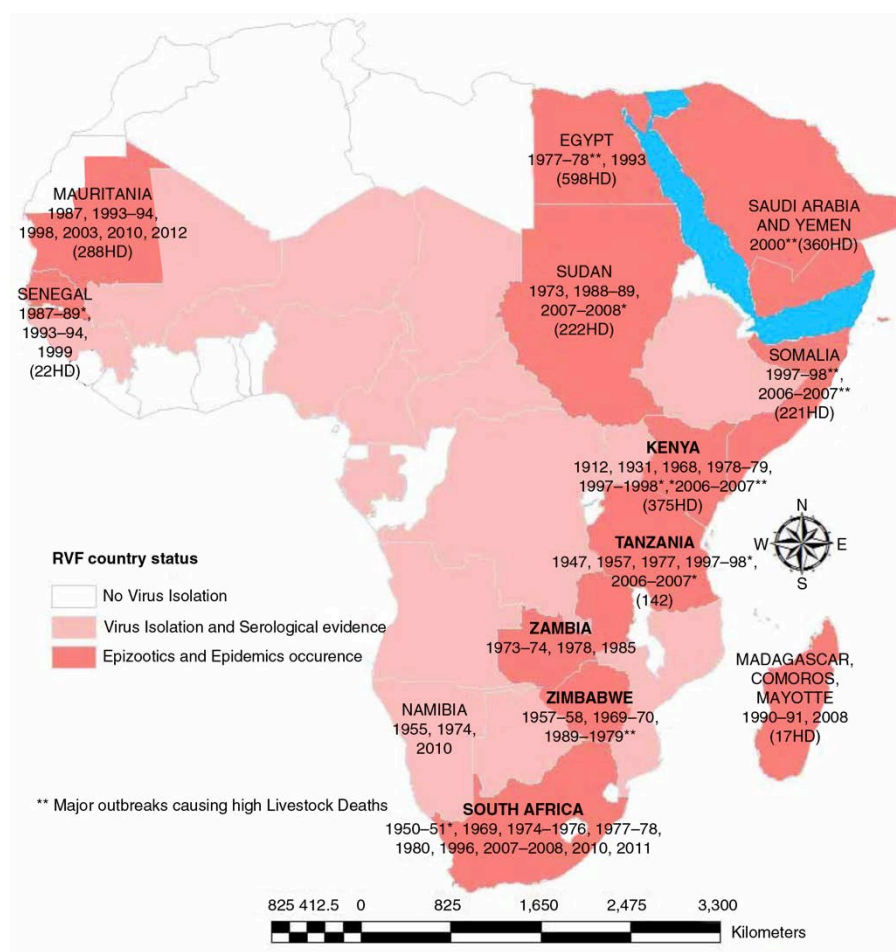


Figure 6. Distribution de la FVR et des principales épidémies/épizooties. En blanc : les pays où le virus n'a jamais été isolé ; en rose : les pays où soit le virus a été isolé, soit des traces sérologiques ont été mises en évidence ; en rouge : les pays ayant subi des épizooties et épidémies notables (Source : (Nanyingi et al., 2015))

## 1. La découverte du Virus au Kenya en 1930

La fièvre de la vallée du Rift a été identifiée pour la première fois en 1930, lors d'une enquête réalisée suite à des avortements et des mortalités anormales chez des moutons dans une grande ferme coloniale, près du lac Naivasha, dans la vallée du Rift, au Kenya (Daubney et al., 1931), mais le virus circulait déjà probablement avant cette date (Gerdes, 2004). Des hépatites enzootiques compatibles avec la future description de la FVR avaient par exemple été notées dès 1912 au Kenya (Nanyingi et al., 2015). Lors de la première description de la maladie en 1930, plus de 3500 agneaux et 1200 brebis sont morts en quelques semaines. Les quatre employés du laboratoire ayant pratiqué les analyses ont contracté le virus ainsi que la majorité des personnes en contact avec le troupeau ovin. Au total plus de 200 cas humains ont été enregistrés lors de cet épisode, sans mortalité (Daubney et al., 1931).

## 2. Principales épidémies et épizooties

Après sa découverte au Kenya en 1930, le virus a été identifié comme étant la cause inattendue d'une épizootie sévère en Afrique du Sud survenue en 1951 et qui a entraîné la mort d'environ 100 000 ovins et provoqué près de 500 000 avortement chez des brebis (Bird et al., 2009).

En 1977, c'est en Egypte que le virus a entraîné la plus grande épidémie enregistrée, alors que la FVR n'avait jamais été observée au nord du Sahara. Le virus a été probablement introduit par le commerce de bétail vivant depuis le Soudan, le long du Nil. Le nombre de cas humains s'est élevé à 200 000 et près de 600 personnes sont mortes de l'infection par le virus de la FVR (Meegan, 1979).

En 1987, une épidémie de FVR est détectée entraînant la mort de plusieurs centaines de personnes, dans la basse et la moyenne vallée du fleuve Sénégal, nouvellement irriguées par la mise en fonction du barrage de Diama et alors que la circulation du virus était très fortement suspectée depuis plusieurs années déjà en Afrique de l'Ouest (Ksiazek et al., 1989; Lancelot et al., 1989; Saluzzo et al., 1987).

En avril 1990, une vague d'avortements a été rapportée sur la côte Est de Madagascar et attribuée à la FVR. La séroprévalence (test IgM) dans la zone a été étudiée *a posteriori* et s'élevait à 30% chez les animaux et 5% chez les éleveurs. Quinze cas humains suspects ont fait l'objet d'investigations et cinq ont pu être confirmés, l'un d'eux est décédé (Morvan et al., 1991a, 1991b). Entre février et avril de l'année suivante, des avortements dus à la FVR et des cas humains (1 mort confirmé) étaient détectés cette fois-ci dans la zone centrale des hauts-plateaux (Morvan et al., 1992c, 1992b).

En 1997-1998, suite à un épisode chaud de l'ENSO<sup>8</sup> (El niño) ayant entraîné de fortes inondations en Afrique de l'Est, des milliers de têtes de bétails et environ 500 personnes sont mortes de la FVR au Kenya, en Somalie et en Tanzanie (Linthicum et al., 1999; Nanyingi et al., 2015).

---

<sup>8</sup> l'ENSO (El Niño- Southern Oscillation) est un phénomène climatique, principale cause des variabilités climatiques interannuelles. Un phénomène chaud, « El Niño » (par opposition à « la Niña ») se caractérise par des températures anormalement élevées de l'eau dans la partie Est de l'océan Pacifique Sud et est associé notamment à des précipitations abondantes en Afrique de l'Est ainsi qu'une sécheresse en Afrique du Sud.

En 2000, la FVR est détectée pour la première fois en dehors du continent africain : en Arabie Saoudite et au Yemen. Plus de 1500 cas humains et près de 200 morts sont enregistrés (OMS, 2016).

Depuis l'an 2000, le recensement des épidémies s'est intensifié, notamment: en Egypte (2003, 27 décès), en Afrique de l'Est (2006-2007, près de 400 décès), au Soudan (2007-2008, 230 décès), à Madagascar (2008, 19 décès, 2008-2009, 7 décès), en Afrique du Sud (2010, 26 décès), en Mauritanie (2010, 13 morts, 2012, 18 morts) et au Niger (2016, 28 morts) (OMS, 2016).

### 3. Circulation enzootique

Ce virus se démarque par ses épisodes épidémiques ou épizootiques marquants mais une circulation à bas bruit, inter-épidémique ou enzootique est aussi attestée (Madagascar (Gray et al., 2015; Nicolas et al., 2014a), Mozambique (Fafetine et al., 2013), Ouganda (Magona et al., 2013), Sénégal (Chevalier et al., 2009), Tanzanie (Sumaye et al., 2013), etc.). Cependant les ressources limitées en matière de surveillance des pays concernés ne permettent pas toujours d'affirmer l'absence de cas cliniques ou, le cas échéant, de circulation inter-épidémique.

### 4. Apport de la phylogénie pour expliquer la diffusion du virus

Les récentes études basées sur la phylogénie permettent d'étudier les scénarios les plus probables de la diffusion du virus à travers le continent africain en comparant les souches virales déjà isolées. Ces études ont révélé une grande mobilité du virus (Bird et al., 2007a; Carroll et al., 2011; Samy et al., 2017). Le virus ayant provoqué l'épidémie en Arabie saoudite et au Yemen en 2000 est ainsi très clairement lié au virus ayant causé l'épidémie de 1997-1998 en Afrique de l'Est, démontrant ainsi l'export du virus sur de grandes distances. Le virus aurait aussi été introduit au moins trois fois à Madagascar depuis le continent africain, une fois avant sa première découverte sur l'île en 1979 (Mathiot et al., 1984), une fois avant l'épidémie de 1990-91 puis à nouveau avant celle de 2008-2009 (Carroll et al., 2011; Samy et al., 2017). Selon Bird *et al.*, le plus vieux ancêtre commun de toutes les souches virales étudiées aurait pu exister à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, ce qui coïncide avec le moment où les premières évocations d'hépatites enzootiques chez les ovins sont rapportées au Kenya alors qu'une nouvelle niche écologique se développe avec l'importation massive de bétail européen propice à l'émergence d'une nouvelle maladie (Bird et al., 2007a).

### E. Cycle de transmission du virus de la FVR

Le cycle de transmission de la FVR est à l'image de son expression clinique et spatio-temporelle : polymorphe et complexe (Bird et al., 2009). Trois voies de transmission du virus sont considérées (cf. Figure 7): directe, indirecte (vectorielle) et verticale, avec une variation du poids relatif de ces voies en fonction de multiples facteurs éco-épidémiologiques comme l'abondance des différentes espèces de mammifères sensibles et d'invertébrés compétents, le climat, etc. (Pepin et al., 2010).

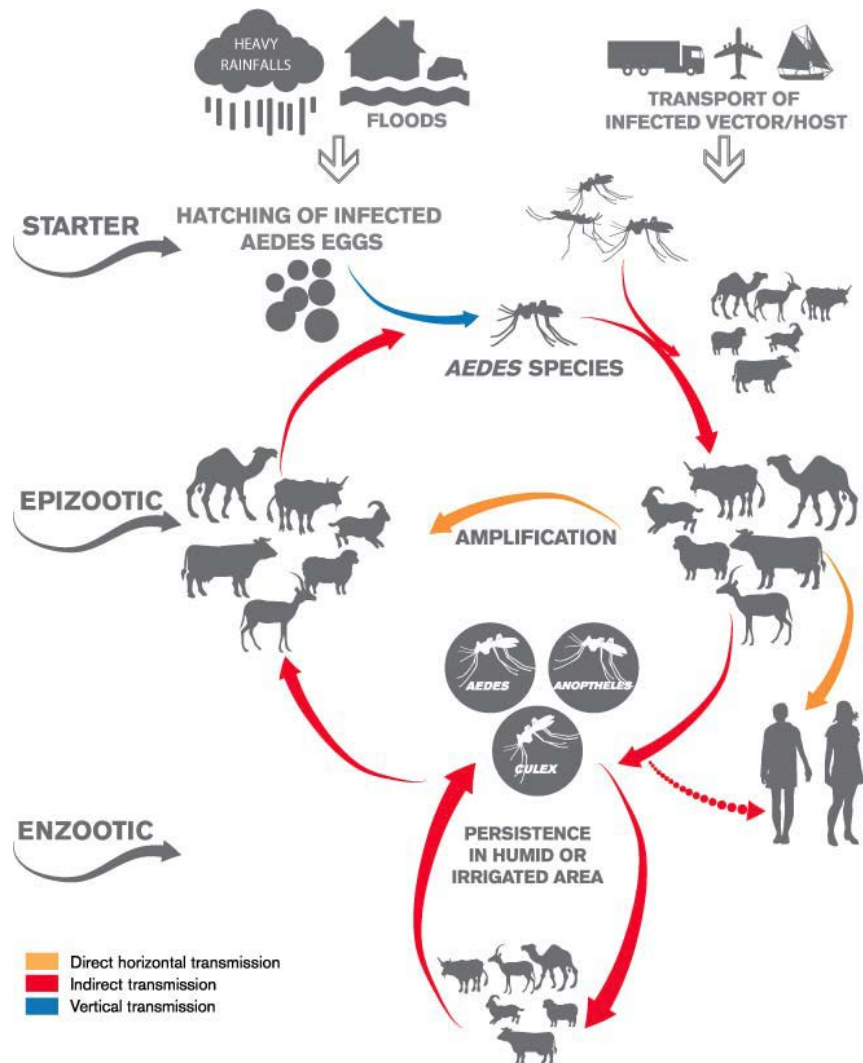


Figure 7. Cycle de transmission de la FVR (Source : (FAO, 2012)). En situation d'endémie, la transmission est assurée entre les hôtes sensibles par un des vecteurs compétents (*Aedes*, *Anopheles*, *Culex*, etc.). Les situations épidémiques sont déclenchées soit par des phénomènes climatiques ou anthropiques permettant la prolifération exceptionnelle de vecteurs (les vecteurs les plus précoces à se développer sont ceux du genre *Aedes*, suivi des *Culex* et *Anopheles* ; les *Aedes* seraient capables de transmettre verticalement le virus à leur progéniture, permettant la persistance du virus pendant les périodes sèches) soit par l'introduction du virus dans une population naïve (généralement par le commerce de bétail). En situation épidémique, une transmission directe à partir d'animaux hautement virémiques renforce la circulation du virus.

## 1. La transmission directe horizontale

Plusieurs modes de contamination directe entre vertébrés sont possibles :

- le contact avec des tissus ou fluides issus d'animaux infectés par l'intermédiaire de micro-érosions de la peau. Les avortons, le placenta, le sang contiennent effectivement fréquemment des quantités importantes de particules virales capables de contaminer des animaux ou des humains par contact. Le virus peut d'ailleurs survivre quelques jours dans ces tissus et infecter aussi bien les autres animaux du troupeau venant au contact d'un avorton que l'éleveur ou le vétérinaire qui voudrait l'éliminer sans équipement de protection individuel (Pepin et al., 2010) ;
- l'inhalation de particules virales (ou « aérosol »): c'est un mode de contamination qui a été décrit notamment pour des personnes travaillant à l'abattoir ou en laboratoire (Chambers

and Swanepoel, 1980; Pepin et al., 2010), mais il est considéré comme exceptionnel chez le bétail (Dubroca, 2001) ;

- l'ingestion par l'Homme de lait voire de viande crue infectés (OIE; OMS, 2016). Cette voie est souvent évoquée mais n'a jamais été démontrée: expérimentalement, l'infection d'agneaux avec du lait contaminé a par exemple échoué (Daubney et al., 1931). En revanche, la présence du virus de la FVR dans le lait a été démontrée expérimentalement pendant la courte phase de virémie des animaux (Pepin et al., 2010).

À ce jour, l'excrétion de virus de FVR dans les sécrétions nasales et lacrymales a été suggérée mais non démontrée, celle dans les urines ou les fèces n'a pas été démontrée en dehors de la présence abondante de sang dans ceux-ci (Pepin et al., 2010).

La transmission directe horizontale est à présent considérée comme le mode d'infection classiquement responsable de l'infection chez l'Homme (Bird et al., 2009; Pepin et al., 2010). C'est probablement ainsi que les techniciens de laboratoire ont tous contracté la maladie lors des premiers travaux sur le virus de la FVR en 1930, alors que la virulence et les voies de transmission de la maladie chez l'Homme n'étaient pas encore connues (cf. §II.D.1) (Daubney et al., 1931). D'autres événements similaires ont été ensuite rapportés, dont un épisode notable, en Afrique du Sud en 2008 avec une épidémie dans une école vétérinaire suite à une autopsie sur des animaux qui se sont révélés être infectés par la FVR (Archer et al., 2011; Bird et al., 2009; Pepin et al., 2010).

## 2. La transmission vectorielle

Une transmission indirecte et l'implication de vecteurs<sup>9</sup> tels que des moustiques a été suspectée dès la première description de la maladie dans l'élevage de moutons atteint en 1930 au Kenya (Daubney et al., 1931), à partir de deux observations principales : premièrement, la survenue de nouveaux cas s'est arrêtée rapidement lorsque les animaux survivants ont été déplacés en altitude et secondement, en laboratoire, aucune transmission n'était observée entre les animaux susceptibles et les animaux infectés pourtant logés ensemble. Ensuite, une première expérience sur la ferme infectée a démontré que les animaux sous moustiquaire ne s'étaient pas contaminés. Une seconde expérience, l'inoculation en laboratoire de moutons naïfs avec différentes espèces de moustiques capturés sur site, a montré que l'inoculation d'une de ces espèces, « *Taeniorhynchus brevipalpis* » (aujourd'hui *Coquillettidia fuscopennata*), a entraîné le développement d'anticorps contre le virus de la FVR chez l'agneau concerné (Daubney et al., 1931). Le premier isolement du virus de la FVR dans des moustiques a été réalisé sur des insectes capturés en 1944 en Ouganda. Six espèces du genre *Eretmapodites* et trois du genre *Aedes* étaient alors concernées, autant de vecteurs potentiels de la FVR (Smithburn et al., 1948).

Le virus de la FVR a désormais été isolé dans la nature à partir de plus de 50 espèces d'arthropodes, principalement de la famille des *Culicidae* et des genres *Aedes*, *Culex* et *Anopheles* mais aussi chez des culicoïdes, des simulies et des tiques (Linthicum et al., 2016). Linthicum *et al.* proposent la liste la plus complète des espèces d'insectes dont le rôle vis-à-vis de la FVR a été étudié dans la littérature. Cela ne signifie pas pour autant que toutes ces espèces jouent effectivement un rôle de vecteur

---

<sup>9</sup> Un vecteur est un être vivant capable de transmettre de façon active (en étant lui-même infecté) ou passive un agent infectieux (bactérie, virus, parasite).

biologique. Pour être « compétent », l'arthropode hématophage doit assurer une transmission active du virus par piqûre entre les vertébrés. Ceci implique une multiplication du virus chez l'arthropode et une migration du virus dans les glandes salivaires pour assurer sa transmission. Plus de vingt espèces (*Aedes aegypti*, *Aedes mcintoshi*, *Culex pipiens*, *Eretmapodites quinquevittatus*, etc.) se sont révélées capables de transmettre le virus en laboratoire de façon active ou passive (Linthicum et al., 2016).

La réponse immunitaire des vecteurs aux infections virales fait l'objet de travaux de recherche dans le but de comprendre leur mécanisme de survie. La mise en œuvre d'un mécanisme inné reposant sur l'interférence ARN a été confirmée et pourrait représenter une piste de recherche pour la lutte contre la maladie (Léger et al., 2013; Dietrich et al., 2017). Une diminution de 20-25% du taux de nouveau repas sanguin, du nombre d'œufs et du taux de survie a néanmoins été décrite chez des *Culex Pipiens* infectés (Linthicum et al., 2016).

Le mode de transmission vectoriel est principalement important pour la transmission inter-vertébrés (ovins, caprins, bovins et camélidés qui sont les principaux vertébrés capables de développer une virémie permettant d'infecter un vecteur lors d'un repas sanguin). Elle est également suspectée pour la transmission à l'Homme dans les cas où aucun lien avec des animaux infectés n'a pu être identifié (Afssa, 2008b).

### 3. La transmission verticale

En 1985, Linthicum *et al.* isolèrent le virus dans des moustiques de l'espèce *Aedes mcintoshi* (aussi appelée *Aedes lineatopennis*) obtenus à partir de larves prélevées sur le terrain (Linthicum et al., 1985). Cette observation a apporté un argument de poids à l'hypothèse de la transmission verticale du virus de la FVR chez certains vecteurs, en particulier ceux du genre *Aedes*, qui permettrait au virus de persister dans l'environnement pendant la saison sèche voire plus longtemps (Bird et al., 2009). Cependant, cette hypothèse n'a jamais pu être vérifiée chez des moustiques élevés en laboratoire (Linthicum et al., 2016).

Une transmission verticale a été démontrée en laboratoire chez des brebis et est soupçonnée chez les autres ruminants (Antonis et al., 2013). Les forts taux de mortalité néonatale et d'avortements associés à la FVR font de ces potentiels avortons et cadavres infectés une voie de contamination importante pour les autres animaux ou humains qui en sont au contact.

### 4. Mécanismes d'émergence

Le virus de la FVR est capable de circuler de façon épidémique, avec des vagues d'avortements massives, comme endémique, sans manifestation clinique notable, ce, parfois dans les mêmes régions mais à différents moments. En tant que zoonose virale et maladie vectorielle, il est attendu que les ruptures d'équilibres écologiques (suite à des événements climatiques, socio-économiques, etc.), en modifiant les interfaces environnement/vecteur/animal-homme entraînent des modifications de son cycle épidémiologique et une possible émergence (ou réémergence) du virus (Sutherst, 2004). Certains facteurs ayant déclenché des épidémies ou épizooties sont décrits ci-dessous, plusieurs facteurs peuvent bien-sûr se conjuguer.

#### a. Facteurs climatiques

La première description du virus au Kenya en 1930 a été, à plusieurs points de vue (clinique, analytique, etc.), un modèle révélant les grands principes des futures épidémies de FVR en Afrique de

l'Est et le lien entre l'émergence de cette maladie et les conditions climatiques avait déjà été identifié. En effet, l'épidémie s'est déclenchée après une saison des pluies marquée par une pluviométrie au-dessus de la normale, ce qui avait incité l'éleveur qui allait subir la première épizootie décrite de FVR à avancer ses mises-bas pour profiter de l'abondance des fourrages et ne pas risquer des pâtures impraticables lors des secondes pluies annuelles (Daubney et al., 1931).

Cette association entre forte pluviométrie et épidémies se reproduira de façon constante au Kenya lors des prochaines épizooties (notamment en 1951-1953, 1961-1963, 1967-1968, 1977-1979, 1997-1998 et 2006-2007) (cf. Figure 8) (Anyamba et al., 2009; Davies et al., 1985; Linthicum et al., 1999). Il est à présent supposé qu'en Afrique de l'Est les épidémies de FVR surviennent après des phénomènes de fortes pluies permettant la mise en eau des « *dambos* », des mares temporaires, dans les habitats de basse altitude, propices à la prolifération des nombreux vecteurs de la FVR. En Afrique de l'Est, ces phénomènes de fortes pluies surviennent en lien avec les épisodes chauds de l'ENSO (*El Niño*) qui interviennent à intervalles plus ou moins réguliers de 5 à 15 ans, permettant par ailleurs à la population des vertébrés sensibles de se renouveler naturellement (Linthicum et al., 1999). Un phénomène similaire survient également en Afrique du Sud dans des habitats similaires aux *dambos* nommés *pans* ou *vleis*, mais selon une chronologie différente, puisque c'est la phase *La Niña* qui y est responsable des épisodes de fortes pluies (Linthicum et al., 2016). L'émergence de la FVR en Afrique du Sud semble cependant moins bien prédite par ce seul phénomène ENSO.

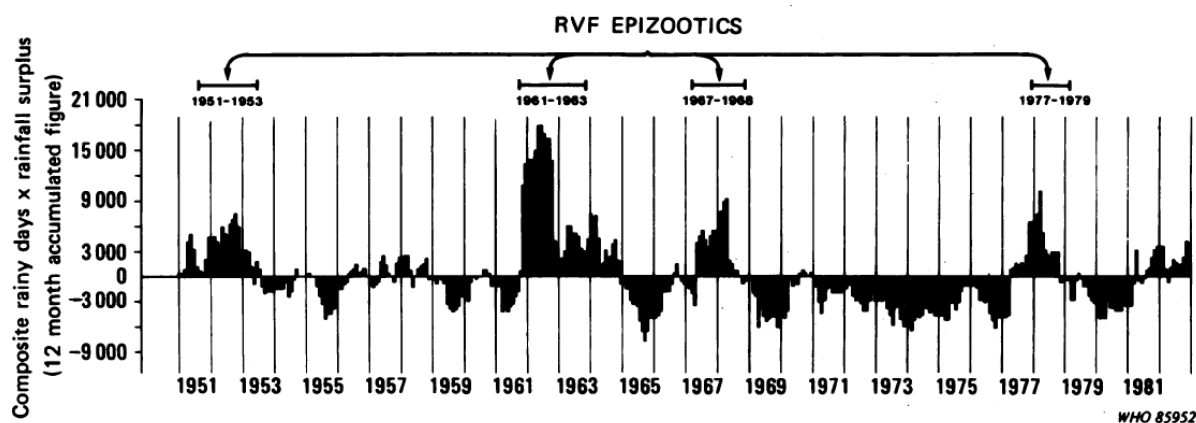


Figure 8. Mise en relation entre les périodes d'épizootie de FVR et la pluviométrie au Kenya (l'axe des ordonnées représente un indicateur composite d'anomalie de pluviométrie basé sur le nombre de jours de pluies par mois multiplié par la pluviométrie mensuelle à partir des données de cinq sites au Kenya où des épizooties de FVR ont été détectées)

La persistance du virus entre les périodes épidémiques reposerait sur un cycle enzootique inter-épidémique. Ce cycle enzootique impliquerait l'infection occasionnelle de mammifères comme le bétail domestique ou encore les buffles sauvages (*Syncerus caffer*), expliquant les séroconversions observées en période inter-épidémique (LaBeaud et al., 2008, 2011; Lichoti et al., 2014) ainsi qu'une transmission verticale chez certains vecteurs afin de survivre aux épisodes de sécheresse (Bird et al., 2009; Linthicum et al., 2016).

### b. Facteurs anthropiques

Plusieurs interventions humaines ont par le passé contribué à déclencher des épidémies de FVR soit en modifiant un écosystème et en créant un environnement plus favorable aux vecteurs soit en déplaçant des animaux infectés (ou des vecteurs) vers des zones indemnes mais propices au développement de la maladie.



L'épidémie de 1977 en Egypte est probablement liée à l'introduction d'animaux vivants virémiques pour le commerce depuis le Soudan où une épizootie venait de sévir, comme évoqué par le taux de séroprévalence important des dromadaires à leur arrivée (Hoogstraal et al., 1979). Le virus a alors trouvé un écosystème favorable dans le système irrigué de la vallée du Nil, grâce notamment à la construction récente du barrage d'Assouan (Afssa, 2008b; Digoutte and Peters, 1989), avec une très forte abondance de *Culex pipiens*. Le comportement observé d'abattage immédiat des animaux malades (sans attendre leur mort) par les éleveurs pour la consommation humaine a, quant à lui, fortement contribué à augmenter le nombre de cas humains (Hoogstraal et al., 1979).

La responsabilité du barrage de Diama sur le fleuve Sénégal a aussi été évoquée pour l'épidémie de 1987 en Mauritanie, survenue quelques mois après son inauguration et alors que le virus circulait silencieusement depuis plusieurs années déjà en Mauritanie (Digoutte and Peters, 1989; Linthicum et al., 2016). Il est en tout cas certain que ces nouvelles zones irriguées favorisent la prolifération des vecteurs et permettent une intensification de la présence de bétail, propices à la circulation du virus (Linthicum et al., 2016).

Enfin, l'intensification des mouvements commerciaux, en impliquant des animaux domestiques vivants (voire des vecteurs) potentiellement infectés a très probablement permis au virus d'émerger au-delà de son aire de répartition : en Egypte depuis le Soudan (Cf. ci-dessus), au Yémen, en Arabie Saoudite, dans l'Union des Comores et à Mayotte à partir de la Corne de l'Afrique (Cêtre-Sossah et al., 2012a; Maquart et al., 2014a; Shoemaker et al., 2002), voire de réémerger comme cela a été le cas à Madagascar avec au moins trois introductions successives du virus, probablement via le commerce de bétail avec la côte est-africaine ou l'archipel des Comores (Lancelot et al., 2017; Samy et al., 2017). La situation malgache illustre également très bien les nombreuses implications des comportements humains dans la circulation du virus : à travers les pratiques d'échange de bovins au niveau local, les mouvements commerciaux et les marchés d'animaux vivants qui s'intensifient pour faire face à la demande en viande d'une population croissante et l'irrigation pour la production du riz propice au développement de vecteurs au contact de la population et des animaux domestiques (Lancelot et al., 2017; Nicolas et al., 2013).

Une autre illustration de l'impact complexe des activités humaines sur l'épidémiologie de la FVR semble se dessiner en Afrique de l'Ouest où les cas se multiplient depuis 2012 y compris en dehors d'épisodes de pluies importants. Pour expliquer ce phénomène, Arsevska *et al.* évoquent l'association du reverdissement du Sahel (en cours depuis les grandes sécheresses des années 1980 et permis par des précipitations plus abondantes dues à un réchauffement des eaux de surface de l'Atlantique lui-même lié à une diminution de la pollution atmosphérique au niveau de cette zone) favorables aux vecteurs de la FVR avec une augmentation des populations animales (permise par la plus grande abondance en fourrages) et du commerce de ces animaux lié à l'accroissement de la population (Arsevska et al., 2016a; Giannini et al., 2013).

### *c. Autres facteurs*

D'autres facteurs naturels pourraient être responsables d'épidémies, comme le transport éolien de vecteurs ou le déplacement d'animaux sauvages infectés vers des zones indemnes mais propices au développement de la maladie (Pepin et al., 2010).

## F. Prévention et Lutte

### 1. Enjeux

La FVR représente une menace importante pour plusieurs aspects de la société justifiant l'intervention des autorités publiques pour en organiser la prévention et la lutte.

La maladie a d'abord des conséquences directes potentiellement majeures en termes de morbidité et mortalité humaine et animale, comme décrit lors des principales épidémies et épizooties ci-dessus. Les vies humaines et les coûts de traitement, convertis financièrement pourraient atteindre des milliards de dollars (Peyre et al., 2015).

Les épizooties ont un impact très important sur les communautés d'éleveurs et toute la chaîne de valeur qui en découle (marchands, bouchers, exportateurs, etc.) (Peyre et al., 2015). Les pertes directes de productivité des éleveurs à cause de la mortalité des animaux et des avortements peuvent mettre en danger la sécurité alimentaire. Aux pertes directes s'ajoutent également les changements de comportement des acteurs économiques qui peuvent être spontanés ou formalisés par la mise sous embargo officielle des zones où une épizootie est en cours (Bird et al., 2009; Peyre et al., 2015). En complément, diverses mesures de lutte ou de prévention sont généralement mises en place à la charge directe des acteurs concernés ou des Etats. En effet, l'infection par le virus de la fièvre de la vallée du Rift fait partie de la liste des maladies à notification obligatoire à l'OIE<sup>10</sup> et le code de l'OIE y consacre un chapitre avec des préconisations de mesures pour le commerce des animaux (vaccination, quarantaine, contrôle des vecteurs, etc.)(OIE, 2016b).

Au final, les conséquences socio-économiques interviennent à des niveaux très variés (micro, méso, macro-économiques, local, régional, national, international) difficiles à synthétiser et prévoir. Peyre *et al.* ont fait l'inventaire des études conduites sur les impacts socio-économiques de la FVR et ont ainsi rassemblé 17 études décrivant un total de 13 catégories d'impacts socio-économiques de la maladie (Peyre et al., 2015). Les études se sont concentrées principalement sur les impacts à court-terme des épidémies et épizooties et aucune n'a pu en évaluer tous les aspects. Le chiffrage partiel des coûts des épizooties s'échelonne de 5 à 470 millions de dollars et représente de 0,02 à 5% du produit intérieur brut (PIB) des pays concernés. La situation analysée la plus critique est celle de la Somalie qui a subi des embargos sur ses exportations de ruminants vivants vers la péninsule arabique entre 1998 et 2003 suite à l'épizootie dans la Corne de l'Afrique en 1997-1998 et dans la péninsule arabique en 2000-2001. Dans ce pays, les éleveurs représentent 70% de la population et l'élevage et l'exportation de ses produits représentaient 60-65% du PIB (Nin-Pratt et al., 2004; Peyre et al., 2015; Soumaré et al., 2006). L'embargo a entraîné une restructuration du système d'exportation d'animaux vivants de la Corne de l'Afrique vers la péninsule arabique. Cette restructuration a, dans un premier temps, profité à Djibouti qui a pu construire la première quarantaine de la Corne de l'Afrique homologuée par les pays importateurs du Golfe (Pinauld, 2009). D'autres impacts sociaux plus subtils et difficilement quantifiables ont aussi été décrits chez les éleveurs tanzaniens : des difficultés financières pour assumer l'éducation et la santé de leur famille, une stigmatisation par les autres communautés rurales, un stress lié à la perte de proches et d'animaux, etc. (Peyre et al., 2015; Sindato et al., 2011).

<sup>10</sup> <http://www.oie.int/fr/sante-animale-dans-le-monde/oie-listed-diseases-2017/> (visité le 6/06/2017)

Compte-tenu de l'histoire de la maladie, du contexte actuel de changements globaux (augmentation des flux commerciaux mondialisés, migrations, changements climatiques, etc.) et de la présence de vecteurs compétents sur les continents américains, européens et asiatiques, encore indemnes, une extension du virus à d'autres continents représente une source d'inquiétude majeure (Afssa, 2005; Chevalier et al., 2010; Pepin et al., 2010). Le virus de la FVR est aussi considéré comme une potentielle arme de bioterrorisme (Bird et al., 2009; Mandell and Flick, 2011).

## 2. Actions à coordonner

Les enjeux de gestion de la FVR sont multiples (cf. paragraphe précédent), mais compte-tenu de l'aire de répartition vaste et des nombreux hôtes et vecteurs du virus, une éradication de la FVR semble actuellement impossible (Bird et al., 2009; FAO, 2002). Seule la combinaison de plusieurs actions (système d'alerte précoce, surveillance, communication et changements des pratiques pour la prévention des contaminations humaines, contrôle des mouvements, lutte vaccinale et anti-vectorielle, etc.) déployées en tenant compte d'une analyse des risques de transmission de la maladie dans le contexte considéré peut permettre de limiter son extension voire de la faire régresser.

Cette gestion intégrée peut être illustrée par la réponse israélienne à l'épidémie de 1977-1979 en Egypte qui a mis en œuvre vaccination de masse, démoustication, quarantaine, abattage des animaux infectés et qui, en profitant d'une géographie et d'un climat favorables, semble avoir pu empêcher la progression de la maladie au-delà de la péninsule du Sinaï (Bird et al., 2009).

Le succès de la gestion intégrée nécessite une réponse rapide, permise par une bonne préparation, ainsi qu'une étroite collaboration entre les professions agricoles, vétérinaires, médicales, entomologiques et scientifiques. Les différents moyens de prévention et de lutte à la disposition des autorités sont détaillés ci-après.

### a. Préparation – plan d'urgence

Compte-tenu des enjeux et des facteurs d'émergence de la FVR, la planification et la préparation de la réponse à la FVR sont une mission importante des états, qu'ils soient encore indemnes ou non. La FAO (l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, *Food and Agriculture Organization* en anglais) y a dédié un guide (FAO, 2002). Les actions à évaluer dans ce plan d'urgence sont listées dans les paragraphes suivants. Un plan d'urgence doit être régulièrement actualisé.

Un guide d'aide à la décision adapté à la corne de l'Afrique a été conçu dans le cadre d'un projet entre la FAO et l'ILRI (*International Livestock Research Institute*) détaillant les différentes actions (formation, surveillance, vaccination, communication, financement, etc.) à entreprendre en fonction du statut de la zone (inter-épidémique, alerte climatique, post-épidémique, etc.) (Consultative Group for RVF Decision Support, 2010). Un plan d'urgence pour les Etats-Unis est aussi disponible (USDA, 2013).

En France, la FVR est considérée comme un danger sanitaire de première catégorie<sup>11</sup> et devrait faire l'objet de l'élaboration d'un plan national d'intervention sanitaire d'urgence (PISU)<sup>12</sup>, comme

---

<sup>11</sup> Arrêté du 29 juillet 2013 relatif à la définition des dangers sanitaires de première et deuxième catégorie pour les espèces animales

« Les dangers sanitaires de première catégorie sont ceux qui étant de nature, par leur nouveauté, leur

recommandé par les agences d'évaluation des risques sanitaires française et européenne dès 2005 (Afssa, 2005; EFSA, 2005).

### ***b. Analyse de risque***

Afin de construire un plan de préparation et d'urgence (pour les pays indemnes) ou de lutte (pour les pays enzootiques), une analyse de risque est nécessaire. Elle permet de déterminer les moyens qui devront être mis en œuvre en fonction des facteurs d'émergence les plus probables et des conséquences les plus importantes (FAO, 2002). Cette analyse de risque doit permettre particulièrement de cibler et dimensionner les activités de veille et de surveillance.

Face à la situation épidémique dans la Corne de l'Afrique en 2006-2007 et considérant les échanges illégaux avec Mayotte depuis l'Union des Comores, l'Afssa, a ainsi été saisie pour conduire une analyse de risque sur l'introduction de la FVR sur le territoire français (Afssa, 2008a).

### ***c. Alerte précoce : Modèles prédictifs du risque***

Comme décrit plus haut, 90% des épidémies en Afrique de l'Est sont survenues après des épisodes pluvieux plus importants que la normale, essentiellement à cause de la prolifération de vecteurs qui en découle (Linthicum et al., 1999, 2016). Or la compréhension du phénomène climatique ENSO, principale cause de variabilité climatique inter-annuelle (Linthicum et al., 2016), peut permettre de contribuer à anticiper ces épisodes, notamment par la mesure de différents indices basés sur des différentiels de température de surface de la mer (SST, *sea surface temperature* en anglais) en des lieux précis.

Des cartes de risque de l'activité de la FVR ont ainsi pu être construites grâce à un modèle utilisant des mesures éco-climatiques à haute résolution spatio-temporelle (principalement obtenues grâce à des appareils de mesures sur des satellites) comme les anomalies de température de surface de la mer à certains endroits, la couverture nuageuse (OLR, rayonnement de grande longueur d'onde ou *outgoing longwave radiation* en anglais), les précipitations et la couverture végétale (principalement le NDVI, indice de végétation normalisé ou *normalized difference vegetation index* en anglais) combinées avec les connaissances épidémiologiques sur la présence du virus de la FVR. Les premiers résultats ont permis de reconstruire avec succès l'activité épizootique/épidémique de la FVR entre 1982 et 1998 avec des indicateurs d'alerte détectables deux à cinq mois avant les premiers cas (Linthicum et al., 1999).

Ce modèle a ensuite été utilisé en temps réel, produisant des cartes de risques mensuelles<sup>13</sup> (Anyamba et al., 2009, 2010). Il a notamment permis d'anticiper avec succès, de deux à quatre mois, les foyers survenus entre septembre 2006 et mars 2008, dans la Corne de l'Afrique, au Soudan et en

---

apparition ou persistance, à porter une atteinte grave à la santé publique ou à la santé des végétaux et des animaux à l'état sauvage ou domestique ou à mettre gravement en cause, par voie directe ou par les perturbations des échanges commerciaux qu'ils provoquent, les capacités de production d'une filière animale ou végétale, requièrent, dans un but d'intérêt général, des mesures de prévention, de surveillance ou de lutte rendues obligatoires par l'autorité administrative » Article L201-1 du Code Rural et de la Pêche Maritime

<sup>12</sup> Décret n° 2012-845 du 30 juin 2012 relatif aux dispositions générales organisant la prévention, la surveillance et la lutte contre les dangers sanitaires de première et deuxième catégorie

<sup>13</sup> Ces cartes sont accessibles sur le site suivant : [https://www.ars.usda.gov/southeast-area/gainesville-fl/center-for-medical-agricultural-and-veterinary-entomology/docs/rvf\\_monthlyupdates/](https://www.ars.usda.gov/southeast-area/gainesville-fl/center-for-medical-agricultural-and-veterinary-entomology/docs/rvf_monthlyupdates/) (consulté le 9/06/2017)

Afrique du Sud (Anyamba et al., 2010). Cette anticipation permet notamment à la FAO et l'OMS (Organisation mondiale de la santé) d'émettre des messages d'alerte avec des recommandations de mesures et aux états de préparer leur réponse (vaccination préventive, activation de la surveillance, messages d'information, etc.) (Anyamba et al., 2009; FAO, 2008, 2012). Contrairement à sa très bonne prédiction temporelle, ce modèle a néanmoins pour l'instant révélé quelques limites sur la spatialisation du risque. La majorité des cas à Madagascar et en Afrique du Sud se trouvaient en 2006-2008 en dehors des zones prédites contre une majorité en zone prédite pour l'Afrique de l'Est et le Soudan. Ces écarts pourraient être expliqués par des défauts dans la qualité des données (par exemple, la localisation des cas humains qui ont pu être attribué à un hôpital ou une zone différente de l'infection) mais aussi des lacunes du modèle en lui-même (par exemple, le fait qu'il ne tient compte que des composantes environnementales propices aux vecteurs et pas des mouvements d'animaux) (Anyamba et al., 2010).

D'autres travaux ont également étudié, à différentes échelles et à partir de différentes données, les zones à risque de FVR permettant également de concentrer les actions de surveillance ou de recherche sur la maladie (Arsevska et al., 2016b; Clements et al., 2006; Tran et al., 2016).

### *d. Surveillance (Alerte précoce et suivi)*

La surveillance de la FVR est indispensable pour connaître le statut d'une région, déclencher d'éventuelles actions de lutte ou de prévention et évaluer leur efficacité (OIE, 2016b). Elle peut être soit événementielle (ou passive), soit programmée (ou active) (Dufour, 2007).

Les activités de surveillance doivent s'adapter au niveau de risque de la région à un moment donné (OIE, 2016b). Dans les régions indemnes de FVR, un système d'alerte basé sur une surveillance événementielle des avortements, voire des hépatites nécrosantes, pouvant permettre de détecter la FVR mais aussi les principales maladies exotiques abortives doit être mis en place (Afssa, 2005). Une surveillance programmée de routine y est probablement peu coût-efficace.

Cette surveillance événementielle reste également primordiale dans les zones ayant connu des épisodes de FVR et qui restent à risque. En temps de « paix », l'utilisation des méthodes d'épidémiologie participative peut permettre de créer le lien indispensable entre les éleveurs et les acteurs de la santé animale et de l'entretenir afin d'assurer une bonne réactivité de la surveillance événementielle (Consultative Group for RVF Decision Support, 2010). Dans les zones à risque, une surveillance programmée peut également être mise en place sur la base d'un suivi de troupeaux sentinelles, en général des petits ruminants, en ciblant les endroits propices aux vecteurs (Davies and Martin, 2003). La FAO recommande ainsi de suivre de 20 à 30 petits ruminants par localisation et de les tester de deux à cinq fois par an par IgG et IgM en privilégiant la période autour de la saison des pluies (*a minima* avant-après) (Davies and Martin, 2003). Compte-tenu de la faible réactivité de la surveillance sérologique dans les troupeaux sentinelles (délais de séroconversion, délais des analyses de laboratoire, intervalles entre les campagnes de prises de sang), ce système ne constitue généralement pas un moyen d'alerte précoce d'épizootie/épidémie (Consultative Group for RVF Decision Support, 2010) et ce sont souvent les cas humains qui permettent la première détection du virus au début des épisodes épidémiques. Ils sont pourtant secondaires en théorie aux cas animaux, mais font généralement l'objet d'une investigation plus poussée. Cependant la surveillance programmée des ruminants est un outil indispensable pour comprendre *a posteriori* les épizooties et alimenter les travaux de modélisation et d'analyse de risque. En période d'alerte climatique, les

visites chez les éleveurs sentinelles permettent aussi de documenter la présence de manifestation clinique ou non et ainsi de renforcer la surveillance événementielle (Consultative Group for RVF Decision Support, 2010). De plus en plus de programmes de surveillance active ont ainsi documenté la circulation inter-épizootique, au Sénégal, au Mozambique, à Madagascar, etc (Fafetine et al., 2013; Lichoti et al., 2014; Nicolas et al., 2014a; Thonnon et al., 1999).

### *e. Traitement*

Il n'existe aucun traitement spécifique contre la FVR. Dans les formes sévères, un traitement symptomatique et de soutien des patients hospitalisés est mis en oeuvre : réhydratation, transfusion, etc. (Bird et al., 2009; OMS, 2016).

### *f. Vaccination*

#### *i. Vaccins disponibles*

Deux types de vaccins ont principalement été utilisés jusqu'ici chez les ruminants domestiques. Ils sont encore aujourd'hui distribués par une entreprise sud-africaine : un vaccin inactivé qui nécessite deux injections lors de la primo-vaccination puis une nouvelle injection chaque année et un vaccin vivant atténué à partir de la souche neurotrope « Smithburn » qui procure une immunité à vie (FAO, 2011; Mansfield et al., 2015; Smithburn, 1949). Le vaccin vivant atténué « Smithburn » a été développé en Ouganda dans les années 50 et utilisé notamment extensivement au Kenya et en Afrique du Sud (Mansfield et al., 2015). Il semble à première vue moins couteux et plus efficace que le vaccin inactivé, mais sa virulence résiduelle peut provoquer des avortements et des malformations sur les femelles gestante (FAO, 2011). Le développement d'un vaccin efficace mais moins dangereux et permettant la distinction sérologique des animaux vaccinés et des animaux infectés naturellement (DIVA, en anglais « *differentiate between infected and vaccinated animals* ») reste un enjeu pour l'avenir (FAO, 2011). Une deuxième génération prometteuse, car plus sûre, de vaccins atténués est en cours d'émergence à partir des souches « MP 12 » (un vaccin avec une licence partielle aux Etats-Unis) et « clone 13 » (un vaccin avec une licence en Afrique du Sud et au Zimbabwe (Njenga et al., 2015) qui dispose d'une délétion naturelle du gène codant pour la protéine NSs et ainsi d'un potentiel pour permettre un test DIVA) qui seraient plus immunogènes et moins pathogènes (Bird et al., 2008; FAO, 2011; Mansfield et al., 2015). D'autres vaccins, notamment recombinants sont à l'étude.

Aucun de ces vaccins vétérinaires ne dispose d'autorisation d'utilisation en Europe (autorisation de mise sur la marché ou AMM pour la France) ou en Amérique du Nord. En France, en cas d'urgence, une demande préalable d'autorisation temporaire d'utilisation (ATU), délivrée par l'ANMV (Agence nationale du médicament vétérinaire) serait nécessaire.

Aucun vaccin humain n'a été homologué à ce jour. Un vaccin inactivé, dénommé « TSI-GSD-200 » a été développé aux Etats-Unis et utilisé expérimentalement avec pour objectif de protéger des personnels à fort risque d'exposition (vétérinaires, laboratoire), mais jusqu'à maintenant, il n'a pas été commercialisé (Afssa, 2008b; Bird et al., 2009; Ikegami and Makino, 2009).

*ii. Déploiement de la vaccination*

La vaccination en zone d'enzootie est déconseillée à cause du risque de transmission par les aiguilles (Davies and Martin, 2003). De plus une utilisation continue risque d'être trop coûteuse (FAO, 2002). Une vaccination des seuls animaux à haut potentiel génétique pourra alors être envisagée.

Les modèles climatiques d'alerte précoce pourraient permettre de préparer une campagne de vaccination massive juste avant une période à risque (Anyamba et al., 2009). Une évaluation du risque basée notamment sur les modèles de cartographie du risque permettrait de cibler les zones prioritaires lorsque les moyens de déploiement sont contraints (Anyamba et al., 2010).

Dans cette optique, la nécessité de constituer des stocks internationaux, ou au moins régionaux, de vaccin à utiliser en cas d'épizootie a été soulignée à plusieurs reprises (FAO, 2011; Mansfield et al., 2015). Ces stocks sont importants pour une réponse rapide car la durée de production de nouveaux vaccins peut être de plusieurs mois, alors que le stockage de vaccin par un Etat seul n'est pas pertinent compte-tenu de la durée de conservation des vaccins (quelques années) plus courte que l'intervalle moyen entre deux épizooties (Consultative Group for RVF Decision Support, 2010).

Une vaccination d'urgence en anneau, sur des animaux sains uniquement (pour éviter toute transmission indirecte par les aiguilles) peut être envisagée suite à une introduction de la FVR dans une zone indemne afin de limiter son extension et si possible d'empêcher son installation (FAO, 2002).

Enfin le recours à la vaccination peut être envisagé spécifiquement pour faciliter les échanges commerciaux d'animaux à partir de zones à risque de FVR, en suivant les recommandations proposées dans le code Terrestre de l'OIE, afin de limiter le risque de diffusion de la maladie (OIE, 2016b).

*g. Contrôle des mouvements d'animaux*

Les mouvements d'animaux infectés ont été incriminés pour l'introduction de la FVR dans des zones préalablement indemnes (exemples de l'Egypte ou de la péninsule arabique décrits plus haut). Même si le transport (antropique ou naturel) de vecteurs est aussi envisageable, de nombreux travaux pointent le risque pour les zones indemnes représenté par les mouvements de bétail depuis les zones où la FVR circule mais aussi leur importance à l'échelle locale pour permettre le maintien de la transmission du virus (Chevalier et al., 2010; Favier et al., 2006; Lancelot et al., 2017; Nicolas et al., 2014b).

Le code de l'OIE prescrit des mesures particulières à appliquer aux mouvements de ruminants issus des zones infectées par le virus de la FVR (i.e. ayant eu des cas de FVR pendant les dix dernières années) (OIE, 2016b). En fonction de la période (épizootique ou en inter-épidémique), différentes précautions sont à prendre comme la désinsectisation des animaux, différentes adaptations du transport en fonction du risque vectoriel, et la vaccination des animaux. Les animaux ayant séjourné dans les derniers 14 jours en zone d'épizootie devraient être exclus de tout commerce. Le code de l'OIE prévoit aussi leur stationnement pendant les 14 jours avant le départ dans une « station de quarantaine protégée des vecteurs qui était située dans un secteur à faible activité vectorielle démontrée ». L'absence de quarantaine somalienne homologuée par les pays de la péninsule arabique a ainsi contribué à déplacer vers Djibouti, qui a été prompte à construire une quarantaine

standard, les mouvements officiels d'exportation de ruminants de la Corne de l'Afrique (Pinault, 2009). Des mesures s'appliquent aussi à la semence, aux embryons, à la viande et au lait (OIE, 2016b).

L'impact économique de ces mesures a pu conduire certains pays à sous-déclarer ou retarder la déclaration de cas de FVR (Linthicum et al., 2016). Le code spécifie désormais que les peaux, les cuirs et la laine ne sont pas des produits à risque. La Chine avait notamment imposé un embargo probablement disproportionné sur l'exportation de la laine sud-africaine en 2010 (Laxminarayan and Macauley, 2012).

#### *h. Lutte anti-vectorielle*

La lutte contre les vecteurs est principalement pertinente dans les stations de quarantaine pour permettre le transport des animaux et par l'application d'insecticides topiques sur les animaux en amont de leur déplacement (OIE, 2016b). Les zones aéroportuaires sont également des lieux sensibles (Linthicum et al., 2016). Les traitements insecticides sont envisageables pour d'autres situations (Anyamba et al., 2010), mais présentent cependant plusieurs inconvénients (chronophage, toxicité, etc.) qui peuvent faire renoncer à leur utilisation, notamment autour des habitations humaines. Pour prévenir les éventuelles contaminations vectorielles humaines, le recours aux précautions générales contre les maladies vectorielles (moustiquaires, destruction des gîtes, etc.) est préférable.

#### *i. Prévention des cas humains*

Les caractéristiques de survie dans les organes et les prélèvements des particules virales impliquent de suivre des mesures de biosécurité strictes. De nombreux cas humains ont été rapportés chez des éleveurs et des vétérinaires en contact proche avec des animaux malades ou des cadavres ainsi qu'en laboratoire (Anyangu et al., 2010; Archer et al., 2011; Bird et al., 2009; Daubney et al., 1931; OIE; Pepin et al., 2010). La meilleure façon de prévenir ces cas est de respecter des mesures de biosécurité, dans un contexte à risque vis-à-vis de la FVR. Ces mesures concernent en particulier les vétérinaires, les éleveurs, les techniciens d'abattoir lors de la manipulation d'avortons ou de cadavres, lors des mises bas, ainsi que les personnels d'hôpital en contact avec des patients (Bird et al., 2009; OMS, 2016).

En France, le virus de la FVR fait partie des Micro-Organismes et Toxines (MOT) « dont l'emploi serait de nature à présenter un risque pour la santé publique »<sup>14</sup>. La production, la fabrication, le transport, l'importation, l'exportation, la détention, l'offre, la cession, l'acquisition et l'emploi des MOT est soumis à des conditions et à un régime d'autorisation définis réglementairement<sup>15</sup>. C'est l'ANSM (Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé) qui délivre et administre ces autorisations. Un arrêté<sup>16</sup> encadre notamment les bonnes pratiques « tendant à garantir la sécurité et la sûreté biologiques » relative à la manipulation de ces MOT. L'agence fédérale américaine pour la santé publique, le CDC (*Centers for Disease Control and Prevention*, Atlanta) recommande sa

<sup>14</sup> Arrêté du 30 avril 2012 fixant la liste des micro-organismes et toxines prévue à l'article L. 5139-1 du code de la santé publique

<sup>15</sup> Article L5139-1 et 2 du code de la santé publique

<sup>16</sup> Arrêté du 23 janvier 2013 relatif aux règles de bonnes pratiques tendant à garantir la sécurité et la sûreté biologiques mentionnées à l'article R. 5139-18 du code de la santé publique



## Introduction

manipulation en laboratoire de niveau de confinement 3 (*Biosafety level* ou BSL-3) (Bird et al., 2009; CDC, 2009; OIE, 2016a).

La consommation de produits d'origine animale est aussi évoquée comme un facteur de risque, même si cette voie de transmission est controversée (Nanyingi et al., 2015).

Des actions de communications vis-à-vis du grand public et des personnes les plus à risque (abattoir, personnel de santé, élevages etc.) sont donc nécessaires pour les informer des risques encourus et transmettre les gestes de prévention pratiques à adopter afin de les minimiser (Bird et al., 2009; FAO, 2002).

### III. Mayotte et la FVR

#### A. Géographie

Mayotte se situe dans le canal du Mozambique à 400 km de la Tanzanie et 300 km de Madagascar. Elle constitue la partie orientale de l'archipel des Comores, d'origine volcanique, qui comprend quatre îles principales : Grande Comore, Mohéli, Anjouan et Mayotte, les deux dernières n'étant distantes que de 70 km (cf. Figure 9). Le territoire de Mayotte constitue lui-même un petit archipel d'environ 376 km<sup>2</sup>, comprenant deux îles principales : Petite Terre et Grande Terre et une trentaine d'îlots. Le lagon corallien de Mayotte est l'un des plus grands du monde<sup>17</sup>. Le sommet de Mayotte, le Mont Bénara, culmine à 660m.

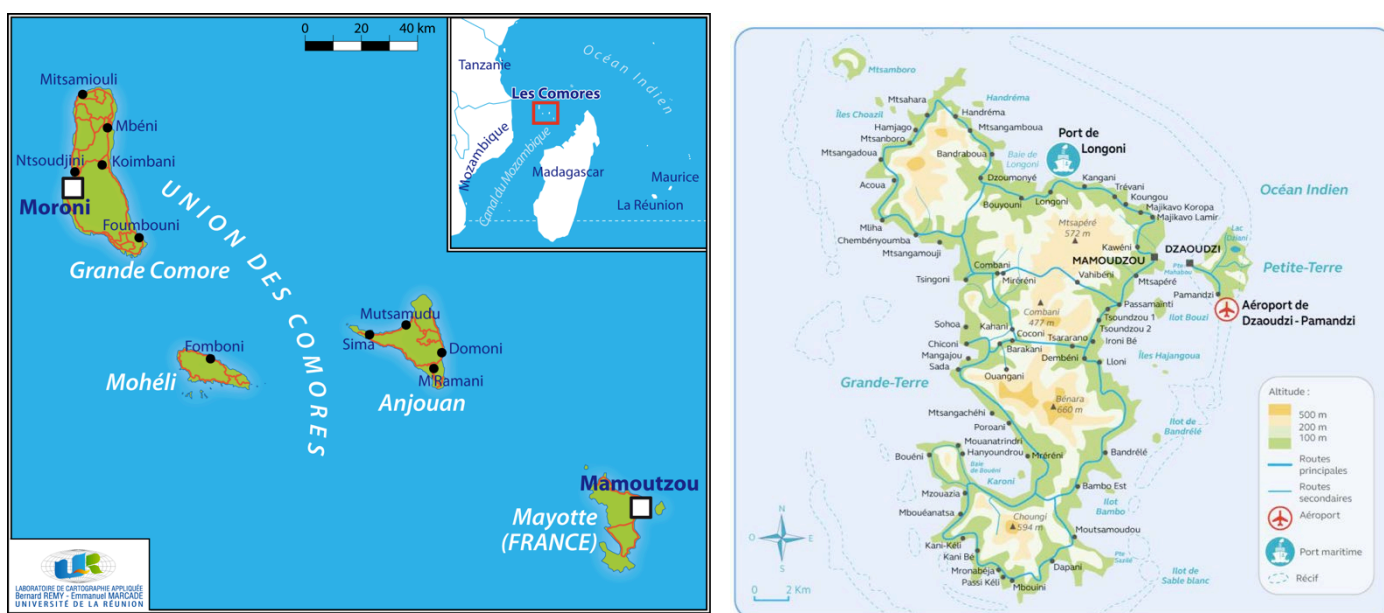


Figure 9. Localisation de Mayotte dans l'archipel des Comores (Gauche, Source : (Taglioni, 2009) et principaux lieux-dits et axes de communication (Droite, Source : (Cour des Comptes, 2016))

Mayotte abrite plusieurs espèces endémiques (deux oiseaux, sept reptiles, quarante-neuf mollusques terrestres) et représente avec Madagascar l'un des 34 hotspots de biodiversité de la planète<sup>18</sup>. Contrairement au lagon qui est protégé par le parc naturel marin (qui couvre les 68 381 km<sup>2</sup> de la zone économique exclusive), seuls 0,2% de l'espace terrestre bénéficie d'une protection réglementaire forte. Les écosystèmes mahorais (forêts naturelles, zones humides, ripisylves, mangroves, vasières, etc.) subissent une pression importante (urbanisation, agriculture) qui entraînent notamment un morcellement de ces espaces et une fragilisation des sols (IUCN France, 2014).

#### B. Climat

Mayotte bénéficie d'un climat de type « tropical chaud, humide et maritime »<sup>19</sup> avec une température moyenne de 25,6°C et plus de 1500mm par an de précipitations en moyenne. L'été austral, saison chaude et pluvieuse (85-95% humidité) s'étend en général de décembre à mars,

<sup>17</sup> <http://www.outre-mer.gouv.fr/mayotte-geographie-climat> (Consulté le 11/06/2017)

<sup>18</sup> <https://www.iucn.org/fr/node/27723> (Consulté le 11/06/2017)

<sup>19</sup> <http://www.meteofrance.yt/climat/description-du-climat> (Consulté le 11/06/2017)

influencé par les vents de mousson. L'hiver austral, plus frais et sec, s'étend de juin à septembre sous l'influence des alizés (cf. graphiques « *Mean Rainfall 2004-2010 per month in different location in Mayotte* » et « *Mean Temperatures in Mayotte 2000-2009* » dans le **Chapitre III** « *Supporting Information S1* »). La température varie néanmoins peu au cours de l'année en restant presque toujours comprise entre 20 et 30°C et reste homogène sur le territoire. En revanche, les écarts de pluviométrie sont plus marqués, malgré la petite taille de l'île : le centre et le Nord-Ouest sont presque deux fois plus arrosés que le Sud.

### C. Histoire

Les premières traces archéologiques de peuplement remontent environ aux V-VIII<sup>e</sup> siècle et semblent attribuables à une présence bantoue<sup>20</sup> (Mesas, 2014; Sueur et al., 2012). L'arrivée de commerçants arabo-persans sur la côte est-africaine diffuse la culture arabe dans cette zone de l'océan indien et introduit la religion musulmane à Mayotte. D'après la tradition orale, une période de chefferies villageoises (les *Fani*) sera suivie d'un régime de sultanat unique, imposée par les chiraziens, à partir de la fin du XV<sup>e</sup> siècle.

Les européens arrivent aux Comores au début du XVI<sup>e</sup> siècle mais ne s'y arrêtent que pour se ravitailler sur la route des Indes. A partir de la fin du XVI<sup>e</sup> siècle, plusieurs épisodes vont conduire à dépeupler et déstabiliser le sultanat de Mayotte (batailles de succession, piraterie, rivalités avec le sultan d'Anjouan, razzias malgaches pour le commerce d'esclaves, etc.). Se sachant menacé par les territoires voisins, le sultan Andriantsouli, d'origine malgache, propose la cession de Mayotte à la France en 1841 en échange principalement d'une rente de 1000 piastres et d'une protection<sup>21</sup>.

Mayotte, qui ne compte plus que quelques milliers d'habitants de onze nationalités différentes, devient alors une colonie. Les trois autres îles de l'archipel des Comores sont placées peu après sous protectorat français et gouvernées depuis Mayotte. La France qui a d'abord vu en Mayotte un intérêt stratégique militaire pour le contrôle du canal du Mozambique, se ravisera et développera une seconde ambition : celle du développement agricole et notamment sucrier, qui sera cependant rapidement concurrencée par d'autres territoires plus performants (Mesas, 2014). Après plusieurs changements de statut, l'archipel devient Territoire d'Outre-mer en 1946, le chef-lieu restant à Mayotte. Face à la montée des tensions et des revendications d'indépendance, un référendum est organisé en décembre 1974. Mayotte est la seule des quatre îles à se prononcer pour rester française (63,8% des suffrages exprimés). Il est alors prévu un second référendum, le 8 février 1976 qui voit Mayotte confirmer sa position avec 99,4% des suffrages exprimés. Mayotte devient alors une collectivité territoriale, sans pour autant régler définitivement la question de son statut. Conformément aux engagements pris, la population de Mayotte est à nouveau consultée le 2 juillet 2000 (72,94 % des suffrages exprimés se prononcent en faveur d'un accord permettant à Mayotte de devenir « collectivité départementale ») puis le 29 mars 2009 (95,2% des suffrages exprimés sont en faveur de la création d'une collectivité unique de l'article 73 de la Constitution, exerçant les compétences d'un département et d'une région d'outre-mer). Mayotte devient le 101<sup>ème</sup> département français le 31 mars 2011 et elle est reconnue comme région ultra-périphérique de

---

<sup>20</sup> Le terme bantou était à l'origine une caractéristique linguistique, il définit aujourd'hui l'ensemble ethnique originaire du Golfe de Guinée et Gabon qui a colonisé au début de notre ère le centre et l'Est du continent africain.

<sup>21</sup> <http://www.mayotte.pref.gouv.fr/Politiques-publiques/Culture-Tourisme-et-Patrimoine/Decouvrir-Mayotte/Histoire-et-Geographie> (consulté le 11/06/2017)

l'Union européenne à compter du 01/01/2014<sup>22</sup>. Un contentieux international perdure avec l'Union des Comores, qui n'a jamais admis le maintien de la souveraineté française sur Mayotte (Sueur et al., 2012).

## D. Situation socio-économique et culturelle

Mayotte comptait 212 600 habitants en 2012 (Insee, 2012) et 235 132 habitants en 2016<sup>23</sup>, soit une croissance moyenne de 2 à 3%. La population a triplé depuis 1985, portée par un très fort taux de natalité (Insee, 2012), 54% de la population a aujourd'hui moins de 20 ans. Sa densité de 625 habitants/km<sup>2</sup> en 2016 place Mayotte juste derrière les départements d'Ile de France.

Le PIB par habitant de Mayotte, en constante progression, reste environ cinq fois inférieur à celui de la métropole mais il est huit fois supérieur à celui de l'Union des Comores (6 575 €/habitant à Mayotte contre près de 30 000 €/habitant en France métropolitaine et 760 €/habitant aux Comores en 2010) (Sueur et al., 2012). Depuis l'instauration d'un visa obligatoire pour se rendre à Mayotte depuis les autres îles des Comores en 1995, l'île connaît une forte immigration clandestine en provenance principalement des Comores et surtout de l'île d'Anjouan (la plus proche, à 70 km). En 2010, 26 405 reconduites d'étrangers ont ainsi été mises en œuvre, un chiffre variable d'année en année : 18 763 en 2015, 22 677 en 2016 (préfecture de Mayotte, 2017; Sueur et al., 2012).

La population mahoraise actuelle est issue d'origines diverses. Les principales langues parlées sont le français, le shimaore (langue bantoue, proche du swahili), ainsi que les variétés comoriennes des trois autres îles de l'archipel (à savoir le grand comorien, le mohélien et l'anjouanais), le malgache de Mayotte (ou shibushi) et l'arabe.

La société mahoraise traditionnelle fonctionne sur les principes de la prééminence du groupe sur l'individu, de la matrilinearité (filiation définie dans la lignée maternelle) et de la matrilocalité (résidence de la famille chez la mère)<sup>24</sup>. La religion musulmane, occupe une place majeure dans l'organisation de la société avec par exemple une adaptation des horaires des entreprises privées et des services publics pendant la période du ramadan<sup>25</sup>. Près de 95% des Mahorais sont d'obédience musulmane et de rite sunnite (Sueur et al., 2012).

## E. Agriculture

### 1. Aspects généraux

Le PIB du secteur agricole de Mayotte s'élevait à 75 M€, soit 4% du PIB total (Insee, 2015). La production d'Ylang-Ylang et de Vanille débutée au XIX<sup>ème</sup> siècle est en déprise totale marquée par un arrêt des exportations d'Ylang-Ylang en 2013 (IEDOM, 2014).

<sup>22</sup> DÉCISION DU CONSEIL EUROPÉEN du 11 juillet 2012 modifiant le statut à l'égard de l'Union européenne de Mayotte (2012/419/UE)

<sup>23</sup> <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1893198> (Consulté le 11/06/2017)

<sup>24</sup> <http://www.outre-mer.gouv.fr/mayotte> (Consulté le 11/06/2017)

<sup>25</sup> <http://lejournaldemayotte.com/societe/horaires-ramadan-a-la-mairie-de-mamoudzou/> (Consulté le 11/06/2017)

<http://lejournaldemayotte.com/societe/total-mayotte-horaires-ramadan/> (Consulté le 11/06/2017)

La surface agricole représente 19% du territoire mahorais, soit 7 092 ha en 2010 (DAAF Mayotte, 2011a). L'essentiel est constitué de systèmes agro-forestiers plus ou moins arborés et intensifs, avec de nombreuses associations de culture.

La majorité des agriculteurs sont pluri-actifs et 50% sont des femmes (DAAF Mayotte, 2011a).

La structuration des agriculteurs est récente, avec notamment la création de la chambre d'agriculture, de la pêche et de l'aquaculture de Mayotte (CAPAM) en 2006.

L'agriculture mahoraise, dans son fonctionnement décrit par le recensement agricole de 2010, semble peu durable. Elle est menacée par un vieillissement des chefs d'exploitation (44 % sont des « exploitants âgés isolés »), des amendements organiques trop faibles pour garantir une exploitation pérenne des parcelles, un accès difficile aux parcelles qui sont fragmentées, de petite taille (0,45 ha cultivés en moyenne par exploitation) et éloignées du domicile des exploitants, une absence de prévention de l'érosion des sols (la majorité des parcelles ont une pente de plus de 15%) et un foncier non sécurisé (77% des agriculteurs exploitent des parcelles qui ne leur appartiennent pas, sur la base d'un accord oral) (DAAF Mayotte, 2011a).

## 2. Les pratiques d'élevage

Lors du recensement agricole de 2010, 3 600 élevages de bovins (17 150 animaux) ont été dénombrés ainsi que 2 200 de petits ruminants (cf. Figure 10) (DAAF Mayotte, 2011a). La taille moyenne des cheptels bovins est en progression avec 4,8 bovins en moyenne par exploitation en 2010 contre 3 en 1978. La taille moyenne des troupeaux de petits ruminants est également limitée : 5,8 animaux en moyenne (DAAF Mayotte, 2011a).

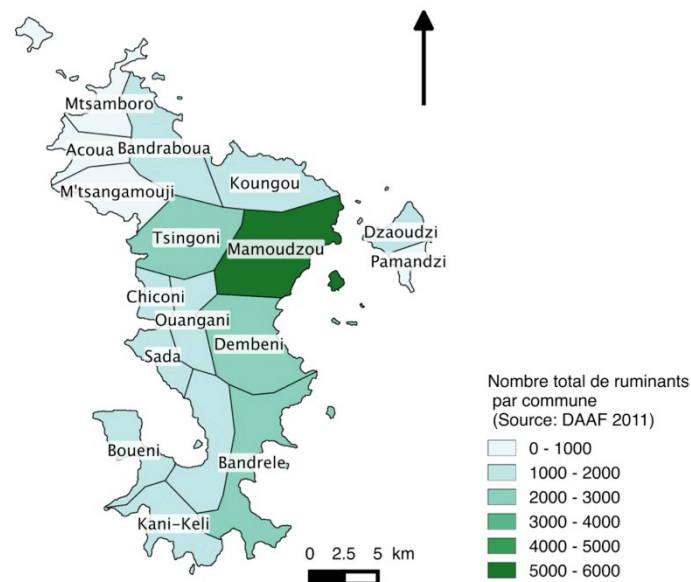


Figure 10. Carte de densité des ruminants à Mayotte (Source : (DAAF Mayotte, 2011b))

La majorité des bovins présents à Mayotte sont des zébus peu productifs mais résistant aux conditions locales. Des races européennes ont fait leur apparition dans les années 1990 avec un engouement rapide pour la montbéliarde, jusqu'à atteindre environ 12-15% d'animaux métis dès 2007 (Poivey, 2007). En 2010, 22% des élevages bovins produisent du lait (DAAF Mayotte, 2011a). En

2004, des caprins de race Boer ont été introduits pour améliorer le gabarit et la vitesse de croissance, mais le taux de métissage n'est pas connu (Janelle et al., 2013).

L'élevage Mahorais est encore en très grande majorité traditionnel : non mécanisé, pas d'intrants, avec une vocation d'épargne, non commerciale, etc. En 2010, moins de 1% des élevages disposaient d'une étable avec une dalle béton et les trois quarts des bovins étaient conduits à l'attache et déplacés en fonction des ressources fourragères (DAAF Mayotte, 2011a). Des travaux récents se sont intéressés à la typologie des élevages Mahorais de bovins (cf. Figure 11) (Gaborit, 2009; Ninot, 2001; Ringiard, 2010; Tillard et al., 2013).

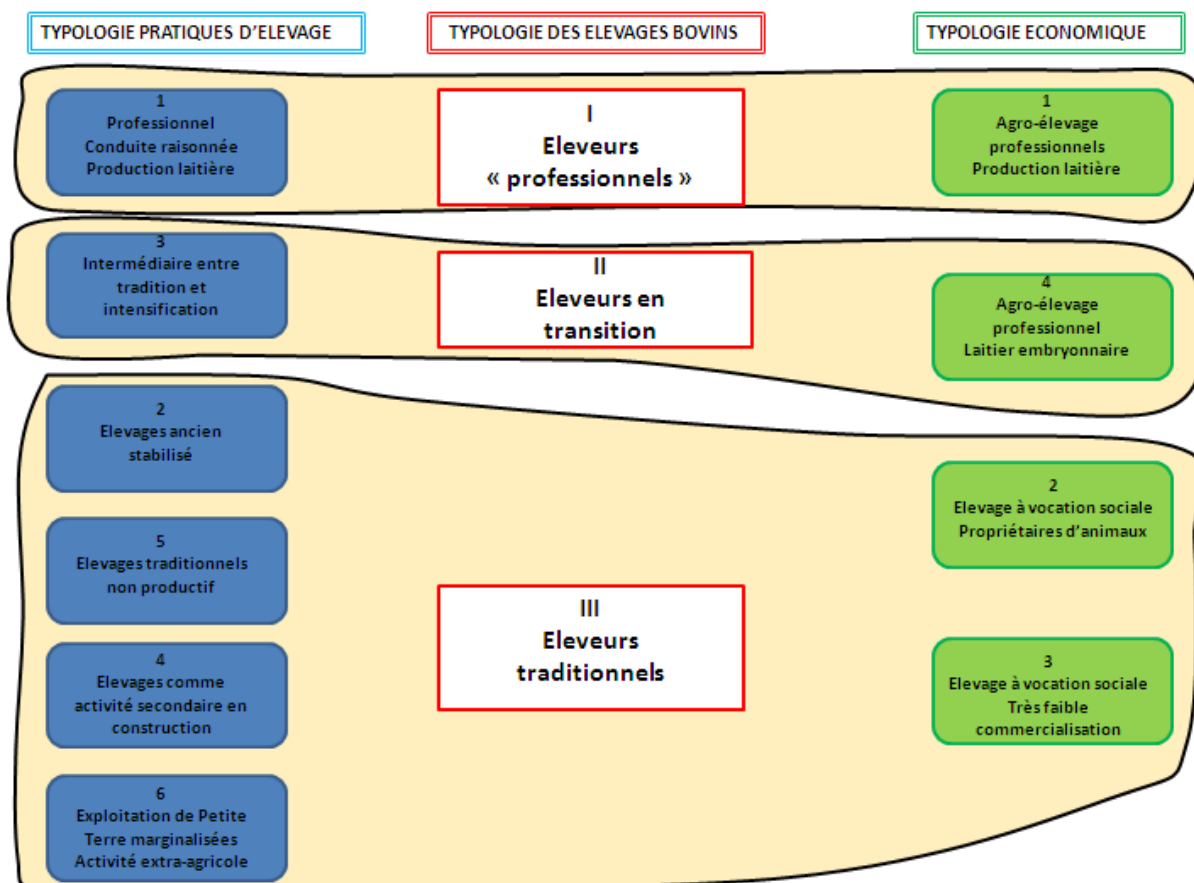


Figure 11. Typologie synthétique des élevages mahorais (Source : Tillard et al., 2013)

La majorité des éleveurs, des pluri-actifs « propriétaires d'animaux », a conservé son fonctionnement traditionnel avec des animaux à des fins d'autoconsommation et représentant une forme d'épargne. En parallèle, un petit groupe d'éleveurs est en voie de professionnalisation, déjà engagés dans une démarche de modernisation et de spécialisation. Ces éleveurs ont fait des investissements et sont dans une démarche de rentabilité, notamment pour la production laitière. Ces éleveurs ont de plus grands troupeaux. Ainsi, les 320 éleveurs qui ont plus de 10 animaux possèdent à eux seuls 31 % du troupeau mahorais, soit plus de 5 200 bovins (DAAF Mayotte, 2011a). Un troisième groupe d'éleveurs se dessine, entre tradition et modernité, ils sont dans une démarche de développement et d'intensification, mais disposent de moins d'expérience (Tillard et al., 2013).

Une typologie des élevages caprins a aussi été proposée différenciant les élevages en cinq groupes selon leur niveau d'intensification et de spécialisation et de commercialisation (Janelle et al., 2013).

Par ailleurs, Mayotte a été le siège d'importants mouvements illégaux d'importations de ruminants dont il est très difficile d'évaluer le volume actuel (Afssa, 2008b). Avant 2006, il était estimé que près de 1000 ruminants étaient introduits chaque année (Tillard, 2006). Depuis, le nombre d'animaux introduits illégalement semble avoir diminué : en 2008, une centaine d'animaux ont été saisis, représentant peut-être le quart des mouvements réels (Afssa, 2008b). Les saisies se sont ensuite encore raréfiées sans pour autant disparaître (cf. Figure 12) : 78 caprins et 5 bovins en 2009 (Defernez et al., 2010), 1 caprin en 2012 et 1 en 2013 (Communication personnelles DAAF) mais aussi 25 petits ruminants en 2015 (Cardinale et al., 2015).

Ces mouvements suivent les routes des migrations humaines, par la voie maritime, à bord des *kwassa-kwassa*, et ont pour principale origine Anjouan (les animaux pouvant exceptionnellement y avoir simplement transité et venir d'une autre île voire de la côte est-africaine) et dans une moindre proportion Madagascar (Afssa, 2008b).



Figure 12. Zébus dans un *kwassa-kwassa* saisi par la police aux frontières (Source : Journal de Mayotte du 08/09/2014<sup>26</sup>)

L'identification des bovins a été un chantier important de la CAPAM et on compte aujourd'hui plus de 80% des bovins en règle. Des efforts restent à entreprendre concernant les caprins et les ovins (respectivement 13 et 21% des animaux en règle) (DAAF Mayotte, 2016a).

### 3. Les produits de l'élevage

L'élevage de ruminants à Mayotte se caractérise par l'absence de filière de commercialisation organisée et une majorité des exploitations destinent le lait et la viande à la consommation familiale ou à des dons et échanges (Afssa, 2008b; DAAF Mayotte, 2011a). Les abattages s'effectuent en grande majorité « sous le manguier » et pour une minorité (10-15% en 2008) sur une aire d'abattage contrôlée par les services vétérinaires (Afssa, 2008b; Poivey, 2007). On estime à 3500 le nombre de bovins abattus par an pour un équivalent de 300-400t. Le lait est consommé quasiment

<sup>26</sup> <http://lejournaldemayotte.com/fil-info/kwassa-un-zebu-un-blesse-grave-et-64-migrants/> (Consulté le 11/06/2017)

exclusivement caillé. La mise en place d'un abattoir bovin et d'une laiterie fait partie des projets prioritaires régulièrement évoqués pour mettre les produits de l'élevage mahorais en conformité avec les réglementations nationales et européennes désormais en vigueur. En 2016, seuls deux élevages avaient déclaré officiellement une activité de vente directe de produits laitiers à la ferme.

La consommation de lait et viande locales est principalement occasionnelle et restreinte aux événements festifs et culturels où ils sont quasiment systématiquement présents : grand mariages, fêtes de villages comme les *daïra* et les *shidjabou*, funérailles, fêtes de l'Aïd, etc. (Mansuy et al., 2013). Les produits locaux sont disponibles en quantité inférieure à la demande et sont vendus à des prix trop élevés pour une consommation régulière mais très rémunérateurs pour les éleveurs: 4€/L de lait et entre 10 et 14€/kg de viande (DAAF Mayotte, 2016a; Mansuy et al., 2013). En 2015, la production locale pesait pour près de 6M€ pour la viande (bovins et petits ruminants) et 3M€ pour le lait (DAAF Mayotte, 2016b). Les produits consommés régulièrement, en dehors de festivités culturelles, sont très majoritairement importés. En 2015, ce sont 5000 tonnes de viande (principalement congelée), pour une valeur de 17M€, et 6000 tonnes de produits laitiers, pour une valeur de 10M€ qui ont été importés (DAAF Mayotte, 2016b).

La première « association des éleveurs mahorais » (ADEM) a vu le jour en 2000 avec pour objectif de mieux satisfaire la demande locale (Ninot, 2001). L'ADEM est devenue une coopérative agricole et a changé de nom pour devenir la COOPADEM le 1<sup>er</sup> septembre 2012. Elle adhère à GDS France<sup>27</sup> depuis 2012 et a été reconnue<sup>28</sup> comme organisme à vocation sanitaire (OVS)<sup>29</sup> ce qui lui confère un statut officiel pour la gestion du sanitaire dans les élevages de Mayotte en partenariat avec l'administration. En 2017, elle dépasse les 800 adhérents et compte 10 salariés, contre 400 adhérents et 6 salariés en 2012.

## F. La FVR dans l'archipel des Comores

### 1. La FVR dans l'Union des Comores

#### a. Cas humains (2007-2012)

Aux Comores, une infection par le virus de la FVR a été détectée pour la première en 2007, chez un jeune garçon de douze ans habitant Moroni (Grande Comore). Il souffrait d'une méningo-encéphalite depuis mai 2007. Le diagnostic a pu être posé par la détection d'IgG et d'IgM contre la FVR après son transfert à l'hôpital de Mayotte (ProMED-mail, 2007; Sissoko et al., 2009). La confirmation par le CNR (centre national de référence) arbovirus (Pasteur Lyon) est obtenue le 7 septembre 2007. L'enquête épidémiologique relative à ce cas n'a mis en évidence aucun déplacement dans une zone d'enzootie ou d'épizootie mais un contact avec un animal malade a été rapporté (ProMED-mail, 2007). En mars 2008, lors des investigations consécutives à ce cas et portant sur les syndromes grippaux, un patient possédant des IgM contre la FVR est identifié en Grande Comore (Afssa, 2008b).

<sup>27</sup> GDS France est la fédération nationale des groupements de défense sanitaire départementaux (GDS), qui est l'organisation française agricole en charge des questions sanitaires pour les filières bovines, porcines, ovines, caprines, apicoles principalement

<sup>28</sup> Arrêté du 31 mars 2014 portant reconnaissance des organismes à vocation sanitaire dans le domaine animal ou végétal

<sup>29</sup> les OVS sont définis par l'article L. 201-9 du CRPM, une fois reconnus par arrêté ministériel, ils peuvent se voir confier par voie de convention des missions de surveillance, de prévention ou de lutte contre les dangers sanitaires.



En 2011-2012, deux cas de FVR ont été confirmés en France, l'un à Mayotte, l'autre en métropole, chez des personnes ayant séjourné aux Comores peu avant l'apparition de leur symptômes (InVS, 2011, 2012).

### ***b. Situation épidémiologique chez les ruminants (2007-2011)***

- ***Surveillance programmée***

Une enquête sérologique (recherche d'IgG par ELISA) chez les ruminants domestiques a pu être conduite durant la saison sèche suivante, en 2009 (avril-août) sur les trois îles de l'Union des Comores. Elle a révélé une prévalence globale de 33 % (160 animaux positifs sur 488 prélevés), confirmant que le virus avait largement circulé (Roger et al., 2011). Lors de cette étude, il est signalé qu'aucune vague d'avortements ou taux de mortalité anormal n'ont été rapportés aux autorités vétérinaires du pays (Roger et al., 2011).

Un suivi longitudinal de 191 ruminants répartis dans les trois îles de l'Union des Comores, mis en place d'avril 2010 à août 2011 a mis en évidence 15 séroconversions, avec une incidence significativement plus importante à Mohéli que dans les autres îles (Roger et al., 2014).

- ***Surveillance événementielle***

Les informations sont contradictoires quant à la présence de manifestations cliniques chez les ruminants de l'Union des Comores pendant cette période. Des documents évoquent des avortements en nombre anormal chez des caprins en février 2007 dans le nord de la Grande Comore, puis dans les mois suivants dans toute la Grande Comore et à Mohéli (Afssa, 2008b; Pépin, 2011). Une épizootie « ravageant les moutons de Mohéli » est également évoquée dans la presse locale en novembre 2008 (Riziki, 2008). Cependant, aucune investigation de laboratoire n'a été conduite pour déterminer les causes de ces épisodes. Aucune notification immédiate de FVR n'a été faite par les autorités comoriennes, mais les rapports annuels à l'OIE font état de 50 cas de FVR chez des bovins en 2008, 173 cas en 2009 et de 16 cas en 2010<sup>30</sup>. Les moyens des services vétérinaires comoriens sont très contraints (Afssa, 2008b), limitant la capacité de recueil et de vérification des informations sanitaires.

### ***c. Cycle épidémiologique de la FVR dans l'Union des Comores***

- ***Origine du virus***

Une PCR spécifiquement adaptée pour des charges virales faibles a été développée pour analyser les échantillons prélevés dans l'océan Indien à cette période (Maquart et al., 2014b). Elle a permis la détection de génome viral chez vingt animaux du suivi longitudinal 2010-2011 (confirmés par séquençage) contre trois animaux seulement avec la PCR classique (Bird et al., 2007b). Le virus de la

---

<sup>30</sup>[http://www.oie.int/wahis\\_2/public/wahid.php/Countryinformation/Reporting](http://www.oie.int/wahis_2/public/wahid.php/Countryinformation/Reporting)  
[http://www.oie.int/wahis\\_2/public/wahid.php/Reviewreport/semestrial/review?year=2008&semester=0&wild=0&country=COM&this\\_country\\_code=COM&detailed=1](http://www.oie.int/wahis_2/public/wahid.php/Reviewreport/semestrial/review?year=2008&semester=0&wild=0&country=COM&this_country_code=COM&detailed=1)  
[http://www.oie.int/wahis\\_2/public/wahid.php/Reviewreport/semestrial/review?year=2009&semester=0&wild=0&country=COM&this\\_country\\_code=COM&detailed=1](http://www.oie.int/wahis_2/public/wahid.php/Reviewreport/semestrial/review?year=2009&semester=0&wild=0&country=COM&this_country_code=COM&detailed=1)  
[http://www.oie.int/wahis\\_2/public/wahid.php/Reviewreport/semestrial/review?year=2010&semester=0&wild=0&country=COM&this\\_country\\_code=COM&detailed=1](http://www.oie.int/wahis_2/public/wahid.php/Reviewreport/semestrial/review?year=2010&semester=0&wild=0&country=COM&this_country_code=COM&detailed=1)  
(consultés le 05/06/2017)

FVR n'a pas pu être isolé, mais une analyse phylogéographique a pu être conduite sur une séquence virale partielle obtenue à partir d'un prélèvement sur un zébu originaire d'Anjouan et prélevé en août 2011 (Maquart et al., 2014a). Les résultats de cette analyse révèlent une souche virale proche de celle à l'origine de l'épizootie ayant sévi dans la Corne de l'Afrique (Kenya, Somalie, Tanzanie) entre décembre 2006 et mai 2007 et à Madagascar en 2008-2009. Une introduction du virus depuis l'Afrique de l'Est est ainsi soupçonnée (ou indirectement via Madagascar) par le commerce d'animaux vivants ou le transport de vecteurs infectés par le biais de ce même flux commercial (Afssa, 2008b).

Les importations de ruminants aux Comores sont en effet assez importantes, les quelques 200 000 têtes de bétail (50 000 bovins et 122 000 caprins et 24 000 ovins en 2014<sup>31</sup>) élevées dans le pays ne suffisent pas à satisfaire la demande des 800 000 habitants du pays, notamment pendant la période des « Grands Mariages ». L'Union des Comores importe régulièrement des bovins sur pied et de petits ruminants en provenance de l'Afrique de l'Est (Tanzanie et Kenya) (Afssa, 2008b; Roger et al., 2011). Avant l'embargo commercial de Madagascar en 2002 et depuis 2012 à nouveau, les Comores ont importé des animaux sur pied venant de Madagascar (Afssa, 2008b; Roger et al., 2011). Malheureusement le dénuement extrême des services vétérinaires se manifeste aussi dans l'absence de contrôles efficaces à l'importation d'animaux vivants (Afssa, 2008b; Roger et al., 2011).

Maquart *et al.* souligne les difficultés rencontrés dans les tentatives d'isolement viral malgré des résultats positifs en RT-PCR, pouvant indiquer de faibles charges virales ou un virus partiellement délété (Maquart et al., 2014b).

- **Facteurs de risque**

Par ailleurs, le suivi longitudinal de 2010-2011 a montré que plus de la moitié des séroconversions sont survenues en saison sèche et aucun des 1568 insectes piqueurs capturés dans le cadre de cette étude, dans les élevages suivis, ne contenait de virus détectable (Roger et al., 2014). La recherche d'un éventuel réservoir du virus chez les chauves-souris présentes aux Comores, s'est pour le moment, révélée infructueuse (Maquart et al., 2014b). Ces observations suggèrent une circulation endémique basée sur un cycle complexe où la part des mouvements d'animaux inter-îles et depuis la côte africaine reste à déterminer (Roger et al., 2014).

#### **d. Actions mises en œuvre**

En dehors d'une vigilance renforcée et des études conduites dans le cadre du réseau AnimalRisk<sup>32</sup> (Balenghien et al., 2013; Roger et al., 2011, 2014), peu de mesures concrètes ont pu être mises en œuvre.

Un projet de quarantaine pour les animaux vivants importés via le port de Moroni a fait l'objet de réflexions à plusieurs reprises, notamment depuis la survenue d'une épizootie de theileriose aux Comores en 2003-2004, probablement introduites avec de bovins importés de Tanzanie (De Deken et

<sup>31</sup> <http://www.fao.org/faostat/en/#data> (Consulté le 10/06/2017)

<sup>32</sup> Le réseau AnimalRisk-OI a été créé en 2009 pour rassembler les acteurs de la santé animale de l'Océan Indien avec comme objectif d'apporter un soutien technique et scientifique aux systèmes de surveillance et de proposer des réponses pour une meilleure gestion des risques sanitaires dans la zone (Cardinale et al., 2011). Il a fait l'objet d'un financement de la Commission européenne de 2009 à 2015 à hauteur de 2,2 millions d'euros. (<https://umr-cmaee.cirad.fr/projets/animal-risk-oi> Consulté le 10/06/2017)

al., 2007). Ce projet n'avait toujours pas vu le jour en 2012, pour des raisons tant politiques, qu'économiques et foncières (Cardinale et al., 2012; Cavalerie et al., 2012).

## 2. La FVR à Mayotte

### a. Cas humains (2007-2011)

Suite à la confirmation du premier cas humain de FVR aux Comores (voir plus haut) et aux premières découvertes de résultats sérologiques positifs pour la FVR sur des ruminants mahorais (voir paragraphe *b* ci-dessous), une enquête rétrospective a été mise en place à Mayotte en utilisant les sérums stockés dans le cadre de la surveillance des syndromes dengue-like<sup>33</sup> (Sissoko et al., 2009). Parmi 220 prélèvements effectués entre septembre 2007 et mai 2008, la présence d'une infection par le virus de la FVR (IgM ou PCR) a été identifiée chez dix patients étudiés (Sissoko et al., 2009). Aucun cluster spatial n'a été identifié, aucun patient n'avait voyagé récemment hors de Mayotte, neuf patients étaient des hommes, cinq ont rapporté des contacts avec des ruminants et trois autres avaient un nombre important de potentiels gîtes à moustiques à leur domicile (Sissoko et al., 2009).

La recherche d'infection par le virus de la FVR s'est ensuite poursuivie de façon active dans les cas de syndrome dengue-like où les principales autres pathologies infectieuses (dengue, chikungunya, leptospirose, paludisme) avaient déjà été écartées. Cette surveillance a mis en évidence deux nouveaux cas confirmés par RT-PCR en mars et avril 2009, puis trois cas probables en mai, juin et août 2011 (résultat IgM positif et séroconversion IgG, mais pas de résultat PCR positif) (cf. Figure 13) (Lernout et al., 2009, 2011).

Une enquête conduite en 2011 dans la population générale de Mayotte a permis d'estimer un taux de séroprévalence de 3,5% IC<sub>95%</sub> [2,6 ; 4,8] (Lernout et al., 2013).

---

<sup>33</sup> Un syndrome *dengue-like* est défini comme la présence des symptômes suivants (Lernout et al., 2011):  
fièvre d'apparition brutale ( $\geq 38,5$  °C)

ET

un ou plusieurs symptômes non spécifiques (douleurs musculo-articulaires, manifestations hémorragiques, céphalées, asthénie, signes digestifs, douleur rétro-orbitaire, éruption maculo-papuleuse

ET

en l'absence de tout autre point d'appel infectieux

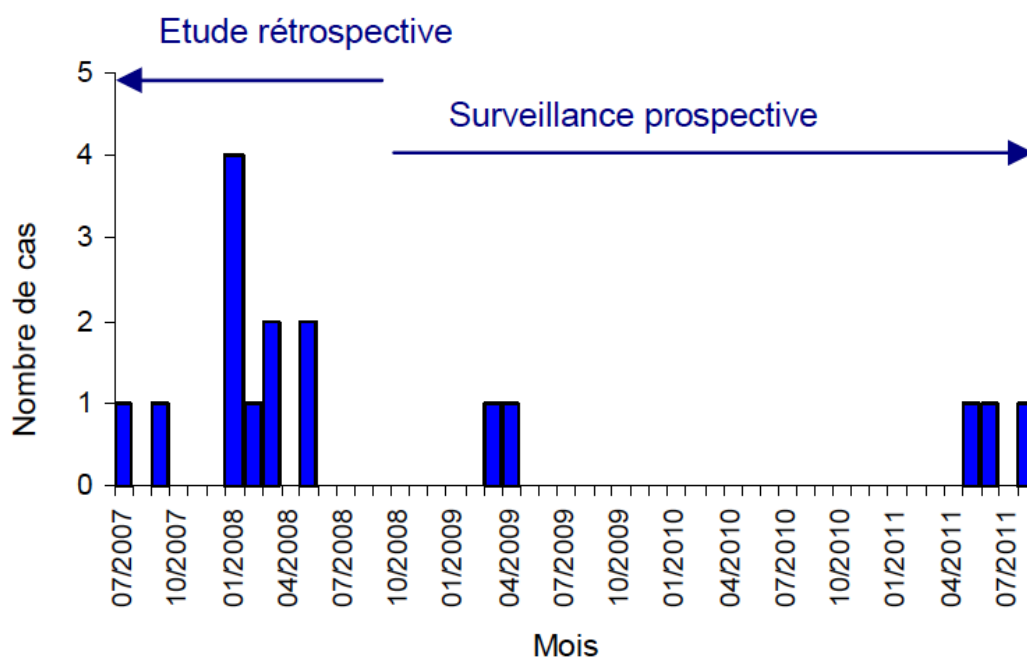


Figure 13. Nombre de cas humains de FVR identifiés à Mayotte entre Juin 2007 et Juillet 2009, le premier cas correspond au cas importé de Grande Comore (Source : (Lernout et al., 2011)

### *b. Situation épidémiologique chez les ruminants (2004-2011)*

- **Surveillance programmée**

A partir d'avril 2008, plusieurs études se sont mises en place pour clarifier la situation épidémiologique chez les ruminants de Mayotte vis-à-vis de la FVR après la découverte du premier cas humain dans l'archipel à l'été 2007.

Une première étude, prospective, à M'tsangamouji (au nord de Mayotte, un secteur à risque pour les importations illégales (Afssa, 2008b)) a révélé la présence d'anticorps récents (IgM) dans un groupe de caprins importés illégalement des Comores entre novembre 2007 et avril 2008, mais aussi chez des zébus nés à Mayotte, mais présents à proximité (Cêtre-Sossah et al., 2012b).

Consécutivement à cette découverte, une seconde étude a consisté en l'analyse de sérum prélevé sur demande des services vétérinaires pour la prophylaxie sanitaire bovine annuelle (recherche de brucellose) entre juin 2007 et mai 2008, sur des bovins répartis dans toute l'île. Une séroprévalence de 10,6% IC<sub>95%</sub> [7% ; 14%] fut alors observée avec des animaux séropositifs dans 7 des 14 communes ayant fait l'objet de prélèvements, allant du Nord au Sud de l'île (Cêtre-Sossah et al., 2012b).

Une troisième étude, rétrospective, fut alors mise en œuvre à partir des sérums des campagnes de prophylaxie précédentes encore stockés au laboratoire vétérinaire d'analyse départemental (LVAD), qui remontaient jusqu'à l'année 2004. En 2004, 29 des 130 zébus prélevés avaient déjà des anticorps anti-FVR (IgG), contre seulement 4 sur 130 en 2005, puis 16 sur 130 en 2006 et 39 sur 126 en 2007. Aucun anticorps de type IgM n'a été détecté dans ces échantillons (Cêtre-Sossah et al., 2012b).

Une quatrième étude a consisté en la mise en place d'une enquête longitudinale de juin 2008 à août 2009 à partir de treize élevages caprins. Des prélèvements ont été effectués toutes les 6-8 semaines dans les cinq élevages avec des animaux séronégatifs (70 animaux au total). Une seule chèvre a séroconverti en février 2009 (Cêtre-Sossah et al., 2012b).

Le dispositif de surveillance active, sur la base d'un suivi longitudinal de troupeaux sentinelles, a été reconduit et amplifié de 2009 à 2011 (Girard et al., 2011; Lernout et al., 2013). Cinquante élevages ont été choisis aléatoirement, à partir de la seule base de données alors disponible : la liste des élevages enregistrés à la CAPAM. Après une première campagne de prise de sang en 2009, trente-trois élevages avec des animaux séronégatifs en nombre suffisant ont été ensuite suivis trimestriellement. Entre mars 2010 et août 2011, l'incidence animale observée était de 12,9% IC<sub>95%</sub> [9,6 ; 16,2] avec un pic de 18,8% pour le dernier trimestre de 2010, pendant la saison des pluies (Lernout et al., 2013). En août 2011, la séroprévalence observée était de 25,3% IC<sub>95%</sub> [19,8 ; 32,2] (Lernout et al., 2013).

- **Surveillance événementielle**

A partir de début 2008, la recherche systématique d'infection par la FVR en cas d'avortements ou de mortalité suspecte de ruminants a été mise en œuvre. Une brebis a ainsi été détectée positive (RT-PCR) en juillet 2008 à Combani<sup>34</sup>. Un autre avortement survenu en 2010 a fait l'objet d'un résultat positif en RT-PCR avec la méthode de Maquart *et al.* mais pas avec la méthode classique de Bird *et al.* (Bird et al., 2007b; Maquart et al., 2014b). Ce sont les deux seuls cas cliniques connus chez des ruminants mahorais.

### c. Cycle épidémiologique à Mayotte

- **Origine du virus**

Le virus de la FVR a pu être isolé et séquencé chez deux des patients atteints par un syndrome *dengue-like* et trouvés infectés par Sissoko *et al.* en février et mars 2008 (Cêtre-Sossah et al., 2012a; Sissoko et al., 2009). L'analyse phylogénétique a montré que ces deux souches étaient apparentées à celle ayant circulé dans la Corne de l'Afrique pendant l'épidémie de 2006-2007, mais aussi à Madagascar en 2008 et à Anjouan en 2011 (Cêtre-Sossah et al., 2012a; Maquart et al., 2014a).

Ces résultats combinés aux observations répétées d'introduction illégales à Mayotte d'animaux originaires des Comores séropositifs permettent de supposer que le virus est arrivé à Mayotte par ce flux illégal d'animaux, voire par le transport de vecteurs infectés introduits par ce même flux humain et commercial (Afssa, 2008b; Cêtre-Sossah et al., 2012a).

- **Facteurs de risque**

L'analyse des données de séroprévalence de l'étude menée dans la population humaine mahoraise en 2011 a permis de mettre en évidence les facteurs de risque de séropositivité suivants : être âgé de plus de 15 ans, être un homme, être né dans l'Union des Comores, vivre à Mayotte depuis moins de cinq ans, un niveau d'éducation bas, être agriculteur et vivre près d'un point d'eau. Chez les

---

<sup>34</sup> [http://www.oie.int/wahis\\_2/public/wahid.php/Reviewreport/Review?reportid=7267](http://www.oie.int/wahis_2/public/wahid.php/Reviewreport/Review?reportid=7267) (Consulté le 10/06/2017)

ruminants, les facteurs de risque significatifs étaient les suivants : la proximité d'un point d'eau, la pluviométrie des deux mois précédents, l'absence d'élimination des avortons (Lernout et al., 2013).

- **Vecteurs présents**

Plusieurs inventaires des espèces de moustiques de Mayotte ont été réalisés. Parmi la quarantaine d'espèces observées, certaines sont des vecteurs potentiels de la FVR : *Aedes aegypti*, *Aedes albopictus*, *Eretmapodites quinquevittatus*, *Culex quinquefasciatus*, etc. (Brunhes, 1978; Le Goff et al., 2014; Linthicum et al., 2016). Une étude spécifique sur la diversité et l'abondance des vecteurs potentiels de FVR a été mise en place entre 2010 et 2012. Elle s'est déroulée dans cinq élevages de ruminants sentinelles de FVR répartis dans cinq zones agro-écologiques représentatives de la diversité de Mayotte (Balenghien et al., 2013), les résultats sont en partie présentés dans le **Chapitre III**.

Une étude dédiée aux espèces du genre *Aedes* a permis de confirmer la présence à travers toute l'île d'*Aedes albopictus*, décrit à Mayotte pour la première fois en 2001 (Bagny et al., 2009; Girod, 2004; Le Goff et al., 2014). La grande majorité des larves d'*Aedes albopictus* a été trouvée dans des gîtes d'origine anthropique (seaux, récipients, etc.) ce qui permet d'orienter les mesures de lutte anti-vectorielle et les messages de prévention (Bagny et al., 2009). Les individus d'*Aedes aegypti* ont été en revanche aussi trouvés dans la végétation en décomposition au sol. *Aedes aegypti* est ainsi plus abondant qu'*Aedes albopictus* en zone rurale et en saison sèche, ce qui peut complexifier son contrôle (Bagny et al., 2009).

La diversité globale des moustiques de Mayotte est plus proche de celle de Madagascar que de celle de l'Afrique de l'Est, possiblement sous l'effet des vents dominants Est-Ouest (Le Goff et al., 2014).

- **Réservoir sauvage potentiel**

L'hypothèse d'un réservoir sauvage de la FVR à Mayotte a été proposée pour expliquer la circulation endémique à bas bruit. Les premières investigations sur des lémuriers (n=100) et des rongeurs (n=50), conduites en 2011, se sont révélées négatives (Lernout et al., 2013).

#### **d. Actions mises en œuvre**

##### *i. Evaluation du risque*

En mars 2007, au vu de la situation épidémique dans la Corne de l'Afrique, l'Afssa est saisie par la direction générale de la santé pour étudier le risque d'introduction de la FVR à Mayotte et à la Réunion. Un groupe de travail est constitué en mai 2007 (Afssa, 2008b).

Compte-tenu de la découverte de résultats de sérologie positifs sur des zébus autochtones de Mayotte en novembre 2007, et donc de l'introduction supposée de la maladie sur ce territoire, l'Afssa s'est auto-saisie le 31 mars 2008 afin d'évaluer en urgence la probabilité de propagation et de pérennisation de la FVR à Mayotte et d'émettre des recommandations concernant les actions à entreprendre (Afssa, 2008a). En avril, elle conclut à une faible circulation virale suite à une probable introduction par les importations illégales d'animaux des Comores. La probabilité de pérennisation du virus serait faible, comme celle de contamination animal – Homme. L'avis ne recommande pas à ce stade la vaccination car ses bénéfices ne sont pas évidents « en l'absence de symptômes avérés sur le bétail » et puisqu'elle compliquerait la surveillance, serait difficile à mettre en œuvre et

pourrait même avoir des conséquences indésirables en raison notamment de l'innocuité limitée des vaccins. L'avis rappelle que la probabilité de diffusion inter-humaine et donc la diffusion à la Réunion ou en France métropolitaine est « quasi-nulle ». L'Agence recommande fortement la mise en place de troupeaux sentinelle et une enquête sérologique transversale sur l'île pour confirmer les hypothèses de faible circulation et suivre la situation épidémiologique, ce qui sera rapidement mis en œuvre (Cêtre-Sossah et al., 2012b). L'avis recommande également une exploration entomologique approfondie pour comprendre le cycle de transmission; une enquête sérologique d'exposition chez les éleveurs ainsi que leur sensibilisation sur la transmission de la maladie.

Le rapport sur l'évaluation du risque d'introduction à Mayotte et à la Réunion en réponse à la direction générale de la santé est finalement validé en juillet 2008 (Afssa, 2008b). Il conclut à un risque d'épidémie nul ou « quasi-nul » à la Réunion quelle que soit la voie d'introduction considérée. En revanche à Mayotte, le risque est un peu plus important, jusqu'à « très faible », si des animaux sont introduits depuis le Kenya ou la Tanzanie avec des conditions climatiques favorables ou depuis les Comores et Madagascar en période d'épizootie. L'Afssa recommande donc de « prendre toutes les mesures de gestion nécessaires à l'établissement d'un niveau nul d'importations illégales ». Outre les recommandations déjà établies en urgence, l'avis conseille (1) la recherche de la FVR dans le cadre de la surveillance des avortements (2) une réalisation d'analyses de façon locale et fiable, tant chez l'animal que chez l'Homme. L'Agence évoque aussi plusieurs questions de recherche comme l'explication de la virulence des souches virales, le développement d'outils diagnostiques et vaccinaux plus performants, l'identification des vecteurs potentiels de FVR à Mayotte, etc. (Afssa, 2008b).

Enfin, en décembre 2008, l'Afssa émet un avis sur les stratégies vaccinales envisageables, et plus largement les mesures de gestion de la FVR en prévision de la saison des pluies, au vu des connaissances acquises pendant l'année 2007-2008 sur la situation épidémiologique mahoraise. L'agence recommanderait une vaccination préventive avec un vaccin inactivé mais alerte sur les difficultés majeures de sa mise en œuvre, compte-tenu des contraintes du système d'élevage mahorais (défaut d'identification et de recensement des animaux et des élevages) et de la nécessité de primo-vaccination en deux injections. L'agence ré-insiste sur (1) le rôle primordial du contrôle des importation illégales, (2) la prévention des contaminations humaines liées aux activités d'abattage de ruminants, (3) la lutte anti-vectorielle pour limiter l'exposition humaine en cas d'épizootie, (4) le renforcement de la surveillance animale, active et passive, (5) l'évaluation de l'innocuité des vaccins existants et le développement de nouveaux plus performants (Afssa, 2008c).

### *ii. Communication préventive*

En coordination avec la DASS (direction des affaires sanitaires et sociales) et les services vétérinaires, la préfecture a communiqué auprès de la population sur les mesures préventives de la contamination humaine par la FVR à travers différents médias (presse, radio, etc.)<sup>35</sup>. A partir de 2008 et de la connaissance de la circulation du virus à Mayotte, les recommandations portaient en particulier sur les pratiques d'abattage, la consommation de lait ou de viande crus et les piqûres de moustiques (cf. Figure 14). L'ARS (agence régionale de santé) a fait une campagne de sensibilisation sur l'élimination des gîtes à moustiques (Sissoko et al., 2009).

---

<sup>35</sup> <https://issuu.com/mayottemag/docs/mag7> (page 14, consulté le 10/06/2017)





par ailleurs obligatoire pour la recherche de la brucellose<sup>36</sup>. Le fonctionnement du SESAM et les résultats de la surveillance de la FVR en 2012-2013 seront précisés dans les **Chapitres I et II**.

Par ailleurs, la surveillance humaine des syndromes *dengue-like* et la surveillance hospitalière des formes graves ont été renforcées. Chaque cas humain déclenche une enquête vétérinaire et entomologique à proximité du domicile du patient.

#### *iv. Autres mesures*

Lorsqu'ils sont interceptés par les forces de l'ordre, les ruminants importés illégalement sont systématiquement et immédiatement euthanasiés et des prélèvements sont réalisés pour rechercher la FVR (Defernez et al., 2010).

Les cas animaux sont notifiés à l'OIE.

Des projets de recherche ont été entrepris : recherche des facteurs de risque de l'infection humaine et animale, description de la diversité et de la dynamique vectorielle, compréhension de la dynamique de la maladie, avec des financements notamment du Cirad, du ministère de la recherche, de l'ARS, pour des stages et des thèses dont celle-ci.

Un des points critiques resté non résolu est l'absence d'abattoir conforme à la réglementation pour les ruminants.

---

<sup>36</sup> Arrêté du 22 avril 2008 fixant les mesures techniques et administratives relatives à la prophylaxie collective et à la police sanitaire de la brucellose des bovinés, arrêté du 13 octobre 1998 fixant les mesures techniques et administratives relatives à la prophylaxie collective et à la police sanitaire de la brucellose ovine et caprine et arrêté du 10 octobre 2013 fixant les mesures techniques et administratives relatives à la prophylaxie collective et à la police sanitaire de la brucellose ovine et caprine

## CHAPITRE I : Incidence et impact de la FVR à Mayotte de 2010 à 2013 d'après le suivi de troupeaux de bovins sentinelles et la déclaration des avortements

### Résumé de la démarche :

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'incidence de la FVR à Mayotte sur la période 2012-2013 à partir d'un suivi longitudinal sérologique d'animaux sentinelles. Pour certains de ces animaux sentinelles, des prélèvements étaient également disponibles en sérothèque pour l'année 2010. Une mise en relation avec les données de déclaration d'avortements ainsi qu'un suivi zootechnique (production laitière, croissance) a aussi été réalisée pour évaluer l'impact clinique de la circulation de la FVR à Mayotte entre 2010 et 2013.

### Principaux résultats :

- **1075 animaux sont inclus dans cette étude** dont 586 ont eu au moins deux prélèvements consécutifs.

- **Le taux de séroprévalence diminue au cours du temps** : il est de 22,5% IC<sub>95%</sub>[18,1 ; 27,5] en 2010, 16,0% IC<sub>95%</sub>[13,0 ; 19,4] pour la campagne A, 12,9% IC<sub>95%</sub>[10,3 ; 16,1] pour la campagne B, 11,8% IC<sub>95%</sub>[9,0 ; 15,2] pour la campagne C et 9,6% IC<sub>95%</sub>[7,1 ; 12,8] pour la campagne D. Le taux de séroprévalence est plus élevé chez les éleveurs « modernes » que chez les « traditionnels » chez qui le taux de renouvellement a peut-être été plus faible au plus fort de la circulation du virus. Aucune différence géographique significative n'a été identifiée.

- Des changements de statut sérologique au cours du temps ont été observés chez 34 animaux : **18 séroconversions (séropositivations) et 27 séronégativations ont été observées**. Certains changements de statut à répétition des mêmes animaux laissent à penser que le taux d'anticorps chez des animaux ayant été exposés au virus peut passer sous la limite de détection du test ELISA pour des raisons sans doute physiologiques complexifiant l'interprétation des résultats au niveau individuel.

- **Le taux d'incidence observé est resté stable au cours du temps, entre 2 et 3 séroconversions pour 100 animaux-ans** :  $\tau_{I_{Obs} 2010A} = 2,9\%$  IC<sub>95%</sub>[1,0 ; 5,8],  $\tau_{I_{Obs} AB} = 2,3\%$  IC<sub>95%</sub>[0,5 ; 7,5],  $\tau_{I_{Obs} BC} = 2,0\%$  IC<sub>95%</sub>[0,5 ; 5,0],  $\tau_{I_{Obs} CD} = 2,1\%$  IC<sub>95%</sub>[0,4 ; 6,2].

- la prise en compte de l'effet troupeau et des performances du test ELISA (sensibilité, spécificité) diminue la précision des estimations faites. La prise en compte des performances du test pour l'estimation de l'incidence n'est pas triviale mais devrait être faite.

- **Le virus de la FVR n'a été détecté dans aucun des prélèvements réalisés dans le cadre de la déclaration officielle des avortements** chez les ruminants (n=41).

- L'impact de séroconversions vis-à-vis de la FVR sur la production laitière ou les courbes de croissance n'a pu être étudié que chez cinq animaux, ne permettant pas de conclure sur cette question.

**Les données de séroprévalence à Mayotte de 2004 à 2015 ont été valorisées dans un article collectif** : Métras, Raphaëlle, Lisa Cavalerie, Laure Dommergues, Philippe Mérot, W. John Edmunds, Matt J. Keeling, Catherine Cêtre-Sossah, et Eric Cardinale. 2016. « The Epidemiology of Rift Valley Fever in Mayotte: Insights and Perspectives from 11 Years of Data ». *PLOS Negl Trop Dis* 10 (6): e0004783. doi:10.1371/journal.pntd.0004783.



Photo 2. Contention et prise de sang (©Lisa Cavalerie)



Photo 3. En saison des pluies l'accès aux élevages est souvent rendu difficile (©Lisa Cavalerie)



Photo 4 : Découverte fortuite d'un avorton chez un éleveur du suivi sentinelle (©Lisa Cavalerie)

## I - Contexte de l'étude

La FVR a été détectée pour la première fois à Mayotte en 2007: d'abord chez un jeune enfant originaire de la Grande-Comore ayant un historique d'encéphalite sévère depuis 2 mois et transféré à Mayotte pour y être soigné. Puis dans le cadre de la surveillance des syndromes *dengue-like*, entre septembre 2007 et mai 2008, 10 cas humains autochtones ont été diagnostiqués comme infectés par le virus FVR (détection d'IgM spécifiques et/ou détection génomique). L'analyse d'échantillons d'animaux prélevés antérieurement provenant de la sérothèque du LVAD de Mayotte a ensuite montré la présence d'anticorps dirigés contre la FVR chez les bovins depuis 2004 au moins (Cêtre-Sossah et al., 2012b). C'est dans ce contexte que le SESAM a été créé en 2009 (Girard et al., 2011). Entre 2009 et 2011, 33 troupeaux sentinelles (198 animaux) ont été suivis par le SESAM, permettant de montrer une persistance de la circulation du virus à Mayotte avec un taux d'incidence maximal de 19% au dernier trimestre 2010 (Lernout et al., 2013), mais sans impact apparent, ce qui laissait la question de la mise en place de mesures de gestion de cette maladie (vaccination, sensibilisation, etc.) ouverte. En effet, la FVR est considérée en France comme un danger sanitaire de première catégorie (arrêté du 29 juillet 2013) dont la déclaration est obligatoire (anciennement appelée « maladie à déclaration obligatoire ») et doit faire l'objet d'un plan national d'intervention sanitaire d'urgence (décret n°2012-845 du 30 juin 2012).

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer si la circulation virale du virus FVR observée entre 2009 et 2011 a été maintenue en 2012-2013. En cas de persistance avérée, un suivi des avortements et d'autres indicateurs zootechniques doit permettre d'objectiver l'impact de la maladie sur le cheptel mahorais.

Pour répondre à cet objectif, une surveillance « active » aussi appelée « programmée » du cheptel mahorais a été remise en place en 2012 sur la base d'un réseau d'éleveurs sentinelles partiellement renouvelé par rapport à celui de la période 2009-2011. Des campagnes de prélèvements (prises de sang) ont été répétées aussi régulièrement que possible dans des élevages sentinelles afin de suivre le statut sérologique vis-à-vis de la FVR des animaux présents. La virémie des animaux infectés par le virus de la FVR est courte (de l'ordre de 0 à 7 jours) alors que les anticorps semblent persister plus longtemps (de dix jours à plusieurs mois) (Bird et al., 2009).

En parallèle de ce suivi sérologique, sur la même période 2012 – 2013, une surveillance des avortements (surveillance événementielle ou clinique) a été réalisée afin de mesurer l'impact de la circulation de la FVR dans les élevages mahorais. En s'appuyant sur l'obligation réglementaire de déclarer tout avortement sur les bovins, ovins et caprins en France, pour la recherche de la brucellose, les avortements déclarés ont fait l'objet de prélèvements supplémentaires pour une recherche de FVR par RT-PCR.

## II - Matériel et méthodes

### A. Séroprévalence et incidence sérologique de la FVR à Mayotte

#### 1. Population d'étude

Deux groupes d'élevages ont été étudiés :

- Le premier groupe est issu d'une enquête antérieure conduite par le Cirad en 2010 sur la typologie des élevages mahorais. Soixante-dix élevages ont été classés en trois types : les élevages professionnels, ici appelés « modernes », les élevages « traditionnels » et les élevages intermédiaires « en transition » (Tillard et al., 2013). Au cours de cette enquête, 33 élevages ont également fait l'objet de prélèvements sanguins conservés dans l'attente d'être analysés. Chacun de ces prélèvements a été testé pour la recherche d'anticorps contre le virus de la FVR. Les élevages enquêtés ont ensuite été suivis régulièrement pour leurs performances zootechniques (production laitière et croissance par pesée des jeunes animaux) dans le cadre du PAZEM (Programme d'appui zootechnique aux éleveurs mahorais). Deux années plus tard, en mai 2012, les vingt élevages encore inclus dans le programme de suivi zootechnique PAZEM ont alors été intégrés dans notre étude de suivi longitudinal de surveillance de la FVR. Ces élevages étaient composés de bovins, et éventuellement de petits ruminants s'ils étaient présents dans l'élevage. Les 13 élevages dont le suivi PAZEM avait été interrompu avant 2012 mais qui avaient fait l'objet de prélèvements en 2010 ont été recontactés pour effectuer une unique campagne complémentaire de prises de sang en 2013.
- Le deuxième groupe d'élevages suivis correspond à un échantillon de 30 élevages, tirés au sort à partir de la base de données de la CAPAM qui comptait 3178 éleveurs au 25/04/2012. Cette taille d'échantillon correspondait aux capacités maximales de suivi permises par les moyens humains disponibles. Pour assurer une meilleure représentativité géographique des élevages, l'échantillonnage a été stratifié en divisant Mayotte en cinq zones (cf. Figure 10 et Figure 15) : Nord (communes de M'tsangamouji, Acoua, Mtzamboro, Bandraboua et Koungou), Est (communes de Mamoudzou et Dembeni), Sud (communes de Bandrélé, Kani Kéli, Bouéni et Chirongui), Ouest (communes de Sada, Chiconi, Ouangani et Tsingoni) et Petite Terre (Communes de Dzaoudzi-Labattoir et Pamandzi). Sept élevages ont été choisis dans chaque zone de Grande Terre et deux ont été choisis en Petite Terre qui compte un nombre plus limité d'élevages (cf. Figure 10). Ces élevages ont été classés en trois catégories : « modernes », « traditionnels » ou « en transition » selon les critères de Tillard (Tillard et al., 2013).

Une première campagne de prélèvements sanguins, appelée ici « Campagne 2010 », a été réalisée en 2010, uniquement pour le premier groupe d'éleveurs. A partir de mai 2012, des visites trimestrielles accompagnées de prélèvements sanguins ont été réalisées dans l'ensemble des élevages. A chaque visite, tous les ruminants présents dans l'élevage et ayant passé la période d'immunité colostrale (soit environ 6 mois pour les bovins et 3 mois pour les petits ruminants) ont été prélevés quel que soit leur statut sérologique antérieur. Les campagnes de prélèvements ont été identifiées par une lettre par ordre alphabétique : « campagne A », « campagne B », « campagne C » et « campagne D », correspondant à l'ordre chronologique.

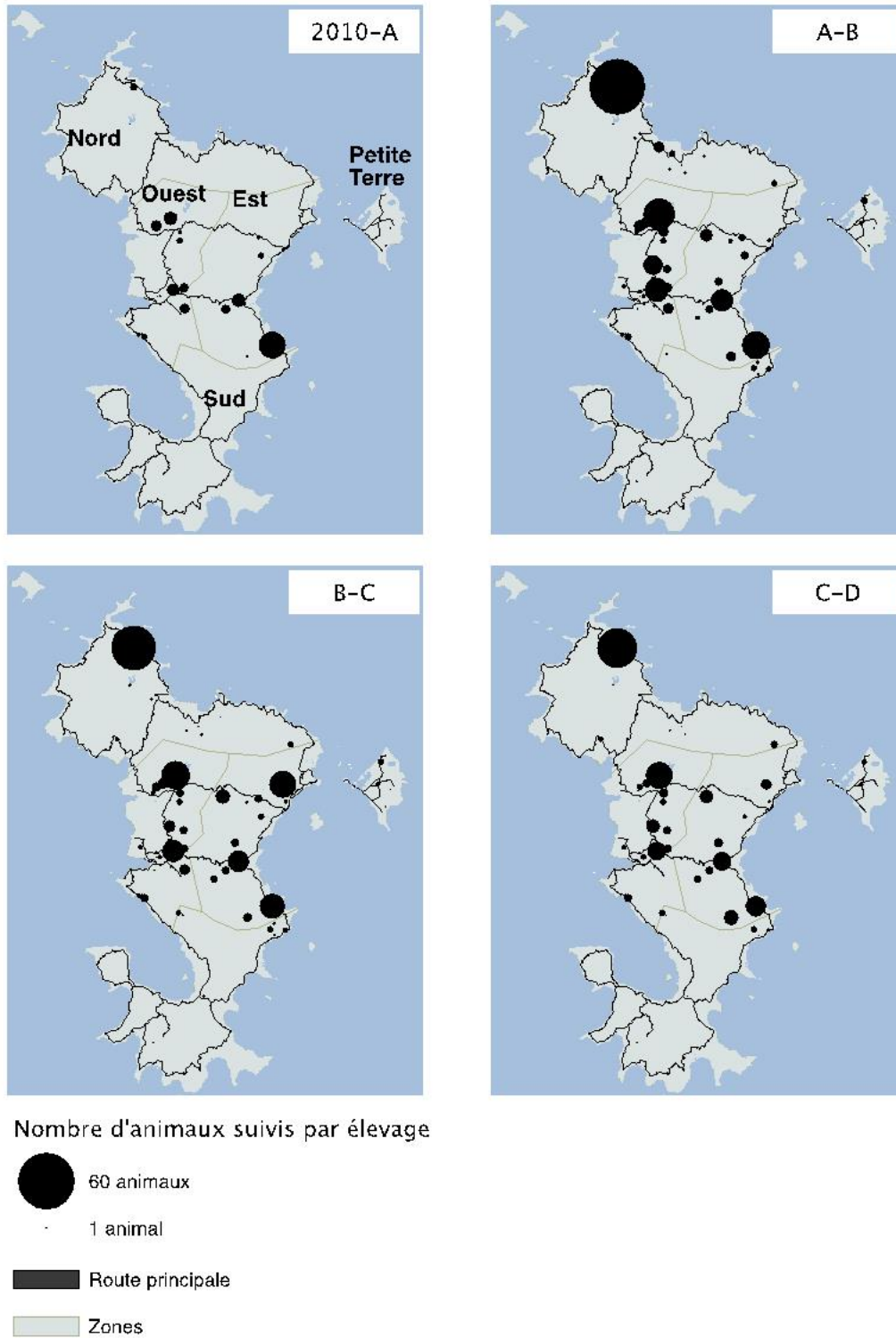


Figure 15. Répartition géographique des animaux suivis par élevage et par période (entre deux campagnes de prélèvements sanguins) : (I) Période 2010-A, (II) Période A-B, (III), Période B-C et (IV) Période C-D

## 2. Méthode d'analyse sérologique en laboratoire

L'ensemble des prélèvements a été analysé au laboratoire du LVAD, à Mamoudzou, ou au Cirad (UMR CMAEE, CYROI, la Réunion) par la technique ELISA grâce au kit de compétition *ID Screen® Rift Valley Fever Competition Multi-species* (Comtet, 2010). Les échantillons qui ont fait l'objet d'un résultat trouvé douteux ont été analysés une seconde fois. Si le résultat était à nouveau douteux, ils étaient finalement considérés comme négatifs.

## 3. Taux de séroprévalence

### a. Taux de séroprévalence observé globalement, par campagne et par strate (type d'élevage ou zone géographique)

A chaque campagne « X » de prises de sang, le taux de séroprévalence observé ( $p_{obs X}$ ) a été calculé par type d'élevage et par zone géographique. Il correspond au nombre d'animaux pour lesquels la présence d'anticorps dirigés contre le virus de la FVR a été détectée par le test ELISA ( $n+$ ) rapporté au nombre d'animaux ( $n_X$ ) testés lors de la campagne de prélèvements « X » :

$$p_{obs X} = \frac{n+}{n_X} \quad (Eq1)$$

L'intervalle de confiance à 95% (IC<sub>95%</sub>) du taux de séroprévalence observé a été calculé grâce à la fonction *prop.test* du logiciel R (R Core Team, 2015).

Le taux de séroprévalence observé a été décrit par type d'élevage (« traditionnel », « en transition », et « moderne ») et par zone géographique (Nord, Sud, Est, Ouest et Petite Terre).

### b. Taux de séroprévalence « réel » tenant compte de la sensibilité et de la spécificité du test sérologique

Le kit de diagnostic ELISA utilisé lors de cette étude a été décrit par Comtet (Comtet, 2010) comme ayant une sensibilité ( $Se$ ) et une spécificité ( $Sp$ ) de 100%. Compte-tenu du nombre d'échantillons testés, un intervalle de confiance pour les valeurs de sensibilité et spécificité est donné par Comtet (Comtet, 2010), respectivement [91,24% ; 100%] et [99,54% ; 100%]. Par ailleurs, un essai inter-laboratoire de ce kit de détection ELISA au niveau européen (Kortekaas et al., 2013) permet de conforter le bon niveau de sensibilité de ce kit avec une sensibilité minimale de diagnostic observée de 91% dans un laboratoire, contre 98 et 100% dans les cinq autres laboratoires participants. La spécificité semble elle excellente, elle a été à nouveau de 100% dans les 6 laboratoires. Les valeurs extrêmes observées de performances de diagnostic par le test ELISA ont été prises en compte pour corriger le taux de séroprévalence observé et calculer ce que nous appellerons ici le taux de séroprévalence « réel », comme défini par *Dohoo et al.* et l'intervalle de confiance à 95% (Dohoo et al., 2009).

Le taux de séroprévalence réel ( $p_R$ ) est déterminé selon la formule suivante (Dohoo et al., 2009) :

$$p_R = \frac{p_{obs} + Sp - 1}{Se + Sp - 1} \quad (Eq2)$$

### c. Correction de l'intervalle de confiance du taux de séroprévalence observé pour tenir compte de « l'effet troupeau » de l'échantillonnage

L'échantillonnage des animaux prélevés à chaque campagne n'était pas parfaitement aléatoire : lorsqu'un cheptel était choisi, tous les animaux remplissant les conditions d'âge et de manipulation faisaient l'objet d'une prise de sang. Cette méthode correspond à un échantillonnage en grappe et peut affecter la précision de l'estimation de la séroprévalence par un « effet troupeau » ou « cluster ». L'importance de l'influence de l'échantillonnage, appelée « Design effect » (*Deff*), a été estimée en utilisant la fonction « svymean » du package « survey » (Lumley, 2014), à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2015).

## 1. Taux d'incidence

### a. Taux d'incidence observé par campagne et par strate

Entre deux campagnes de prélèvements consécutive X et Y, le taux d'incidence observé ( $\tau_{I_{obs}XY}$ ) de la FVR a été estimé.

Le taux d'incidence correspond au nombre de nouveaux cas d'une maladie pendant une période donnée rapporté au nombre « d'individus-unité de temps » à risque inclus dans l'étude (Dohoo et al., 2009).

Dans cette étude, un nouveau cas est un animal qui est infecté par le virus de la FVR au cours de la période de suivi. Pour identifier ces nouvelles infections, un suivi indirect de la présence d'anticorps dirigés contre le virus de la FVR a été choisi. En effet, la durée de la virémie induite par le virus FVR est courte chez les animaux (moins d'une semaine d'après Bird *et al.* 2009) alors que les anticorps de type IgG produits par les animaux infectés, détectables par un test ELISA, apparaissent environ dix jours après le début de l'infection et il est supposé que ces anticorps persistent plusieurs mois voire toute la vie de l'animal (Bird et al., 2009).

Entre deux campagnes de prélèvements sanguins, un nouveau cas est donc défini comme une séroconversion, c'est-à-dire un animal ayant un résultat négatif au test ELISA à la première campagne suivi d'un résultat séropositif au test ELISA lors de la seconde campagne.

Les « individus-unités de temps » à risque sont ici des « animaux-ans » suivis sur une période donnée, c'est à dire ayant eu des prises de sang lors des deux campagnes de prélèvements encadrant la période étudiée. Un animal-an est un animal qui a été prélevé deux fois à 365 jours d'écart. Par exemple, un animal prélevé le 1<sup>er</sup> janvier 2012 et le 4 avril 2012, c'est-à-dire à 105 jours d'intervalle correspond à environ 0,29 animal-an. Pour être considérés à risque, il faut que les « animaux-an » soient naïfs au début de la période, c'est à dire séronégatifs lors de la campagne de prise de sang correspondant au début de la période d'étude.

Le taux d'incidence observé ( $\tau_{I_{obs}}$ ) sur une période XY correspond finalement au nombre de séroconversions observées entre deux campagnes X et Y ( $SC_{obs}$ ) rapporté au nombre d'animaux-an à risque pouvant être inclus dans l'étude sur la période XY ( $n$ ) (Eq2)

$$\tau_{I_{obs}XY} = \frac{\text{nombre de séroconversions observées } (SC_{obs}) \text{ sur la période } XY}{\text{nombre d'animaux-an à risque suivis sur cette période } (n)} \quad (Eq3)$$



Certains animaux ont été prélevés lors de deux campagnes mais ont été « absents » lors d'une campagne intermédiaire. Cela est principalement dû aux conditions zootechniques mahoraises, en effet il est parfois impossible de prélever le jour de la visite certains animaux laissés en semi-divagation. Ces animaux absents transitoirement ont été tout de même inclus dans le nombre d'animaux-an suivis, et s'ils ont séroconverti, la probabilité de séroconversion est considérée comme uniforme sur la période, entre la date de prélèvement à  $t_i$  et la date de prélèvement à  $t_j$ .

Des « séronégativations » ayant été observées (animaux avec un résultat initial positif au test ELISA suivi d'un résultat négatif au test ELISA lors d'une prise de sang ultérieure), le taux de séronégativations observé ( $\tau_{Sobs}$ ) a été défini, de façon similaire, comme le nombre de séronégativations observées ( $SN_{obs}$ ), rapporté au nombre d'animaux-ans à risque de séronégativations inclus dans le suivi ( $n'$ ). Pour être à risque de séronégativations, les animaux-ans doivent être séropositifs au début de la période d'étude, contrairement à ceux à risque de séroconversion.

Le taux d'incidence observé a été décrit par type d'élevage (« traditionnel », « en transition », et « moderne ») et par zone géographique (Nord, Sud, Est, Ouest et Petite Terre).

L'intervalle de confiance à 95% du taux d'incidence observé a été calculé grâce à la fonction *prop.test* du logiciel R (R Core Team, 2015) en utilisant la loi de poisson.

#### ***b. Correction de l'intervalle de confiance du taux d'incidence observé pour tenir compte de « l'effet troupeau » de l'échantillonnage***

Pour tenir compte de l'échantillonnage en grappe qui peut affecter la précision de l'estimation du taux d'incidence observé, les intervalles de confiance du taux d'incidence observé pour chaque période ont été estimés en utilisant la fonction « svyglm » du package « survey » (Lumley, 2014), avec une loi de Poisson, à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2015).

## **B. Impacts de la FVR**

Dans le but de mieux mesurer l'impact de la FVR sur les ruminants à Mayotte, des détections génomiques du virus FVR par la méthode de RT-PCR (Bird et al., 2007b) ont été systématiquement réalisées sur les avortements officiellement déclarés aux services vétérinaires à partir de mai 2012, date de redémarrage de la surveillance sentinelle et conformément à la réglementation en vigueur sur la surveillance de la brucellose. Si l'élevage dans lequel un avortement a été déclaré faisait partie des élevages du suivi sentinelle, il a été recherché si l'animal qui a avorté et/ou ses congénères avaient séroconverti à la même période.

### **1. Surveillance évènementielle des avortements : déclaration obligatoire des avortements et recherche de la FVR par RT-PCR**

Le SESAM s'est appuyé sur le système national de déclaration obligatoire des avortements<sup>37</sup>. A chaque déclaration d'avortement, le vétérinaire sanitaire doit faire une visite dans l'élevage et faire

---

<sup>37</sup> Arrêté du 22 avril 2008 fixant les mesures techniques et administratives relatives à la prophylaxie collective et à la police sanitaire de la brucellose des bovins

Arrêté du 13 octobre 1998 fixant les mesures techniques et administratives relatives à la prophylaxie collective et à la police sanitaire de la brucellose ovine et caprine abrogé depuis par l'arrêté du 10 octobre 2013 fixant les

une prise de sang sur l'animal ayant avorté pour la recherche de brucellose. Dans le cadre du SESAM, il a été demandé qu'un échantillon supplémentaire (sang de la mère et si possible avorton) soit effectué et transmis au laboratoire du Cirad à La Réunion afin de réaliser une détection génomique du virus de la FVR par RT-PCR. Ces échantillons ont été conservés à -80°C à Mayotte avant d'être envoyés sous azote liquide une à deux fois par an à La Réunion pour y être analysés. Les éleveurs inclus dans le suivi sentinelle ont été plus particulièrement sensibilisés à la déclaration obligatoire des avortements notamment à travers une demande d'information active sur l'occurrence d'éventuels avortements à chaque campagne de prélèvements.

## **2. Comparaison des données de séroconversions avec les données de production laitières et les pesées réalisées par le projet PAZEM dans le premier groupe d'éleveurs**

Le premier groupe d'éleveurs inclus dans le suivi sérologique a également fait l'objet d'un suivi zootechnique régulier dans le cadre du PAZEM. Ce suivi s'est déroulé de juillet 2009 à décembre 2013. Des visites mensuelles dans les élevages ont permis de collecter différents types d'informations (Tillard, 2013) :

- inventaire des animaux, recensement des entrées/sorties d'animaux et leur motif (naissance, mort, achat, etc.) ;
- pesée des jeunes de moins de deux ans tous les mois ;
- pesée des adultes à deux reprises : au démarrage et six mois après le début du suivi ;
- mesures de production laitière dans cinq élevages à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2012.

Ce suivi a débuté avec trente élevages, puis certains élevages sont sortis du suivi fin 2010, d'autres ont été ajoutés début 2012.

Les pesées mensuelles des animaux ont permis d'obtenir pour chaque type génétique (zébu, croisé et montbéliarde) des poids à âge type en supposant que le gain moyen quotidien était linéaire entre deux pesées. Les âges-types étaient les suivants : 30j, 90j, 180j et 360j.

La production laitière a été estimée une fois par mois dans cinq élevages en veillant à écarter le veau de la mère et à respecter un intervalle entre deux traites de 24h.

Pour tous les animaux ayant séroconverti, il a été recherché si des données zootechniques (pesées ou production laitière) étaient disponibles. Si au moins une pesée a été retrouvée dans la base de données, celle-ci a été reportée sur le graphique représentant les poids à âge type des animaux de même type génétique. Si au moins une mesure de production laitière a été retrouvée, la (les) lactations de la vache a (ont) été représentée(s) sur un graphique avec les productions laitières des autres vaches de même type génétique.

Les dates de séroconversions ont été ajoutées sur les graphiques afin de détecter visuellement un éventuel lien entre séroconversion et anomalie zootechnique.

---

mesures techniques et administratives relatives à la prophylaxie collective et à la police sanitaire de la brucellose ovine et caprine. Pour les ovins et caprins, seules les séries d'avortements (au moins trois en sept jours ou moins) font l'objet désormais d'investigations obligatoires.

### III - Résultats

#### A. Séroprévalence et incidence sérologique de la FVR à Mayotte

##### 1. Population d'étude

Soixante-trois élevages ont fait l'objet de prises de sang, dans le cadre du suivi sentinelle avec un total de 1075 animaux prélevés (813 bovins et 262 petits ruminants). Les prélèvements ont eu lieu du 14 mai au 10 juillet 2012 (appelés campagne « A »), du 23 août au 29 décembre 2012 (campagne « B »), du 6 février au 12 août 2013 (campagne « C »), et du 9 septembre 2013 au 12 janvier 2014 (campagne « D »). Au total, 2288 prises de sang ont été réalisées.

Cinquante-sept élevages ont pu avoir au moins deux campagnes de prélèvements sur au moins un animal. Parmi ces élevages, on trouvait 12 élevages « modernes », 33 « traditionnels » et 12 « en transition » ; 10 élevages étaient dans la région Nord, 12 à l'Est, 23 à l'Ouest, 9 au Sud et 4 en Petite Terre (cf. Figure 15).

Sur les 1075 animaux inclus dans cette étude, 586 (dont 446 bovins) ont été prélevés au moins deux fois et ont donc pu être inclus dans le calcul de l'incidence. Ces 586 animaux représentent un équivalent de 912 animaux-an. Les animaux qui n'ont eu qu'une prise de sang sont généralement sortis de l'élevage morts ou vendus, souvent après la campagne 2010, ou bien ils sont nés en cours de suivi et ont été intégrés à la fin du suivi.

##### 2. Taux de séroprévalence

###### a. Taux de séroprévalence « observé »

Pour la campagne de prélèvements identifiée « Campagne 2010 », 325 échantillons de sérum pour lesquels le numéro de l'animal était identifiable ont été retrouvés et analysés par ELISA (73 positifs et 252 négatifs ( $p_{\text{obs } 2010} = 22,5\%$  IC<sub>95%</sub>[18,1 ; 27,5])). Lors de la campagne de prises de sang A, 85 échantillons étaient positifs sur 533 ( $p_{\text{obs } A} = 16,0\%$  IC<sub>95%</sub>[13,0 ; 19,4]) ; lors de la campagne B, 69 échantillons étaient positifs sur 534 ( $p_{\text{obs } B} = 12,9\%$  IC<sub>95%</sub>[10,3 ; 16,1]) ; lors de la campagne C, 53 étaient positifs sur 449 ( $p_{\text{obs } C} = 11,8\%$  IC<sub>95%</sub>[9,0 ; 15,2]) ; enfin lors de la campagne D, 43 étaient positifs sur 447 ( $p_{\text{obs } D} = 9,6\%$  IC<sub>95%</sub>[7,1 ; 12,8]). Les résultats correspondants sont présentés dans la Figure 16 ci-dessous.

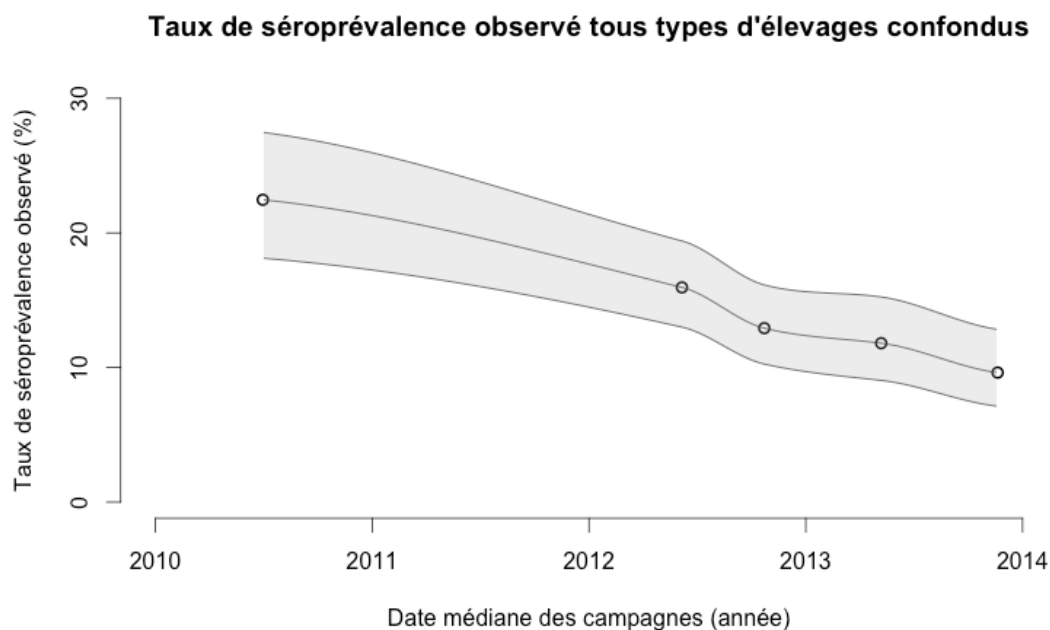


Figure 16. Taux de séroprévalence observé tous types d'élevages confondus (et IC 95%)

Le Tableau 2 présente le nombre d'échantillons prélevés au cours des différentes campagnes, le nombre d'animaux séropositifs ainsi que les taux de séroprévalence observés par type d'élevage (moderne, en transition, traditionnel). La Figure 17A présente les taux de séroprévalence observés et leur intervalle de confiance par type d'élevage. Les taux de séroprévalence diminuent au cours du temps dans tous les types d'élevages. La diminution entre les campagnes 2010 et D est significative pour les élevages modernes et traditionnels. Globalement, le taux de séroprévalence observé est plus élevé dans les élevages traditionnels que dans les élevages en transition qui ont eux-mêmes un taux de séroprévalence plus élevé que les élevages modernes, à l'exception de la campagne D où le taux de prévalence observé chez les éleveurs en transition est plus élevé que chez les éleveurs traditionnels (14% versus 13%). La différence n'est cependant significative qu'entre les élevages traditionnels et modernes et ce, pour les campagnes A et C.

Tableau 2. Taux de séroprévalence observé (ELISA IgG) par campagne de prélèvements (2010, A, B, C, D) et par type d'élevage

		Campagne de prélèvement				
		2010	A	B	C	D
Types d'élevage	Modernes	17% [12 ; 23] <i>n</i> + =30 <i>n</i> <sub>X</sub> =181	12% [8 ; 17] <i>n</i> + =33 <i>n</i> <sub>X</sub> =276	8% [5 ; 12] <i>n</i> + =19 <i>n</i> <sub>X</sub> =244	7% [4 ; 12] <i>n</i> + =13 <i>n</i> <sub>X</sub> =189	5% [3 ; 9] <i>n</i> + =11 <i>n</i> <sub>X</sub> =209
	En transition	25% [15 ; 40] <i>n</i> + =13 <i>n</i> <sub>X</sub> =51	19% [13 ; 26] <i>n</i> + = 7 <i>n</i> <sub>X</sub> =144	13% [8 ; 19] <i>n</i> + =23 <i>n</i> <sub>X</sub> =179	14% [8 ; 22] <i>n</i> + =18 <i>n</i> <sub>X</sub> =127	14% [9 ; 21] <i>n</i> + =19 <i>n</i> <sub>X</sub> =139
	Traditionnels	32% [23 ; 43] <i>n</i> + =30 <i>n</i> <sub>X</sub> =93	22% [15 ; 31] <i>n</i> + =25 <i>n</i> <sub>X</sub> =113	24% [17 ; 34] <i>n</i> + =27 <i>n</i> <sub>X</sub> =111	17% [11 ; 24] <i>n</i> + =22 <i>n</i> <sub>X</sub> =133	13% [7 ; 22] <i>n</i> + =13 <i>n</i> <sub>X</sub> =99
TOTAL		22% [18 ; 27] <i>n</i> + =73 <i>n</i> <sub>X</sub> =325	16% [13 ; 19] <i>n</i> + =85 <i>n</i> <sub>X</sub> =533	13% [10 ; 16] <i>n</i> + =69 <i>n</i> <sub>X</sub> =534	12% [9 ; 15] <i>n</i> + =53 <i>n</i> <sub>X</sub> =449	10% [7 ; 13] <i>n</i> + =43 <i>n</i> <sub>X</sub> =447
Taux de séroprévalence observé [IC 95%] <i>n</i> + = nb d'animaux positifs ; <i>n</i> <sub>X</sub> = nb total d'animaux testés						

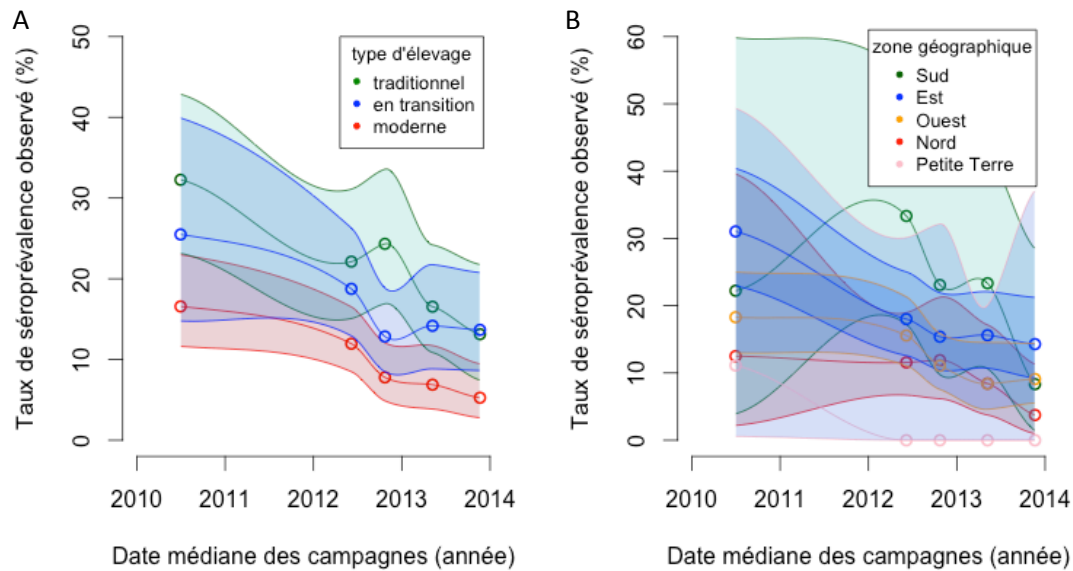


Figure 17. Taux de séroprévalence observé par type d'élevage (A) et par zone géographique (B) (et IC 95%)

Le Tableau 3, la Figure 17B et la Figure 18 présentent les taux de séroprévalence observés par zone géographique lors de chacune des cinq campagnes de prélèvements. En ne tenant pas compte du taux de séroprévalence observé dans la zone Sud en 2010, reposant sur un très petit nombre d'animaux prélevés (n=9), on observe la même tendance globale de diminution du taux de séropositivité dans toutes les zones au fil des campagnes, mais les différences ne sont pas significatives. Les taux de séroprévalence sont maximaux à l'Est, en campagne 2010 (31% IC<sub>95%</sub>[23 ; 40]) et D (14% IC<sub>95%</sub>[9 ; 21]) et au Sud lors des campagnes A (33% IC<sub>95%</sub>[15 ; 51]), B (23% IC<sub>95%</sub>[10 ; 44]) et C (23% IC<sub>95%</sub>[11 ; 43]). Cependant, aucune différence significative n'est identifiée entre les zones pour une campagne donnée. Un seul animal séropositif a été détecté sur Petite Terre lors de la campagne de 2010. Cet animal, prélevé une seule fois, y serait né en 1999 et aucun mouvement de sortie d'exploitation n'est enregistré le concernant.

Tableau 3. Taux de séroprévalence observé (ELISA IgG) et intervalle de confiance à 95% par campagne de prélèvements (2010, A, B, C, D) et par zone géographique

		Campagne de prélèvement				
		2010	A	B	C	D
Zone d'élevage	Nord	12% [2 ; 40] n+=2 n <sub>X</sub> =16	12% [7 ; 19] n+=14 n <sub>X</sub> =121	12% [6 ; 21] n+=10 n <sub>X</sub> =84	8% [4 ; 17] n+=7 n <sub>X</sub> =83	4% [1 ; 11] n+=3 n <sub>X</sub> =80
	Sud	22% [4 ; 60] n+=2 n <sub>X</sub> =9	33% [17 ; 54] n+=9 n <sub>X</sub> =27	23% [10 ; 44] n+=6 n <sub>X</sub> =26	23% [11 ; 43] n+=7 n <sub>X</sub> =30	8% [1 ; 28] n+=2 n <sub>X</sub> =24
	Est	31% [23 ; 40] n+=36 n <sub>X</sub> =116	18% [13 ; 25] n+=29 n <sub>X</sub> =161	15% [10 ; 22] n+=26 n <sub>X</sub> =169	16% [11 ; 22] n+=27 n <sub>X</sub> =173	14% [9 ; 21] n+=21 n <sub>X</sub> =147
	Ouest	18% [13 ; 25] n+=32 n <sub>X</sub> =175	16% [11 ; 21] n+=33 n <sub>X</sub> =212	11% [8 ; 16] n+=27 n <sub>X</sub> =244	8% [5 ; 15] n+=12 n <sub>X</sub> =143	9% [5 ; 14] n+=17 n <sub>X</sub> =187
	Petite Terre	11% [1 ; 50] n+=1 n <sub>X</sub> =9	0% [0 ; 30] n+=0 n <sub>X</sub> =12	0% [0 ; 32] n+=0 n <sub>X</sub> =11	0% [0 ; 20] n+=0 n <sub>X</sub> =20	0% [0 ; 37] n+=0 n <sub>X</sub> =9
TOTAL		22% [18 ; 27] n+=73 n <sub>X</sub> =325	16% [13 ; 19] n+=85 n <sub>X</sub> =533	13% [10 ; 16] n+=69 n <sub>X</sub> =534	12% [9 ; 15] n+=53 n <sub>X</sub> =449	10% [7 ; 13] n+=43 n <sub>X</sub> =447
Taux de séroprévalence observé [IC 95%] n+ = nb d'animaux positifs ; n <sub>X</sub> = nb total d'animaux testés						

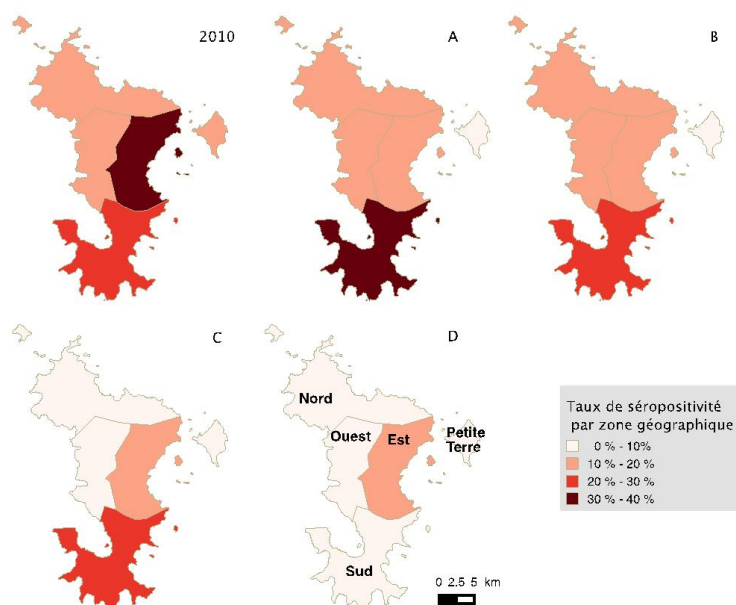


Figure 18. Taux de séroprévalence observé par zone géographique (Nord, Sud, Est, Ouest, Petite Terre) et par campagne de prélèvement (2010, A, B, C, D)

*b. Taux de séroprévalence « réel » tenant compte de la sensibilité et de la spécificité du test sérologique*

Les taux de séroprévalence « réel » tenant compte des valeurs extrêmes de la sensibilité et de la spécificité du test ELISA sont présentés pour chaque campagne dans le Tableau 4. L'écart entre les valeurs observées et « réelles » sont distantes d'au plus 2,3% (pour la borne supérieure de l'IC<sub>95%</sub> pour la campagne « 2010 »). La combinaison Se=91% et Sp=99,54% donne des valeurs de taux de séroprévalence intermédiaires entre le taux de prévalence observé et les valeurs extrêmes décrites dans le Tableau 4.

Tableau 4. Taux de séroprévalence réel ( $p_R$ ) en fonction des valeurs extrêmes de la sensibilité (Se) et la spécificité (Sp) du test ELISA

	Campagne				
	2010	A	B	C	D
$p_{obs}$ [IC <sub>95%</sub> ]	22% [18 ; 27]	16% [13 ; 19]	13% [10 ; 16]	12% [9 ; 15]	10% [7 ; 13]
$p_R$ (Se=91% et Sp = 100%)	25% [20 ; 30]	17% [14 ; 21]	14% [11 ; 18]	13% [10 ; 17]	11% [8 ; 13]
$p_R$ (Sp=99,54% et Se = 100%)	22% [18 ; 27]	16% [13 ; 19]	13% [10 ; 16]	11% [9 ; 15]	9% [7 ; 12]

**c. Correction de l'intervalle de confiance du taux de séroprévalence observé pour tenir compte de « l'effet troupeau »**

L'effet de l'échantillonnage en grappe est présenté dans le Tableau 5. L'effet le plus important est celui observé pour la campagne de 2010 ( $Deff = 4,2$ ) dégradant la qualité de la précision absolue<sup>38</sup> de l'estimation qui passe de +/- 5% à +/- 10% environ. L'effet le plus faible est celui de la campagne B ( $Deff = 1,8$ ) diminuant la qualité de la précision absolue de l'intervalle de confiance qui passe de 25% à 30% environ.

Tableau 5. Prise en compte du *Design effect* dans le calcul de l'intervalle de confiance du taux de prévalence observé

	Campagne				
	2010	A	B	C	D
$p_{obs}$ [IC 95%]	22% [18 ; 27]	16% [13 ; 19]	13% [10 ; 16]	12% [9 ; 15]	10% [7 ; 13]
Nb d'élevages	27	49	48	54	43
<i>Design effect</i>	4,2	2,6	1,8	2,7	2,2
IC 95% corrigé par l'échantillonnage en grappe	[13 ; 32]	[11 ; 21]	[9 ; 17]	[7 ; 17]	[6 ; 14]

### 3. Taux d'incidence

**a. Taux d'incidence « observé »**

Parmi les 586 animaux qui ont été prélevés au moins deux fois dans cette étude, 34 animaux ont connu un changement de statut sérologique au cours du suivi. Au total, 18 séroconversions (dans 13 élevages différents) et 27 séronégativations (dans 20 élevages différents) ont été observées.

Le détail des résultats sérologiques de chaque prélèvement des 34 animaux concernés est présenté en **ANNEXE I** :

- 8 animaux ont eu une séroconversion (passage de négatif à positif),
- 17 animaux ont eu une séronégativations (passage de positif à négatif)
- et 9 animaux ont eu deux changements de statut ou plus : négatif puis positif puis négatif pour 6 animaux, positif puis négatif puis positif pour 2 animaux et enfin 1 animal a changé de statut à chacune de ses prises de sang : négatif, positif, négatif, positif, négatif. Concernant ces trois derniers animaux, de tels changements successifs de statut sérologiques sont inattendus, compte-tenu de la cinétique des anticorps contre le virus de la FVR décrite jusqu'ici.

Ces résultats sont utilisés de façon brute pour le calcul du taux d'incidence et l'interprétation de cette situation sera développée en discussion.

Les taux d'incidence sont présentés pour chaque période du suivi, chaque type d'élevage et zone géographique dans le Tableau 6 et le

<sup>38</sup> Précision absolue = Mesure de la dispersion des valeurs d'une estimation autour de sa valeur moyenne

Tableau 7. Au total, 18 séroconversions chez 17 animaux ont été observées (16 bovins et un caprin). Sur la période entre les campagnes 2010 et A, 7,8 séroconversions ont été observées pour 270 animaux-an à risque inclus dans le suivi, ce qui correspond à un taux d'incidence observé de 2,9 séroconversions pour 100 animaux-ans à risque soit  $\tau_{I_{obs} 2010A} = 2,9 \% \text{ IC}_{95\%} [1,0 ; 5,8]$ . Sur les périodes AB, BC et CD ont été observées respectivement 3, 2, 4 et 3 séroconversions. Ces nombres décimaux sont expliqués par l'absence de prélèvement à des campagnes intermédiaires pour certains animaux qui ont séroconverti entre des campagnes distantes empêchant de déterminer avec certitude à quelle période, ils ont séroconverti. Le taux d'incidence observé est resté stable sur les périodes AB, BC et CD, avec respectivement  $\tau_{I_{obs} AB} = 2,3\% [0,5 ; 7,5]$ ,  $\tau_{I_{obs} BC} = 2,0\% [0,5 ; 5,0]$ ,  $\tau_{I_{obs} CD} = 2,1\% [0,4 ; 6,2]$ .

La répartition des animaux-an à risque suivis et des séroconversions observées en fonction de la typologie des élevages est présentée dans le Tableau 6. Des séroconversions ont été observées dans tous les types d'élevages : 6 en élevage moderne, 4 en élevage en transition et 8 en élevages traditionnels. Aucune différence significative entre les taux d'incidence observés dans les différents types d'élevage ou au cours du temps n'a été observée.

Tableau 6. Taux d'incidence observé (séroconversions) intervalle de confiance à 95% par période et par type d'élevage

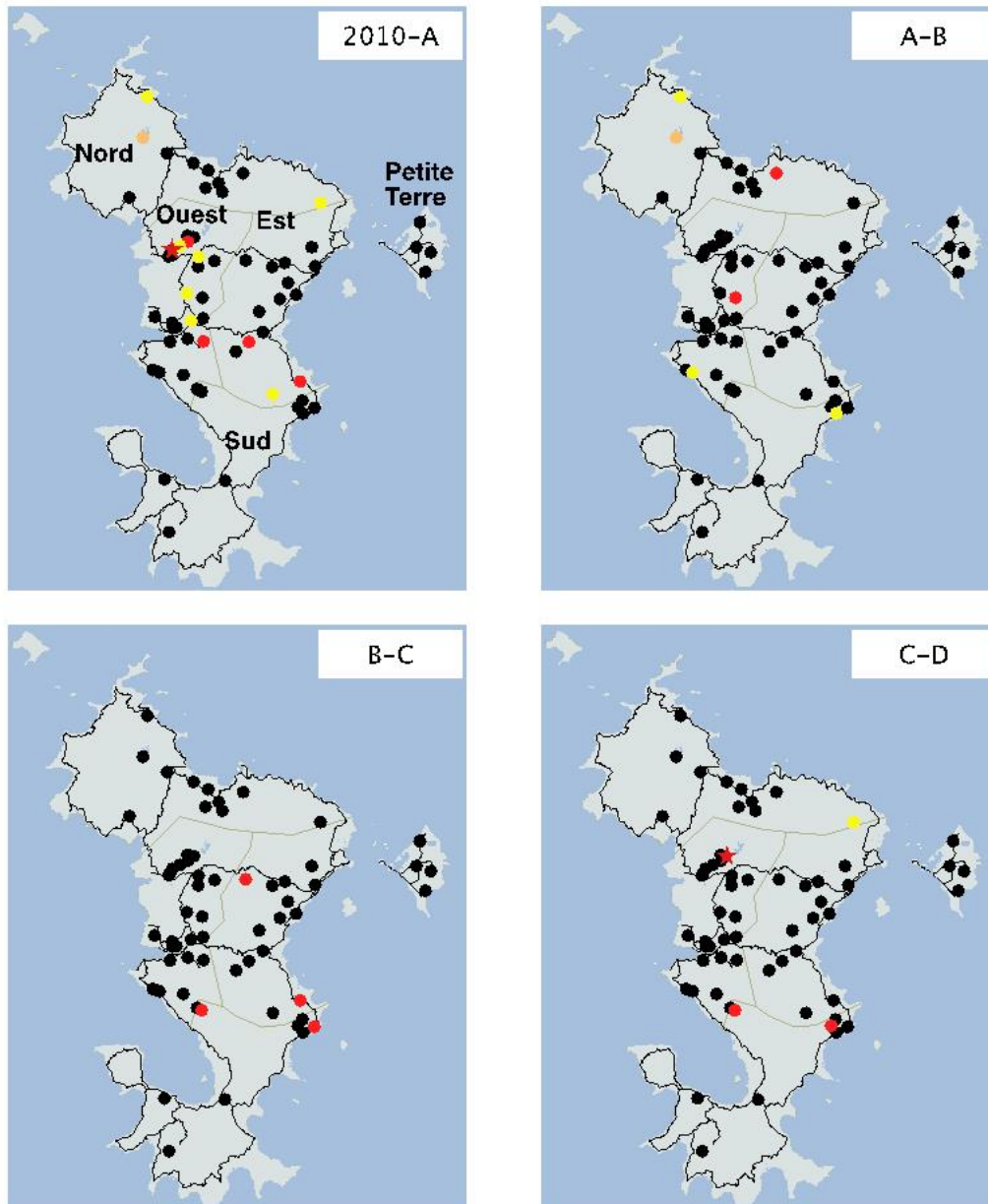
		Période d'étude			
		2010-A	A-B	B-C	C-D
Types d'élevage	Modernes	3% [1 ; 7] <i>SC<sub>obs</sub></i> =5 <i>n</i> =177	0% [0 ; 5] <i>SC<sub>obs</sub></i> =0 <i>n</i> =70	1% [0 ; 6] <i>SC<sub>obs</sub></i> =1 <i>n</i> =101	0% [0 ; 6] <i>SC<sub>obs</sub></i> =0 <i>n</i> =59
	En transition	4% [0 ; 13] <i>SC<sub>obs</sub></i> =2 <i>n</i> =57	0% [0 ; 11] <i>SC<sub>obs</sub></i> =0 <i>n</i> =34	1% [0 ; 8] <i>SC<sub>obs</sub></i> =1 <i>n</i> =69	2% [0 ; 12] <i>SC<sub>obs</sub></i> =1 <i>n</i> =45
	Traditionnels	2% [0 ; 15] <i>SC<sub>obs</sub></i> =0,8 <i>n</i> =37	10% [2 ; 32] <i>SC<sub>obs</sub></i> =3,2 <i>n</i> =32	6% [1 ; 21] <i>SC<sub>obs</sub></i> =2 <i>n</i> =34	5% [1 ; 20] <i>SC<sub>obs</sub></i> =2 <i>n</i> =37
TOTAL		2,9% [1,0 ; 5,8] <i>SC<sub>obs</sub></i> =7,8 <i>n</i> =270	2,3% [0,5 ; 7,5] <i>SC<sub>obs</sub></i> =3,2 <i>n</i> =136	2,0% [0,5 ; 5,0] <i>SC<sub>obs</sub></i> =4 <i>n</i> =204	2,1% [0,4 ; 6,2] <i>SC<sub>obs</sub></i> =3 <i>n</i> =141
Taux d'incidence observé par période en nombre de séroconversion par animal-an [IC <sub>95%</sub> ] <i>SC<sub>obs</sub></i> = nb de séroconversions observées ; <i>n</i> = nb d'animaux-an à risque					



Le Tableau 7 et la Figure 19 présentent la distribution géographique des élevages où des séroconversions ont été observées. Des séroconversions ont été observées dans toutes les zones sauf en Petite Terre, avec un maximum de six séroconversions dans chacune des zones Est et Ouest. Quatre séroconversions ont été observées au Sud et deux au Nord. Aucune différence significative entre les taux d'incidence observés dans les différents types d'élevage ou au cours du temps n'a été identifiée.

Tableau 7. Taux d'incidence observé (séroconversions) intervalle de confiance à 95% par période et par zone géographique d'élevage

		Période d'étude			
		2010-A	A-B	B-C	C-D
Zone d'élevage	Nord	5% [0 ; 33] <i>SC<sub>obs</sub></i> =0,8 <i>n</i> =17	4% [0 ; 26] <i>SC<sub>obs</sub></i> =1,2 <i>n</i> =28	0% [0 ; 10] <i>SC<sub>obs</sub></i> =0 <i>n</i> =38	0% [0 ; 16] <i>SC<sub>obs</sub></i> =0 <i>n</i> =23
	Sud	0% [0 ; 100] <i>SC<sub>obs</sub></i> =0 <i>n</i> =2	0% [0 ; 79] <i>SC<sub>obs</sub></i> =0 <i>n</i> =5	24% [3 ; 85] <i>SC<sub>obs</sub></i> =2 <i>n</i> =8	19% [2 ; 69] <i>SC<sub>obs</sub></i> =2 <i>n</i> =11
	Est	4% [1 ; 11] <i>SC<sub>obs</sub></i> =4 <i>n</i> =92	0% [0 ; 11] <i>SC<sub>obs</sub></i> =0 <i>n</i> =35	3% [0 ; 11] <i>SC<sub>obs</sub></i> =2 <i>n</i> =64	0% [0 ; 7] <i>SC<sub>obs</sub></i> =0 <i>n</i> =50
	Ouest	2% [0 ; 6] <i>SC<sub>obs</sub></i> =3 <i>n</i> =153	3% [0 ; 11] <i>SC<sub>obs</sub></i> =2 <i>n</i> =63	0% [0 ; 4] <i>SC<sub>obs</sub></i> =0 <i>n</i> =88	2% [0 ; 11] <i>SC<sub>obs</sub></i> =1 <i>n</i> =53
	Petite Terre	0% [0 ; 64] <i>SC<sub>obs</sub></i> =0 <i>n</i> =6	0% [0 ; 68] <i>SC<sub>obs</sub></i> =0 <i>n</i> =5	0% [0 ; 68] <i>SC<sub>obs</sub></i> =0 <i>n</i> =5	0% [0 ; 64] <i>SC<sub>obs</sub></i> =0 <i>n</i> =6
TOTAL		2,9% [1,0 ; 5,8] <i>SC<sub>obs</sub></i> =7,8 <i>n</i> =270	2,3% [0,5 ; 7,5] <i>SC<sub>obs</sub></i> =3,2 <i>n</i> =136	2,0% [0,5 ; 5,0] <i>SC<sub>obs</sub></i> =4 <i>n</i> =204	2,1% [0,4 ; 6,2] <i>SC<sub>obs</sub></i> =3 <i>n</i> =141
Taux d'incidence observé par période en nombre de séroconversion par animal-an [IC 95%] <i>SC<sub>obs</sub></i> = nb de séroconversions observées ; <i>n</i> = nb d'animaux-an à risque					



Localisation des 63 élevages suivis et des évènements associés (2010-2013)

- Séroconversion (n=11 élevages)
- Séroconversion (date incertaine)
- Avortement (n=9 élevages)
- ★ Avortement et séroconversion (n=2 élevages)
- Pas d'évènement (n=41 élevages)
- Route principale
- Zones

Figure 19. Carte des évènements observés (séroconversions ou avortements) dans les élevages suivis entre 2010 et 2013

Pour des raisons logistiques, dont les délais d'analyse parfois allongés, tous les animaux des élevages étaient systématiquement prélevés, quel que soit leur statut sérologique antérieur. Parallèlement au suivi des séroconversions, 27 séronégativations ont ainsi été observées. Pendant les périodes 2010A, AB, BC et CD, on compte ainsi 8,7, 9,9, 5,3 et 3,1 séronégativations pour respectivement, 67, 27, 29 et 22 animaux-an à risque suivis (c'est-à-dire initialement séropositifs). Le Tableau 8 présente les taux

d'incidence des séronégativations ( $\tau_{Sobs}$ ) par période, aucune différence significative n'a été observée entre les périodes.

**Tableau 8. Taux d'incidence observé des séronégativations à chaque période d'étude**

	Période d'étude			
	2010-A	A-B	B-C	C-D
$\tau_{Sobs}$	13% [5 ; 25] $SN_{obs}=8,7$ $n'=67$	37% [15 ; 68] $SN_{obs}=9,9$ $n'=27$	19% [6 ; 46] $SN_{obs}=5,3$ $n'=29$	14% [3 ; 48] $SN_{obs}=3,1$ $n'=22$
$\tau_{Sobs}$ =Taux d'incidence observé des séronégativations par période [IC 95%] $SN_{obs}$ = nb de séronégativations observées ; $n'$ = nb d'animaux-an à risque				

**b. Correction de l'intervalle de confiance du taux d'incidence observé pour tenir compte de « l'effet troupeau »**

L'effet de l'échantillonnage en grappe est présenté dans le Tableau 9.

L'effet le plus important est celui observé pour la période AB ( $Deff = 1,7$ ) où la précision absolue de l'intervalle de confiance est augmentée de 3%. L'effet de l'échantillonnage en grappe est très faible pour les autres périodes, la précision relative n'étant quasiment pas modifiée.

**Tableau 9. Prise en compte de l'effet troupeau dans le calcul de l'intervalle de confiance du taux d'incidence observé ( $\tau_{Iobs}$  =Taux d'incidence observé par période)**

	Période			
	2010 A	AB	BC	CD
$\tau_{Iobs}$ [IC 95%]	2,9% [1,0 ; 5,8]	2,3% [0,5 ; 7,5]	2,0% [0,5 ; 5,0]	2,1% [0,4 ; 6,2]
Nb d'élevages	23	52	54	42
<i>Design effect (Deff)</i>	0,9	1,7	1,0	1,0
IC 95% corrigé par l'échantillonnage en grappe	[1,3; 5,5]	[0,5 ; 10,2]	[0,7 ; 5,3]	[0,7 ; 6,3]

## B. Impacts de la FVR

### 1. Surveillance évènementielle des avortements : déclaration obligatoire des avortements et recherche de la FVR par RT-PCR

Entre 2010 et 2013, 72 avortements ont été officiellement déclarés à la DAAF pour l'ensemble de Mayotte. La répartition de ces déclarations par année est présentée dans la Figure 20 avec la répartition par type d'élevage lorsque les élevages faisant la déclaration faisaient partie du suivi PAZEM.

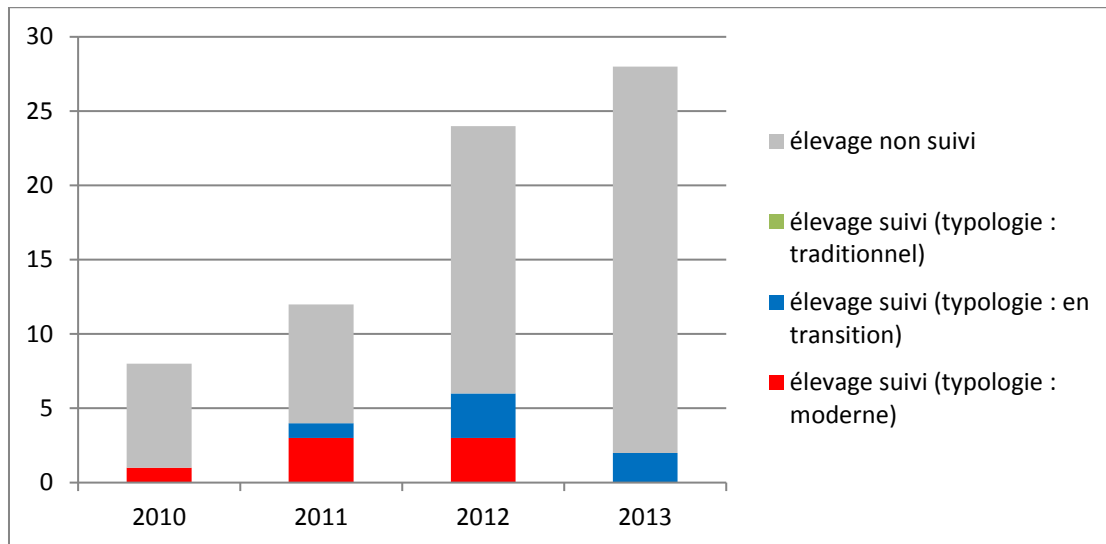


Figure 20. Nombre de déclarations d'avortements à Mayotte entre 2010 et 2013, avec le type d'élevage pour les éleveurs dont la typologie est connue par leur inclusion dans l'étude

Depuis la mise en place de l'étude en mai 2012, 44 avortements ont été déclarés, dont 41 ont pu faire l'objet d'analyses permettant la détection génomique du virus de la FVR (RT-PCR). Tous les résultats de ces analyses se sont révélés négatifs.

Treize avortements ont été déclarés dans des élevages inclus dans le suivi entre 2010 et 2013 et dont la typologie était connue : 1 élevage moderne en 2010, 3 élevages modernes et 1 en transition en 2011, 3 élevages modernes et 3 en transition en 2012 et 2 élevages en transition en 2013 (Voir Figure 20). Un seul éleveur qui n'avait pas déclaré l'avortement au moment de sa survenue l'a « déclaré » *a posteriori* lors d'une visite de suivi sentinelle ce qui n'a pas permis de réaliser de prélèvements.

Parmi ces treize avortements, deux sont survenus à la même période qu'un animal chez qui une séroconversion a été observée dans le même élevage, mais il s'agissait d'animaux différents. Pour les autres séroconversions et avortements, aucune concomitance n'a été observée.

En dehors des avortements sporadiques déclarés ci-dessus, aucun éleveur inclus dans le suivi (que son cheptel ait présenté des séroconversions ou non) n'a rapporté d'épisode clinique permettant de suspecter une circulation de FVR.

## 2. Comparaison des données de séroconversions avec les données de production laitières et les pesées réalisées par le projet PAZEM dans le premier groupe d'éleveurs

Parmi les 17 animaux pour lesquels une séroconversion a été observée, quatre ont été suivis pour leur production laitière. Seulement 3 de ces animaux disposent de données de production laitière enregistrées pendant la période de séroconversion observée. La Figure 21 présente les données de production laitière (litres de lait par jour) de ces trois animaux, pendant leur période de séroconversion et en fonction du type génétique. Les données de production enregistrées pour des animaux du même type sont affichées pour comparaison.

Pour les deux animaux de type croisé qui ont séroconverti et été suivis pour leur production laitière, aucune anomalie n'est notable dans leur production laitière, mais le nombre d'enregistrements est trop limité pour conclure (2 valeurs pour l'animal n°16, écart de plus de 150 jours entre deux mesures pour la lactation 3 de l'animal n°13, etc.).

L'animal n°24, un animal issu de la première génération d'un croisement zébu/montbéliarde, a une période de séroconversion possible s'étendant sur deux lactations ce qui rend très difficile la mise en évidence d'un effet de la séroconversion sur la production laitière.

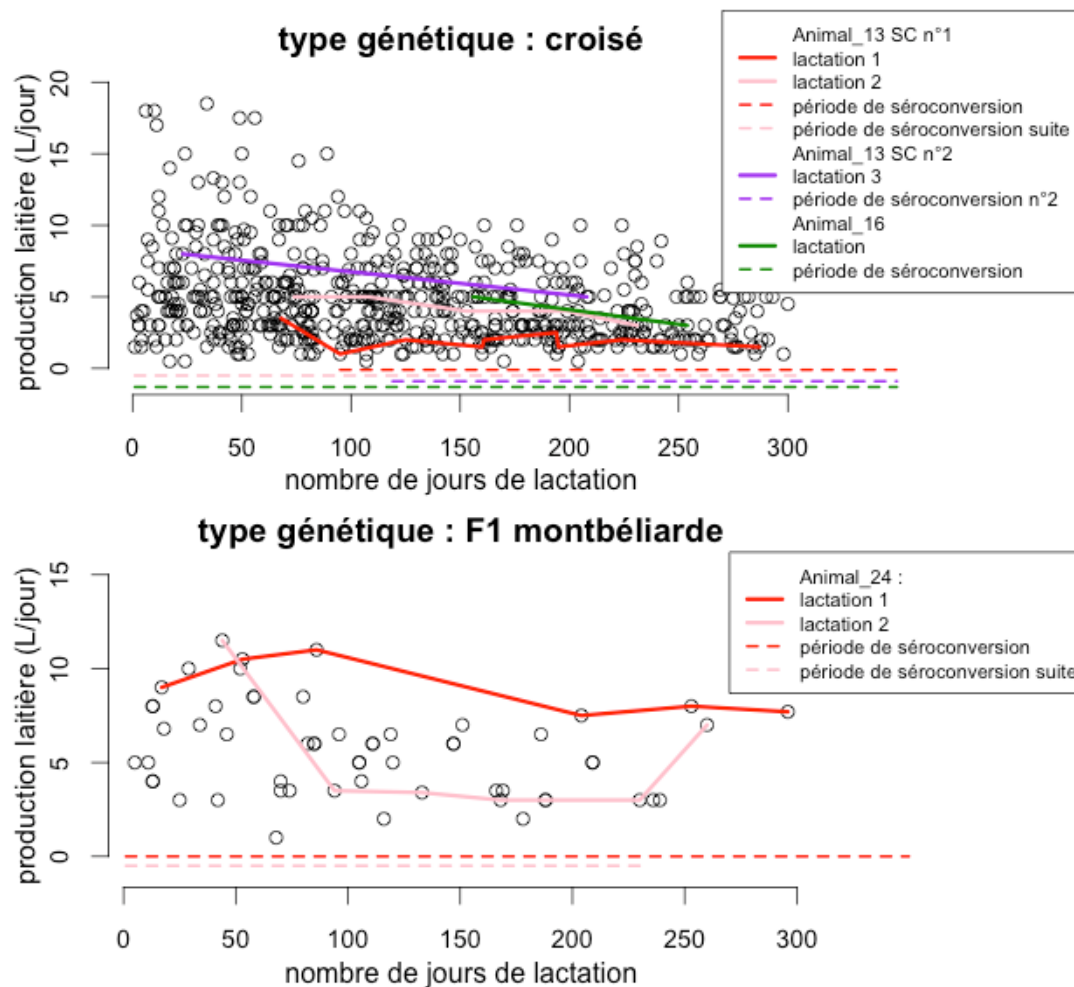


Figure 21. Comparaison de la production laitière d'animaux ayant séroconverti avec d'autres animaux du même type racial suivis par le PAZEM (nuage de points) en fonction de la période de séroconversion observée (Les lignes pointillées

couvrent la période où la séroconversion observé a pu avoir lieu et sont de la même couleur que la production laitière pour un même animal).

Parmi les 17 animaux ayant fait l'objet d'une séroconversion, quatre ont été suivis pendant leur période de séroconversion pour leur poids. La Figure 22 présente les courbes de poids des quatre animaux ayant séroconverti et ayant eu un suivi de pesée dans le cadre du PAZEM de façon concomitante. Les poids moyens des animaux du même type racial au même âge sont également représentés pour comparaison (Tillard et al., 2013). Un seul animal, un jeune mâle croisé, a eu des pesées de façon régulière et rapprochées, de façon concomitante à sa séroconversion observée, aucune anomalie n'est détectable sur cette observation. Les trois autres individus étaient des adultes avec uniquement deux points de pesée. Un animal a vu son poids augmenter (+66kg), les deux autres ont connu une baisse de poids (-12kg et -126kg). Ces seules observations ne permettent pas de conclure sur l'existence d'une association statistiquement significative.

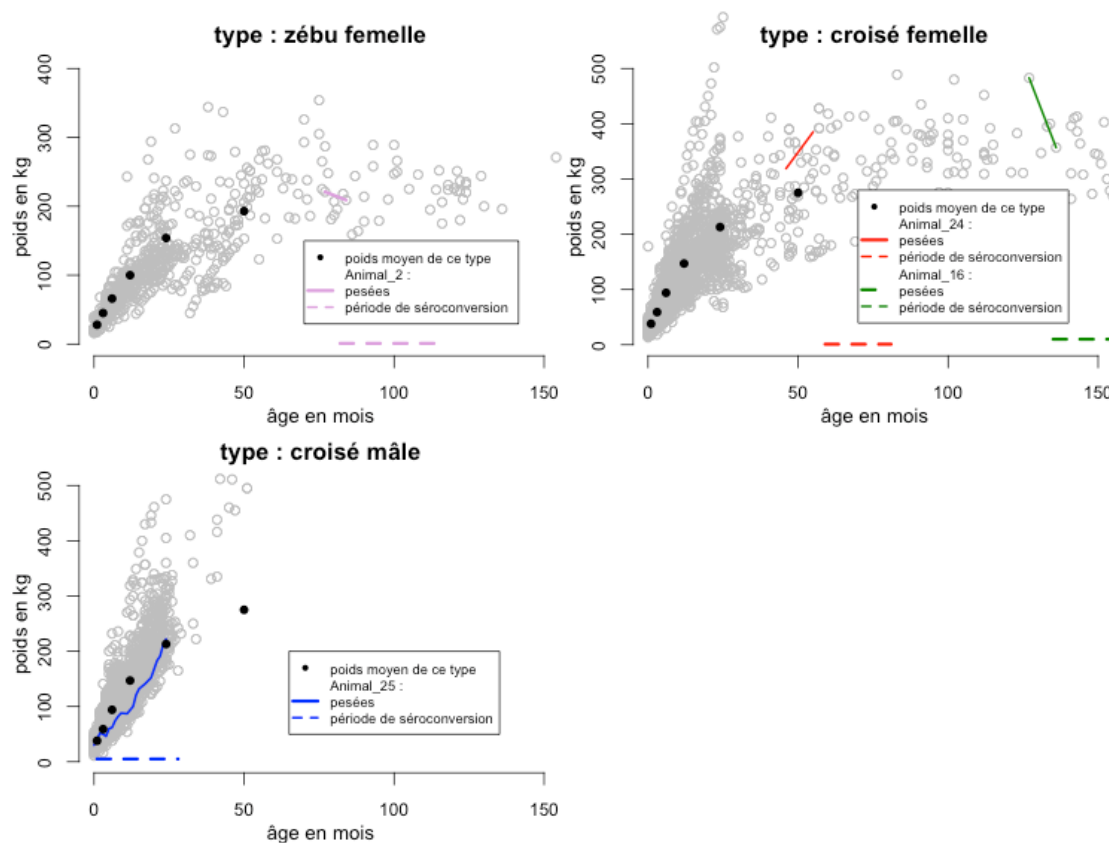


Figure 22. Comparaison des courbes de croissance d'animaux ayant séroconverti avec d'autres animaux de même type racial et de même sexe suivis par le PAZEM (Les lignes pointillées couvrent la période où la séroconversion observé a pu avoir lieu et sont de la même couleur que le poids pour un même animal)

#### IV - Discussion

Cette étude a permis de poursuivre le travail de surveillance de la FVR à Mayotte entamé par le SESAM en 2009. Le taux de séroprévalence est en diminution passant de 22,5% (IC<sub>95%</sub> [18,1 ; 27,5]) en 2010 à 9,6% (IC<sub>95%</sub> [7,1 ; 12,8]) en 2013. Sur les quatre périodes couvertes par cette étude, s'étalant entre 2010 et 2013, le taux d'incidence observé, environ 2 séroconversions pour 100 animaux-an à

risque pour chaque période, est en forte baisse par rapport aux observations de Lernout *et al.* sur la période 2010-2011 (12,9% IC<sub>95</sub> [9,6 ;16,2]) (Lernout *et al.*, 2013). Compte-tenu de cette faible incidence et du nombre limité d'observations réalisées dans les dispositifs d'évaluation de l'impact de la circulation de la FVR sur cette période (41 PCR sur avortements et 5 animaux ayant séroconverti avec des données concomitantes de courbe de poids et/ou de production laitière) aucun impact significatif n'a pu être identifié.

### A. Difficultés du suivi sentinelle

L'élevage de bovins mahorais est majoritairement de type traditionnel, avec des petits troupeaux de zébus. Mais une minorité d'éleveurs s'est déjà engagée dans la voie de la professionnalisation avec des croisements entre la race zébu et la race Montbéliarde et l'adoption de modes de conduite plus intensifs. Parmi les trente élevages tirés au sort, on comptait ainsi 83% d'éleveurs traditionnels et 17% d'éleveurs en transition alors que notre échantillonnage final, intégrant les éleveurs suivis par le PAZEM, comprenait 21 % d'élevages modernes et « seulement » 54% d'élevages traditionnels. Il n'était donc pas représentatif des pratiques d'élevages mahoraises mais cette particularité a été abordée en comparant les taux de séroprévalence et d'incidence observé par type d'éleveurs. En revanche, compte-tenu des trop faibles effectifs, la comparaison entre type d'élevages sur les taux d'incidence est restée imprécise. En raison de ces effectifs limités, une approche par modèle multivarié a dû être également abandonnée.

Le nombre d'élevages suivi a été limité par les moyens humains disponibles. En effet, malgré la petite taille de l'île, le temps de parcours pour accéder aux élevages peut être très important, d'autant qu'ils sont souvent situés loin des zones urbaines et des voies d'accès les mieux entretenues et sont souvent accessibles par des pistes et finalement uniquement à pied.

De plus certains éleveurs n'ont pas de téléphone et l'élevage des animaux au piquet mobile est une pratique courante qui peut rendre difficilement identifiables les animaux dans la brousse d'une campagne de prélèvement à l'autre. Pour ces raisons techniques et en fonction des aléas météorologiques importants dans cette zone tropicale, l'intervalle entre les prises de sang n'a pas non plus pu être constamment respecté. Des interruptions du rythme trimestriel envisagé ont ainsi augmenté l'intervalle entre les dates de séroconversion observées, limitant la précision des taux d'incidence en découlant.

A cause du taux de renouvellement, des difficultés à retrouver les animaux d'une campagne sur l'autre, des moyens de contention très rudimentaires (cordes et cocotiers sont du luxe) et du taux de séroprévalence, seulement 50% des animaux inclus dans l'étude ont pu être inclus dans le suivi de l'incidence, alors que 92% des élevages ont été concernés par au moins un animal à risque au cours de l'étude.

Ce suivi n'en a pas moins mis en évidence 18 séroconversions qui constituent autant de cas possibles de FVR alors que la surveillance événementielle réalisée à travers la déclaration des avortements, certes probablement moins coûteuse, n'est pas encore devenue une habitude assez développée dans les élevages mahorais pour atteindre un niveau de sensibilité satisfaisant. Une évaluation et une comparaison plus poussées de ces deux composantes de la surveillance de la FVR à Mayotte permettraient de préciser ces impressions et des pistes d'amélioration (cf. **Chapitre II**). Pour confirmer les cas possibles de séroconversion, un suivi virologique aurait été nécessaire, soit en

retournant dans les élevages pour réaliser des prélèvements pour recherche virologique, mais cela était rendu improbable compte-tenu des délais de réalisation des analyses et de la courte durée de la virémie, soit en réalisant d'emblée les prélèvements nécessaires, là encore compte-tenu des frais engendrés, des contraintes logistiques (contention, stockage, etc.) et de la faible incidence, cette option n'a pas été retenue. Quant à rapprocher les campagnes de prélèvements, cela ne s'est pas avéré réaliste, le rythme trimestriel ayant déjà été difficilement respecté. Une amélioration de la réactivité de la réalisation des analyses ainsi que l'ajout d'un dépistage des IgM (anticorps plus précoces que les IgG) représenteraient un important progrès.

## B. Taux de séroprévalence et d'incidence observé par zone géographique et par type d'élevage

Le taux de séroprévalence que nous avons observé en 2010, 22,5% (IC<sub>95%</sub> [18,1 ; 27,5]) est similaire à celui observé en août 2011 par Lernout *et al.* (Lernout *et al.*, 2013) 25.3% (IC<sub>95%</sub> [19,8 ; 32,2]).

La prévalence observée dans les élevages modernes semble sensiblement plus faible que dans les élevages traditionnels alors que tous les ruminants mahorais vivent dehors et l'exposition à des vecteurs potentiels de la FVR semble homogène. Plusieurs éléments peuvent cependant modifier le risque de ces troupeaux vis-à-vis de la FVR : (1) le taux de renouvellement des animaux plus important que dans les élevages traditionnels, amenant des animaux naïfs de façon plus rapide, cependant l'écart entre élevage modernes et traditionnels semble rester constant ce qui impliquerait une circulation de la FVR dans les élevages modernes pour maintenir cet écart. Cette circulation pourrait *a contrario* être facilitée par la taille importante des cheptels modernes ; (2) une meilleure protection contre les vecteurs (aménagements, désinsectisation, gestion des points d'eau) ; (3) une meilleure hygiène pour la gestion des cadavres et des avortons. La gestion des avortons et l'existence d'un point d'eau à proximité de l'élevage avaient en effet été identifiés comme facteurs de risque de séropositivité des élevages vis-à-vis de la FVR à Mayotte par Lernout *et al.* (2013). Aucune différence sur le taux d'incidence observé n'a été cependant identifiée entre les typologies d'éleveurs.

Les élevages suivis étaient répartis sur l'ensemble du territoire avec une prédominance sur la zone centrale et le long des principaux axes où les densités d'élevages sont aussi les plus importantes et l'accessibilité meilleure. Aucune différence statistiquement significative entre les différentes zones géographiques n'a pu être mise en évidence qu'il s'agisse du taux de séroprévalence ou d'incidence. Les séroconversions sont intervenues en réalité majoritairement dans la zone centrale de l'île ou en bordure dans la zone la plus dense en élevages et là où le suivi était le plus important. Des séroconversions ont été observées dans toutes les zones géographiques de Mayotte à l'exception de Petite Terre où un seul animal séropositif a été observé. Il semble que cet animal soit né dans l'élevage dans lequel il a été prélevé, mais aucune garantie sur l'absence de mouvement vers Grande Terre n'est possible. L'existence d'une circulation en Petite Terre de la FVR reste incertaine.

## C. Interprétation des séroconversions et de la persistance de la FVR

Le suivi des séroconversions dans le cheptel mahorais par le SESAM sur la période 2009-2011 avait permis de détecter un taux d'incidence très élevé, jusqu'à 18%, concluant sur une possible endémisation du virus (Lernout *et al.*, 2013). Pour la période 2012-2013, l'incidence observée de séroconversions dans notre étude est beaucoup plus faible (environ 2%). Le niveau de circulation virale semble avoir beaucoup diminué et demeure silencieux au niveau clinique.



Plusieurs facteurs peuvent conduire à une sous ou surestimation de l'incidence : les biais d'échantillonnage, les défauts du test de dépistage, des variabilités individuelles de réponse immunitaires et d'éventuelles erreurs humaines (Schrijver and Kramps, 1998; Selby, 1999; Toma et al., 2010).

L'effet de l'échantillonnage imparfaitement aléatoire de l'étude n'a qu'une influence limitée en terme de précision absolue (1-3% d'écart).

En l'absence de confirmation virologique ayant pu être mise en œuvre dans le cadre de cette étude, il est important de garder à l'esprit que les séroconversions observées demeurent des « cas possibles » de FVR. Les défauts de sensibilité comme de spécificité du test ELISA peuvent en effet conduire à des erreurs d'interprétation par excès comme par défaut du taux d'incidence de séroconversions (cf. Figure 39 : les éclairs rouges montrent des cas de « fausses séroconversions » les éclairs bleus à des séroconversions non détectées par les tests ELISA consécutifs).

Si l'influence sur le taux de séroprévalence de la sensibilité et de la spécificité du test ELISA a pu être aisément calculée (et est restée limitée à +/-3% d'écart au maximum entre la valeur brute et corrigée), en revanche, il n'existe *a priori* pas de formule simple pour corriger un taux d'incidence calculé sur la base de séroconversions. En effet, il faut dans ce cas tenir compte de la sensibilité et de la spécificité du test de diagnostic pour les résultats au début et à la fin de chaque période. Un arbre de probabilité est proposé en **Annexe II** pour calculer un taux d'incidence réel tenant compte des résultats faux négatifs et positifs à chaque campagne causés par les défauts de sensibilité et de spécificité du test ELISA. Cette approche conclut à une sur-estimation de l'incidence mais dans les scénarios les plus défavorables, l'incidence resterait non nulle à part pour la période 2010-A et des valeurs de sensibilité et de spécificité de 91% et 99,54% respectivement. Ce calcul se base toutefois sur certaines simplifications : les résultats entre les campagnes pour un même animal sont considérés indépendants et nécessitent d'introduire la survenue de séronégativations comme un phénomène possible et indépendant notamment du délai depuis la virémie de l'animal.

Outre cette correction arbitraire tenant compte de l'imperfection intrinsèque des tests, les changements de statut sérologique de certains animaux au cours du temps pourraient correspondre à une instabilité temporelle de la production d'anticorps chez des animaux ayant effectivement été infectés. En effet, neuf animaux enregistrent au moins deux changements de statuts sérologiques consécutifs (voir le détail des résultats quantitatifs des ELISA par animal en **Annexe I**). Un animal en particulier, « animal\_13 », change plusieurs fois de statut, avec des valeurs de densité optique variant peu autour des valeurs limites entre les différents statuts « positif », « douteux », « négatif ». Il connaît ainsi deux séroconversions observées, ce qui est en théorie impossible car les anticorps produits après une infection par la FVR sont supposés persister plusieurs mois, si ce n'est toute la vie de l'animal (Bird et al., 2009). Le statut de cet animal en particulier pourrait s'expliquer par un faible titre d'anticorps qui oscillerait autour du seuil de détection du kit ELISA en fonction de son état de santé, de son alimentation, voire de son âge (Smith, 2014; Swecker et al., 1995). L'apport alimentaire ou hydrique et la présence de co-infections peuvent en effet avoir un rôle sur la concentration sérique en anticorps à un temps  $t$ . Le taux de concentration en IgG des ruminants mahorais pourrait être dégradé par une quasi-absence de complémentation en oligo-éléments et minéraux alors que certains sols de Mayotte sont particulièrement connus pour en être carencés (Mandret, 1996; Tillard et al., 2013). Les travaux de Maquart *et al.* (Maquart et al., 2014b) avaient également mis en

évidence l'absence de séroconversion chez 11 des 18 animaux de l'océan Indien trouvés infectés par le virus de la FVR par RT-PCR. L'influence des statuts physiologiques individuels était alors évoquée mais aussi la faible charge virale circulant en période inter-épidémique. L'observation de nombreuses « séronégativations » (entre 13 et 37 séronégativations pour 100 animaux-an à risque, c'est à dire parmi les animaux séropositifs) corroborerait l'hypothèse que le statut physiologique (dont les carences en oligo-éléments, des co-infections ou simplement l'âge) joue un rôle important sur la détection d'anticorps chez les animaux mahorais initialement infectés par le virus de la FVR et que leur immunité n'est peut-être pas installée aussi définitivement que décrit jusqu'ici. La relation entre le statut physiologique et sérologique des animaux mahorais mériterait d'être approfondie pour savoir s'il s'agit d'une réelle perte de l'immunité des animaux au fil du temps ou d'un statut transitoire dépendant de l'état de l'animal et également d'être étendu à d'autres pathologies pour mieux connaître la vulnérabilité de l'élevage de ruminants à Mayotte.

Enfin, les conditions difficiles de terrains combinées avec l'identification incomplète des animaux et un nombre important d'intermédiaires peuvent avoir conduit à quelques erreurs (échanges de tubes, mauvais report manuel des identifiants animaux, rupture de la chaîne du froid pour la conservation des échantillons, contaminations, etc.).

Tous ces éléments (biais d'échantillonnage, performances des tests, fluctuations plus ou moins transitoires du statut immunitaire des animaux, difficultés de terrain) peuvent être à l'origine d'erreurs d'interprétation sur le statut sérologique d'un animal donné ou l'estimation du taux d'incidence. L'explication la plus plausible de l'écart entre le taux d'incidence calculé dans cette étude et celui de l'étude Lernout *et al.* (2013) pour la période 2010-2011 concerne le design de l'échantillonnage et de notre suivi. Dans notre étude, les animaux de 2010 n'ont été reprélevés au mieux qu'en 2012, soit deux ans plus tard au lieu de trois mois dans l'étude précédente. Le nombre de cheptels de notre échantillon est également plus faible induisant un risque de biais potentiellement plus important (respectivement 157 animaux dans 23 élevages contre 198 animaux suivis dans 33 élevages chez Lernout *et al.*).

#### **D. Impact de la FVR en élevage**

Seuls deux élevages du suivi ont connu un avortement concomitant à une séroconversion observée. Aucune détection de virus FVR par PCR sur avortement n'a été obtenue et les élevages pour lesquels certains animaux ont séroconverti n'ont pas connu de manifestation clinique de FVR (pas d'avortement, pas de surmortalité rapportée et si des animaux ont été malades et qu'un vétérinaire a été appelé pour réaliser des soins, celui-ci n'a pas suspecté la FVR) à l'exception près citée des deux avortements ci-dessus.

En ce qui concerne la comparaison des données zootechniques du PAZEM avec celles de séroconversion, les périodes de séroconversion étaient définies sur une période trop longue pour être mises en relation avec les mesures de production qui sont finalement trop espacées pour pouvoir identifier d'éventuelles chutes de production pendant la courte période de virémie. La variété des types génétiques limitait encore le nombre d'observations comparables. Seul un animal a connu une très forte perte de poids de façon concomitante à sa séroconversion, un entretien rapproché avec l'éleveur aurait pu permettre d'expliquer ce phénomène, mais les délais entre l'occurrence du phénomène et l'obtention des résultats sérologiques définitifs n'ont pas permis une telle réactivité.

Malgré des signes sérologiques de circulation du virus, la FVR semble ne pas avoir eu d'impact clinique majeur sur les ruminants à Mayotte de 2010 à 2013. Cependant, compte-tenu de la petite taille des exploitations mahoraises, le taux d'incidence très faible a pu passer inaperçu, puisque les symptômes sont finalement assez peu spécifiques et les vagues d'avortement décrites en Afrique de l'Est et de l'Ouest sont difficiles à observer dans des élevages de très petite taille, comme c'est le cas en majorité à Mayotte. Un des cas positifs identifiés par PCR par Maquart *et al.* dans l'archipel des Comores avait tout de même été identifié dans un élevage caprins mahorais en 2011 suite à un avortement (Maquart *et al.*, 2014b).

Depuis la dernière épidémie en Afrique de l'Est en 2006-2007, de nombreuses observations, principalement entre 2009 et 2011 ont été faite d'un maintien de la circulation à bas bruit du virus de la FVR sans manifestation clinique particulière, c'est le cas au Kenya (Lichoti *et al.*, 2014), au Mozambique (Fafetine *et al.*, 2013) et en Tanzanie (Kifaro *et al.*, 2014; Wensman *et al.*, 2015) notamment. Ces observations concordent avec la situation observée à Mayotte.

La faible charge virale dans cette période post-épidémique pourrait expliquer l'absence d'impact notable mais le virus circulant pourrait aussi avoir subi des délétions partielles entraînant une virulence différente comme suggérée par Maquart *et al.* (Maquart *et al.*, 2014a). Une perte de virulence a notamment été observée *in vitro* par un cycle de transmission répétée entre vertébrés uniquement, ce qui est particulièrement possible en période épidémique, ou entre vecteurs uniquement entraînant des délétions importantes du gène relié à la virulence (Moutailler *et al.*, 2011).

## **E. Conclusion, recommandations et perspectives**

Le taux d'incidence observé a chuté de façon très significative entre les observations de 2011 par la première phase du SESAM et la seconde phase décrite par cette étude. L'impact clinique de la FVR reste à ce stade indécélable du statut sanitaire attendu des élevages mahorais. Une poursuite de la surveillance demeure néanmoins indispensable pour mieux comprendre la dynamique de la FVR dans cet écosystème particulier, qui avait échappé aux modèles prédictifs développés pour l'Afrique de l'Est (Anyamba *et al.*, 2009), continuer de connaître la situation et déterminer si la persistance de la FVR à Mayotte se confirme.

Les seules souches virales de FVR à Mayotte l'ont été à partir des cas humains et se sont révélées être proches génétiquement de celles d'Afrique de l'Est (Cêtre-Sossah *et al.*, 2012a). Si le virus de la FVR a sans doute continué à circuler silencieusement à Mayotte de 2010 à 2013 dans le cheptel de ruminants mahorais, le cycle de transmission de la FVR est toujours mal compris. La question d'une éventuelle réémergence ou réintroduction qui pourrait être accompagnée de signes cliniques chez les ruminants voire de cas humains se pose toujours, d'autant que le taux de séroprévalence observé a en parallèle également diminué de moitié, augmentant la vulnérabilité du cheptel.

Deux phénomènes pourraient engendrer cette perte d'immunité à l'échelle de la population : le renouvellement naturel de la population et la diminution du titre d'anticorps produits (ce qui pourrait correspondre à la « séronégativisation »). La vigilance des acteurs doit donc être maintenue la situation pouvant se dégrader.

Des améliorations du dispositif de surveillance peuvent être envisagées pour améliorer la réactivité du suivi, pour le moment assez faible et en maintenir la qualité. Pour faciliter l'interprétation des

suivis sentinelles, une combinaison de tests IgG/IgM est à recommander (FAO, 2002) en lien avec des analyses de séroneutralisation de façon plus systématique afin d'augmenter la confiance dans l'interprétation de ces cas possibles (Nicolas et al., 2014a).

Dans la mesure du possible, le développement des compétences d'analyses de laboratoire et un meilleur équipement pour l'enregistrement et la traçabilité des prélèvements et analyses seraient profitables au SESAM qui doit effectuer un suivi dans des conditions de terrain difficiles, avec une faible numérisation, des aléas climatiques importants et un éloignement du laboratoire de référence rendant complexes et coûteux les transferts d'échantillons. Un essai inter-laboratoires pour confirmer les performances de diagnostic du laboratoire de Mayotte seraient indispensables afin de pouvoir réaliser des analyses dans les délais les plus courts possibles avec toute la fiabilité nécessaire dans les résultats.

Après cinq ans de fonctionnement du système d'épidémiosurveillance vétérinaire mis en place à Mayotte (SESAM), il semble utile d'évaluer plus précisément ses performances vis-à-vis de la FVR en particulier en termes de sensibilité et de coût-efficacité. Cette évaluation permettrait de mieux expliquer les résultats observés et si possible d'améliorer l'efficacité de ce dispositif qui demeure essentiel dans un territoire aux ressources limitées. Cette approche sera abordée dans la deuxième partie de ce chapitre.

La modélisation mathématique permettrait elle d'explorer les conditions (climatiques, épidémiologiques ou écologiques) permettant la persistance ou la réémergence de la FVR. Une partie de ces conditions (climatiques, vectorielles et épidémiologiques essentiellement) seront explorées dans un modèle dynamique adapté au contexte mahorais présenté dans le **Chapitre III** de ce manuscrit. Les conditions qui permettraient une réémergence, qu'elles soient climatiques, liées à l'évolution du taux de couverture en anticorps, aux vecteurs, aux mouvements d'animaux virémiques, ou à d'éventuels réservoirs sauvages non encore étudiés nécessiteront d'être évaluées de façon plus approfondie par la modélisation mais aussi par le recueil de données. En effet, les modèles prédictifs actuels qui semblent efficaces dans certaines zones du continent africain, semblent en revanche peu adaptés au contexte de l'océan Indien, comme l'a montré l'épisode de 2007-2009 (Anyamba et al., 2010).

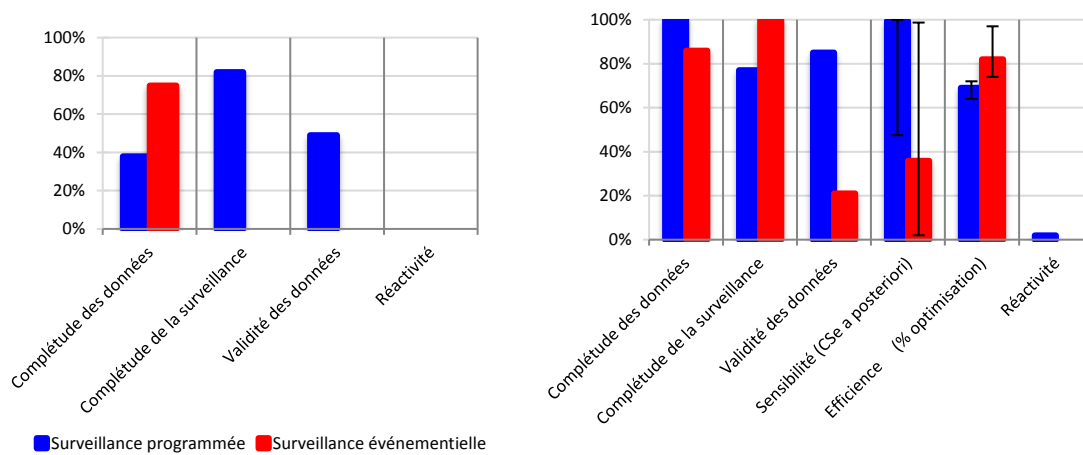
## CHAPITRE II : Evaluation du dispositif de surveillance de la FVR du SESAM

### Résumé de la démarche :

Des indicateurs de performance ont été proposés et calculés entre 2010 et 2013 pour les deux composantes du système de surveillance de la FVR : la surveillance programmée (suivi sérologique en élevage sentinelle) et événementielle (déclaration des avortements). Cette démarche a suivi les lignes directrices établies par le CDC afin de proposer des recommandations d'améliorations en particulier en matière de qualité des données, de réactivité, d'efficience et de réactivité.

### Principaux résultats :

Les estimations concernant les indicateurs de performance de la surveillance de la FVR par le SESAM sont décrites dans la figure ci-dessous:



## I. Introduction

### A. Contexte et objectifs de l'évaluation des performances du SESAM

Le SESAM a été créé en 2009 suite à la découverte de la présence du virus de la FVR à Mayotte. Conformément aux recommandations de la FAO en matière de surveillance en zone à risques (FAO, 2002), le dispositif de surveillance de la FVR s'est progressivement structuré autour de deux grandes composantes :

- la surveillance « programmée » basée sur un échantillon « d'élevages sentinelles » faisant l'objet de visites de prélèvements régulières pour mettre en évidence des changements de statut sérologique chez les animaux ;
- la surveillance « événementielle » basée sur le système de déclaration obligatoire des avortements déjà en place<sup>39</sup> et en ajoutant le diagnostic virologique de la FVR à la recherche obligatoire de la brucellose.

Après plusieurs années de fonctionnement et de production de données sanitaires (Cêtre-Sossah et al., 2012b; Lernout et al., 2013), il est important d'entamer un travail d'évaluation de ce système de surveillance, tant pour en analyser les performances que pour proposer des pistes d'amélioration.

La démarche d'évaluation est d'autant plus légitime que le SESAM est financé par des fonds publics (German et al., 2001). Au vu des résultats décrits dans la première partie de ce chapitre, l'évaluation de la sensibilité et de l'efficacité du dispositif est cruciale pour conclure sur la persistance de la FVR et la nécessité du maintien ou de l'évolution de sa surveillance.

Dans le cadre de ce dispositif encore jeune, n'ayant fait l'objet d'aucun processus d'évaluation, il a été décidé avec l'animateur et les gestionnaires du dispositif de commencer par définir et mesurer certains indicateurs de performances, ce qui constitue « la première étape dans l'amélioration permanente des réseaux » (Dufour, 2007).

Parmi les nombreuses démarches d'évaluation des systèmes de surveillance sanitaire déjà décrites (Calba et al., 2015), notre travail s'est plus particulièrement appuyé, en accord avec l'animateur et les gestionnaires du dispositif, sur les recommandations du CDC (*Centers for Disease Control and Prevention*, Atlanta) en matière d'évaluation des systèmes de surveillance en santé publique (German et al., 2001), qui est la démarche la plus couramment utilisée (Calba et al., 2015) (cf. encadré ci-dessous).

**Encadré : Lignes directrices du CDC pour l'évaluation des systèmes de surveillance en santé publique (source (German et al., 2001)**

Publiées pour la première fois en 1988, ces lignes directrices ont pour objectif d'assurer

<sup>39</sup> Arrêté du 22 avril 2008 fixant les mesures techniques et administratives relatives à la prophylaxie collective et à la police sanitaire de la brucellose des bovinés

Arrêté du 13 octobre 1998 fixant les mesures techniques et administratives relatives à la prophylaxie collective et à la police sanitaire de la brucellose ovine et caprine abrogé depuis par l'arrêté du 10 octobre 2013 fixant les mesures techniques et administratives relatives à la prophylaxie collective et à la police sanitaire de la brucellose ovine et caprine.

l'efficacité et l'efficience des systèmes de surveillance en santé publique les meilleures possibles.

Un système de surveillance y est défini comme « la collecte systématique et continue, l'analyse, l'interprétation et la diffusion de données relatives à un événement sanitaire, en vue d'actions de santé publique pour réduire la morbidité et la mortalité et améliorer la santé ».

La démarche d'évaluation proposée par le CDC est définie comme suit :

Activité A. Mobiliser les parties prenantes pour participer à l'évaluation

Activité B. Décrire le système de surveillance à évaluer

Activité C. Préciser le cadre de l'évaluation

Activité D. Rassembler les éléments factuels concernant les performances du système de surveillance

D.1. Indiquer le niveau d'utilité du système

D.2. Décrire chaque attribut du système :

- Simplicité
- Flexibilité
- Qualité des données
- Acceptabilité
- Sensibilité
- Valeur prédictive positive
- Représentativité
- Réactivité
- Stabilité

Activité E. Exposer et justifier les conclusions, faire des recommandations

Activité F. S'assurer de l'usage des résultats de l'évaluation et partager les enseignements tirés

Le CDC propose une « *checklist* » à suivre pendant la conduite de l'évaluation.<sup>40</sup>

Le fonctionnement du dispositif de surveillance de la FVR du SESAM sera d'abord détaillé avant d'aborder l'évaluation de quatre attributs du dispositif de surveillance :

- La qualité des données : deux aspects ont été pris en compte: la « complétude », (ou « exhaustivité »), et la « validité » des informations disponibles sur chaque événement et enregistrées par chacune des deux composantes du système de surveillance.
- La sensibilité : l'impact de la sensibilité des méthodes de laboratoire de détection sérologique sur le nombre de séroconversions observées a été abordé dans la première partie de ce chapitre. Nous nous intéresserons ici plus globalement à la capacité des deux composantes (programmée et événementielle) du dispositif à détecter des cas, par une approche basée sur la méthode des arbres de scénarios qui tient compte à la fois des méthodes de détection et des caractéristiques des populations suivies.
- L'acceptabilité : d'après German *et al.* cet attribut reflète la volonté des acteurs de participer au dispositif de surveillance (2001). Nous n'aborderons ici qu'un aspect de cet attribut, le

<sup>40</sup> <https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/rr5013a1.htm> (consulté le 5/05/2017)

rapport coût-efficacité, qui caractérise le degré d'optimisation des ressources en fonction de l'objectif à atteindre et donc le degré d'acceptabilité du financement du dispositif pour l'Etat, qui en est le principal financeur. L'efficacité sera définie ici de trois façons : le nombre de prélèvements effectués, le nombre de cas détectés, la sensibilité telle qu'elle est définie ci-dessus (probabilité de détecter un cas). Les deux composantes du dispositif de surveillance (programmée et événementielle) seront comparées, un scénario de simplification et donc d'allègement des coûts sera également présenté. Le **Chapitre IV** qui s'intéresse à la perception des éleveurs mahorais, à travers la hiérarchisation des problèmes sanitaires qu'ils connaissent, éclairera également cet attribut.

- La réactivité : nous avons étudié le délai entre la date de prélèvement et la date d'analyse permettant de donner un résultat qu'il s'agisse de l'analyse ELISA dans le cadre de la surveillance programmée ou de la RT-PCR dans le cas des avortements.

## B. Description du dispositif de surveillance de la FVR à Mayotte par le SESAM

La FVR a été identifiée à Mayotte en 2008, et sa présence a été attestée de façon rétrospective depuis 2004 au moins. Un système de surveillance a été mis en place en 2009 par le Cirad, la DAAF et l'ADEM (devenue « COOPADEM » en 2012) : le SESAM (Système d'épidémiosurveillance animale à Mayotte). Notre évaluation se concentre sur les années 2012 et 2013 qui marquent un redémarrage des activités de surveillance après une longue période de grève générale à Mayotte fin 2011<sup>41</sup> et l'arrivée d'une nouvelle animatrice pour le SESAM en avril 2012. Pendant cette période, les activités du SESAM se sont également élargies à d'autres problématiques sanitaires que la FVR (cf. **ANNEXE IV**): inventaire des parasites digestifs, enquête sérologique transversale sur la prévalence de maladies abortives (Fièvre Q, néosporose, IBR, etc.), investigation de cas de « bavite », un syndrome respiratoire fréquemment évoqué par les vétérinaires et les éleveurs mahorais. Le fonctionnement du système de surveillance de la FVR est décrit ci-après d'après le modèle utilisé par Dufour et Hendrikx (Dufour, 2007).

### 1. Protocole de surveillance de la FVR par le SESAM

#### a. Objet de la surveillance

- **Objectif détaillé**

Vis-à-vis de la FVR, l'objectif du SESAM est d'évaluer régulièrement le niveau de séroprévalence chez les ruminants et de détecter une éventuelle circulation du virus qui se manifesterait par des séroconversions ou des événements cliniques anormaux (notamment des avortements).

- **Définition de cas**

---

<sup>41</sup> « Signature d'un accord sur une sortie de crise à Mayotte ». 2017. *Le Monde.fr*. Consulté le mars 7 2017. [http://www.lemonde.fr/economie/article/2011/12/20/signature-d-un-accord-sur-une-sortie-de-crise-a-mayotte\\_1620937\\_3234.html](http://www.lemonde.fr/economie/article/2011/12/20/signature-d-un-accord-sur-une-sortie-de-crise-a-mayotte_1620937_3234.html) (consulté le 5/05/2017)

« Mayotte: Les mouvements de grève pour un traitement égalitaire se multiplient ». 2017. *Zinfos 974, l'info de l'île de La Réunion*. Consulté le mars 7 2017. [http://www.zinfos974.com/Mayotte-Les-mouvements-de-greve-pour-un-traitement-egalitaire-se-multiplie\\_a38806.html](http://www.zinfos974.com/Mayotte-Les-mouvements-de-greve-pour-un-traitement-egalitaire-se-multiplie_a38806.html) (consulté le 5/05/2017)



Dans le cadre de la surveillance événementielle, tout ruminant ayant avorté à n'importe quel stade de gestation a été considéré comme un cas suspect de FVR. Dans le cadre de la surveillance programmée, un cas possible de FVR était un animal ayant séroconverti, que ce cas ait présenté des symptômes ou non.

Un cas confirmé de FVR était défini comme un animal ayant eu un résultat d'analyse PCR positif.

- **Population cible**

La surveillance concernait toute la population de ruminants de Mayotte, c'est-à-dire environ 17 150 bovins, 1 100 ovins et 11 500 caprins (DAAF Mayotte, 2011b). Il n'y a ni ruminant sauvage ni autre espèce de ruminant domestique à Mayotte.

### *b. Stratégies de surveillance*

Le dispositif de surveillance de la FVR a reposé en 2012-2013 sur deux composantes (cf. Figure 25) : la surveillance « programmée » à partir d'élevages sentinelles et une surveillance « événementielle » basée sur la déclaration obligatoire des avortements. Les modalités de mise en œuvre et les résultats des deux composantes du dispositif de surveillance de la FVR ont été détaillés dans le **Chapitre I**.

#### *i. Surveillance programmée*

Pour la surveillance programmée, les éleveurs sentinelles suivis trimestriellement en sérologie en 2009-2011 ont été renouvelés par tirage au sort dans la base de données de la CAPAM. Les vingt élevages déjà suivis par le PAZEM ont été inclus dans le suivi sentinelle de façon à bénéficier d'une combinaison de données sanitaires et zootechniques (production laitière et croissance).

#### *ii. Surveillance événementielle*

La surveillance événementielle reposait sur le système préexistant de surveillance événementielle de la brucellose, et encadré réglementairement au niveau national<sup>42</sup>. Ainsi, sur chaque avortement déclaré, un prélèvement supplémentaire en vue d'une recherche virologique de la FVR était réalisé.

Une campagne de sensibilisation sur la déclaration des avortements avait eu lieu en 2011 auprès des éleveurs adhérents de l'ADEM, notamment sur la base d'un prospectus distribué aux éleveurs (cf. Figure 24). Le prospectus a été réutilisé en 2012 auprès des éleveurs sentinelles.

---

<sup>42</sup> Arrêté du 22 avril 2008 fixant les mesures techniques et administratives relatives à la prophylaxie collective et à la police sanitaire de la brucellose des bovins

Arrêté du 13 octobre 1998 fixant les mesures techniques et administratives relatives à la prophylaxie collective et à la police sanitaire de la brucellose ovine et caprine abrogé depuis par l'arrêté du 10 octobre 2013 fixant les mesures techniques et administratives relatives à la prophylaxie collective et à la police sanitaire de la brucellose ovine et caprine. Pour les ovins et caprins, seules les séries d'avortements (au moins trois en sept jours ou moins) font l'objet désormais d'investigations obligatoires.



Figure 24 : document d'information transmis aux éleveurs de l'ADEM en 2011

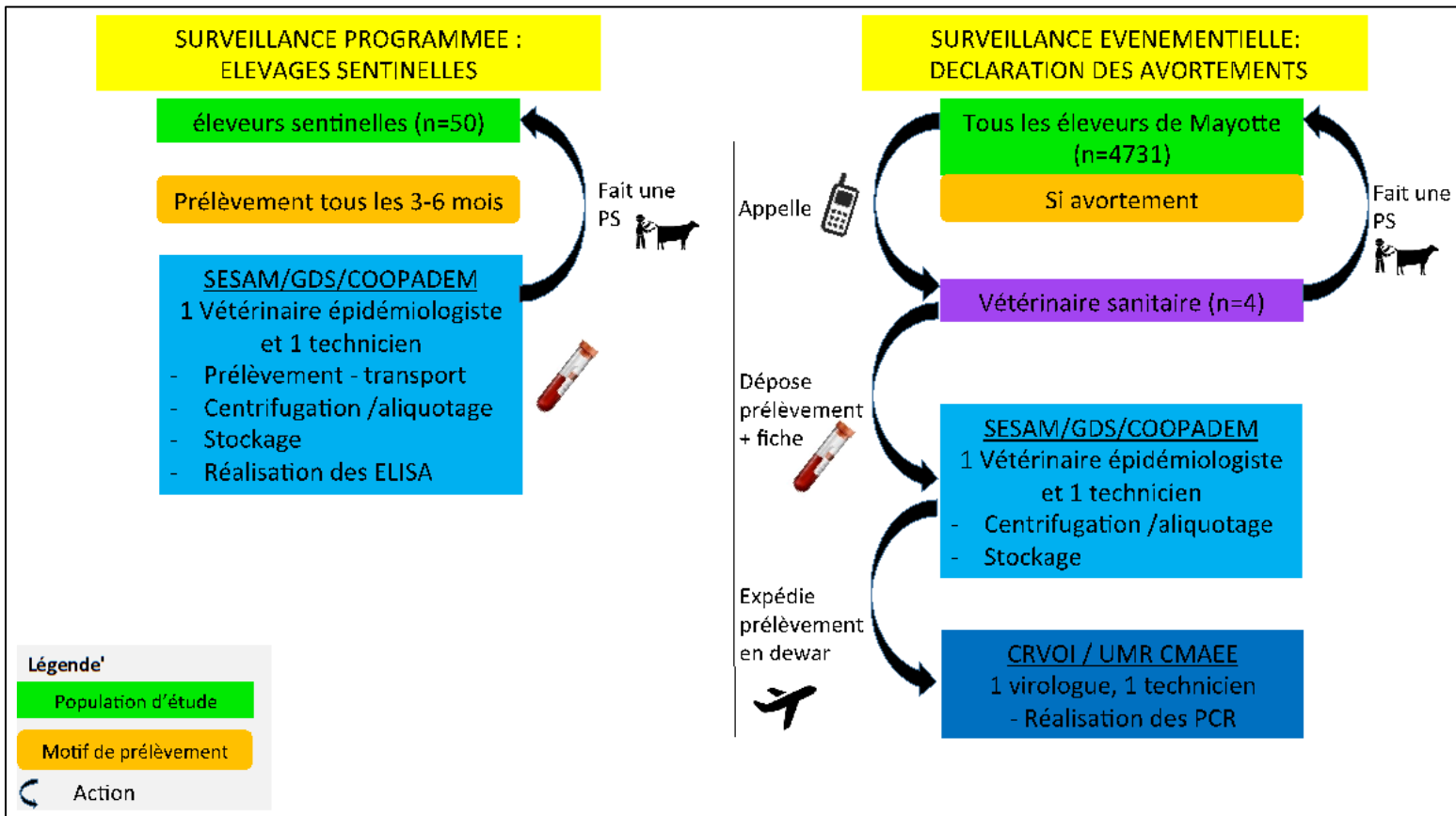


Figure 25. Schéma de fonctionnement des deux composantes du dispositif de surveillance de la FVR du SESAM en 2012 et 2013 (PS = Prise de sang)

### *c. Analyses de laboratoire*

Les sérologies ont toutes été réalisées avec le même kit ELISA commercial de compétition *ID Screen® Rift Valley Fever Competition Multi-species* (Comtet, 2010) et les PCR ont toutes été réalisées par le même laboratoire (Cirad).

### *d. Gestion des données*

La collecte d'information sur le terrain a été standardisée à l'aide de deux fiches de prélèvement :

- l'une spécifique aux prélèvements d'avortement pour la surveillance événementielle (cf. **ANNEXE III**),
- l'autre déjà utilisée dans le cadre des opérations de prophylaxie obligatoire pour les prélèvements dans les troupeaux sentinelles (cf. **ANNEXE III bis**).

Tous les prélèvements ont été centralisés et conditionnés avant envoi ou analyse par une seule personne (animateur du réseau).

Toutes les données de surveillance du SESAM sont enregistrées par l'animateur dans une base de données : la BDD SESAM. Elle fonctionne sous Access® spécialement conçue pour le réseau (la BDD SESAM). La BDD SESAM a pris le relais de la base de données qui avait été utilisée pour le suivi sentinelle 2009-2011 (Lernout et al., 2013).

L'analyse des données a été partagée entre l'animateur et d'autres épidémiologistes basés au Cirad.

### *e. Diffusion des résultats*

Les activités ont fait l'objet de bulletins épidémiologiques diffusés trimestriellement via une liste de diffusion électronique et sur internet<sup>43</sup>.

Des retours plus fréquents étaient faits directement aux services vétérinaires et aux vétérinaires sanitaires des élevages en cas de besoin.

Les résultats des analyses sérologiques étaient remis par écrit aux éleveurs lors de la campagne de prises de sang suivante.

## **2. Organisation institutionnelle**

### *a. Comité technique et comité de pilotage*

A Mayotte où les acteurs sont très peu nombreux, comité technique et comité de pilotage étaient confondus et composés :

- Du chef du service de l'Alimentation de la DAAF de Mayotte;
- D'un représentant du Cirad, qui est à la fois un organisme de recherche et la structure qui anime la surveillance des maladies animales à l'échelle de l'Océan Indien grâce au réseau AnimalRisk OI et à l'origine de la création du SESAM ;
- D'un représentant de la COOPADEM, coopérative agricole qui héberge le SESAM ;
- D'un représentant de chacun des deux cabinets vétérinaires de Mayotte ;
- Du directeur du LVAD (laboratoire vétérinaire d'analyses départemental) ;

---

<sup>43</sup> <http://coatis.rita-dom.fr/mayotte/wakka.php?wiki=BibliothequeE&facette&facette=> (consulté le 29/06/2017)

- De l'animateur du SESAM.

Ce comité se réunit de manière formelle au moins une fois par an.

#### ***b. Unité centrale***

L'unité centrale est composée d'une personne, l'animatrice du réseau, embauchée par le Cirad mais hébergée par la COOPADEM. Le Cirad assure néanmoins un appui technique et scientifique en mettant à disposition plusieurs compétences, basées à la Réunion principalement, en fonction des besoins : stagiaire pour la création de la BDD, experts pour les questions relatives aux analyses de laboratoires, doctorant ou épidémiologiste sénior pour le traitement, l'analyse ou l'interprétation des données, appui logistique et administratif, etc.

#### ***c. Laboratoire***

Le conditionnement des prélèvements a été réalisé au plus près du terrain, dans un laboratoire localisé à la COOPADEM par l'animatrice du réseau. Puis les analyses sérologiques ont été réalisées à Mayotte au LVAD et les analyses PCR à La Réunion au Cirad.

Ni le laboratoire de la COOPADEM, ni le LVAD n'étaient engagés dans une démarche qualité mais il s'agissait des seuls laboratoires existant sur l'île à part des laboratoires d'analyses humaines, non désireux d'ajouter la surveillance des maladies animales à leurs missions.

#### ***d. Intervenants de terrain***

En raison de la petite taille du réseau, le SESAM ne disposait ni d'équipe mobile ni d'unités régionales. Les intervenants de terrain étaient les vétérinaires sanitaires de Mayotte intervenant en élevage de ruminants (au nombre de quatre), l'animatrice du réseau ainsi qu'un technicien de la COOPADEM.

#### ***e. Charte de fonctionnement***

Aucune charte n'avait encore été rédigée pour le SESAM au moment de l'évaluation.

### **3. Financement du SESAM**

Le financement du SESAM pour ces deux années a été principalement permis par le CIOM (Comité interministériel de l'Outre-Mer) qui a contribué au projet porté par le Cirad relatif à « l'appui au développement et à la diversification des filières de ruminants et de volailles à Mayotte ». Ce projet était divisé en deux principales tâches portant sur l'amélioration de « la productivité et l'efficacité technico-économique des exploitations familiales » d'une part et sur l'amélioration de « la surveillance et de la prévention des maladies animales » d'autre part. C'est dans cette deuxième tâche, prévue pour un montant de 430 000 €, qu'apparaissent les missions du SESAM :

- « Consolidation du réseau d'épidémiosurveillance (en construction depuis deux ans - SESAM) pour évaluer la situation sanitaire en temps réel des ruminants et des volailles (informations passives) ;
- Mise en place d'élevages sentinelles répartis uniformément sur l'île (informations actives) pour détecter toute anomalie survenant brusquement ou à bas bruit ; mise en place d'un système d'épidémiogigilance en cas d'introduction d'une maladie exotique ;
- Identification des principales pathologies du bétail (notamment abortives) et des volailles : importance sanitaire et économique ;

- [...]».

A travers ce projet, le SESAM a pu bénéficier de la mise à disposition d'un animateur recruté dans le cadre d'un contrat de volontariat de service civique (VSC) avec le Cirad et de nombreuses autres compétences et ressources du Cirad (collaboration avec des épidémiologistes, des virologues, plateforme d'analyse du CRVOI, etc.)

En complément de ce financement, le SESAM a également pu bénéficier d'un financement complémentaire par le ministère de la Recherche (52 000€/an) et de soutiens divers par le ministère de l'Agriculture (paiement des vétérinaires pour certains prélèvements, dont les visites d'avortement, mise à disposition d'un doctorant dans le cadre d'une formation doctorale pour la conduite de la présente thèse).

#### 4. Résultats de la surveillance de la FVR en 2012-2013

Les résultats ont été présentés dans le **Chapitre I**. En résumé, une incidence de séroconversion d'environ 2 cas pour 100 animaux-ans a été mise en évidence mais aucune manifestation clinique n'a été observée. Aucun des prélèvements concernant les 41 avortements déclarés ne s'est révélé positif lors de la recherche du virus de la FVR par RT-PCR.

## II. Matériel et méthode

### A. Qualité des données

#### 1. « Complétude »

##### *a. Composante n°1 : Surveillance programmée, suivi sentinelle sérologique*

Pour la campagne 2010, les informations étaient disponibles dans des fichiers Excel® qui ont été intégrés dans la BDD SESAM. Les données relatives aux campagnes A, B, C et D ont été directement saisies dans la BDD SESAM. La « complétude des données », c'est-à-dire le pourcentage d'animaux prélevés, inclus dans le suivi, avec des informations complètes a été calculée par année. Les informations qui devaient être disponibles étaient les suivantes :

- identifiant de l'animal
- espèce
- commune
- identifiant élevage
- identifiant du prélèvement
- nature du prélèvement
- date de prélèvement
- date de réalisation de l'analyse
- type de test réalisé
- résultat du test renseigné

Par ailleurs, la complétude de la réalisation de chaque campagne de prélèvements a été évaluée avec deux indicateurs :

- « la complétude de la surveillance au niveau animal » : le pourcentage d'animaux effectivement prélevés par rapport au nombre d'animaux prélevables pour les campagnes intermédiaires A, B et C. Ce nombre d'animaux prélevables a été estimé en ajoutant au nombre d'animaux prélevés, le nombre d'animaux présents aux campagnes de prélèvement antérieure et postérieure et manquant à une ou plusieurs campagnes intermédiaires (c'est à dire les animaux temporairement absents, non retrouvés ou non prélevables à une campagne de prélèvement intermédiaire, alors qu'ils sont présents avant et après) ;
- « la complétude de la surveillance au niveau élevage » : le pourcentage d'élevages ayant des résultats sérologiques à chaque campagne par rapport au nombre d'élevages qu'il était prévu d'inclure dans la campagne. Pour la campagne « 2010 », il était prévu d'analyser les prélèvements réalisés dans les 33 élevages alors suivis par le PAZEM et connus d'après la base de données tenue entre 2009 et 2011. Pour les campagnes A et B, 50 élevages sentinelles devaient faire l'objet de prélèvements. Pour les campagnes C et D, les 50 élevages sentinelles devaient à nouveau faire l'objet de visites de prélèvements. Enfin, les 13 élevages de la campagne 2010 dont le suivi PAZEM avait été interrompu avant 2012 et qui ne faisaient donc pas partie des 50 élevages sentinelles sélectionnés pour le suivi à partir de la campagne A ont été recontactés pour reprogrammer une visite, soit à la campagne C, soit à la campagne D. Les objectifs de prélèvements étaient donc de 57 élevages pour la campagne C et 56 pour la campagne D.

### ***b. Composante n°2 : surveillance évènementielle des avortements***

Jusqu'en mai 2012, les données relatives aux avortements étaient enregistrées au LVAD dans des fichiers Excel®. A partir de mai 2012, les prélèvements supplémentaires pour la recherche du virus de la FVR ont fait l'objet d'un enregistrement dans la BDD SESAM à partir d'un formulaire papier spécifique distribué aux vétérinaires (cf. **ANNEXE III**).

« La complétude des données », c'est-à-dire le pourcentage d'avortements avec des informations complètes, a été calculée pour chaque année. Les informations qui devaient être disponibles étaient les suivantes :

- identifiant de l'animal
- espèce
- commune
- identifiant de l'élevage
- identifiant du prélèvement
- date de la visite du vétérinaire pour les prélèvements

A partir de mai 2012, une recherche virale du virus de la FVR était systématiquement demandée sur les avortements déclarés. Pour 2012 et 2013, les informations suivantes étaient demandées en supplément :

- date de réalisation de l'analyse
- type de test
- résultat du test

La complétude de la réalisation de la surveillance événementielle, appelée ici « complétude de la surveillance au niveau animal » a été définie comme le pourcentage des avortements déclarés ayant pu faire l'objet d'une recherche virologique.

## 2. Validité des données

### *a. Composante n°1 : Surveillance programmée, suivi sentinelle sérologique*

Pour chaque campagne, le pourcentage d'animaux avec des informations valides a été calculé. Pour que les données relatives à un animal prélevé lors d'une campagne soient considérées comme valides, les informations suivantes ont été vérifiées :

- L'identifiant animal devait correspondre au « numéro IPG » (identification pérenne généralisée des bovins), c'est à dire contenir dix chiffres et non se limiter au « numéro de travail » à cinq chiffres, communément utilisé, mais qui n'est pas unique. Concernant les petits ruminants inclus dans le suivi, un collier numéroté devait normalement être posé sur chaque animal suivi pour pallier l'absence de dispositif d'identification généralisé chez ces animaux à Mayotte. Lorsque le numéro de collier était renseigné, sous la forme, « *n°EDE\_M si mouton ou C si caprin\_n° du collier* » l'identifiant animal était considéré comme valide.
- L'identifiant élevage devait correspondre à un « numéro EDE » valide, c'est à dire un numéro à huit chiffres commençant par les cinq chiffres du numéro INSEE (Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques) de la commune de l'élevage « 976XX ». En France, ce numéro unique est délivré par l'établissement départemental d'élevage (EDE), ici, la CAPAM.
- L'identifiant du prélèvement devait être sous la forme « Lettre de la campagne »\_ « initiales de l'animateur du réseau »\_ « numéro à 4 chiffres » (par exemple A\_JD\_0001 pour le premier prélèvement de la campagne A alors que « Jean Dupont » était animateur du réseau). En 2010, les identifiants de prélèvements sont de simples numéros s'incrémentant de 1 à 325.
- Les dates enregistrées de prélèvement et d'analyses devaient être cohérentes : la date de prélèvement devait être antérieure à la date de réalisation de l'analyse de laboratoire et les dates de prélèvements lors de campagnes successives devaient se succéder (par exemple : date du prélèvement pour la campagne A antérieure à la date du prélèvement pour la campagne B).
- Le résultat du test sérologique devait être négatif ou positif. Les prélèvements dont le résultat était initialement douteux devaient faire l'objet d'une nouvelle analyse par le laboratoire du Cirad à la Réunion et une conclusion définitive devait être fournie, un prélèvement deux fois douteux était ainsi considéré comme négatif.

### *b. Composante n°2 : surveillance événementielle des avortements*

Le pourcentage d'avortements avec des informations valides a été calculé pour chaque année. Les informations suivantes étaient vérifiées :

- L'identifiant des bovins devait correspondre au n° IPG, selon les mêmes dispositions que dans la composante n°1.
- L'identifiant élevage devait correspondre à un numéro EDE valide : c'est-à-dire un numéro à huit chiffres commençant par « 976 ».
- L'identifiant du prélèvement devait être sous la forme « Z »\_ « initiales de l'animateur »\_ « numéro à 4 chiffres » (par exemple Z\_JD\_0004 si le 4<sup>ème</sup> prélèvement traité

par l'animateur « Jean Dupont » était un prélèvement d'avortement). En 2010 et 2011, les identifiants de prélèvements sont des numéros uniques liés à la fiche de prélèvement d'avortement fournie par les services vétérinaires aux vétérinaires sanitaires.

- Les dates enregistrées de prélèvement et d'analyses devaient être « cohérentes » : la date de prélèvement devait être antérieure à la date de réalisation de l'analyse de laboratoire.

## B. Sensibilité

L'indicateur de sensibilité choisi ici est la capacité de chaque composante du dispositif de surveillance puis du dispositif complet à détecter au moins un cas de FVR. Elle a été évaluée en utilisant une approche probabiliste déterministe basée sur la méthode des arbres de scénario.

### 1. Méthode des arbres de scénarios et définitions

La méthode des arbres de scénarios appliquée à l'évaluation de la sensibilité des systèmes de surveillance a été utilisée plus particulièrement pour les systèmes de surveillance complexes reposant sur plusieurs composantes de surveillance et pour démontrer le caractère indemne ou non de territoire vis-à-vis de certaines maladies (Christensen and Vallières, 2016; Martin et al., 2007a, 2007b; Rivière et al., 2015). Elle nécessite, pour chaque composante du système de surveillance (en l'occurrence, ici, événementielle et programmée), de distinguer les facteurs influençant les probabilités de détection et d'infection. La population d'étude est ainsi divisée en groupes homogènes vis-à-vis de la probabilité d'être infectés et détectés (cf. Figure 26), par exemple par niveau de risque géographique, par espèce, tranche d'âge selon le contexte épidémiologique, etc. La probabilité d'une branche de l'arbre sera obtenue en multipliant les probabilités de survenue de chaque événement représenté par un nœud en amont de cette branche.

On note  $CSeU_{Composante}$ , la sensibilité *individuelle* au sein d'une composante, qui correspond à la probabilité qu'un animal choisi aléatoirement dans la population soit infecté et détecté comme tel par cette composante du dispositif de surveillance (Martin et al., 2007a; Rivière, 2016). Elle correspond à la (les) branche(s) aboutissant à un résultat de détection positif d'un cas (cf. Figure 26). La sensibilité individuelle sera calculée en multipliant simplement les probabilités des nœuds sur chaque branche considérée puis en additionnant les probabilités ainsi obtenues.

On note  $CSe_{Composante}$ , la sensibilité *de chaque composante* du système de surveillance (ou encore sensibilité « globale » ou « collective » de la composante), qui correspond à la probabilité qu'au moins un animal infecté soit détecté par cette composante, compte-tenu du niveau de prévalence et d'incidence réels de la maladie dans le système étudié. Elle peut aussi être calculée en fonction de taux de prévalence et d'incidence théoriques qui sont souvent des seuils convenus par la réglementation pour déclarer des territoires indemne de la maladie étudiée. La sensibilité  $CSe_{Composante}$  dépend de la sensibilité individuelle et du nombre  $n$  d'individus soumis à la surveillance selon la formule suivante :  $CSe_{Composante} = 1 - (1 - CSeU_{Composante})^n$ .

La sensibilité d'un dispositif de surveillance ( $SSe$ ) dans son ensemble, basé sur un nombre  $K$  de composantes indépendantes (dans le cadre de la FVR et du SESAM,  $K=2$ ) peut-être calculée en combinant simplement les sensibilités de chaque composante de la façon suivante (Cannon, 2002; Martin et al., 2007a; Rivière, 2016):  $SSe = 1 - \prod_{i=1}^K (1 - CSe_j)$ .



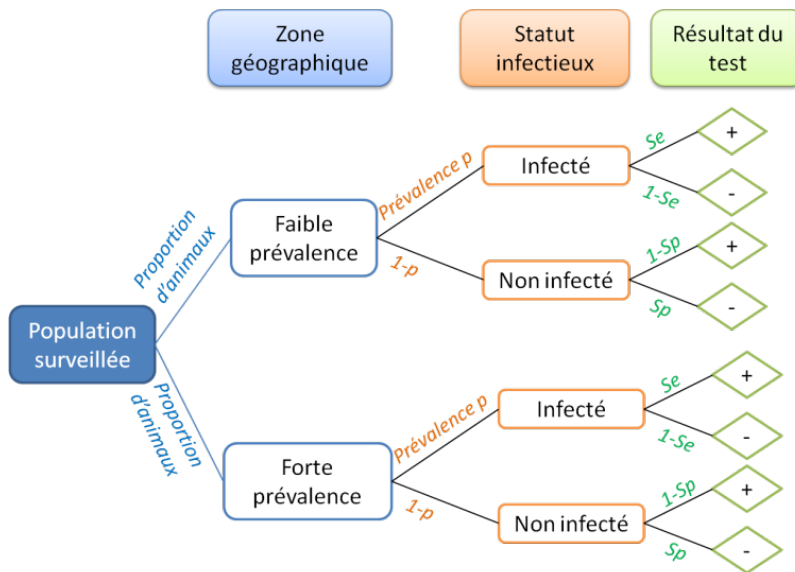


Figure 26. Présentation schématique d'un arbre de scénario pour une composante du système de surveillance (source : Rivière 2016)

## 2. Méthode des arbres de scénarios appliquée à la surveillance de la FVR du SESAM

Les deux composantes du dispositif seront décrites ci-dessous en termes d'événements influençant la détection de la maladie et les arbres correspondants sont décrits dans les Figure 27 et Figure 28. Deux estimations de la sensibilité seront faites pour chaque composante (CSe) : une estimation *a priori* à partir des données de prévalence/incidence/probabilité de déclaration des avortements disponibles ou observées avant le démarrage de notre étude et une estimation *a posteriori* avec les données observées au cours de notre propre étude en 2012-2013.

### a. Composante n°1 : Surveillance programmée, suivi sentinelle sérologique

Le fonctionnement de la surveillance programmée a été décrit dans la première partie du chapitre. Les étapes de détection de la FVR et leurs probabilités dans le cadre de cette composante du dispositif de surveillance sont décrites ci-dessous (voir également Figure 27 et Tableau 10) :

- Le nombre d'animaux soumis à la surveillance programmée a été estimé comme étant le nombre de bovins âgés de plus de 6 mois au 01/05/2012 (date de démarrage de la surveillance), soit 18 965 bovins d'après une extraction de la BDNI (Base de Données Nationale de l'Identification) en Octobre 2015. Afin de tenir compte de l'incertitude sur l'âge des animaux inclus dans le suivi (dates de naissances inexactes), un intervalle d'âge de 4 à 12 mois a été pris en compte.
- Pour être infectés, les animaux doivent être sensibles à la FVR, c'est-à-dire être séronégatifs. Pour l'estimation *a priori*, cette probabilité a été déduite de la séroprévalence évaluée par les premières enquêtes du SESAM (Lernout et al., 2013) et pour l'estimation *a posteriori* les valeurs de séroprévalence trouvée dans la première partie du chapitre pour la série AB ( $\tau_{I_{obs} AB} = 2,3\%$ ,  $IC_{95\%} [0,5 ; 7,5]$ ) ont été utilisées.
- L'infection par la FVR que nous voulons détecter est caractérisée par un taux d'incidence réel que nous ne connaissons pas *a priori*. Le taux d'incidence décrit lors des précédentes études

du SESAM a été utilisé *a priori*, le taux d'incidence estimé dans la première partie de ce chapitre a été utilisé *a posteriori*.

- L'animal infecté doit appartenir à un des 50 élevages sentinelles sélectionnés parmi les 3580 élevages recensés en 2010 par les services du ministère de l'agriculture (DAAF Mayotte, 2011b), ce qui correspond à un taux de sondage au niveau élevage de 1,4%. Cependant, le nombre d'élevages à Mayotte n'est pas connu de façon très précise, 3 177 élevages seulement étaient répertoriés dans la base de données de la CAPAM en 2012. Des taux de sondage minimum et maximum ont donc été aussi considérés allant de 1 à 2%.
- Pour être détectée par le dispositif, la séroconversion consécutive à l'infection doit être mise en évidence par les tests sérologiques programmés chez l'animal infecté (Bird et al., 2009). Pour simplifier l'approche, il n'a pas été tenu compte du fait qu'un animal pouvait avoir été vendu ou être mort entre le moment de son infection et celui de son prochain test. L'animal devait correspondre aux conditions suivantes :
  - L'animal d'abord naïf doit avoir un résultat négatif en sérologie avant sa séroconversion, la probabilité de cet événement correspond à la spécificité du test ELISA utilisé ;
  - L'animal une fois infecté et qui a séroconverti doit être détecté positif par le test ELISA, ce qui correspond à la sensibilité du test ELISA.

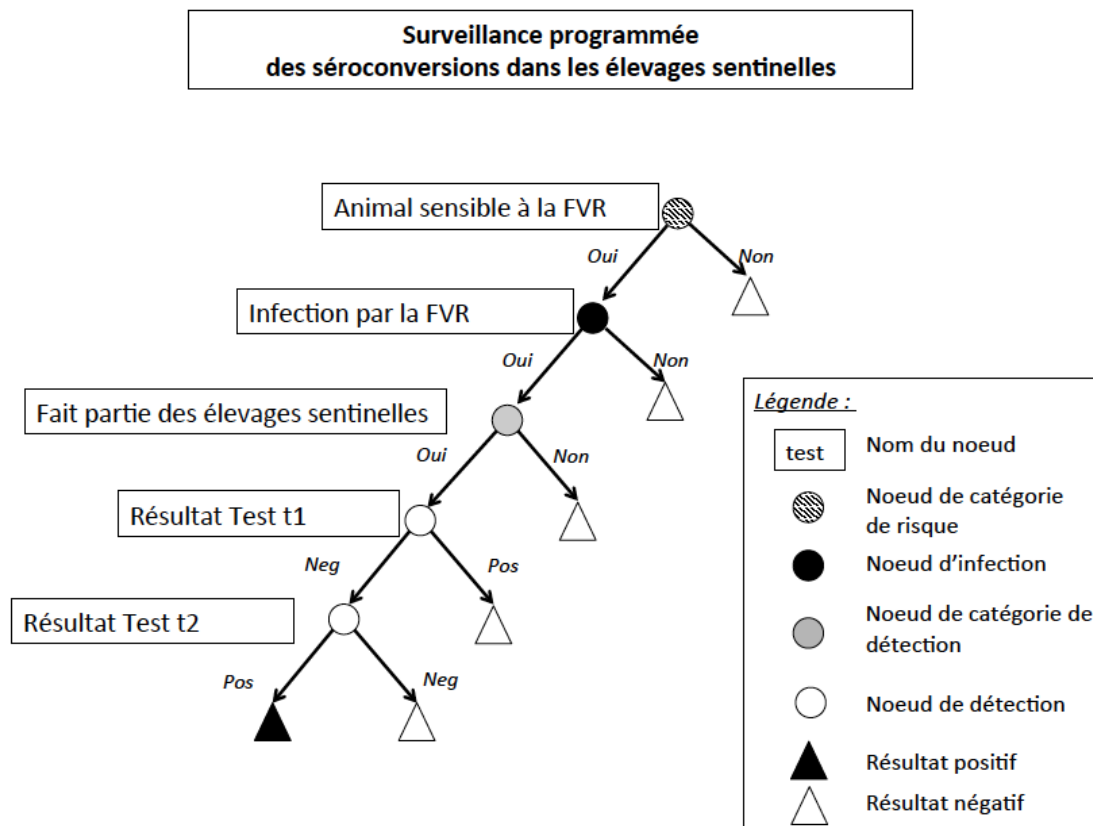


Figure 27. Arbre de scénario pour la sensibilité de la surveillance programmée de la FVR du SESAM

Tableau 10. Valeurs utilisées *a priori* pour le calcul de la sensibilité de la surveillance programmée

Paramètres	Valeurs <i>a priori</i>	Référence/source
Probabilité que l'animal soit sensible (séronégatif)	73,2 % IC <sub>95%</sub> [64,7 ; 80,9]	Lernout 2013
Taux d'incidence annuel de la FVR à Mayotte	12,9% IC <sub>95%</sub> [9,6 ; 16,2]	Lernout 2013
Taux d'inclusion dans le suivi	1,4% [1,0 ; 2,0]	RA 2010, Base CAPAM 2012
Spécificité du test ELISA	100,0% [99,5 ; 100,0]	Comtet 2010, Kortekaas 2013
Sensibilité du test ELISA	100,0% [91,0 ; 100,0]	Comtet 2010, Kortekaas 2013
Nombre d'animaux soumis à la surveillance (bovins de plus de 6 mois [4 ; 12])	18 965 [17 640 ; 19 252]	BDNI octobre 2015

### b. Composante n°2 : surveillance événementielle des avortements

Le fonctionnement de la surveillance événementielle a été décrit dans la première partie du chapitre. Les étapes de détection et leurs probabilités dans le cadre de cette composante du dispositif sont décrites ci-dessous (voir également Figure 28 et Tableau 11) :

- La population soumise à cette surveillance événementielle rassemble les bovins femelles potentiellement en gestation. Sachant qu'à Mayotte, l'âge à partir duquel une femelle devient reproductrice est estimé à 3 ans et que le taux de mise-bas s'élève en moyenne à environ 50% (Tillard et al., 2013), nous avons estimé cette population en ne conservant que 50% des bovins femelles de plus de 3 ans présents à Mayotte pendant l'étude, soit environ 4 701 animaux (source : BDNI).
- Pour être infectés, les animaux doivent être sensibles à la FVR, c'est-à-dire être séronégatifs. Pour l'estimation *a priori*, cette probabilité a été déduite de la séroprévalence évaluée par les premières enquêtes du SESAM (Lernout et al., 2013) et pour l'estimation *a posteriori* les valeurs de séroprévalence trouvées dans la première partie du chapitre ont été utilisées.
- L'infection par la FVR que nous voulons détecter est caractérisée par un taux d'incidence réel que nous ne connaissons pas au moment de démarrer le suivi. Le taux d'incidence décrit lors des précédentes études du SESAM a été utilisé pour l'estimation *a priori*, le taux d'incidence estimé dans la première partie de ce chapitre pour la série AB ( $\tau_{I_{obs\ AB}} = 2,3\%$ , IC<sub>95%</sub>[0,5 ; 7,5]) a été utilisé *a posteriori*.
- La probabilité que la vache gestante et infectée par la FVR avorte semble importante, c'est en effet un phénomène communément décrit dans la plupart des épizooties (Bird et al., 2009). Un taux d'avortement de 50% [25 ;75] a été appliqué.
- L'éleveur doit ensuite détecter l'avortement. Un taux de détection moyen d'environ 30% a été estimé d'après la comparaison de plusieurs études sur les taux d'avortement observés ou non dans des systèmes de production laitiers occidentaux (Forar et al., 1995). Pour le système mahorais plus traditionnel, une probabilité de détecter l'avortement de 20% [10 ; 30] a été appliquée.
- L'éleveur doit ensuite faire la démarche de déclarer officiellement l'avortement. Le taux de déclaration parmi les éleveurs ayant détecté un avortement a été estimé en France à environ 34% (Bronner et al., 2013a) et nous avons utilisé cette estimation *a priori* comme la borne

supérieure de ce qui était envisageable pour le contexte mahorais. Nous avons souhaité estimer plus précisément la probabilité que les éleveurs mahorais ayant détecté des avortements les déclarent et utiliser cette estimation pour le calcul *a posteriori* de la sensibilité de la composante. Pour ce faire, nous avons estimé la fréquence de détection d'avortements, en interrogeant directement les éleveurs du suivi sentinelle FVR sur la survenue d'éventuels avortements et en leur demandant de préciser l'année de survenue de ces avortements. La fréquence de détection d'avortements ainsi calculée a été comparée à la fréquence de déclaration d'avortement d'après le fichier de déclaration officiel pour évaluer le niveau moyen de sous-déclaration des avortements à Mayotte, en prenant pour hypothèse que seule la fréquence de déclaration variait entre les éleveurs sentinelles (dont une partie était en contact régulier de la COOPADEM pour les suivis zootechniques et avaient pu faire l'objet d'une sensibilisation plus importante) et la population générale alors que la fréquence de survenue et de détection des avortements n'était pas significativement différente. Pour pouvoir les comparer, la fréquence annuelle d'avortement trouvée dans ces deux cas a été rapportée au nombre total de femelles de plus de 6 mois [4 ; 12] recensées dans la BDNI à Mayotte pour ce qui concerne le fichier d'enregistrement des avortements du LVAD et au nombre de femelles incluses dans le suivi et donc âgées de plus de 6 mois environ en ce qui concerne les éleveurs sentinelle interrogés. L'information dans la BDD SESAM étant à ce moment-là et sur cet échantillon précise en théorie plus précise que la BDNI qui connaît encore un certain décalage avec la réalité du terrain.

- Une fois l'avortement déclaré, des prélèvements sont réalisés par le vétérinaire sanitaire tant pour la recherche de la FVR que de la brucellose. Une RT-PCR est mise en œuvre pour la détection virale de la FVR avec une sensibilité très élevée, estimée à 100% pendant la phase virémique (Bird et al., 2007b).

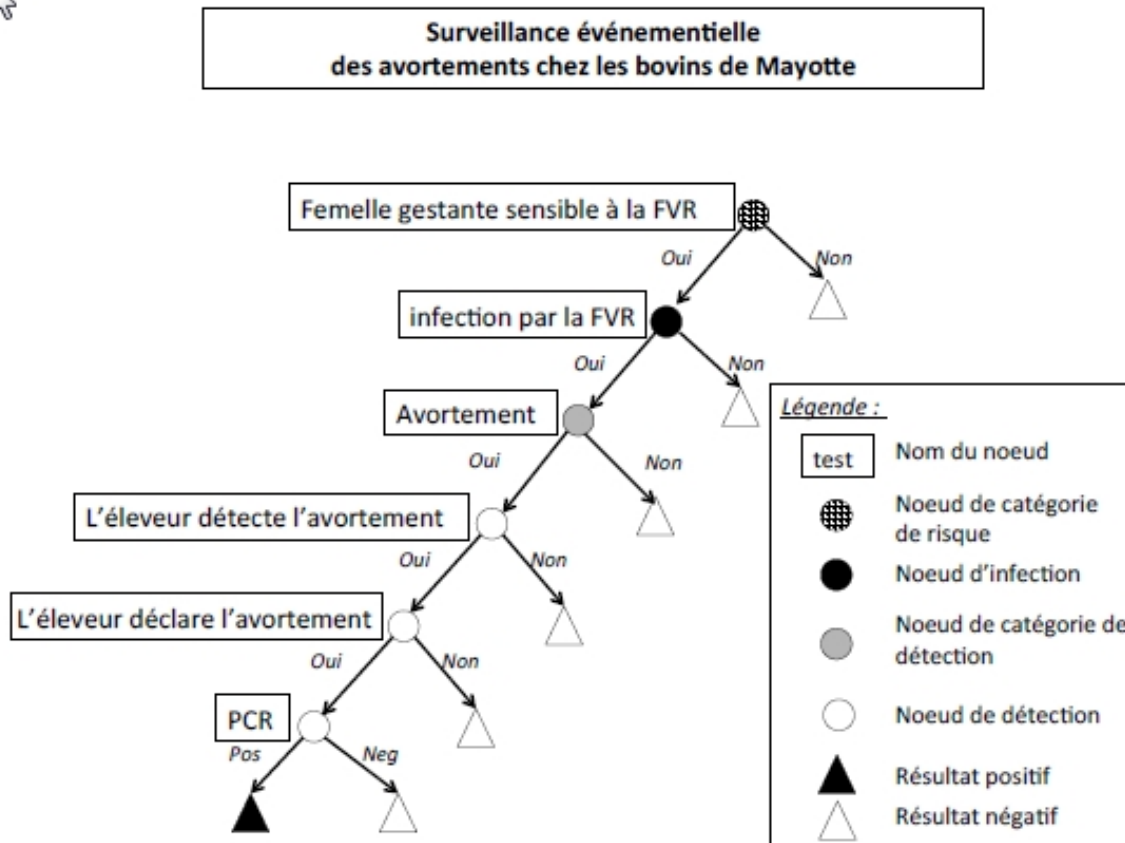


Figure 28. Arbre de scénario pour la sensibilité de la surveillance événementielle de la FVR du SESAM

Tableau 11. Valeurs utilisées *a priori* pour le calcul de la sensibilité de la surveillance événementielle

Paramètre	Valeurs <i>a priori</i>	Référence/ source
Probabilité que l'animal soit sensible (séronégatif)	73,2 % IC <sub>95%</sub> [64,7 ; 80,9]	Lernout 2013
Taux d'incidence annuel de la FVR à Mayotte	12,9% IC <sub>95%</sub> [9,6 ; 16,2]	Lernout 2013
Probabilité qu'une vache infectée gestante avorte	50% [25 ; 75]	Bird 2009
Probabilité de détection de l'avortement	20% [10 ; 30]	Forar 1995, - estimation
Probabilité de déclaration de l'avortement	4,9% [4,8 ; 5,6]	Bronner 2013 - estimation
Sensibilité du test PCR	100%	Bird 2007
Nombre d'animaux soumis à la surveillance (femelles gestantes de plus de 3 ans au 30 juin 2012 [2 ; 4])	4 701 [4 142 ; 5 307]	BDNI – octobre 2015

### C. Acceptabilité : rapport coût-efficacité et efficience

Le rapport coût/efficacité est calculé pour chaque composante du dispositif de surveillance (programmée et événementielle) entre mai 2012 et fin 2013. Ce calcul permet d'identifier les postes budgétaires qui pourraient faire l'objet d'optimisation et de discuter de la justification de la surveillance programmée.

Les coûts associés à la surveillance de la FVR par le SESAM ont été répartis en trois catégories : les investissements, les coûts relatifs aux moyens humains ainsi que les coûts de fonctionnement. Pour le calcul des coûts, une méthode de budget partiel, n'incluant que les coûts variables entre les composantes a été choisie, permettant d'alléger la démarche aux seuls éléments différenciant les composantes du dispositif (Cavalerie, 2011). Le détail des coûts pris en compte est présenté dans **l'ANNEXE V**.

La répartition des investissements et des autres dépenses communs aux deux composantes de la surveillance s'est faite au pro-rata du nombre d'échantillons traités par chaque composante. Certains équipements ou moyens humains sont également dédiés à d'autres missions du SESAM. Le pourcentage du temps d'animation global dédié à la surveillance de la FVR a été estimé. Ces estimations comportant des incertitudes, une variation de +/- 20 % a été prise en compte pour les dépenses concernées.

L'efficacité est représentée ici par le nombre de prélèvements réalisés pour chaque composante, le nombre de cas détectés par chaque composante et la sensibilité de chaque composante calculée d'après la démarche décrite ci-dessus. Le rapport coût-efficacité a été calculé pour chacun de ces trois critères.

L'efficience a été abordée sous l'angle de l'optimisation des coûts de fonctionnement en comparant le fonctionnement existant avec un scénario alternatif fondé sur la délégation des activités de prélèvements de l'animateur du SESAM vers les vétérinaires sanitaires. Une fois par an, les vétérinaires se rendent dans chaque élevage dans le cadre de la prophylaxie, il suffirait dans ce scénario de leur payer la réalisation d'un prélèvement supplémentaire pour la FVR. Il resterait ensuite à la charge de l'Etat, une deuxième visite annuelle dédiée uniquement aux prélèvements en vue d'analyses sérologiques FVR. Dans le cadre des visites d'avortement, les vétérinaires seraient également en charge de l'éventuelle autopsie de l'avorton. Les analyses seraient enfin toutes réalisées au laboratoire du Cirad à la Réunion. Cette réorganisation permettrait de dégager un temps important (qui passerait de 80% à 10% de son temps pour le suivi de la surveillance de la FVR) à l'animateur du SESAM pour effectuer d'autres tâches que la réalisation des prélèvements tout en dégageant un financement suffisant pour mobiliser des chercheurs, notamment en épidémiologie pour participer à l'analyse des données. **L'ANNEXE V bis** présente le détail de ce scénario pour chacune des composantes de surveillance (programmée et événementielle).

## D. Réactivité

Nous avons étudié le délai entre la date de prélèvement et la date d'analyse qu'il s'agisse de l'analyse ELISA dans le cadre de la surveillance programmée ou de la RT-PCR dans le cadre de la surveillance événementielle des avortements.

Un objectif a été proposé avec l'animatrice du SESAM d'avoir des premiers résultats d'analyse dans les 30 jours suivant le prélèvement. Le pourcentage de prélèvements respectant cet objectif a été calculé.

### III. Résultats

#### A. Qualité des données

Les tableaux présentés ci-après présentent la valeur de plusieurs indicateurs dont la couleur reflète la qualité : du vert pour les valeurs optimales au rouge pour les valeurs les moins favorables.

##### 1. Complétude

###### a. Composante n°1 : surveillance programmée, suivi sentinelle sérologique

Concernant la surveillance programmée des élevages sentinelles, la complétude des données était parfaite à l'exception de l'absence de dates précises de prélèvements de 203 animaux de l'année 2010 (cf. Tableau 12).

Les objectifs de réalisation de la surveillance programmée n'ont en revanche pas été totalement atteints. Lors du démarrage du nouveau suivi sentinelle en 2012, les deux premières campagnes de prélèvements (A et B) ont été quasi-complètes (respectivement 49 et 48 élevages visités sur 50 prévus), en revanche, les prélèvements de seulement 27 des 33 élevages suivis en 2010 ont pu être retrouvés et analysés. Les campagnes C et D ont également été plus difficiles à conduire (respectivement 54 et 43 élevages visités sur 57 et 56 prévus, et 91 animaux du suivis n'ont pas été prélevés en campagne C), en raison des difficultés à retrouver les élevages de 2010 dont les coordonnées avaient pu évoluer, mais aussi de conditions logistiques difficiles (saisons des pluies et fin de contrat du technicien en appui aux visites d'élevages).

Tableau 12. Complétude des données de la surveillance programmée des élevages sentinelles (NA=non applicable)

Campagne	Informations manquantes	nb animaux avec informations complètes	nb animaux prélevés	Complétude des données	Complétude de la réalisation de la surveillance	
					Complétude de la surveillance au niveau animal	Complétude de la surveillance au niveau élevage
2010	203 animaux avec jour et mois de prélèvement manquants	122	325	38%	NA	27/33 (82%)
2012	Campagne A	NA	533	100%	96%	49/50 (98%)
	Campagne B	NA	534	100%	92%	48/50 (96%)
2013	Campagne C	NA	449	100%	83%	54/57 (95%)
	Campagne D	NA	447	100%	NA	43/56 (77%)

### ***b. Composante n°2 : surveillance événementielle des avortements***

Concernant la composante événementielle de la surveillance, le principal problème pour la complétude des données a été l'identification animale : au total, dix animaux, sur 72 avortements enregistrés, n'avaient aucune information d'identification (cf. Tableau 13). Pour sept animaux, l'espèce n'était pas renseignée.

La recherche virale de FVR s'est généralisée sur les avortements déclarés à Mayotte à partir de mai 2012. Sur les 16 avortements enregistrés entre mai et décembre 2012, seuls 13 ont eu une analyse RT-PCR. La complétude de la surveillance au niveau animal a été de 81% pour la période mai - décembre 2012 puis de 100% en 2013.

**Tableau 13. Complétude des données de la surveillance événementielle des avortements**

Période	Informations manquantes		nb avortements avec informations complètes	nombre avortements	Complétude des données	Complétude de la surveillance au niveau animal
	Identifiant animal	espèce				
<b>2010</b>	2 non identifiés		6	8	75%	NA
<b>2011</b>	3 non identifiés	5 manquants	7	12	58%	NA
<b>2012</b>	1 non identifié	2 manquants	22	24	92%	81%
<b>2013</b>	4 non identifiés		24	28	86%	100%

## **2. Validité des données**

### ***a. Composante n°1 : surveillance programmée, suivi sentinelle sérologique***

Le principal problème de validité des données de la surveillance programmée concernait l'identification animale. Les trois-quarts des problèmes consistaient en un enregistrement du numéro de travail uniquement au lieu d'un numéro IPG complet (cf. Tableau 14). L'absence complète d'identification de certains animaux représentait la majorité du reste des problèmes. Une forte amélioration a cependant été notée entre 2010 et la partie plus récente du suivi depuis 2012.



Tableau 14. Validité des données de la surveillance programmée

Campagne	Informations invalides		nb animaux avec informations invalides	nb animaux prélevés	Validité des données
	IPG invalide	dates illogiques (dates de prélèvement postérieures à la date d'analyse)			
2010	7 bovins non bouclés 159 IPG incomplets (n° de travail)	0	166	325	49%
2012	Campagne A 6 bovins non bouclés 37 IPG incomplets (n° de travail) 1 IPG non conforme* 9 petits ruminants sans collier	0	53	533	90%
	Campagne B 11 bovins non bouclés 48 IPG incomplets (n° de travail) 1 IPG non conforme*	5 animaux dont 1 avec IPG également invalide	64	534	88%
2013	Campagne C 25 bovins non bouclés 29 IPG incomplets (n° de travail) 2 IPG avec faute de frappe 2 IPG non conformes* 5 petits ruminants sans collier	5 animaux dont 1 avec IPG également invalide	67	449	85%
	Campagne D 9 bovins non bouclés 41 IPG incomplets (n° de travail) 1 IPG non conforme* 2 IPG avec erreur frappe 14 petits ruminants sans collier	0	67	447	85%

\* un animal a été vendu et la structure de la BDD ne permettait pas de rattacher un même animal à deux élevages différents, un nouveau numéro a donc été donné à cet animal dans la BDD

### ***b. Composante n°2 : surveillance événementielle des avortements***

Concernant la surveillance événementielle, le principal problème a aussi été l'identification des animaux, combinée à l'absence d'identifiant élevage valide (cf. Tableau 15). En 2010 et 2011, le LVAD n'enregistrait que les noms des éleveurs. L'enregistrement du numéro EDE et IPG complets s'est un peu améliorée pour atteindre 21% d'enregistrements valides en 2013.

Tableau 15. Validité des données de la surveillance événementielle

	Informations invalides		nb avortements avec informations invalides	nb avortements	Validité des informations
	IPG invalide	n° EDE invalide			
2010	6 n° de travail 2 chèvres non identifiées	8 (nom de l'éleveur uniquement)	8	8	0%
2011	7 n° de travail 2 identifiants invalides 3 non renseignés	12 (nom de l'éleveur uniquement)	12	12	0%
2012	11 n° de travail 4 descriptions d'animaux non identifiés 4 invalides 1 non renseigné	12 (nom de l'éleveur uniquement et IPG également invalides)	20	24	17%
2013	8 n° de travail 8 petits ruminants non identifiés 2 invalides 4 non renseignés	9 (nom de l'éleveur uniquement dont 8 avec également un IPG invalide)	22	28	21%

## B. Sensibilité

### 1. Composante n°1 : surveillance programmée, suivi sentinelle sérologique

La sensibilité individuelle ( $CSeU_{programmée}$ ) de la surveillance programmée de la FVR à Mayotte était très faible à savoir de 0,1% [0,1 ; 0,3] *a priori* et de 0,0% [0,0 ; 0,1] *a posteriori*. La sensibilité globale ( $CSe_{programmée}$ ) de la surveillance programmée est restée bonne (100% *a priori*, 99,4 % [47,5 ; 100,0] *a posteriori*), même si la précision s'est dégradée.

 Tableau 16. Valeurs estimées *a priori* et *a posteriori* de sensibilité de la surveillance programmée

	<i>A priori</i> [min ; max]	<i>A posteriori</i> (Série AB) [min ; max]
Sensibilité individuelle ou probabilité qu'un animal soit infecté et détecté ( $CSeU_{programmée}$ )	0,1% [0,1 ; 0,3]	0,0% [0,0 ; 0,1]
Sensibilité globale ou probabilité de détecter au moins un cas ( $CSe_{programmée}$ )	100,0% [100,0 ; 100,0]	99,4 % [47,5 ; 100,0]

### 2. Composante n°2 : surveillance événementielle des avortements

La sensibilité individuelle ( $CSeU_{événementielle}$ ) de la surveillance événementielle de la FVR à Mayotte était *a priori* du même ordre de grandeur que la surveillance programmée, soit 0,2% [0,0 ; 1,5] (cf. Tableau 18). La sensibilité *a priori* de la composante événementielle ( $CSe_{événementielle}$ ) était également bonne

100,0% [47,4 ; 100,0], avec une précision cependant moins importante que l'estimation concernant la surveillance programmée.

L'enquête auprès de 53 éleveurs inclus dans le suivi du SESAM a montré que les éleveurs interrogés avaient détecté seize avortements (dans douze élevages) sur la période d'étude (janvier 2011 - juin 2012), parmi lesquels sept avaient fait l'objet d'une déclaration officielle, soit 44%. Cette situation correspond à environ 3 avortements détectés et à 1,3 avortement déclaré par an pour 100 femelles de plus de six mois présentes dans les élevages.

Dans la population générale et sur l'année 2012, dix-huit avortements sur des bovins (et un avortement sur un ruminant dont l'espèce n'a pas été enregistrée) ont été déclarés officiellement et enregistrés au LVAD, représentant une fréquence d'environ 1 avortement pour 1000 femelles seulement déclaré aux services vétérinaires (cf. Tableau 17). En considérant une fréquence de détection identique avec les éleveurs du suivi sentinelle, le taux de déclaration a ainsi été estimé *a posteriori* à 4,9% [4,8 ; 5,6], soit six fois moins que l'estimation *a priori* d'après la bibliographie en France métropolitaine (Bronner et al., 2013a).

Tableau 17. Estimation de la proportion de déclaration parmi les avortements observés à Mayotte

Paramètre	Valeur [min ; max]	source
<b>Avortements détectés dans les élevages du SUIVI sentinelle SESAM FVR</b>		
Nombre d'avortements sur des bovins détectés de janvier 2011 à Juin 2012	16	Enquête sur questionnaire aux éleveurs
Nombre de bovins femelles d'environ plus de 6 mois dans les 53 élevages du SESAM ayant répondu à la question (14 bovins de sexe inconnu)	368 [368 ; 382]	BDD SESAM et BDNI
<b>Nombre d'avortements observés pour 100 bovins femelles incluses dans le suivi SESAM pendant 1 an</b>	<b>2,8% [2,8 ; 2,9]</b>	-
<b>Avortements déclarés dans le cadre du dispositif de DECLARATION des AVORTEMENTS valable pour tout Mayotte</b>		
Nombre de femelles de plus de 6 mois [4;12] au 30/06/2012 à Mayotte	12 658 [12 079 ; 12 993]	BDNI
Nombre d'avortements sur bovins déclarés en 2012 [1 avortement sur espèce inconnu]	18 [18 ; 19]	LVAD
<b>Nombre d'avortements déclarés pour 100 femelles à Mayotte pendant 1 an</b>	<b>0,1% [0,1 ; 0,2]</b>	-
<b>Proportion estimée d'avortements déclarés</b>	<b>4,9% [4,8 ; 5,6]</b>	-

La sensibilité individuelle ( $CseU_{\text{événementielle}}$ ) de la surveillance événementielle de la FVR à Mayotte était *a posteriori* de 0,0% [0,0 ; 0,1], soit toujours très faible (comme dans l'estimation *a priori* mais aussi pour la surveillance programmée) (cf. Tableau 18). La sensibilité de la surveillance événementielle ( $Cse_{\text{événementielle}}$ ) a en revanche été divisée par plus de deux par rapport à l'estimation *a priori* (100% [47,4 ; 100,0] *a priori*, 35,9% [2,0 ; 98,7] *a posteriori*) et est donc aussi plus faible que la surveillance programmée. La précision de cette estimation est néanmoins très mauvaise.

Tableau 18. Valeurs estimées *a priori* et *a posteriori* de sensibilité de la surveillance événementielle

	<b>A priori [min ; max]</b>	<b>A posteriori (2011-2012) [min ; max]</b>
Sensibilité individuelle ou probabilité qu'un animal soit infecté et détecté ( $CSeU_{\text{événementielle}}$ )	0,2% [0,0 ; 1,0]	0,0% [0,0 ; 0,1]
Sensibilité de la composante ou probabilité de détecter au moins un cas ( $Cse_{\text{événementielle}}$ )	100,0% [47,4 ; 100,0]	35,9 % [2,0 ; 98,7]

### 3. Sensibilité du dispositif de surveillance de la FVR

En combinant les performances des deux composantes du dispositif de surveillance de la FVR, la sensibilité estimée *a priori* est de 100,0% [100,0 ; 100,0] alors que la sensibilité estimée *a posteriori* est de 99,6% [48,5 ; 100,0]. Globalement la sensibilité du dispositif s'adapte au dispositif le plus sensible, ici la surveillance programmée.

#### C. Acceptabilité : rapport coût-efficacité et efficience

Le détail du budget partiel est présenté en **ANNEXE V**. Dans le cadre de la surveillance programmée, 1963 prélèvements ont été traités, contre 41 avortements (et 80 prélèvements) dans le cadre de la surveillance événementielle. La répartition des postes de dépenses communs aux deux composantes du dispositif a été faite selon un ratio de 96% [94 ; 98] pour la surveillance programmée et de 4% [2 ; 6] pour la surveillance événementielle. Enfin, il a été estimé que 80% du temps d'animation du SESAM était dédié à la FVR, contre 20% pour les autres missions (conseils, parasitisme, surveillance des « bavites », etc.).

Les montants du budget partiel par grande catégorie de dépenses sont présentés dans le Tableau 19. La surveillance programmée est près de douze fois plus coûteuse que la surveillance événementielle (128 000 € contre 11 000 €) ou dix fois plus en excluant les investissements liés à la création d'un laboratoire de terrain au sein des bâtiments de la COOPADEM afin principalement de traiter les échantillons en vue des sérologies (cf. Figure 30).

Tableau 19. Bilan en budget partiel des coûts et de l'efficacité des deux composantes du dispositif de surveillance de la FVR à Mayotte

		Surveillance programmée (sentinelles sérologiques) [min ; max]	Surveillance événementielle (avortements) [min ; max]
Coûts	Investissements	51 k€ [47 ; 56]	1,8 k€ [0,8 ; 3,0]
	Personnel	57 k€ [49 ; 65]	6,8 k€ [4,5 ; 9,4]
	Fonctionnement	20 k€ [19 ; 21]	0,9 k€ [0,6 ; 1,2]
	Total	128 k€ [114 ; 143]	11 k€ [9 ; 14]
	Total hors investissement	77 k€ [68 ; 87]	8 k€ [5 ; 11]

Critères d'efficacité	Nb échantillons pris en charge	1963 prélèvements	41 avortements
	Nb de cas détectés	18 cas possibles (séroconversions)	0 résultat positif
	Sensibilité <i>a posteriori</i> (CSe)	99,4 % [47,5 ; 100,0]	35,9 % [2,0 ; 98,7]
Rapport coût-efficacité	Coût (hors investissement) par échantillon pris en charge	39 € [34 ; 44]	189 € [125 ; 261]
	Coût par cas détecté	4 k€ [4 ; 5]	> 8 k€ [5 ; 11]
	Coût par point de sensibilité	774 € [676 ; 1825]	215 € [52 ; 5401]

Efficience	Coût optimisé/échantillon	27 € [22 ; 32]	154 € [121 ; 193]
	Indicateur d'optimisation	69% [64 ; 72]	82% [74 ; 97]

En ce qui concerne l'efficacité, un nombre très supérieur de prélèvements a été traité par la surveillance programmée par rapport à la surveillance événementielle et seule la surveillance programmée a pu mettre en évidence des cas possibles de FVR. La sensibilité de la surveillance programmée semble aussi meilleure que celle de la surveillance événementielle même si l'estimation de cette dernière reste imprécise. Le rapport coût-efficacité sur le premier critère est au moins trois fois plus favorable pour la surveillance programmée que pour l'événementielle. Il reste également favorable à la surveillance programmée pour le coût par nombre de cas détectés. Le rapport coût-efficacité relatif à la sensibilité serait en revanche en faveur de la surveillance événementielle dans la situation la plus optimiste, mais l'imprécision de son estimation, à nouveau, empêche de conclure sur cet aspect.

En optimisant le fonctionnement du dispositif de surveillance en incluant une partie des visites programmées chez les éleveurs sentinelles dans les visites de prophylaxie, et en réalisant les analyses à la Réunion au tarif habituels d'analyse par le Cirad, il est possible de diminuer de 30% le coût par

échantillon, hors investissements, de la surveillance programmée. Le coût par échantillon passerait de 39 € [34 ; 44] à 27 € [22 ; 32], ce qui représenterait une économie totale de 24 224 € [24 080 ; 24 278] (cf. **ANNEXE V bis**). De même, des optimisations sur le fonctionnement de la surveillance événementielle (recours aux vétérinaires libéraux pour les autopsies sur les avortons), permettrait de diminuer de 19% le coût/échantillon (hors investissement), ce qui représenterait une économie de 1 414€ [142 ; 2795].

## D. Réactivité

### 1. Composante n°1 : surveillance programmée, suivi sentinelle sérologique

Le délai médian entre la date de prélèvement et la date d'analyse a été très important pour la campagne 2010 (1an), ce qui était attendu car une importante partie des analyses a été réalisée *a posteriori* en 2012 lorsque la volonté a été affichée de disposer des données de séroconversions en lien avec les données de performances zootechniques d'un maximum d'élevages inclus dans le PAZEM. Pour les campagnes A à D, le délai médian a oscillé entre 58 et 156 jours en fonction des contraintes logistiques (cf. Tableau 20). Certains prélèvements ont mis plus de trois ans à être analysés (délai maximum de 1159 jours lors de la campagne A) car ils ont été retrouvés lors de contrôles de complétude des données en 2014.

Tableau 20. Délai de réalisation des analyses de la surveillance programmée et événementielle

Campagne		Surveillance programmée		Surveillance événementielle	
		Délai médian en jour [min ; max]	Objectif : délai <30jours	Délai médian en jour [min ; max]	Objectif : délai < 30 jours
2010		399 [366 ; 1534]	0%	NA	0%
2011				NA	0%
2012	Campagne A	63 [34 ; 1159]	0%	799 [640 ; 857]	0%
	Campagne B	58 [8 ; 1053]	4%		
2013	Campagne C	112 [1 ; 901]	18%	421 [296 ; 575]	0%
	Campagne D	156 [23 ; 686]	2%		

### 2. Composante n°2 : surveillance événementielle des avortements

Concernant la surveillance événementielle des avortements, les délais d'analyse sont également très importants : 799 jours en 2012 et 421 en 2013 (cf. Tableau 20). Tous les prélèvements ont en fait été analysés le même jour en septembre 2014.

## IV. Discussion

Plusieurs indicateurs de fonctionnement pour les deux composantes du dispositif de surveillance de la FVR du SESAM (événementielle et programmée) ont été définis et évalués entre 2010 et 2013, pointant une évolution encourageante des performances du dispositif ainsi que l'intérêt de la surveillance programmée malgré son coût important. Cette évaluation permet de proposer certaines pistes d'optimisation. Pour les deux composantes, la qualité des données et de la réalisation de la surveillance s'est globalement améliorée entre 2010 et la fin de la période d'étude (cf. Figure 29).

. La réactivité reste l'indicateur le plus critique pour les deux composantes du dispositif de surveillance et ce, sur toute la période d'étude, car il est resté à 0% de prélèvement traité en moins de 30 jours pour la surveillance événementielle (délai minimum de 296 jours) et a atteint au mieux 18% des prélèvements traités en moins de 30 jours pour la campagne C de la surveillance programmée.

La sensibilité et l'efficacité n'ont été évaluées que sur la fin de la période de suivi. La sensibilité de la surveillance programmée semble meilleure que celle de la surveillance événementielle, mais cette dernière n'a pu être évaluée avec assez de précision pour conclure. L'efficacité a été bonne pour les deux dispositifs (> 69%).

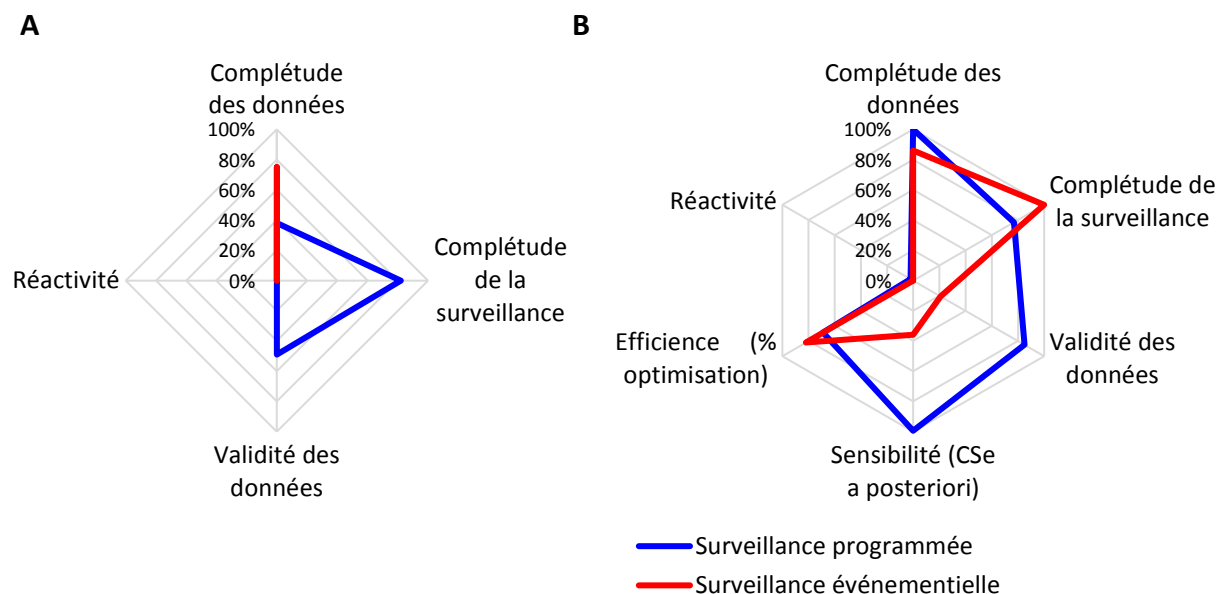


Figure 29. Rosace bilan des indicateurs de performances des composantes du dispositif de surveillance de la FVR du SESAM. En A : Données relatives à l'année 2010. En B : données relatives à la campagne D pour la surveillance programmée et données relatives à l'année 2013 pour la surveillance événementielle concernant la complétude des données, la complétude de la réalisation, la validité des données et la réactivité. Pour l'efficacité et la sensibilité, les données sont globalisées sur la période d'étude 2012-2013 pour les deux composantes.

## A. Qualité des données

- Complétude

Le très bon niveau de complétude des données de la surveillance programmée (100%) a été permis par la mise en place de la BDD SESAM et de fiches de prélèvements adéquates. Le nombre limité d'acteurs intervenant pour la gestion de ces prélèvements (quasiment tous réalisés par l'animatrice du SESAM) a garanti l'homogénéité de la gestion des données.

Les problèmes de complétude des données de la surveillance événementielle sont probablement attribuables à l'absence d'identification de certains animaux bien qu'elle soit obligatoire et mise en place depuis 2003 pour les bovins (jusqu'à 25% des avortements ont le champ d'identifiant animal non renseigné) et au remplissage partiel des fiches de prélèvements ne permettant pas non plus de retrouver l'espèce *a posteriori*.

La complétude de la surveillance au niveau animal de la surveillance programmée a été limitée par la possibilité de prélever tous les animaux d'une campagne de prélèvement à l'autre au sein d'un même élevage. Certains animaux ont eu des interruptions de suivi à cause de problèmes de contention ou de localisation, les animaux pouvant alternativement être en divagation et non attrapables ou bien temporairement déplacés sur un site trop éloigné ou sans moyen de contention (arbre, barrières, ...), etc.

La complétude de la surveillance programmée au niveau élevage a été principalement limitée par l'impossibilité de recontacter en 2013 tous les élevages prélevés en 2010. Ils étaient connus essentiellement par leur nom et leur commune, parfois un lieu géographique plus précis ou un numéro de téléphone, mais certains élevages avaient disparu, les personnes étaient décédées, avaient déplacé leurs animaux ou n'avaient plus le même numéro de téléphone. Tous les élevages sentinelles n'ont pas non plus été systématiquement prélevés à chacune des campagnes, en général pour des raisons logistiques : impraticabilité des chemins d'accès (saison des pluies), difficultés de prises de RDV quand l'éleveur n'a pas de téléphone, etc. Ces absences de prélèvements ont entraîné une incertitude plus grande que prévu sur une période de séroconversion et plusieurs dates de séronégativité.

En ce qui concerne la complétude de la surveillance au niveau animal dans le cadre de la surveillance événementielle, le critère choisi était la réalisation d'une recherche virologique pour chaque avortement déclaré. Les prélèvements relatifs à trois avortements n'ont pas pu être retrouvés pour réaliser des PCR en début de mise en œuvre en 2012. Cette situation ne s'est ensuite plus reproduite.

- Validité

La principale cause de non-validité des données était liée à l'identification animale, encore incomplète dans de nombreux élevages. En effet, lorsque l'information d'absence d'identification de l'animal par une boucle était disponible dans la BDD, la donnée était considérée comme complète mais invalide. La saisie du seul numéro de travail était aussi fréquente (quatre derniers chiffres du numéro IPG seulement). L'absence de contrôle de la saisie avec la BDNI dans la BDD SESAM a également introduit quelques erreurs de frappe dans les n°IPG à une fréquence compatible avec le « taux d'erreur d'inattention » de quelques pourcents qui peut être attendu ((Bronner et al., 2015a).



La BDD SESAM pourrait ainsi être améliorée en augmentant les contrôles de cohérence (lien automatique avec la BDNI, contrôle de la longueur et du format des champs n°EDE et IPG).

Concernant la surveillance événementielle, il est à souligner que les enregistrements des identifiants éleveurs en 2010 et 2011 ne contenaient que le nom de l'éleveur, or en raison du très fort taux d'homonymie et des fluctuations d'orthographe, cela rend quasiment impossible l'identification *a posteriori* des élevages concernés (Blanchy, 1988, 1996). Les élevages caprins ont également la particularité de n'avoir commencé à être recensés qu'à partir de 2013, ce qui explique le faible nombre d'EDE encore déclarés à ce jour. Une sensibilisation des vétérinaires et du LVAD a tout de même permis d'améliorer la complétude des données relatives aux déclarations d'avortement entre 2010 et 2012, mais cet aspect de traçabilité n'est toujours pas perçu comme une réelle priorité à l'échelle d'une île de taille limitée, où les gens se connaissent globalement. Pourtant cette rigueur est indispensable pour une analyse rétrospective des données et des améliorations sont encore possibles.

D'autres dimensions de la qualité des données (Bronner et al., 2013b; Pipino et al., 2002; Weiskopf and Weng, 2013) pourraient être explorées ou approfondies à l'avenir : leur pertinence (les données sont elles toutes utilisées et utilisables pour atteindre les objectifs posés...), leur accessibilité (les données sont elles disponibles, facilement et rapidement...) ou encore leur plausibilité (les résultats de sérologie auraient pu faire l'objet d'une confirmation par séroneutralisation par exemple).

## B. Sensibilité

La méthode des arbres de scénario a permis de calculer simplement la probabilité attendue de détecter au moins un cas *a priori*, et observée *a posteriori* par chacune des deux composantes du dispositif de surveillance de la FVR et la probabilité de détecter au moins un cas. Les estimations *a priori* étaient très favorables ( $CSe_{programmée} = 100,0\%$  [100,0 ; 100,0] et  $CSe_{événementielle} = 100,0\%$  [47,4 ; 100,0]).

La précision de l'estimation de la sensibilité de la surveillance événementielle est affectée négativement par plusieurs facteurs dont la probabilité que la vache avorte, qui reste décrite, ainsi que les paramètres liés à la détection et à la déclaration de l'avortement, là encore une forte incertitude entoure leur valeur exacte dans le contexte mahorais et les valeurs minimales envisagées dégradent fortement la précision de l'estimation. Enfin, la population soumise à la surveillance événementielle (uniquement les vaches gestantes) est quatre fois plus restreinte que celle potentiellement incluse dans la surveillance programmée (tous les bovins de plus de six mois).

Les estimations *a posteriori* ont révélé une sensibilité moins bonne qu'*a priori* ( $CSe_{programmée} = 99,4\%$  [47,5 ; 100,0] et  $CSe_{événementielle} = 35,9\%$  [2,0 ; 98,7]).

L'incidence observée est six fois plus faible que prévu d'après les dernières données qui étaient disponibles (3% [0,5 ; 7,5] en série AB contre environ 13% dans les études antérieures (Lernout et al., 2013)) et son niveau de précision relative se dégrade (passant de 26% à 78%). Le taux de prévalence initial déterminant le nombre d'animaux naïf est plus faible que prévu d'environ 10% mais ne compense pas la différence d'incidence. De même que pour l'estimation *a priori*, l'écart entre surveillance programmée et événementielle s'explique en partie par les probabilités des nœuds de détection de la surveillance événementielle, à savoir les probabilités d'avortement, de détection et

de déclaration des avortements, cette dernière se révélant de 2 à 6 fois plus faible que prévu d'après les données métropolitaines. Les probabilités d'avortement et de détection gardent une précision relative de 50%, ce qui se répercute dans le niveau de précision de l'estimation de la sensibilité de la composante événementielle. Le nombre d'animaux soumis à la surveillance ne varie pas entre les deux estimations et conserve donc un écart important entre les deux composantes.

Tous paramètres égaux par ailleurs, on peut noter que le taux d'incidence permettant d'assurer la détection d'au moins un cas avec une probabilité supérieure à 95% est d'environ 1% [1 ; 3] pour la surveillance programmée, contre 16% [6 ; 75] pour la surveillance événementielle. Concernant la surveillance programmée, les conditions semblaient réunies pour détecter un taux d'incidence même plus faible qu'observé les années précédentes. En situation de risque homogène (pas d'effet troupeau et répartition de la maladie vectorielle sur toute l'île), la taille de l'échantillon prévu était de 150 animaux à risque pour un taux de détection limite de 2% (Toma et al., 2010). Ce sont en réalité 50 troupeaux et de 136 à 270 animaux-ans à risque qui ont été suivis sur chaque période.

La surveillance événementielle, en revanche, ne semble pas à même de détecter une circulation à bas bruit. Elle est intimement dépendante de la probabilité d'avorter des vaches gestantes infectées, or cette probabilité n'est pas connue avec précision. Cette probabilité pourrait être diminuée par le fait que les animaux sont infectés par de faibles charges virales (période inter-épizootique, hors épisode pluvieux intense) ou si la pathogénicité de la souche virale endémique a évolué (Maquart et al., 2014a). En second lieu intervient la probabilité de détection par les éleveurs. Cette probabilité est faible dans les élevages laitiers occidentaux, mais il est difficile de déterminer en première approche si cette probabilité est dégradée à Mayotte par le niveau de connaissance en physiologie majoritairement limité des éleveurs traditionnels et leur pluriactivité fréquente ou favorisée par la petite taille des exploitations essentiellement non mécanisées et le lien de proximité éleveur-animal qui doit en découler. Une exploration qualitative de ces aspects serait appréciable (cf. **chapitre IV**). Enfin, intervient la probabilité de déclaration des avortements. Seuls 4,9% [4,8 ; 5,6] des avortements détectés seraient déclarés par les éleveurs mahorais contre environ 34% en France métropolitaine (Bronner et al., 2013a). Les causes de non-déclaration des avortements peuvent être multiples à Mayotte : de l'ignorance de la réglementation qui la rend obligatoire à l'absence de moyen de télécommunication permettant cette déclaration, en passant par la méfiance ou l'incompréhension de cette règle pour les éleveurs qui en ont connaissance, malgré les campagnes de communication du SESAM sur ce sujet (cf. Figure 24).

L'estimation du taux de déclaration des avortements repose sur une hypothèse de taux d'avortement homogène au sein des élevages mahorais. Ainsi, on a pu estimer qu'environ 3 avortements ont été détectés par an pour 100 femelles de plus de 6 mois (et dont seulement une partie sont gestantes, mais seule l'information sur le seuil approximatif des 6 mois était connue au moment de l'étude) à Mayotte ce qui est dans la fourchette des observations faites dans les troupeaux laitiers occidentaux allant de 0,4 à 5,5% de taux d'avortement observé avec des unités de références également variables : le troupeau en âge de reproduire, les vaches gestantes, etc. (Forar et al., 1995). Le taux de déclaration dans les élevages sentinelles est nettement supérieur au taux de déclaration moyen (44% contre 4,9%). Deux types de biais peuvent expliquer en partie cette différence : un biais de mémoire dans l'enquête réalisée chez les éleveurs sentinelles, ou bien un biais de sélection puisque les éleveurs « modernes » sont surreprésentés dans les élevages sentinelles. Il conviendrait d'étudier plus précisément les tenants et aboutissants de ce possible biais

de représentativité : soit les éleveurs modernes sont simplement plus sensibilisés au processus de déclaration des avortements, soit ils sont plus à même de détecter les avortements par leurs pratiques (temps de présence et d'observation des animaux accrus, mais aussi par la taille du troupeau qui permet de mieux normer la reproduction) ou bien ils sont soumis à des pathologies abortives spécifiques que les éleveurs traditionnels ne rencontrent pas.

En conclusion, la surveillance programmée et événementielle sont complémentaires : la première devant permettre de mettre en évidence une circulation endémique à bas bruit et la seconde devant en théorie permettre de mettre en évidence un phénomène plus exceptionnel de « vagues d'avortements » comme cela a été décrit en Afrique de l'Est.

- Limites

Outre les performances des techniques de détection et de la taille de l'échantillonnage, la représentativité de la surveillance est un élément crucial pour sa sensibilité, notamment en terme de couverture des animaux les plus à risque. Compte-tenu du contexte insulaire, la bonne répartition géographique des élevages, dont aucun n'est en bâtiment fermé, semblait pour une maladie vectorielle suffisant en première approche. Il faut souligner un autre biais de représentativité du suivi sentinelle concernant l'espèce choisie. En effet il s'agit de bovins, l'espèce majoritaire à Mayotte alors qu'il serait plutôt conseillé de sélectionner des troupeaux sentinelles de petits ruminants qui sont plus sensibles à la FVR. Cela pourra être rendu possible à l'avenir car les élevages de petits ruminants sont en cours de recensement et une description de la typologie des élevages caprins est en train d'être réalisée par le Cirad.

L'évaluation de la sensibilité de la surveillance des avortements n'a porté également que sur les bovins, or les petits ruminants sont aussi inclus dans le dispositif événementiel. Cependant les moutons, connus pour être plus sensibles à la FVR, sont rares à Mayotte. Quant à la sensibilité des chèvres à la FVR et ses conséquences en matière d'avortement, elles sont moins bien connues (Bird et al., 2009). La sensibilité de la composante événementielle a donc probablement été sous-estimée, même si le taux de déclaration chez les petits ruminants doit rester très faible.

Finalement, l'approche déterministe décrite ici pourrait être affinée avec une approche stochastique permettant de présenter les résultats sous forme de densités de probabilités, avec par exemple l'outil *DecisionTool* (Rivière, 2016). Une analyse de sensibilité des paramètres les plus influents en fonction de leur incertitude permettrait alors de cibler les prochains travaux de recherche pour améliorer la précision de ces informations sensibles.

### **C. Acceptabilité : rapport coût-efficacité et efficience**

L'acceptabilité d'un dispositif de surveillance, lorsqu'elle caractérise la volonté des acteurs d'y participer (German et al., 2001), est un critère d'évaluation qui recouvre plusieurs notions et reste subjectif. Seul le point de vue du financeur (l'Etat et les finances publiques) a été évalué ici, sous la forme d'indicateurs du rapport coût-efficacité et de l'efficience du dispositif.

Le rapport coût/efficacité utilisé ici est régulièrement utilisé pour l'évaluation des projets relatifs à la surveillance en santé publique (Cavalerie, 2011). Moins complet que le rapport coût-bénéfice pour le financeur, le rapport coût-efficacité reste souvent plus facile à déterminer car les bénéfices des systèmes de surveillance sont par nature complexes à anticiper. D'ailleurs, le bilan des coûts réalisés

ici, reste partiel puisqu'il n'inclut que les coûts variables entre les deux composantes de surveillance. De plus, ce calcul n'a pu être complètement exhaustif, certains postes de dépenses comme les charges d'entretien ou de sécurité des bâtiments n'ont pu être estimés dans le budget global de la COOPADEM.

Dans notre étude, la surveillance programmée s'avère bien plus coûteuse que la surveillance des avortements mais a aussi été plus efficace en termes de nombre d'échantillons traités et de cas possibles détectés. Son rapport coût-efficacité sur ces deux critères la rend donc *a priori* plus acceptable pour le financeur. Le rapport coût-efficacité relatif à la sensibilité pourrait en revanche être en défaveur de la surveillance programmée, cependant l'impossibilité à ce stade d'évaluer la sensibilité de la surveillance événementielle avec plus de précision empêche de conclure définitivement.

Une optimisation substantielle des coûts de la surveillance programmée à sensibilité constante est possible. Conformément aux résultats préliminaires de cette étude, l'optimisation du dispositif de surveillance programmée est en cours avec la réalisation de prélèvements pour la recherche d'anticorps contre la FVR en même temps que les visites de prophylaxie depuis 2014, ce qui a permis de dégager un temps important à l'animateur du SESAM pour recentrer ses missions sur l'animation, la formation et essayer de développer un « réseau d'élèves-délégués sanitaires ». En revanche, l'amélioration de la sensibilité de la surveillance événementielle dépendrait notamment d'une démarche d'ampleur de sensibilisation des éleveurs sur la déclaration des avortements, qui, pour avoir des effets rapides et significatifs serait probablement rapidement très coûteuse.

La perception de la surveillance par les éleveurs et son acceptabilité n'a pas été étudiée spécifiquement mais pourrait être approfondie par des indicateurs spécifiques (taux d'abandon du suivi sentinelle, probabilité de déclarer un avortement pour la première ou la n-ième fois, etc.). La difficulté à retrouver certains élevages sentinelles ou animaux ainsi que le faible taux de déclaration des avortements semble en effet indiquer que les éleveurs n'étaient pas très impliqués dans le dispositif. Deux explications principales peuvent être évoquées : un manque d'intérêt pour le dispositif de surveillance ou bien une mauvaise adaptation du fonctionnement du dispositif. Le **Chapitre IV** explorera les préoccupations sanitaires des éleveurs mahorais. Des discussions informelles avec des éleveurs, à l'occasion des campagnes de prises de sang notamment, montrent que ces derniers reprochent au système de surveillance un défaut de retour d'information et un manque d'application pratique de la surveillance. Le défaut de retour d'information est probablement issu du manque de réactivité : les résultats d'analyses étant disponibles très tardivement (plusieurs mois plus tard en général), ils sont la plupart du temps déconnectés du moment des prélèvements. Le manque d'application pratique vient à la fois du manque de réactivité (constater une séroconversion avec plusieurs mois de retard ne permet pas de prendre des mesures de gestion en élevage) et de l'absence d'impact de la maladie. En effet, aucun éleveur mahorais n'a souffert des conséquences de la FVR dans son élevage ou celui d'un proche. Enfin, concernant le dispositif de surveillance des avortements, les résultats relatifs à la FVR tout comme pour la brucellose sont jusqu'ici systématiquement négatifs (à l'exception d'un avortement en 2011 sur lequel peu de communication a été faite (Maquart et al., 2014b)), ce qui n'a apporté là aussi aucune réponse pratique aux éleveurs sur la cause de leur avortement. Il est en effet supposé qu'à l'inverse, l'émergence d'un virus abortif (Schmallenberg) ou la mise en œuvre de projets de surveillance de

maladies abortives (comme la fièvre Q) peuvent modifier les pratiques des éleveurs et des vétérinaires en matière de déclaration des avortements (Bronner et al., 2015b).

L'acceptabilité du dispositif par les vétérinaires pourrait être étudiée de manière plus approfondie notamment en lien avec les résultats en termes de qualité des données. Le fait que ces acteurs soient rémunérés garantit pour le moment leur participation au dispositif. Comme pour les éleveurs, un meilleur retour d'information augmenterait peut-être leur motivation.

#### D. Réactivité

Les délais d'analyse pour les sérologies ont été très variables (de quelques jours à plusieurs années) selon les aléas des conditions de stockage, de disponibilités des réactifs à Mayotte, des possibilités de transferts d'échantillons entre Mayotte et la Réunion et des dates de réalisation des bilans sur les campagnes réalisées mettant en lumière des échantillons parfois « oubliés » des campagnes antérieures. Les délais très importants pour la campagne 2010 étaient attendus compte-tenu de leur analyse *a posteriori* en 2012. Les délais ont également eu tendance à augmenter entre les campagnes A et D, la charge de travail augmentant et la disponibilité des réactifs diminuant.

L'objectif d'un délai de 30 jours pour des premiers résultats d'analyse est à ce stade un seuil arbitraire proposé avec l'animatrice du dispositif. Ce seuil devrait être un compromis entre ce qui est possible en termes de logistique et la nécessité de fournir un retour d'information aux éleveurs impliqués dans ce dispositif de surveillance.

L'objectif de 30 jours est tout à fait accessible techniquement concernant la surveillance programmée et les analyses sérologiques dès lors que le SESAM sera doté d'un technicien dédié aux analyses de laboratoires (ce qui est le cas depuis juin 2016) et que la qualité des résultats rendus par le laboratoire du SESAM aura été validée par un essai inter-laboratoires d'aptitude (EILA ou EIL) avec le Cirad qui est le laboratoire national de référence (LNR) de la FVR. Les éleveurs ont également besoin d'un retour d'information dans un délai raisonnable pour garantir le maintien de leur participation. Ainsi les résultats devraient être transmis au plus tard lors de la visite de prélèvement suivante. Le fait de communiquer les résultats lors de la prochaine visite, qui peut intervenir trois à six mois plus tard, est plus simple que l'envoi d'un rapport d'analyse par la poste dans un contexte où les adresses des éleveurs ne sont pas toujours connues avec précision en l'absence de boîte aux lettres ou de boîte postale fonctionnelle pour certains. En revanche, ce fonctionnement ne garantit pas toujours la transmission du rapport d'analyse au propriétaire des animaux puisqu'il n'est pas toujours présent sur le site le jour des prélèvements. Parfois, seuls des « bouviers » sont présents, or leurs contrats plus ou moins temporaires ne facilitent pas la transmission des informations à moyen terme ainsi que la conservation d'un historique de la situation sanitaire de l'élevage.

Dans le cadre de la recherche virale sur les avortements, une réactivité plus importante pourrait être attendue à première vue. Cependant, les aspects logistiques constituaient jusqu'ici un frein important pour améliorer la réactivité (envoi groupé des échantillons en *dewar* par avion et analyse groupée des échantillons pour limiter les coûts).

En l'absence d'événement clinique notable associé à la FVR à Mayotte au cours de ces deux années d'études, l'enjeu de réactivité s'est probablement révélé moins prioritaire que d'autres aspects (sensibilité, efficacité) dans le fonctionnement du réseau. Au final, il est proposé de maintenir un délai optimal de 30 jours pour rendre les résultats des analyses sur les troupeaux sentinelles en

adaptant la transmission des résultats aux profils des éleveurs : les résultats peuvent être tenus à disposition des éleveurs fréquentant régulièrement la coopération au secrétariat de la COOPADEM et transmis aux plus isolés lors de la visite suivante. Dans ce dernier cas, un appel téléphonique pourrait être réalisé préalablement pour respecter ce délai de 30 jours. La traçabilité de la communication des résultats devrait être assurée.

L'objectif en termes de réactivité sur la recherche virale FVR devrait être probablement rediscuté avec le gestionnaire du risque (DAAF). La mise en relation de cet objectif avec l'efficacité attendue permettra de vérifier que le dispositif répond aux attentes du gestionnaire et reste acceptable.

Enfin, pour augmenter la précision de la mesure de cette réactivité, la date d'avortement, plutôt que la date de prélèvement aurait du être utilisée. Mais cette date n'était jusqu'ici pas demandée dans le formulaire de prélèvement des vétérinaires.

## E. Conclusion

Le dispositif de surveillance de la FVR à Mayotte a permis de récolter une longue cohorte de données, qui remonte jusqu'en 2004 grâce à des prélèvements conservés en sérothèque (Métras et al., 2016).

La qualité des données s'est beaucoup améliorée avec d'une part l'arrivée de l'identification individuelle et la mise en place de la BDNI et d'autre part celle de la BDD SESAM. La formalisation croissante du dispositif avec des fiches de prélèvements et des procédures de gestion des échantillons ainsi que l'expérience grandissante des équipes ont aussi permis d'améliorer peu à peu la qualité des données du dispositif. Une plus grande implication des acteurs de terrain est encore souhaitable pour améliorer la validité des données relatives à la surveillance événementielle. La connexion et la pérennisation des bases de données existantes (la BDNI, SIGAL –le système d'information de la DGAI ou son remplaçant RESYTAL-, la BDD SESAM) seront un enjeu essentiel pour assurer la qualité des données et permettre une exploitation des données sanitaires efficiente.

Il n'existe pas de système de surveillance parfait, mais un équilibre à trouver entre ressources disponibles et résultats attendus pour chaque composante du dispositif afin d'atteindre les objectifs fixés (German et al., 2001). Ainsi, les objectifs de réactivité et de sensibilité attendus pour une gestion du risque optimale doivent être comparés en permanence aux moyens nécessaires et disponibles pour atteindre ces objectifs, ces aspects pouvant être contradictoires. Dans notre étude, la surveillance programmée a permis de détecter 18 cas possibles et ainsi révélé, malgré son coût important, son intérêt pour la surveillance d'une circulation de la FVR à bas bruit, alors que la déclaration des avortements sporadiques n'est pas encore un réflexe à Mayotte.

Même en temps de paix, il reste en effet recommandé de mettre en place des troupeaux sentinelles (Consultative Group for RVF Decision Support, 2010; FAO, 2002) à suivre régulièrement et plus particulièrement en période à risque (saison des pluies), mais il reste admis que cette surveillance ne sera pas très réactive. Elle sera en revanche très utile *a posteriori* pour documenter la réémergence de la maladie ou sa circulation à bas bruit. Un suivi est recommandé par la FAO au moins deux fois par an (pendant-après la saison des pluies) avec recherche par ELISA d'IgG et IgM pour la FVR. La recherche d'IgM qui n'avait ici pas été réalisée pour des raisons financières pourra par exemple être financée par l'optimisation des moyens de la surveillance programmée et un éventuel allègement du rythme de prélèvement.

Une telle surveillance a ainsi été mise en œuvre entre 2009 et 2012 dans certaines régions du Kenya (Lichoti et al., 2014) sur la base d'un suivi d'environ 500 animaux à raison de 40 petits ruminants par site, prélevés toutes les 4-6 semaines, pendant la saison des pluies. Un animal positif en PCR et un autre en IgM ont ainsi été détectés en 2009. Cette surveillance avait aussi permis de confirmer 4 autres cas cliniques de FVR sur des suspicions cliniques opportunistes dans le voisinage des élevages sentinelles, illustrant les externalités positives de la mise en place d'un système de surveillance basé sur une surveillance programmée couteuse si on la réduit à son utilité directe. En effet ces dispositifs permettent un niveau d'interaction minimal des acteurs de la surveillance et de faire circuler un certain nombre d'informations sanitaires qui n'en auraient pas l'occasion sans un système de surveillance « actif » et « programmé ». Sur le long terme, un tel fonctionnement - s'il est vertueux en matière d'efficacité, réactivité, utilité, etc.- permet de construire un réseau d'acteurs de plus en plus sensible, c'est en partie le modèle de la création des GDS en France sur la base de la surveillance prophylactique de la tuberculose bovine. Le SESAM sert désormais de structure pour adresser bien d'autres thématiques (le charbon, les « bavites », etc.)

Compte-tenu du statut actuel de danger sanitaire de première catégorie de la FVR et en l'absence de classification spécifique aux départements d'outre-mer (DOM), la responsabilité de la gestion du risque et du dispositif de surveillance incombe à l'Etat. Le fonctionnement initial comptait pour beaucoup sur la bonne volonté des acteurs de coopérer avec une animation de la surveillance partagée entre la structure représentant actuellement le GDS (la COOPADEM), le monde de la recherche et le LNR (Cirad). Un processus de clarification des missions a été entamé avec la rédaction d'une charte de fonctionnement du SESAM qu'il convient de poursuivre, tout en tenant compte du potentiel structurant de la surveillance de la FVR et des ressources limitées. Les rôles du gestionnaire du risque et du LNR, en particulier pour fixer les objectifs de surveillance (réactivité, sensibilité, etc.) et les moyens qui y sont consacrés ne doit pas être occulté par l'absence d'impact identifié récemment à Mayotte de la FVR, même si bien évidemment le contexte épidémiologique et socio-économique mahorais doivent être pris en compte. Le mode de fonctionnement de la plateforme nationale d'épidémiologie-surveillance en santé animale (Plateforme ESA) peut ainsi très bien servir d'inspiration avec une formalisation accrue des rôles des acteurs (groupe de suivi, cellule d'animation, centralisation des documents de communication et des bilans sanitaires, etc.). L'exemple du dispositif de surveillance Sylvatub (tuberculose bovine dans la faune sauvage) est le modèle-type d'un dispositif de surveillance dont le gestionnaire est l'Etat (la surveillance est réglementée, prise en charge par l'Etat) avec une animation délocalisée (à l'Anses jusqu'en début 2017). Le modèle de la Plateforme pourrait d'ailleurs à l'avenir être déclinée régionalement, ou au moins s'étendre à certaines thématiques propres aux DOM, comme le montre l'exemple de la FVR à Mayotte.

Concernant le dispositif de surveillance des avortements en place, le taux de déclaration actuel semble rendre hypothétique la mise en évidence d'une circulation à bas bruit de FVR. Une réflexion sur l'amélioration de ce dispositif, dont l'utilité n'est pas limitée à la FVR devrait être conduite pour en améliorer la sensibilité. Dans l'immédiat, même si des doutes existent sur la pathogénicité de la souche qui persiste peut-être à Mayotte (Maquart et al., 2014a), ce dépistage pourrait être maintenu car il reste peu couteux et complète la surveillance programmée en documentant l'absence de phénomène abortif anormal. La définition d'un cas clinique suspect de FVR (pour le moment il s'agit de tout avortement) pourrait cependant être précisée, afin de pouvoir répondre aux attentes de gestion du risque (alerte précoce-efficacité) et de recherche reposant sur ce dispositif.

Pour contribuer à l'évolution du dispositif de surveillance de la FVR du SESAM à Mayotte d'autres attributs pourraient être explorés ou développés plus extensivement: simplicité, flexibilité, représentativité, stabilité, etc. (Calba et al., 2015; German et al., 2001). La simplicité n'a pas été évaluée formellement mais en première approche, le nombre d'acteurs (cf. Figure 25) très limité permet d'avoir un fonctionnement simple et efficace. Ce sont les éléments extérieurs (climat, insularité) et parfois le contexte culturel (barrière de la langue, situation socio-économique etc.) qui peuvent rendre une partie de la logistique et de l'organisation de la surveillance complexe. La flexibilité du système qui s'évalue en regard de l'évolution du contexte épidémiologique n'a pas encore été véritablement testée, l'éventuelle disparition de la FVR à Mayotte pourra être l'occasion d'évaluer le redéploiement des moyens du SESAM. On peut noter que les dispositifs de surveillance (notamment en termes d'outils informatiques, et de gestion des données) ont pour le moment évolué fréquemment (tous les deux ans).

Enfin, il est souhaitable que les indicateurs de performances proposés ici (en priorité la qualité des données, la réactivité, voire le coût de fonctionnement et la sensibilité) continuent d'être calculés annuellement ou soient adaptés selon des méthodes qui peuvent être plus élaborées (stochastique, rythme semestriel, etc.) L'évaluation du dispositif de surveillance SESAM devrait enfin être élargie aux autres activités en dehors de la FVR et une démarche d'évaluation plus générique du fonctionnement d'un dispositif de surveillance comme la méthode OASIS (Hendrikx et al., 2011) serait alors très recommandée. Cette approche permettrait d'engager l'ensemble des parties prenantes du SESAM (Etat, vétérinaires, éleveurs, laboratoires, etc.) dans l'analyse et l'évolution du dispositif notamment sur des aspects non traités ici (la communication, la formation, etc.).



Figure 30. Le laboratoire du SESAM à l'ADEM. Cet investissement a permis en priorité de traiter et stocker les prises de sang des élevages sentinelles (©Lisa Cavalerie)



## CHAPITRE III : Modélisation de la persistance de la FVR à Mayotte

Ce chapitre a fait l'objet d'un article en anglais (voir ci-après), dont le résumé en français est proposé ci-dessous : *Cavalerie, Lisa, Maud V. P. Charron, Pauline Ezanno, Laure Dommergues, Betty Zumbo, et Eric Cardinale. 2015. « A Stochastic Model to Study Rift Valley Fever Persistence with Different Seasonal Patterns of Vector Abundance: New Insights on the Endemicity in the Tropical Island of Mayotte ». PLoS ONE 10 (7): e0130838. doi:10.1371/journal.pone.0130838.*

### Résumé de la démarche :

Un modèle dynamique stochastique de type « SIR » (Sensible, Infecté, Guéri ou *recovered* en anglais) (Keeling and Rohani, 2007) a été construit pour étudier la probabilité de persistance du virus de la FVR. Ce modèle représente la transmission du virus de la FVR au sein des ruminants domestiques et des vecteurs dans un écosystème homogène et fermé, c'est à dire sans introduction d'animaux autre que le renouvellement naturel de la population (cf. Figure 31). Il a été codé sous SCILAB (Scilab Enterprises, 2012).

Une première analyse a permis de comparer la persistance en fonction de quatre scénarios de variation saisonnière de l'abondance des vecteurs (pouvant représenter la dynamique pluviométrique d'une région donnée : constante, tropicale et plus ou moins aride), avec des paramètres de transmission utilisés dans la littérature (Gaff et al., 2007). Une analyse de sensibilité a été conduite pour étudier le poids des différents paramètres sur la dynamique de l'infection en fonction du scénario d'abondance vectorielle.

Une seconde analyse a permis d'estimer la valeur des taux de contact hôte/vecteur, permettant au modèle de représenter au mieux la dynamique épidémiologique observée à Mayotte à partir des données de séroprévalence de 2008 à 2013, de diversité et d'abondance vectorielle de l'étude entomologique conduite entre 2010 et 2012 à Mayotte (Balenghien et al., 2013). La persistance dans ce contexte a ensuite été évaluée.

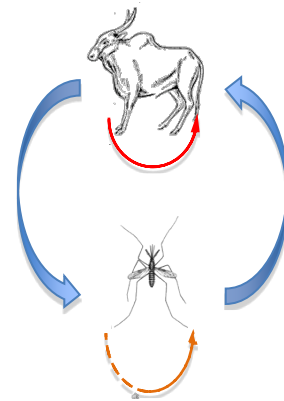


Figure 31. Schéma conceptuel du modèle SIR. En rouge la transmission directe entre ruminants, en bleu la transmission vectorielle, en orange la potentielle transmission verticale

### Principaux résultats :

- Cas général :
  - le virus persiste systématiquement lorsque l'abondance vectorielle est stable ou sinusoïdale, sans besoin de réintroduction ni de transmission verticale ce qui peut représenter un milieu tropical avec une abondance

variable mais permanente des gîtes. La persistance décroît rapidement avec l'occurrence de périodes arides sans émergence de vecteurs.

- L'analyse de sensibilité montre que dans les scénarios de forte abondance vectorielle, la persistance dépend principalement de la durée de vie des vecteurs et de leur taux de piqûre, dans les scénarios arides, elle dépend de la durée de virémie chez l'hôte et de la durée de vie des vecteurs. L'importance du pic épidémique suite à l'introduction du virus, dépend essentiellement, quel que soit le scénario d'abondance de la durée de la virémie chez les hôtes, qui pourrait être contrôlée par la vaccination, tandis que la dynamique des années suivantes dépend plutôt de la durée de vie des moustiques et de leur taux de piqûre dans les scénarios de forte abondance vectorielle alors que dans les scénarios arides, elle dépend du taux de renouvellement et de la durée de virémie des hôtes.
- Cas de Mayotte :
  - Les captures entomologiques dans cinq élevages mahorais de 2010 à 2012 ont mis en évidence la présence de huit espèces potentiellement vectrices de FVR, représentant 66% de la totalité des vecteurs capturés. *Culex quinquefasciatus* représente à lui seul 45% des individus identifiés.
  - Un taux de transmission hôte-vecteur cinq fois plus faible que la littérature, permet de se rapprocher au plus près de la dynamique épidémiologique observée à Mayotte. Ce faible niveau de transmission peut s'expliquer par les différences entre la compétence vectorielle mesurée en laboratoire et sur le terrain, des spécificités des vecteurs mahorais, une modification du virus (délétion, etc.) qui perturberait sa transmission, les pratiques d'élevage mahoraises avec un très petit nombre de ruminants éparpillés dans la brousse, et la présence d'hôtes cul-de-sac (humains, micromammifères abondants, etc.) pouvant diluer la transmission.
  - La probabilité de persistance avec ces paramètres est estimée à 10% au bout de cinq ans.

## RESEARCH ARTICLE

# A Stochastic Model to Study Rift Valley Fever Persistence with Different Seasonal Patterns of Vector Abundance: New Insights on the Endemicity in the Tropical Island of Mayotte

Lisa Cavalerie<sup>1,2,3,4,5</sup>\*, Maud V. P. Charron<sup>6</sup>, Pauline Ezanno<sup>6</sup>,  
Laure Dommergues<sup>1,2,3,7</sup>, Betty Zumbo<sup>8</sup>, Eric Cardinale<sup>1,2,3</sup>

**1** CRVOI, Centre de Recherche et de Veille sur les maladies émergentes dans l'Océan Indien, F-97490 Sainte Clotilde, La Réunion, France, **2** CIRAD, UMR CMAEE, F-97490, Sainte Clotilde, France, **3** INRA, UMR 1309 CMAEE, F-34398, Montpellier, France, **4** AgroParisTech, F-75005, Paris, France, **5** Université de la Réunion, F-97715 Saint Denis, La Réunion, France, **6** INRA, Oniris, LUNAM Université, UMR1300 BioEpAR, CS 40706, F-44307, Nantes, France, **7** GDS Mayotte—Coopérative Agricole des Eleveurs Mahorais, F-97670 Coconi, Mayotte, France, **8** ARS OI, F-97600 Mamoudzou, Mayotte, France

\* These authors contributed equally to this work.

\* [lisa.cavalerie@gmail.com](mailto:lisa.cavalerie@gmail.com)

## Abstract

Rift Valley fever (RVF) is a zoonotic vector-borne disease causing abortion storms in cattle and human epidemics in Africa. Our aim was to evaluate RVF persistence in a seasonal and isolated population and to apply it to Mayotte Island (Indian Ocean), where the virus was still silently circulating four years after its last known introduction in 2007. We proposed a stochastic model to estimate RVF persistence over several years and under four seasonal patterns of vector abundance. Firstly, the model predicted a wide range of virus spread patterns, from obligate persistence in a constant or tropical environment (without needing vertical transmission or reintroduction) to frequent extinctions in a drier climate. We then identified for each scenario of seasonality the parameters that most influenced prediction variations. Persistence was sensitive to vector lifespan and biting rate in a tropical climate, and to host viraemia duration and vector lifespan in a drier climate. The first epizootic peak was primarily sensitive to viraemia duration and thus likely to be controlled by vaccination, whereas subsequent peaks were sensitive to vector lifespan and biting rate in a tropical climate, and to host birth rate and viraemia duration in arid climates. Finally, we parameterized the model according to Mayotte known environment. Mosquito captures estimated the abundance of eight potential RVF vectors. Review of RVF competence studies on these species allowed adjusting transmission probabilities per bite. Ruminant serological data since 2004 and three new cross-sectional seroprevalence studies are presented. Transmission rates had to be divided by more than five to best fit observed data. Five years after introduction, RVF persisted in more than 10% of the simulations, even under this scenario of low transmission. Hence, active surveillance must be maintained to better understand the risk related to RVF persistence and to prevent new introductions.

**Competing Interests:** The authors have declared that no competing interests exist.

## Introduction

Rift Valley fever (RVF) is a zoonotic and vector-borne disease found in many countries of Africa. It has caused “abortion storms” in livestock in numerous countries including Kenya, Tanzania, South Africa and Mauritania, as well as a series of epidemics (200 000 human cases in Egypt in 1977, 155 deaths in Kenya in 2006 and 19 deaths in Madagascar in 2008–2009) [1–3]. Due to global changes (intensification of global trade and human mobility, climate change, etc.), RVF, like other vector borne diseases, has become a genuine threat in other continents [4]. For instance, RVF was reported in the Arabic peninsula in 2000 [5,6].

Persistence of RVF was unexpected in Mayotte, a 370 km<sup>2</sup> tropical island with 200 000 inhabitants in the Mozambique Channel. RVF antibodies in cattle were identified for the first time in 2004 serum databank [7]. In 2008, human cases were genetically linked to the 2006–2007 Kenya outbreak [8], and thus recent virus introduction through illegal animal import was suspected. After the virus circulation was observed in Mayotte, a risk assessment procedure evaluated the risk of persistence as “low” [9], given the limited number of ruminants and their dispersal, which would slow down the virus spread, the low vector activity at the time of the assessment and the absence of a wild reservoir. However, between March 2010 and August 2011, RVF incidence remained high among cattle born in Mayotte (12.9% IC95% = [9.6; 16.2]) and the virus was suspected to have become endemic [10]. Recent field studies in Kenya, Mozambique and Tanzania have shown inter-epidemic activity of RVF as well [11–14]. Reemergence of RVF in the Horn of Africa was attributed to abnormally high rainfall linked to El Niño. This could allow, in particular, *Aedes* eggs infected by vertical transmission to finally emerge [15–17]. However, interepidemic or endemic RVF activity has been poorly studied.

Mathematic modelling is a useful approach for investigating disease dynamics and addressing specific hypotheses in the absence of biological experiments or data [18,19]. A theoretical mathematical model had already shown that RVF could persist at least 10 years in a closed cattle population with two vector populations of constant size, *Culex* and *Aedes*, the latter being able of vertical transmission [20]. Persistence was also possible in a second model including a human compartment, and using low and high sets of RVF transmission parameters, but the authors emphasised the need to test their model against real data. They also underlined that the conclusions on endemic equilibrium and sensitivity analysis were obviously highly dependent on model parameterisation and design [21]. No model was tested against persistence data from a real situation so far. Serological studies conducted in Mayotte may now allow that comparison.

More RVF compartmental models have been developed in the recent years. One of the main differences between those models is the use of different vector population dynamics. Vector population dynamics is complex but strongly influences vector-borne disease dynamics. For instance, overwintering is a burning issue in order to understand Bluetongue or West Nile Virus behaviour in temperate regions [22]. Concerning RVF, the first models were based on vector populations of constant sizes [20,21]. More realistic seasonal vector population dynamics were later introduced to study RVF behaviour in specific areas like California [23], Texas [24], South Africa [25], the Netherlands [26] or Tanzania [27]. Vector population dynamics of *Aedes* and *Culex* were obtained from local vector trapping [23,26] or from more general equations for birth and development rates using local precipitation and temperature data [28,29]. Nevertheless, there are places where RVF vector dynamics and abundance are not well established, hence, theoretical curves have to be used. For instance, Chitnis *et al.* used two sets of parameters alternately to describe a wet and a dry season [30]. They defined the minimum vertical transmission level necessary for persistence over time in this setting. Finally, Chamchod *et al.* compared the impact of a sinusoidal and a step function of vector abundance on RVF

dynamics [31]. In this model, RVF introduction produced a first epidemic and could then persist at a low sinusoidal level. New epidemics could be driven only by the introduction of new susceptible animals or by a wet season very favourable to mosquito succeeding years of drought. Still, the impact of various seasonal patterns on the drivers of epidemics and persistence was not clearly addressed.

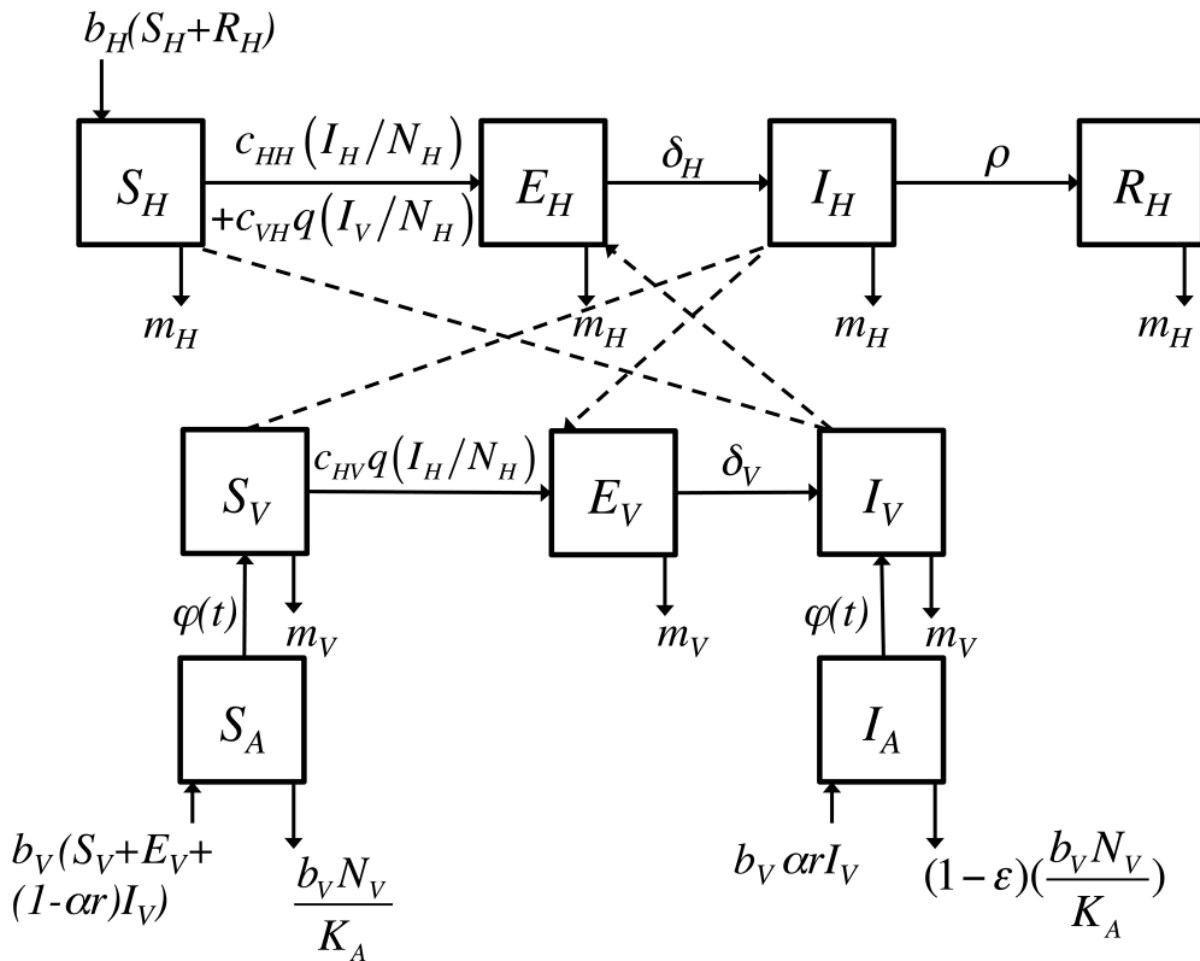
Before focusing on the specific situation of Mayotte, our aim was first to compare the probability of RVF persistence in different seasonal environments, in an isolated population. A theoretical framework was thus needed [32] combining all the exploitable information from previous models and the knowledge we have on the biological system. We built a stochastic compartmental model for the spread of RVF in a ruminant population. Four seasonal patterns were tested, representing a baseline scenario of constant environment and 3 levels of sinusoidal environment, to study the sensitivity of the virus spread and persistence to type and amplitude of seasonal forcing [33]. For each scenario, we performed a sensitivity analysis on the variance of different outputs describing short and long term dynamics. This will help designing specific studies about significantly influential parameters or targeting those parameters for control in each specific scenario. The model was secondly applied to Mayotte, where persistence has been observed since 2004. In order to better fit the model to the observed situation in the island, three serological surveys in Mayotte were conducted between 2012 and 2013 to complete the existing knowledge on RVF serological status of cattle in Mayotte. New data on vector relative abundance in Mayotte were also collected from 2010 to 2012. We reviewed the relevant literature on the competence of the vectors found in the field. These data allowed for adjusting transmission rates to better reproduce the observed seroprevalence. We finally discussed the relevance and the perspectives of our findings.

## Materials and Methods

### Model description

To study RVF persistence, we proposed a stochastic compartmental model (Fig 1) adapted from Gaff *et al.* previous work [20]. Our aim was a better understanding of RVF persistence and humans are unlikely to play a major role [4]. Therefore, we focused on domestic ruminants and vectors but excluded humans. We considered three populations: ruminant hosts ( $N_H$ ), adult vectors ( $N_V$ ) and vectors in the aquatic stage ( $N_A$ ).

Ruminant hosts were divided into four mutually exclusive health states: susceptible ( $S_H$ ), latent ( $E_H$ ), infectious ( $I_H$ ), and recovered and immune ( $R_H$ ) animals. Ruminants could be infected via two routes. First, susceptible ruminants ( $S_H$ ) could be infected by the bite of an infected vector ( $I_V$ ). Infection occurrence depends on the probability of success of the transmission per bite from an infectious vector to a susceptible host ( $c_{VH}$ ), the biting rate ( $q$ ) and the probability of contact ( $I_V/N_H$ ). Second, susceptible ruminants ( $S_H$ ) could be infected by contacts with infectious ruminants ( $I_H$ ) either through direct contacts with biological fluids in case of abortion and slaughter, or through aerosols. The direct transmission depends on the probability of contact ( $I_H/N_H$ ) and the transmission rate ( $c_{HH}$ ). Since this route of transmission is controversial and is assumed to be rare, this transmission rate was very low in our model [34]. After infection, incubating ruminants ( $E_H$ ) became infectious after a latent period of several days ( $1/\delta_H$ ) [1]. They remained infectious ( $I_H$ ) for a short period ( $1/\rho$ ), before becoming immunized ( $R_H$ ) for the rest of their life. Birth rate ( $b_H$ ) was assumed to be constant and applied to susceptible and recovered animals. Latent and infectious ruminants were assumed not to give birth, taking into account the very high abortion and neonatal death rate in infected animals [1]. All new-borns were considered to be susceptible ( $S_H$ ). Mortality rate was constant ( $m_H = b_H$ ) and was applied to all health states.



**Fig 1. Conceptual model of Rift Valley fever (RVF) transmission.** Flow diagram describing the model used for RVF spread in populations of adult mosquitoes (V), aquatic stage of mosquitoes (A) and ruminants hosts (H). Each square represents a health state X in population i ( $X_i$ ) with X = S standing for susceptible, E for latent, I for infectious, and R for recovered and immune animals. The description, values and references for all parameters can be found in Table 1.

doi:10.1371/journal.pone.0130838.g001

Vectors consisted of *Aedes*, *Culex* and *Eretmapodites* genera all together since data was not available to predict their respective abundance in a general context. The vector population was divided into aquatic ( $N_A$ ) and adult ( $N_V$ ) stages. The aquatic stage (representing eggs, larvae, and pupae all together) was divided into two mutually exclusive health states: susceptible ( $S_A$ ) and infected ( $I_A$ ) individuals. The renewal rate ( $b_V$ ), accounting for the egg laying rate and the survival rate in the different aquatic stages until emergence, was constant and applied to all adult vectors: susceptible ( $S_V$ ), exposed and latent ( $E_V$ ), and infectious ( $I_V$ ) individuals. Individuals in the aquatic stage could be infected ( $I_A$ ) by vertical transmission of RVF which could occur, with a probability  $\alpha$ , for a proportion  $r$  of the infected adult vectors ( $I_V$ ) corresponding to *Aedes* [15,34]. Other aquatic individuals were susceptible ( $S_A$ ). Two main processes control the size of the aquatic population: (1) the competition of larvae for food, modelled here with a density-dependent mortality rate with a constant constrain  $K_A$ ; (2) the competition for space at emergence, modelled here with a seasonal function of the emergence rate ( $\varphi(t)$ ) reflecting the change over time of the carrying capacity for the aquatic stage. The density-dependent

mortality rate ( $b_v \cdot N_v / K_A$ ) did not apply to a proportion  $\varepsilon$  of the infected aquatic stages ( $I_A$ ) corresponding to eggs. We assumed that infected eggs belong only to the *Aedes* genus and therefore are able to resist to desiccation for long periods [2]. The emergence rate ( $\varphi(t)$ ) allowed vectors to move from the aquatic stage to the adult stage. This rate was assumed to be seasonal, with no prerequisite on the function type, which depends on environmental conditions and the vector species. Such a seasonal pattern has been evidenced recently as a crucial process in mosquito life cycle irrespective of the genus [35].

Adult vectors were divided into three mutually exclusive health states: susceptible ( $S_V$ ), infected and latent ( $E_V$ ), and infectious ( $I_V$ ) individuals. Adult vectors could become infectious via two routes: first, infectious adult vectors ( $I_V$ ) could directly emerge from infected eggs ( $I_A$ ) depending on the emergence rate ( $\varphi(t)$ ). Second, susceptible adult vectors ( $S_V$ ) could become infected ( $E_V$ ) by biting an infectious host ( $I_H$ ). The force of infection depends on the probability of contact ( $I_H/N_H$ ), the probability of transmission per bite ( $c_{HV}$ ), and the biting rate of adult vectors ( $q$ ). Infected vectors ( $E_V$ ) became infectious ( $I_V$ ) after an extrinsic incubation period ( $1/\delta_V$ ) [36]. Adult vectors remained infectious ( $I_V$ ) until they die. The mortality rate of adult vectors ( $m_V$ ), corresponding to one over their lifespan, was independent of their health state. Despite of the existence of studies showing a reduction in the lifespan of mosquitoes infected by arboviruses, this phenomenon has been evidenced and quantified only for *Cx pipiens* in the case of RVF infection [37] and therefore was neglected here.

The model is described by the following system of ordinary differential equations (ODE):

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dS_H}{dt} &= b_H(S_H + R_H) - \left( c_{HH} \frac{I_H}{N_H} + c_{vH} q \frac{I_V}{N_H} \right) S_H - m_H S_H \\ \frac{dE_H}{dt} &= \left( c_{HH} \frac{I_H}{N_H} + c_{vH} q \frac{I_V}{N_H} \right) S_H - (\delta_H + m_H) E_H \\ \frac{dI_H}{dt} &= \delta_H E_H - (\rho + m_H) I_H \\ \frac{dR_H}{dt} &= \rho I_H - m_H R_H \\ \frac{dS_A}{dt} &= b_v(S_V + E_V + (1 - \alpha r) I_V) - \left( \varphi(t) + \frac{b_v N_V}{K_A} \right) S_A \\ \frac{dI_A}{dt} &= b_v \alpha r I_V - \left( \varphi(t) + (1 - \varepsilon) \frac{b_v N_V}{K_A} \right) I_A \\ \frac{dS_V}{dt} &= \varphi(t) S_A - c_{HV} q \frac{I_H}{N_H} S_V - m_V S_V \\ \frac{dE_V}{dt} &= c_{HV} q \frac{I_H}{N_H} S_V - (\delta_V + m_V) E_V \\ \frac{dI_V}{dt} &= \varphi(t) I_A + \delta_V E_V - m_V I_V \end{aligned} \right. \quad (\text{Eq1})$$

Next, a stochastic counterpart of this ODE system was run in discrete time (using a daily time step) to allow us to estimate the probability of virus persistence. Health transition and mortality rates (depicted by  $\tau_{ij}$ ) were transformed into probabilities ( $p_{ij}$ ) as follows: for each transition from compartment  $i$  to compartment  $j$ ,  $p_{ij} = 1 - \exp(-\Delta t \tau_{ij})$ . The flow of individuals between compartments  $i$  and  $j$  ( $\Delta N_{ij}$ ) was then  $\Delta N_{ij} = \text{Binomial}(N_i, p_{ij})$ , with  $N_i$  the number of individuals in compartment  $i$ . In case of multiple transitions from a given compartment, a multinomial distribution was used [38]. Renewal rate in vectors and births in hosts followed Poisson and binomial distributions, respectively.

**Table 1. Parameters of the Rift Valley fever (RVF) spread model in mosquito and ruminant populations.**

Host parameters	Description	Value	Unit	Source
$b_H$	Birth rate	$1/(5 \times 365)$	per day	[49]
$m_H$	Mortality rate	$b_H$	per day	-
$c_{HH}$	Direct transmission rate	1/1000	per day	[1,34,52]
$c_{VH}$	Transmission probability from vector to host	0.4	-	[20]
$1/\delta_H$	Duration of incubation	2	day	[1]
$1/\rho$	Duration of viraemia	6	day	[1]
$NH_{int}$	Host population size	30 000	animal	[57]
Vector parameters	Description	Value	Units	Source
$b_V$	Renewal rate	4	per day	[64]
$m_V$	Adult mortality rate	1/20	per day	[20,65]
$q$	Biting rate	1/4	per day	[65]
$c_{HV}$	Transmission probability from host to vector	0.6	-	[20]
$1/\delta_V$	Duration of extrinsic incubation period	6	day	[20]
$r$	Proportion of <i>Aedes</i> in the vector population	50%	-	To our best knowledge
$\alpha$	Trans-ovarian transmission probability	$1/279 \times r$	-	[15]
$\varepsilon$	Proportion of eggs in the aquatic stages	44%	-	[64]
$\varphi(t)$	Emergence rate	Environment dependent	per day	See (Eq 2)
$\theta$	Minimum development time before emergence in optimum conditions	5	day	[66]
$K_A$	Carrying capacity	$10^6$	mosquito	To our best knowledge

doi:10.1371/journal.pone.0130838.t001

### Model parameterization, initial conditions and seasonal emergence scenarios

Parameters used in the model are described in Table 1. The numerical simulations were performed using Scilab 5.3.3 [39] (See S1 Fig for the code). Transmission parameters were set to the averaged low transmission set of Gaff *et al.* [20] for a single vector compartment, taking into account the biting rate.

To launch the simulation, a single infectious host was introduced into the ruminant population. Simulations were run over five years.

Vector abundance has been simulated elsewhere either as precipitation and temperature function, available for only few species of RVF competent vectors [24,25,28,29], or parameterized using data collected in the field [23,26]. To assess the importance of different model parameters in the absence of longitudinal data pertaining to the mosquito populations, we simulated four possible scenarios for emergence rates ( $\varphi_i(t)$ ). Each corresponds to a different rainfall pattern, with the view to study the sensitivity of the model to the type and size of seasonal forcing of vector population abundance. Here is the description of the 4 scenarios that we studied:

- scenario *a*: emergence rate was constant over the year representing a baseline scenario as used in some previous models [20,21,40];
- scenario *b*: emergence rate followed a sinusoidal curve corresponding to a tropical environment where emergence is possible all year-round with a single rainy season. The average value of the emergence rate was equal to the constant emergence rate in scenario *a*.



Sinusoidal functions have been widely used to describe vector abundance in the absence of more precise data [22,31,33,41];

- scenario *c*: emergence rate followed here a less favourable sinusoidal curve: same maximal and minimal values as scenario *b* but with a lower mean;
- scenario *d*: the favourable season lasted for half a year during which emergence followed a bell curve pattern with the same maximal values as in scenarios *b* and *c*. In the second half of the year, emergence rate was nil. Adult vectors were forced to die 20 days after the start of the unfavourable period. This scenario corresponds to a more arid environment as described in models applied to East or South Africa [30,42].

Parameter  $\theta$  is the minimal development duration of the aquatic stage. It drives the amplitude of the emergence rate scenarios by setting the maximal value of the emergence rate. In the simulation, the mean development duration was 1/10 days in scenarios *a* and *b*, and 1/16 and 1/15 days in scenarios *c* and *d*, respectively. This covers the observed range of development duration for most mosquitoes which takes from a few days to weeks depending on environmental conditions [20,43,44].

Equations and the resulting population abundance of these four scenarios are described in Eq 2 and Fig 2:

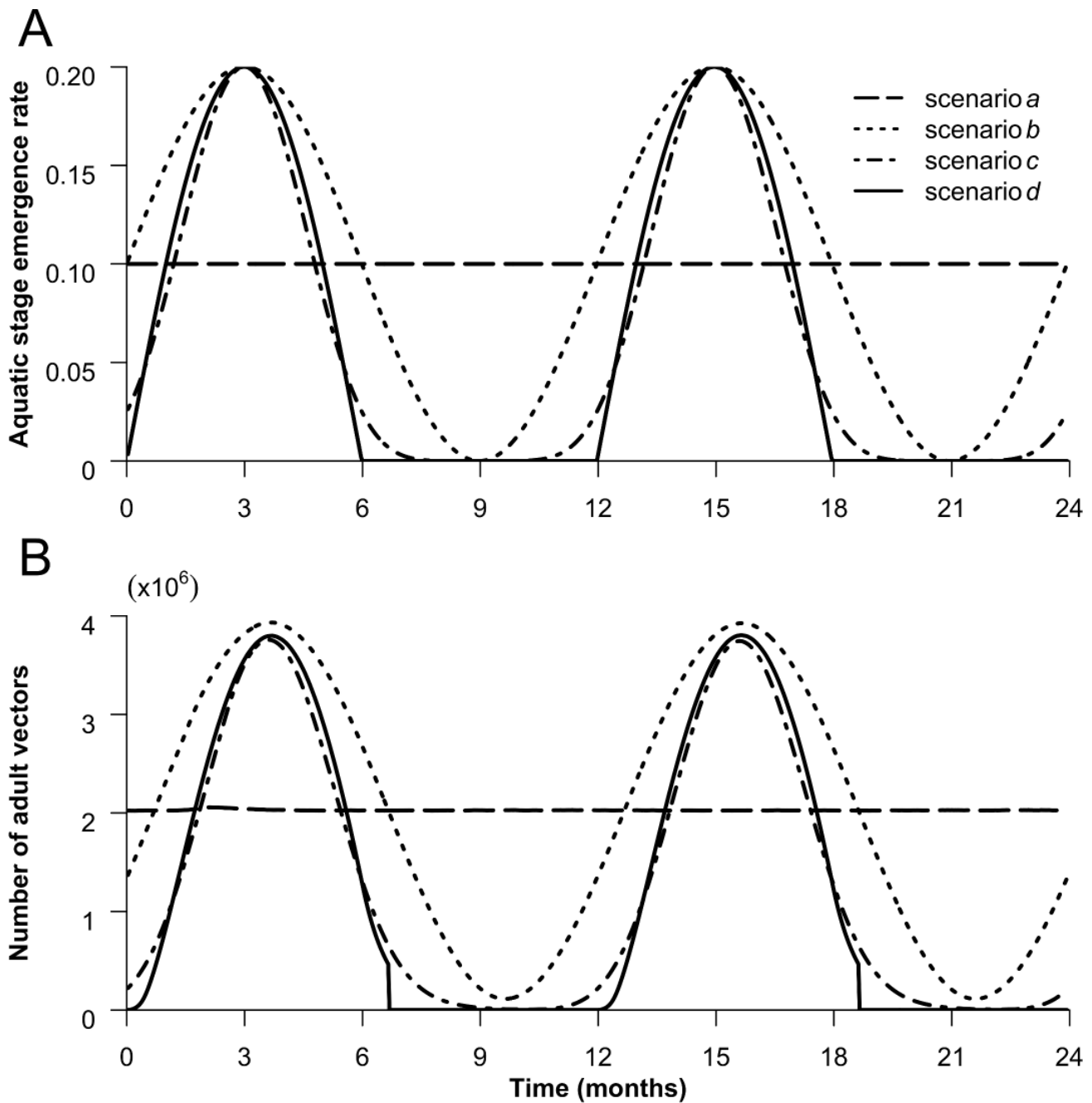
$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_a(t) = \frac{1}{2\theta} \\ \varphi_b(t) = (\sin(\frac{2\pi}{365}t) + 1) \frac{1}{2\theta} \\ \varphi_c(t) = ((\sin(\frac{2\pi}{365}t) + 1) \frac{1}{2})^3 \frac{1}{\theta} \\ \varphi_d(t) = \begin{cases} \sin(\frac{2\pi}{365}t) \frac{1}{\theta}, t \in [365(k-1) + 1 : 365(k-1) + 182], \text{ in year } k \\ 0, t \in [365(k-1) + 183 : 365k], \text{ in year } k \end{cases} \end{array} \right. \quad (\text{Eq2})$$

### Model outputs

The model predicted the distribution of vectors and hosts in the different health states over time. We also computed the probability of virus persistence over time (hereafter called ‘persistence’), defined as the proportion of the stochastic repetitions in which there was at a given time  $t$  at least one infected vector (adult or aquatic stage) or one infected host. The number of repetitions was a compromise between steady output distribution and simulation time. Each simulation comprised 1500 repetitions of the stochastic model.

The following aggregated outputs were also considered:

- persistence one and five years after the introduction of the virus into the population;
- mean number of infectious vectors in the aquatic stage ( $meanI_A$ ) in case of persistence, from the second year after introduction until the end of the simulation (excluding the epizootic peak during the first year);
- maximum proportion of infectious ruminants in year one, two, and three, in case of persistence ( $maxI_{Hk}$  in year  $k$ );
- mean proportion of recovered animals (*i.e.* seroprevalence) in case of persistence ( $meanR_H$ ) from the second year until the end of the simulation;
- mean proportion of ruminants infected via direct transmission in case of persistence.



**Fig 2. Aquatic stage emergence rate (A) and adult vector population patterns (B).** The 4 lines represent the value taken by the emergence rate  $\varphi(t)$  and the adult vector population ( $N_V$ ) over time for each seasonality scenario. In the simulations, the one-year pattern is repeated for as many years as needed.

doi:10.1371/journal.pone.0130838.g002

### Sensitivity analysis

First, we explored the model predictions assuming no vertical transmission in vectors for each of the four seasonal scenarios. Second, to evaluate the effect of variations in the different parameters (including vertical transmission) and their first order interactions on the

aggregated outputs presented above, we carried out a sensitivity analysis using a Fractional Factorial Design sampling method [45] (using the FACTEX procedure in SAS software. Copyright, SAS Institute Inc. SAS and all other SAS Institute Inc. product or service names are registered trademarks or trademarks of SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.) for each of the four scenarios with a variation of 10% below and above the nominal value of each parameter. Following this method, 2187 sets of parameters were computed for each scenario made up of 1500 repetitions. For each output in each scenario, a linear regression model was fitted with all of the principal effects of the parameters and their first-order interactions. The global contribution of parameter  $i$  (including the principal effect plus interactions in which parameter  $i$  is involved) to the variation in output  $y$  was:

$$C_i^y = \frac{SS_i^y + \frac{1}{2} \sum_j SS_{ij}^y}{SS_{tot}^y},$$

with the total sum of squares of the model for output  $y$ , the sum of squares related to the principal effect for parameter  $i$  for output  $y$  (nil if parameter  $i$  is not retained in the model), the sum of squares related to the interaction between parameter  $i$  and parameter  $j$  for output  $y$  (nil if this interaction is not retained in the model). The sum of the contributions for output  $y$  equals the coefficient of determination of the regression model  $R^2$ . Statistical analyses were performed with R 2.15.0 [46].

### Case study: the island of Mayotte, France

The model was applied to the island of Mayotte, with vector transmission probability per bite adjusted to what is known about RVF vectors in Mayotte. First, relative abundance of RVF competent vectors was estimated based on recent entomological captures [47]. Reviewing the literature on competence of these species allowed us to gather information on RVF transmission probability per bite for each species. Since transmission is expected to be affected by numerous parameters in Mayotte environment (blood meal in dead-end hosts, lower contact rates due to vegetation and animal handling), an adjusted contact rate coefficient ( $k$ ) was estimated, in this context, by comparing observed seroprevalence found in the literature until our latest seroprevalence survey, in 2012–2013, with the recovered hosts percentage predicted by the model using a range of different set for transmission rates  $c_{VH} \times k$  and  $c_{HV} \times k$ . The detailed steps to estimate  $c_{VH}$ ,  $c_{HV}$  and  $k$  are described thereafter.

**Observed vector abundance and known transmission probability.** We considered vector species found in a field study in Mayotte between 2010 and 2012 by the ARS (*Agence Régionale de Santé*, the regional health services) (see [47] for details on the protocol).

Vectors were repeatedly trapped in five farms representing five different ecological sites throughout the island. Dissemination ( $DR$ ) and transmission ( $TR$ ) probabilities for each species were looked for in the literature excluding studies with intrathoracic inoculation of RVF because it could overestimate the dissemination. We averaged the relative abundance for the vector species with an available  $DR$  (respectively  $TR$ ) over the whole trapping period and over the five sites. Then, the host-to-vector ( $c_{HV}$ ) (respectively vector-to-host  $c_{VH}$ ) transmission probability was estimated as the mean of all  $DR$  values (respectively  $TR$  values) weighted by the relative abundance of the respective species. Parameter  $\alpha$  was calculated taking into account the proportion of competent vectors belonging to the *Aedes* genus found in the field study. Mayotte has a tropical climate homogeneous for the whole territory (S2 Fig) with temperature favorable to mosquitoes all year round. The dry and rainy seasons last on average six months each, with rainfall under and above 100 mm per month, respectively (S2 Fig for precipitation and temperature in Mayotte). Natural or anthropogenic sites are available all year round but

their abundance depends on the season. Especially in rural areas, *Aedes aegypti* was shown to fluctuate between dry and rainy season [48]. Hence, a sinusoidal seasonality (scenario *b*) was used because it is thought to better fit the entomological dynamics as observed in Mayotte (Thomas Balenghien, personal communication). No difference was made in this model between small ruminants and cattle. Viraemia is indeed about the same for these species [1]. In the absence of precise data on the extensive small ruminant production system in Mayotte (12 619 animals, mainly goats) we used the same value for birth rate as in cattle [49]. Based on our knowledge, there is no significant seasonal variation in ruminant (cattle and small ruminants) birth rate in Mayotte [49]. The day/night cycle is more or less constant and most farmers are not yet willingly trying to control births to adapt them to economic constraints. Hence, we used a constant birth rate.

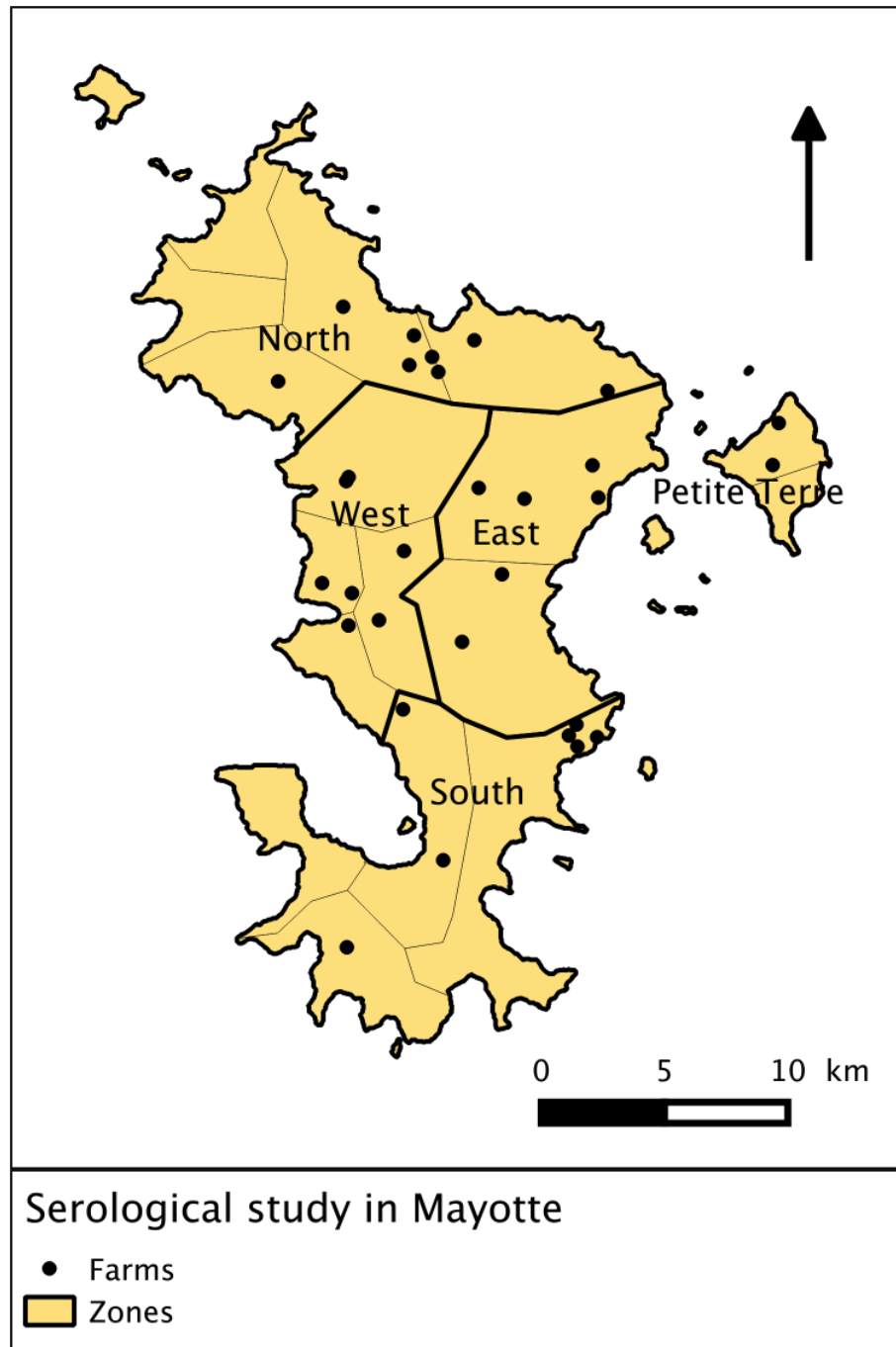
**Observed seroprevalence in Mayotte.** Seroprevalence data was collected between 2004 and 2011 in the bibliography and three times in the field between 2012 and 2013 in order to compare the model outcome with observations in Mayotte.

Search engines were used to find publications on PubMed (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>) and ScienceDirect (<http://www.sciencedirect.com/>) using key words “Rift Valley fever” AND “Mayotte” in English and French. Thirty-two publications were found. Local veterinary services and research institutions were interviewed to find seroprevalence data in unpublished documents, reports or databases. Original datasets were obtained upon request to the authors in order to specify temporal frames and to calculate confidence intervals when necessary. From May 2012 to April 2013, ruminants were selected to obtain a representative sample of the ruminant population of Mayotte. We divided Mayotte into five zones to cover each agro-ecosystem (Fig 3). The 30 farms included in the study were randomly selected from the most comprehensive database available in Mayotte from the *Chambre de l’Agriculture, de la Pêche et de l’Aquaculture de Mayotte* (CAPAM, a local public agricultural institution). All ruminants older than six months of age for cattle and three months of age for small ruminants (beyond colostral immunity) belonging to the same owner were eligible for inclusion in the study.

Three rounds of blood sampling were conducted. The first round was collected between May and July 2012, the second between September and December 2012, and the third between February and April 2013. Blood samples were taken from all animals each time, regardless of the results of previous samples. Sera were analyzed in LVAD (Departmental Laboratory of Veterinary Analysis in Mayotte) with ID Screen RVF competition multi-species (IdVet, France), a competitive ELISA kit for the detection of anti-RVF antibodies in ruminant sera or plasma. Seroprevalence and 95% confidence interval taking into account clusterisation of sampling were computed using the “survey” package in R [46,50].

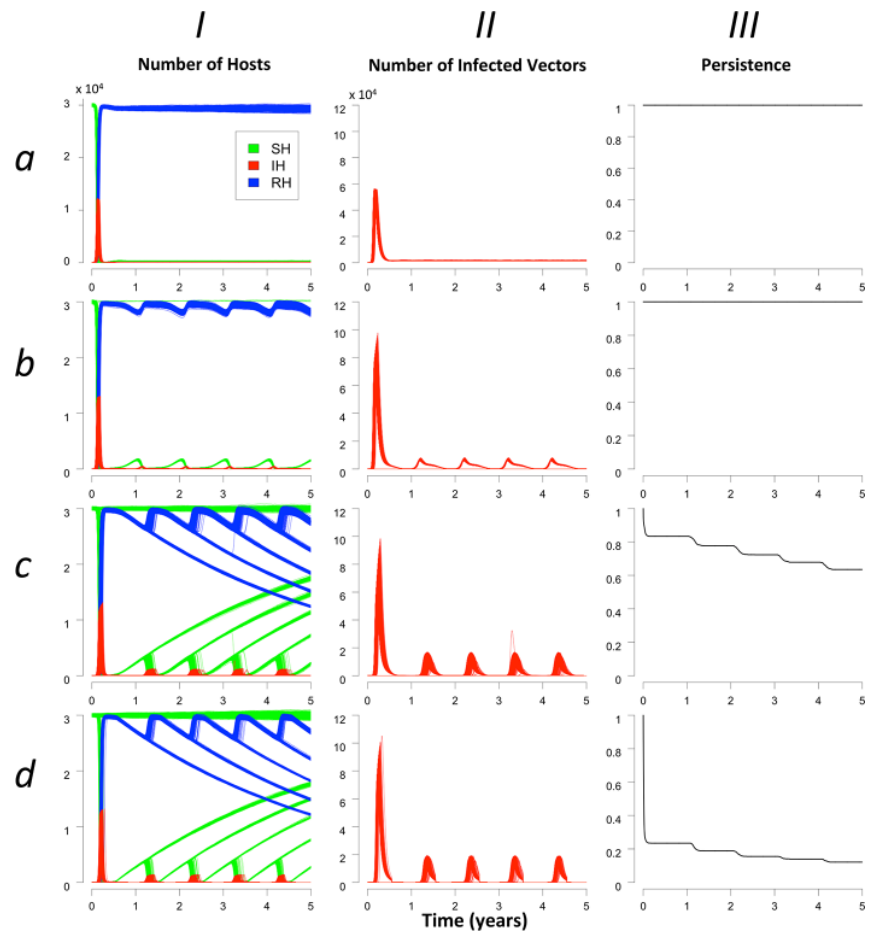
**Ethics statements for the 2012–2013 serological survey.** The study protocol was implemented with the approval of the Direction of Agriculture, Food and Forestry (DAAF) of Mayotte (Project Number NIP42). Animal sampling in this study was not subjected to the approval of ethics committee neither to specific national or international regulations at the time of sample collection. Consent for blood sampling on a herd was obtained from its owner verbally after information in French or Shimaore. The animals were bled without suffering. No endangered or protected species were involved in the survey.

**Comparison of observed and predicted seroprevalence to estimate the likely contact rate coefficient  $k$ .** The SIR model was finally run with seasonal scenario *b*, adjusted  $\alpha$ ,  $c_{VH}$  and  $c_{HV}$  parameters as explained above. A new parameter was introduced “ $k$ ” to take into account a more realistic contact rate. Transmission rates were then set to “ $c_{VH} \times k$ ” and “ $c_{HV} \times k$ ”. We used the least square approach to estimate  $k$ . Our aim was to find the value of  $k$  that minimized the distance between the observed and the predicted seroprevalence. We defined the predicted seroprevalence as the proportion of animals in the recovered status. To compare observed and



**Fig 3. RVF dynamics for different vector emergence scenarios.** The 1<sup>st</sup> column shows the distribution of hosts for each health state: susceptible ( $S_H$ ) in green, infectious ( $I_H$ ) in red and recovered ( $R_H$ ) in blue, for 1500 model repetitions. The 2<sup>nd</sup> column shows the infectious vectors. The 3<sup>rd</sup> column shows the probability of virus persistence. Each line corresponds to a scenario (Fig 2).

doi:10.1371/journal.pone.0130838.g003



**Fig 4. Sampled farms and zones in Mayotte.**

doi:10.1371/journal.pone.0130838.g004

predicted data, the time of virus introduction in the model was assumed to be the 1<sup>st</sup> November 2007 when the rainy season started and when approximately the first RVF IgM positive cow was found in Mayotte, in November 2007 [7]. Proportion of hosts already in the recovered status at that date was estimated according to the literature review. Repetitions were kept only if virus persisted more than three years and 7.5 months which was, to date, the minimum known duration for RVF activity persistence in Mayotte [7,10]. For each period of seroprevalence study, the same number of cattle as sampled in the field was sampled in the animal population simulated by the model. For different values of  $k$  (between zero and one) and for each run, we calculated the sum of square of the differences between the observed and the predicted seroprevalence.

## Results

### Dynamics and persistence for each vector emergence scenario

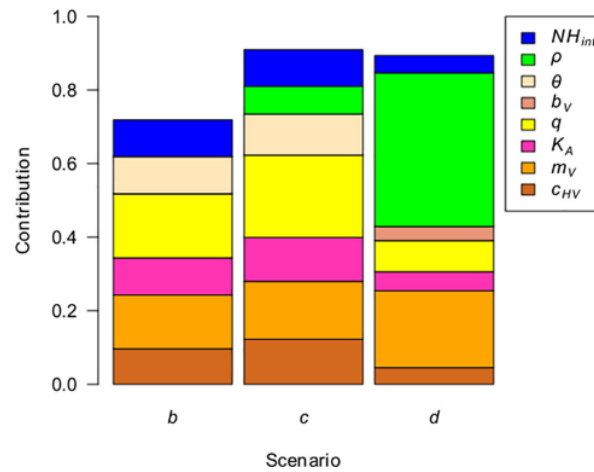
The RVF dynamics observed in the simulations are represented in Fig 4. After the introduction of an infectious animal, epizootics could occur in repetitions for all scenarios with a peak of around 40% of the ruminant population being infectious ( $maxI_{HI}$ ). At the end of the 1<sup>st</sup> year,

in repetitions in which the virus persisted, almost 100% of the host population had become infectious and had recovered. From the second year on, behaviours differed according to vector emergence scenarios. In scenario *a*, new infections occurred constantly with the renewal of the host population so that the infectious hosts remained steady at 0.4% of the population. In the three other scenarios, when the virus persisted, small epizootics occurred early in the favourable season and reached about the same level every year. The maximal proportion of infectious hosts in the 2<sup>nd</sup> year ( $maxI_{H2}$ ) attained 1.4, 3.4, and 4% for scenarios *b*, *c*, and *d*, respectively. Peaks always occurred several days (5–15 days on average) before the maximal vector abundance was reached. Yearly maximal proportion of infectious hosts was roughly stable from the 2<sup>nd</sup> year onwards ( $maxI_{H2}$  and  $maxI_{H3}$ ). In one repetition (over 1500), in scenario *c*, we observed an increase in year 4 of infectious hosts above the value of previous years, reaching 8% of the host population (Fig 4 section *cI*). Meanwhile, the mean proportion of recovered animals in case of persistence ( $meanR_H$ ) from the 2<sup>nd</sup> year until the end of the simulation was of 98, 98, 95, and 94% for scenarios *a*, *b*, *c*, and *d*, respectively; the mean number of infected vectors in aquatic stage in case of persistence was very low ( $1.10^{-3}$ ,  $2.10^{-3}$ ,  $5.1.10^{-3}$ , and  $8.0.10^{-3}$ % of the vectors in the aquatic stage for scenarios *a*, *b*, *c*, and *d*, respectively). Direct transmission was responsible for very few new cases ( $5.4 \times 10^{-2}$ %,  $5.2 \times 10^{-2}$ %,  $6.1 \times 10^{-2}$ %, and  $5.7 \times 10^{-2}$ % of the total cases for scenario *a*, *b*, *c*, and *d*, respectively).

Without reintroduction, it was possible for RVF virus to persist year after year in the 4 scenarios but with different probabilities. In scenarios *a* and *b*, the virus persisted in 100% of the repetitions over 5 years (Fig 4 sections *aIII* and *bIII*). In scenarios *c* and *d*, the virus persisted respectively in 80% and 20% of the repetitions after the first year epidemics (Fig 4 sections *cIII* and *dIII*). Extinctions related to a lack of secondary cases occurred during the favourable season and persistence remained stable during the less favourable season. At the end of the 5<sup>th</sup> year, persistence reached 64% (scenario *c*) and 12% (scenario *d*). When assuming no vertical transmission in vectors, persistence did not change at all for scenarios *a* and *b*. It decreased a little bit faster in scenario *c*, reaching 55% five years after the introduction of the virus. In scenario *d*, RVF virus went extinct without vertical transmission after the beginning of the first unfavourable season, as expected.

### Sensitivity analysis

In the sensitivity analysis, in scenario *a*, persistence reached 100% in most simulations. Hence, the contribution of different parameters to the variation of this output could not be analysed. For the other scenarios, eight parameters contributed to more than 2% of the variance of the persistence one year after the introduction of the virus (Fig 5 and S3 Fig) and explained more than 70% of the variance. Parameters common to the three scenarios were host population size ( $NH_{int}$ ), biting rate ( $q$ ), mortality rate of adult vectors ( $m_v$ ), carrying capacity of vectors in aquatic stage ( $K_A$ ) and transmission probability from hosts to vectors ( $c_{HV}$ ). They had a similar contribution except biting rate ( $q$ ), which contributed twice more in scenarios *b* and *c* than in scenario *d*. Conversely, viraemia duration ( $1/\rho$ ) contributed to almost half of the persistence variance (43%) in scenario *d*, much less (7%) in scenario *c*, and was negligible in scenario *b*. Parameter  $\theta$ , controlling maximal emergence rate, was influential only in scenarios *b* and *c*. Renewal rate of vectors was influential only in scenario *d* and at a low level (4% of the variance). Persistence five years after the introduction of the virus depended, in scenario *b*, on exactly the same parameters as in the first year. It was impossible to conclude for scenario *c* as the output distribution was bimodal (near 0 or 100%) instead of normal, which is obligatory for analysis of variance. In scenario *d*, biting rate ( $q$ ) and host viraemia duration ( $1/\rho$ ) were the most influential parameters on persistence variance until year five (17% and 24% respectively).



The contribution of parameter variations to the variance of other outputs is shown in Fig 6 and S3 Fig. In all scenarios, adult vector mortality ( $m_v$ ) was the main contributor to variance of the mean number of infected vectors in the aquatic stage ( $meanI_A$ ), which varied from 50 (scenario a) to 500 (scenario d). For this output only vertical transmission rate ( $\alpha$ ) was shown to be an influential parameter (>2%).

More than half of the variance of the maximal proportion of infectious hosts in the first year ( $maxI_{H1}$ ) was explained in the four scenarios by viraemia duration ( $1/\rho$ ) and biting rate ( $q$ ). In subsequent years ( $maxI_{H2}$  and  $maxI_{H3}$ ), the situation differed between scenarios: viraemia duration ( $1/\rho$ ) remained important only in scenarios c and d, host birth rate ( $b_H$ ) had growing influence in scenarios b, c and d, and adult vector mortality ( $m_v$ ) was influential in scenarios b and c only.

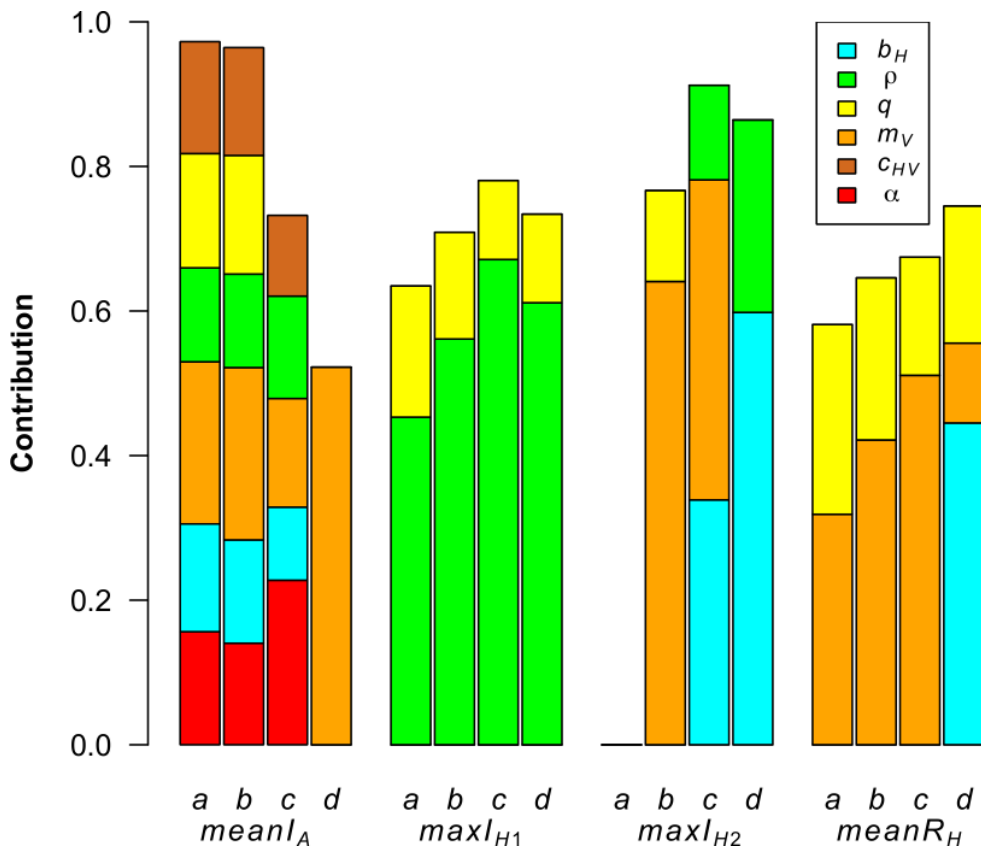
The variance of the mean proportion of recovered animals in case of virus persistence from year two to the end of the simulation ( $meanR_H$ ) was explained mainly by the adult vector mortality ( $m_v$ ) and the biting rate ( $q$ ) in the scenarios a, b and c and by the host birth rate ( $b_H$ ) and the biting rate ( $q$ ) in scenario d.

### Case study: Mayotte

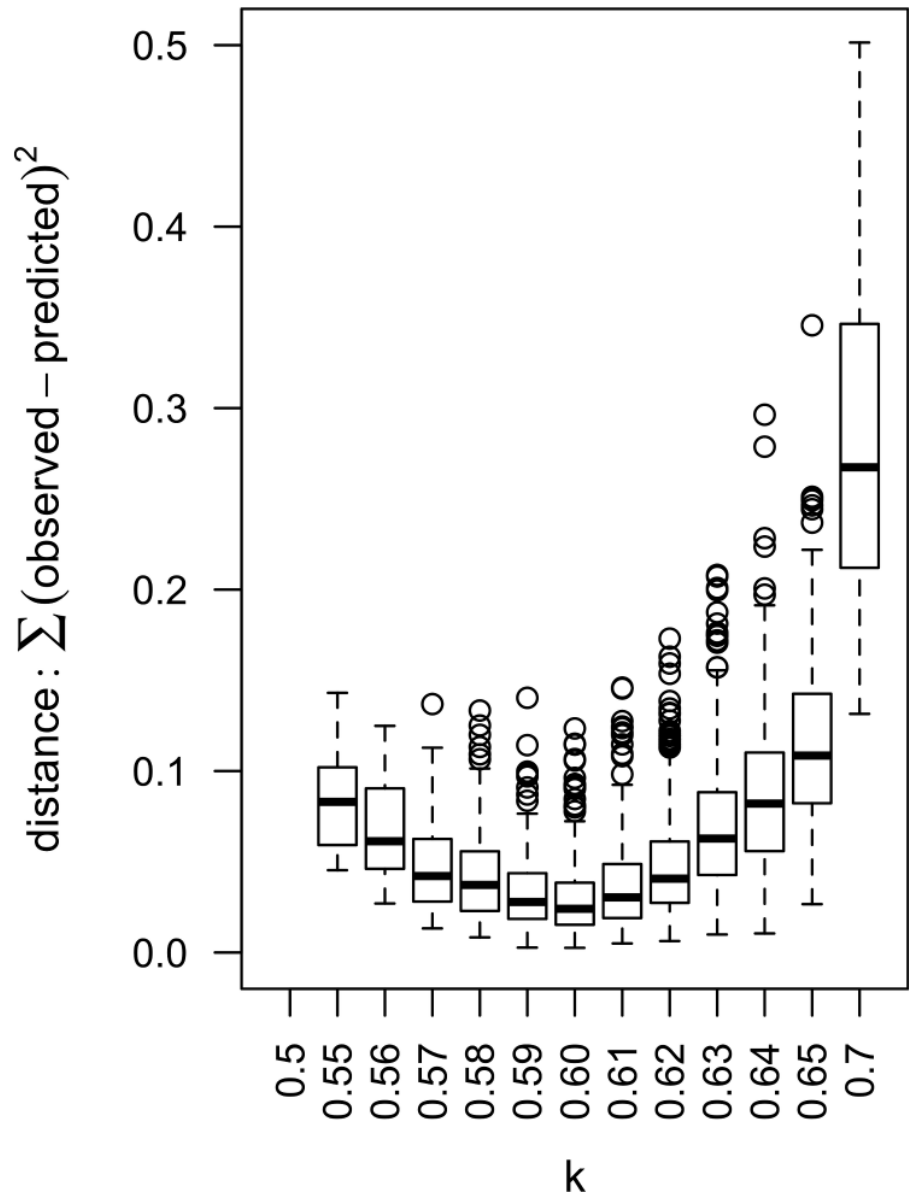
The entomological study conducted by ARS [47] found at least eight mosquito species in Mayotte known to be competent for RVF in the literature (Table 2). 7.84% of the mosquitoes from competent species belonged to *Aedes* genus ( $r$ ). *Cx quinquevittatus* accounted for 45% of the overall diversity but transmission data were lacking for this species. The averaged dissemination and transmission rates were 11.04 and 9.47% respectively.

In the serological survey of 2012–2013, we found 30, 33, and 29 positive animals out of 131, 157, and 161, respectively. Using all available knowledge (literature [7,10], an internal report of 2009 and the 2012–2013 serological survey), the seroprevalence observed between 2004 and 2013 ranged from 3% to 35%. At virus introduction, remaining seroprevalence was set to 16.2% as found in the raw data of the study from Cêtre [7] (Fig 7C and Table 3).





30838.t002



1500 repetitions. percentiles of the

doi:10.1371/journal.pone.0130838.g007

Given the model settings, the value of  $k$  minimizing the distance between observed and predicted data was to be found around 0.6 (Fig 8).

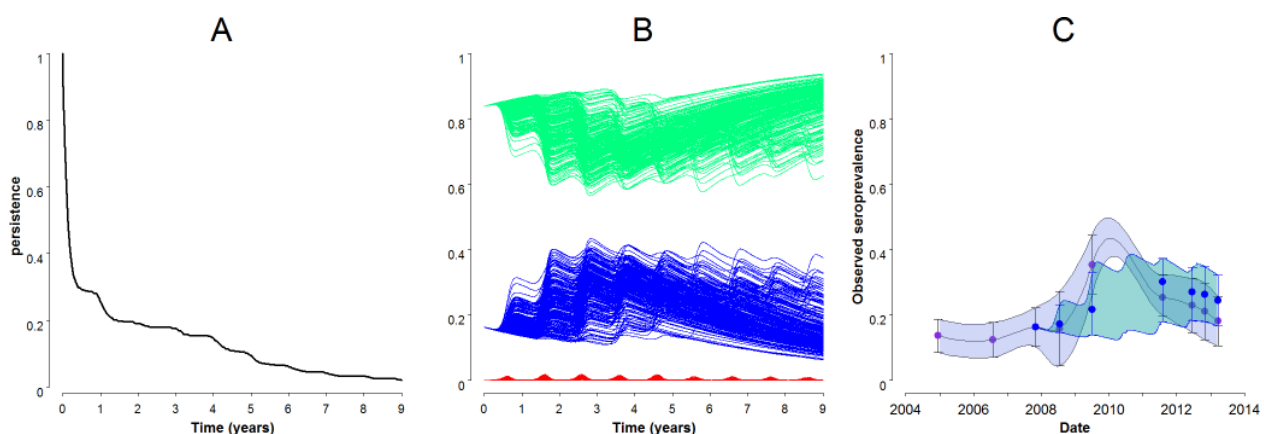
Model predictions with values for  $\alpha$ ,  $c_{VH}$  and  $c_{HV}$  estimated using the entomological study and  $k = 0.6$  are found in Fig 8. The virus persisted in 25.5%, 9.5% and 2.1% of the repetitions

**Table 3. RVF serology studies in ruminants in Mayotte from 2004 to 2013.** Data from 2004 to 2011 were obtained from a literature review. Original data sets could be obtained when source is marked with an asterisk (\*). Data from 2012 to 2013 were obtained through new serological surveys. Design effect refers to the clustering effect of the sampling design [81].

Study beginning-end	Number of animals tested	Number of farms	Number or % of positive IgG tests	Species	Design effect	Source
Oct 2004 - Feb 2005	243	67	33	Cattle	1.41	[7] *
June 2006—Sept 2006	130	39	16	Cattle	0.84	[7] *
June 2007-March 2008	419	124	68	Cattle	2.39	[7] *
June 2008-Aug 2008	267	12	42	Goat	5.43	[7] *
May 2009-Aug 2009	382	36	135	Cattle	3.46	Dr Sébastien Girard unpublished*
July 2011—Aug 2011	452	33	25.3%	Cattle, goat, sheep	-	[10]
May 2012-July 2012	131	29	30	Cattle	1.21	- *
Sept 2012—Dec 2012	157	28	33	Cattle, goat	1.68	- *
Feb 2013-April 2013	161	29	29	Cattle, goat	1.52	- *

doi:10.1371/journal.pone.0130838.t003

after one, five and nine years respectively (Fig 7A). Unlike the above four scenarios, the epizootic maximum could be reached in year one, two or three and the maximum proportion of infectious ruminants ( $maxI_{Hk}$ ) could vary from year to year and reincrease even after few years (Fig 7B). When the virus persisted, the proportion of recovered animals oscillated between 6.2 and 43.3% and the proportion of infectious animals increased at the middle of each year. The predicted seroprevalence varied within the range of observed seroprevalence (Fig 7C). The mean predicted incidence reached 1500, 3000 and 100 new cases per year in the first, second and ninth year after virus introduction, respectively.



**Fig 8. Distance between observed and predicted RVF seroprevalence in Mayotte used to determine the most likely value for transmission rate.** Sum of square of differences between observed and predicted seroprevalence were computed for each of the 1500 repetitions for different values of the possible transmission rate occurring in Mayotte ( $k$ ).

doi:10.1371/journal.pone.0130838.g008

## Discussion

This stochastic model is the first one to be used to study RVF persistence probability and its driving parameters over several years under different seasonal patterns of vector abundance. It was able to mimic a large range of virus spread patterns, from obligate persistence in a constant or tropical environment (without needing vertical transmission or reintroduction) to frequent extinctions in an arid climate. In each seasonality scenario, key parameters influencing the model predictions were identified. In addition, the model was applied to a real geographical area (Mayotte) for which we have shown that lower transmission rates than assumed may explain the observed seroprevalence for the last decade. RVF persistence was possible under such a scenario of low transmission for more than 10 years.

## Accounting for vector abundance seasonality in RVF modelling

Accounting for seasonality in vector abundance is a fundamental concern in vector-borne diseases since vector and pathogen biology and development depend on temperature or precipitation. A recent literature review of mathematical models of mosquito-borne pathogens [51] noted that only 14 per cent of them included a variation of vector abundance, either sinusoidally or based on a pattern derived from data. But applying it to Mayotte, with no longitudinal data allowing deriving such equations, is a real challenge. Moreover, while in the Netherlands and California, models could focus on two competent species only, 40 species of mosquitoes are known to transmit RVF virus. In Mayotte, we have found eight species able to transmit RVF virus. The preliminary use of equations from Gong *et al.* [28] on West Nile virus vectors in New Jersey lead to almost constant development and egg laying rates and did not capture the expert knowledge and the tropical seasonality observed in Mayotte [48]. We decided to focus on precipitation pattern influencing vector population dynamics by regulating larval habitats availability [44] in an intertropical geographical area. Average temperatures oscillate between 25 and 28°C all year round in Mayotte and thus cannot impact transmission nor development time significantly as it would do in California or the Netherlands [23,26]. Our conceptual framework allowed us to compare 4 qualitative scenarios.

## RVF dynamics and persistence depending on vector abundance scenarios

In all the four scenarios, RVF persistence five years after virus introduction was possible without the need for neither reintroduction of the virus nor for a wild reservoir. But the probability of persistence varied between scenarios: it decreased as seasonality became less favorable to vectors. This confirms the low level persistence observed in one previous model with constant abundance [20]. In Gaff *et al.* model, epizootic cycles were observed linked with the longevity of the hosts. In our case, despite the low transmission rates (equivalent to Gaff *et al.* low scenario), infection was facilitated by a higher vector/host ratio linked to our tropical environment-oriented model. Our average vector/host ratio is 30 times higher than in Gaff *et al.* model, but only three times higher than in rainy season of Chitnis *et al.* [30] and three times lower than the sparsely populated area of Fischer *et al.* work [26]. In the constant scenario, as soon as new susceptible hosts were born, they were exposed almost immediately to the virus, independently of host population renewal rate. This difference is also noticeable in the size of the first year epidemic peak: around 40% in our model against 0.12% to 12% in Gaff *et al.* work [20]. The important impact of vector/host ratio on epidemic size was also underlined in the recent study of Chamchod *et al.* [31]

The two first scenarios *a* and *b* with same mean emergence rate behaved identically in terms of persistence. Unexpectedly, the two intermediate sinusoidal scenarios *b* and *c* produced very different persistence probabilities confirming the complex influence of type and amplitude of seasonal forcing [33]. A variation in the dry season length, as between scenario *b* and *c*, can be misleading about the assessment of the potential of persistence of RVF. Here we showed that, in a tropical humid environment, persistence after one year was at least five times more likely than in the drier environment proposed in scenario *d*.

Subsequent epidemics seem extremely rare (only one run on 1500 in scenario *c*) and would indeed probably require inter-annual precipitation variations, recruitment of susceptible animals or an asynchronous metapopulation system [30,32,52].

### Key parameters controlling RVF dynamics and persistence: use in control measures design

According to this model, persistence control should not rely on the same strategies as epizootic control. To prevent or reduce the impact of the first epizootic, a very quick and efficient vaccination could be beneficial for all scenarios to reduce the duration of viraemia, responsible of 50% of the variation of this output. This supports the strategy suggested by Chamchod *et al.* in a constant environment [31]. For greater efficiency, Gaff *et al.* added the culling to the vaccination [40].

Sensitivity analysis of variance of persistence showed a more complex interplay of parameters than the analysis of first year epidemic peak, but still no interaction was significant. Persistence depended on different parameters for each scenario: it was mainly influenced by the biological traits of vectors in the tropical wet scenarios *b* and *c* and by host related parameters (mainly viraemia) in scenario *d* when a dry season occurred with no vector activity. While persistence behaved the same, at first sight, in the constant and sinusoidal scenarios, their sensitivity analysis diverged. A 10% variation had indeed almost no impact on scenario *a* persistence. In scenario *d*, viraemia controlled the proportion of infected eggs in overwintering eggs; hence influenced the size of the emerging infectious vector population during the next rainy season, and consequently likelihood of RVF persistence. This mechanism of persistence was also suggested for overwintering by previous work [22]. Moreover, for persistence on a longer term, host birth rate became influential by allowing a larger susceptible population to be exposed to minor new epizootics when the favourable season resumes.

It suggests that vaccination would be also useful to prevent persistence in arid climates (scenario *d*). In the other cases, potential targets for control measures include vector mortality rate and biting rate. However, mosquito control is hard to implement in tropical islands such as Mayotte, where animals are spread over large areas of forest in low concentrations. To limit the risk for humans, mosquito control could be employed around houses, although the cost would be high to be truly efficient since part of the population lives in poor construction suburbs or in slums surrounded by dense vegetation and are not accessible to vehicles. Still, transmission mainly via animal slaughtering and maybe via consumption of raw milk (a common traditional practices in Mayotte [53]) would remain possible [1,2,34]. In the future, our model could be used to develop and evaluate control strategies using adapted indicators for seasonal environments, as proposed in Charron *et al.* [54].

Transmission rates barely influenced persistence in this sensitivity analysis design, in accordance to Chitnis *et al.* and Fischer *et al.* conclusions [26,30]. Therefore, uncertainty of their values, in the 10% proposed range above and under nominal values, would barely impact model predictions. Transmission rates were influential only in Gaff *et al.*'s model [20,26,30] which had a much lower vector/host ratio and a wide range of uncertainty. Direct transmission was

not a remarkable influential parameter either. Moreover it was insufficient to allow for persistence in scenario *d*.

Limited information is available on vertical transmission [15]. With a parameter value lower than in earlier models [20,30], and within the range found in other models [26,23], we still observed persistence in our model. The sensitivity analysis showed that infected eggs played a role only in scenario *d* (5% and 13% of variance for  $\alpha$  and  $\epsilon$ ), confirming previous findings [30]. Vertical transmission in vectors was required in scenario *d* only for overwintering to occur. In the three other scenarios, even without vertical transmission, persistence could occur.

Faran et al. [37] found an impact of RVF infection on the survival of *Culex pipiens*, which is absent in Mayotte. As no further information was available on vectors found in Mayotte, we did not take into account this possible reduction of vector lifespan due to infection. However, this parameter was found as critical in the sensitivity analysis. Therefore, further lab work should be conducted to better estimate this phenomenon. Birth rate is influential in epidemics size and seroprevalence rate, thus further investigations on ruminant life traits in Mayotte (cattle and small ruminant birth rate and pulse) and their evolution with modernization of farming practices are recommended.

## Persistence and transmission in Mayotte

Our work supports the hypothesis, developed in a previous study [10], that RVF has become endemic in Mayotte. It circulated actively on the island with susceptible animals and a favorable environment for mosquito vectors to maintain virus transmission locally [10]. Firstly, field data showed a stability of seroprevalence over the last decade and, secondly, our model could reproduce an endemic situation without an epizootic peak.

We found eight RVF potential competent vector species in Mayotte. *Culex quinquefasciatus* abundance was remarkably high in our trapping compared to a recent study [55], showing the sensitivity of trapping method to their environment (in our case five ruminant farms).

In order to reproduce observed data, transmission rates were divided by more than five compared to other models [20,24,25]. Owing to stochasticity, seroprevalence appeared to be much more variable in this very low transmission situation than in the general framework developed at first. There are several possible explanations for these low transmission rates in Mayotte (1) transmission rates measured *in vitro* cannot be easily extrapolated to field conditions, (2) vector competence of Mayotte vectors has not been measured and can be poor, (3) a recent study [56] suggested that the RVF virus strain circulating in the Comoros in 2011 was hard to detect maybe because of a specific deleted virus strain or a low virus load in animals, (4) the presence of dead-end hosts could lower the biting rate, (5) vector/host ratio might be reduced due to dense vegetation and the relative isolation of herds (mean size of herd: five bovines [57]). The use of low transmission rates may converge with Xue *et al.* model [24] which found that when only few infectious mosquitoes were present at the beginning of the simulation, and thus a low contact rate, with infected ones, the epizootic was longer and the daily incidence was lower. This slower transmission could explain the absence of impact noticeable in the ruminants of Mayotte because no abortion storm in a short period of time would happen.

Interannual climatic variation in vector abundance could have been also added to eventually better explain the seroprevalence peak observed, which the model tends to underestimate. Indeed, above normal rainfall (1996–2010 data obtained from MétéoFrance) observed in 2007–2008–2009 rainy seasons in Mayotte and 2007–2008 climate anomalies underlined by FAO [58] could have facilitated the virus circulation.

A wildlife reservoir, namely buffaloes, seemed to explain persistence in Kruger National Park [42]. It was not considered in Mayotte, since there are no wild ruminants and since other wild mammals (rats and lemurs) have been tested negative for RVF, so far.

Livestock movements may play an important role in the spread of RVF. In Mayotte, there is neither market to gather animals nor transhumance as observed in Eastern Africa. This hypothesis should be further investigated by evaluating more closely movement practices, particularly when the French national identification database (BDNI) will be functional in Mayotte. Nevertheless, mechanisms such as asynchrony of climate between different zones connected by animal movements, as described in Favier et al. [32], were not necessary to allow for persistence here. The maintenance through illegal animal introduction only, exclusively from Anjouan, 70km distant-island of the Union of the Comoros is unlikely. Firstly, RVF circulation level is also very low there (RVF was unnoticeable from July 2010 to august 2011) [59]. Secondly, the illegal transport of ruminants, which was quite common until 2006–2007, seems to have dropped drastically since then, according to veterinary services and local reports. Since 2011 and the official attachment of Mayotte to France, illegal transport by boat between Anjouan and Mayotte became also more controlled and thus more dangerous and expensive making it less interesting to transport cattle, though not impossible (couple of live ruminants are still seized every year). This aspect should still be carefully monitored to assess reemergence potential.

The impact of RVF in Mayotte (abortion or loss of production in cattle and human cases) is still unknown. Seroprevalence data showed the presence of IgG against RVF virus back to 2004 [7]. The circulation of RVF virus between 2004 and 2007 in Mayotte is unclear since only IgG but no IgM were found in cattle [7]. An increase in seroprevalence was observed between 2007 and 2009 with records of seroconversions in ruminants until 2011 [10]. Human cases were reported sporadically between 2007 and 2012 in the Comoros Archipelago [53,60]. Only one RVF related abortion in ruminant was identified in Mayotte during this period [61]. Only active surveillance would help assessing RVF real impact and whether the circulation has now faded out, like in 90% of our simulations five years after introduction, or has remained silent.

## Conclusion and modelling perspectives

Seasonality in vector abundance has been shown to play a key role in shaping RVF persistence through a complex interplay between biological characteristics of vectors and virus and host characteristics which importance varies from scenario to scenario. We have shown that RVF persistence may occur in a single tropical population with a low transmission scenario without the need for virus reintroduction and even with no or very low vertical transmission. Hence, active surveillance must be maintained to better understand the risk related to RVF persistence and to prevent any new introductions.

“This model can be easily adapted to other climatic conditions by rendering the emergence function relevant for other vector species and areas, or by using longitudinal relative vector abundance as observed in the field. In addition, parameters considered as constant in tropical areas (e.g. incubation rate) can be replaced by temperature functions, more relevant for temperate areas.”

As the heterogeneity in the spatial distribution of vectors and hosts may impact arbovirus spread to a large extent [62], an extension of our model to account for this heterogeneity (urban slums, forest, agricultural zones and the archipelago metapopulation situation) would enable us to better study RVF spread in a low transmission scenario and to link it with neighbouring territories dynamics. Human activities could also be included, through many aspects: (1) slaughter seasonality or farming practices may influence the persistence of RVF; (2) In

urban areas, human behaviour might even be more influential than climate seasonality on vector dynamics [48,63]. Finally, building dynamic models for vector abundance adaptable to different localisations and environments have to be encouraged by extending our knowledge on vector biology from field and laboratory works.

## Supporting Information

### S1 Fig. Model code for Scilab.

(PDF)

**S2 Fig. Average monthly precipitations and temperature observed in Mayotte.** Precipitations were obtained from the agriculture department of Mayotte (DAAF) and temperature data were obtained from the public website of MétéoFrance (<https://donneespubliques.meteofrance.fr/>).

(TXT)

### S3 Fig. Complete results of the sensitivity analysis on variance of model outputs.

(PDF)

## Acknowledgments

We specially thank the ARS for sharing their data (Mikidache Said, Hairya Inoussa, Omar Ouseni, Lassadi Hassani Ali, Ismael Nahouda, Mohamadi Madi Saindou, Naimoudine Berou and Mu'uminat Cheick Ahmed who collected the entomological data, Marina Béral and Cyril Czeher who helped complete the database); Catherine Cêtre-Sossah for the share of her serological data and her invaluable comments; Thomas Balenghien and Séverine Licciardi for their entomological expertise; the CoopADEM-GDS of Mayotte and all the farmers for their help in the serological surveys. We also would like to thank Sandie Arnoux who helped us in performing part of the sensitivity analysis. Finally we sincerely thank David Wilkinson and the two reviewers for their critical and very helpful comments.

## Author Contributions

Conceived and designed the experiments: LC MC PE EC. Performed the experiments: LC MC PE LD BZ. Analyzed the data: LC MC PE. Contributed reagents/materials/analysis tools: LD BZ. Wrote the paper: LC MC LD PE EC BZ.

## References

1. Bird BH, Ksiazek TG, Nichol ST, Maclachlan NJ. Rift Valley fever virus. *J Am Vet Med Assoc.* 2009; 234: 883–893. doi: [10.2460/javma.234.7.883](https://doi.org/10.2460/javma.234.7.883) PMID: [19335238](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19335238/)
2. Pepin M, Bouloy M, Bird BH, Kemp A, Paweska J. Rift Valley fever virus (Bunyaviridae: Phlebovirus): an update on pathogenesis, molecular epidemiology, vectors, diagnostics and prevention. *Vet Res.* 2010; 41: 40.
3. Andriamandimby SF, Randrianarivo-Solofoniaina AE, Jeanmaire EM, Ravololomanana L, Razafimanantsoa LT, Rakotojoelinandrasana T, et al. Rift Valley Fever during Rainy Seasons, Madagascar, 2008 and 2009. *Emerg Infect Dis.* 2010; 16: 963–970. doi: [10.3201/eid1606.091266](https://doi.org/10.3201/eid1606.091266) PMID: [20507747](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20507747/)
4. Chevalier V. Rift Valley fever—a threat for Europe? 2010; Available: <http://www.eurosurveillance.org/ViewArticle.aspx?ArticleId=19506>
5. Abdo-Salem S, Gerbier G, Bonnet P, Al-Qadasi M, Tran A, Thiry E, et al. Descriptive and Spatial Epidemiology of Rift Valley Fever Outbreak in Yemen 2000–2001. *Ann N Y Acad Sci.* 2006; 1081: 240–242. doi: [10.1196/annals.1373.028](https://doi.org/10.1196/annals.1373.028) PMID: [17135517](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17135517/)
6. Shoemaker T, Boulianne C, Vincent MJ, Pezzanite L, Al-Qahtani MM, Al-Mazrou Y, et al. Genetic analysis of viruses associated with emergence of Rift Valley fever in Saudi Arabia and Yemen, 2000–01. *Emerg Infect Dis.* 2002; 8: 1415–1420. PMID: [12498657](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12498657/)



7. Cêtre-Sossah C, Pédarrieu A, Guis H, Defernex C, Bouloy M, Favre J, et al. Prevalence of Rift Valley Fever among Ruminants, Mayotte. *Emerg Infect Dis.* 2012; 18. doi: [10.3201/eid1806.111165](https://doi.org/10.3201/eid1806.111165)
8. Cêtre-Sossah C, Zeller H, Grandadam M, Caro V, Petinelli F, Bouloy M, et al. Genome Analysis of Rift Valley Fever Virus, Mayotte. *Emerg Infect Dis.* 2012; 18. doi: [10.3201/eid1806.110994](https://doi.org/10.3201/eid1806.110994)
9. Afssa. Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments sur le risque de propagation de la fièvre de la vallée du Rift (FVR) dans un département et une collectivité départementale français de l'Océan Indien (la Réunion et Mayotte) [Internet]. 2008 Jul p. 156. Report No.: SANT-Ra-Rift. Available: <http://www.anses.fr/index.htm>
10. Lernout T, Cardinale E, Jegou M, Desprès P, Collet L, Zumbo B, et al. Rift Valley Fever in Humans and Animals in Mayotte, an Endemic Situation? *PLoS ONE.* 2013; 8: e74192. doi: [10.1371/journal.pone.0074192](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074192) PMID: [24098637](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24098637/)
11. Owange NO, Ogara WO, Affognon H, B GP, Kasiiti J, Okuthe S, et al. Occurrence of rift valley fever in cattle in Ijara district, Kenya. *Prev Vet Med.* doi: [10.1016/j.prevetmed.2014.08.008](https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2014.08.008)
12. Lagerqvist N, Moiane B, Mapaco LP, Fafetine J, Vene S, Falk KI. Antibodies against Rift Valley Fever Virus in Cattle, Mozambique. *EID.* 2013; 19. Available: [http://wwwnc.cdc.gov/eid/article/19/7/13-0332\\_article.htm](http://wwwnc.cdc.gov/eid/article/19/7/13-0332_article.htm)
13. Sumaye RD, Geubbels E, Mbeyela E, Berkvens D. Inter-epidemic Transmission of Rift Valley Fever in Livestock in the Kilombero River Valley, Tanzania: A Cross-Sectional Survey. *PLoS Negl Trop Dis.* 2013; 7. doi: [10.1371/journal.pntd.0002356](https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0002356)
14. Kifaro EG, Nkangaga J, Joshua G, Sallu R, Yongolo M, Dautu G, et al. Epidemiological study of Rift Valley fever virus in Kigoma, Tanzania. *Onderstepoort J Vet Res.* 2014; 81. doi: [10.4102/ojvr.v81i2.717](https://doi.org/10.4102/ojvr.v81i2.717)
15. Linthicum KJ, Davies FG, Kairo A, Bailey CL. Rift Valley fever virus (family Bunyaviridae, genus Phlebovirus). Isolations from Diptera collected during an inter-epizootic period in Kenya. *J Hyg (Lond).* 1985; 95: 197–209.
16. Linthicum KJ, Anyamba A, Tucker CJ, Kelley PW, Myers MF, Peters CJ. Climate and Satellite Indicators to Forecast Rift Valley Fever Epidemics in Kenya. *Science.* 1999; 285: 397–400. doi: [10.1126/science.285.5426.397](https://doi.org/10.1126/science.285.5426.397) PMID: [10411500](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10411500/)
17. Davies FG, Linthicum KJ, James AD. Rainfall and epizootic Rift Valley fever. *Bull World Health Organ.* 1985; 63: 941–943. PMID: [3879206](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3879206/)
18. Keeling MJ, Rohani P. *Modeling Infectious Diseases in Humans and Animals.* 1st ed. Princeton University Press; 2007.
19. Ezanno P, Vergu E, Langlais M, Gilot-Fromont E. Modelling the Dynamics of Host-Parasite Interactions: Basic Principles. In: Morand S, Beaudeau F, Cabaret J, editors. *New Frontiers of Molecular Epidemiology of Infectious Diseases.* Springer Netherlands; 2012. pp. 79–101. Available: [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-2114-2\\_5](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-2114-2_5)
20. Gaff HD, Hartley DM, Leahy NP. An epidemiological model of rift valley fever. *Electron J Differ Equ.* 2007; 2007: 1–12.
21. Mpeshe S, Haario H, Tchenche J. A Mathematical Model of Rift Valley Fever with Human Host. *Acta Biotheor.* 2011; 59: 231–250. doi: [10.1007/s10441-011-9132-2](https://doi.org/10.1007/s10441-011-9132-2) PMID: [21611886](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21611886/)
22. Charron MVP, Balenghien T, Seegers H, Langlais M, Ezanno P. How Much Can Diptera-Borne Viruses Persist over Unfavourable Seasons? Lopez-Ferber M, editor. *PLoS ONE.* 2013; 8: e74213. doi: [10.1371/journal.pone.0074213](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074213) PMID: [24023929](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24023929/)
23. Barker CM, Niu T, Reisen WK, Hartley DM. Data-Driven Modeling to Assess Receptivity for Rift Valley Fever Virus. *PLoS Negl Trop Dis.* 2013; 7: e2515. doi: [10.1371/journal.pntd.0002515](https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0002515) PMID: [24244769](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24244769/)
24. Xue L, Cohnstaedt LW, Scott HM, Scoglio C. A Hierarchical Network Approach for Modeling Rift Valley Fever Epidemics with Applications in North America. *PLoS ONE.* 2013; 8: e62049. doi: [10.1371/journal.pone.0062049](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062049) PMID: [23667453](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23667453/)
25. Xue L, Scott HM, Cohnstaedt LW, Scoglio C. A network-based meta-population approach to model Rift Valley fever epidemics. *J Theor Biol.* 2012; 306: 129–144. doi: [10.1016/j.jtbi.2012.04.029](https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2012.04.029) PMID: [22564391](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22564391/)
26. Fischer EA, Boender G-J, Nodelijk G, Koeijer AA de, Roermund HJ van. The transmission potential of Rift Valley fever virus among livestock in the Netherlands: a modelling study. *Vet Res.* 2013; 44: 58. doi: [10.1186/1297-9716-44-58](https://doi.org/10.1186/1297-9716-44-58) PMID: [23876054](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23876054/)
27. Mweya CN, Holst N, Mboera LEG, Kimera SI. Simulation Modelling of Population Dynamics of Mosquito Vectors for Rift Valley Fever Virus in a Disease Epidemic Setting. *PLoS ONE.* 2014; 9: e108430. doi: [10.1371/journal.pone.0108430](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0108430) PMID: [25259792](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25259792/)
28. Gong H, DeGaetano A, Harrington L. Climate-based models for West Nile Culex mosquito vectors in the Northeastern US. *Int J Biometeorol.* 2011; 55: 435–446. doi: [10.1007/s00484-010-0354-9](https://doi.org/10.1007/s00484-010-0354-9) PMID: [20821026](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20821026/)

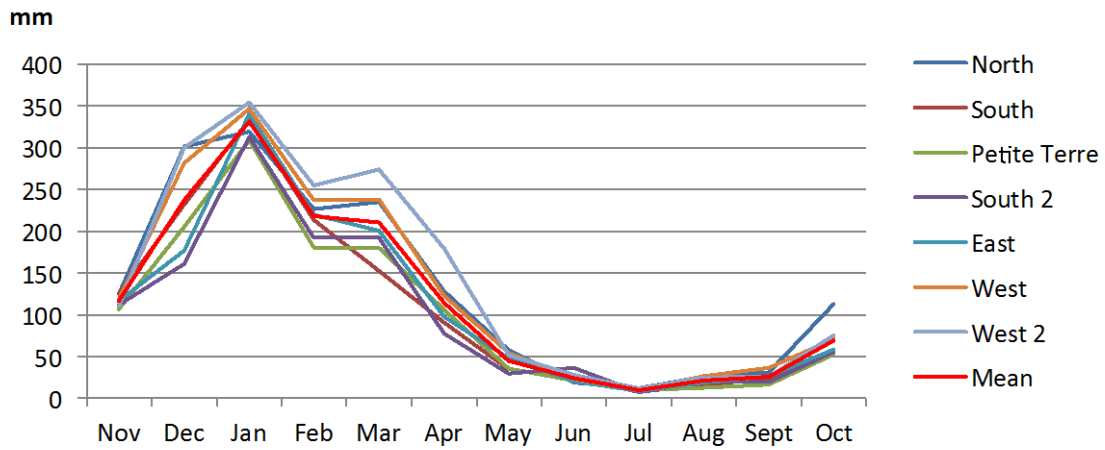
29. Rueda LM, Patel KJ, Axtell RC, Stinner RE. Temperature-dependent development and survival rates of *Culex quinquefasciatus* and *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). *J Med Entomol.* 1990; 27: 892–898. PMID: [2231624](#)
30. Chitnis N, Hyman JM, Manore CA. Modelling vertical transmission in vector-borne diseases with applications to Rift Valley fever. *J Biol Dyn.* 2013; 7: 11–40. doi: [10.1080/17513758.2012.733427](#) PMID: [23098257](#)
31. Chamchod F, Cantrell RS, Cosner C, Hassan AN, Beier JC, Ruan S. A Modeling Approach to Investigate Epizootic Outbreaks and enzootic Maintenance of Rift Valley Fever Virus. *Bull Math Biol.* 2014; 76: 2052–2072. doi: [10.1007/s11538-014-9998-7](#) PMID: [25102776](#)
32. Favier C, Chalvet-Monfray K, Sabatier P, Lancelot R, Fontenille D, Dubois MA. Rift Valley fever in West Africa: the role of space in endemicity. *Trop Med Int Health TM IH.* 2006; 11: 1878–1888. doi: [10.1111/j.1365-3156.2006.01746.x](#)
33. Altizer S, Dobson A, Hosseini P, Hudson P, Pascual M, Rohani P. Seasonality and the dynamics of infectious diseases. *Ecol Lett.* 2006; 9: 467–484. doi: [10.1111/j.1461-0248.2005.00879.x](#) PMID: [16623732](#)
34. Gerdes GH. Rift Valley Fever. *Rev Sci Tech OIE.* 2004; 23: 613–623.
35. Ezanno P, Aubry-Kientz M, Arnoux S, Cailly P, L'Ambert G, Toty C, et al. A generic weather-driven model to predict mosquito population dynamics applied to species of *Anopheles*, *Culex* and *Aedes* genera of southern France. *Prev Vet Med.* doi: [10.1016/j.prevetmed.2014.12.018](#)
36. Turell MJ, Kay BH. Susceptibility of selected strains of Australian mosquitoes (Diptera: Culicidae) to Rift Valley fever virus. *J Med Entomol.* 1998; 35: 132–135. PMID: [9538572](#)
37. Faran ME, Turell MJ, Romoser WS, Routier RG, Gibbs PH, Cannon TL, et al. Reduced Survival of Adult *Culex pipiens* Infected with Rift Valley Fever Virus. *Am J Trop Med Hyg.* 1987; 37: 403–409. PMID: [3661832](#)
38. Bretó C, He D, Ionides EL, King AA. Time series analysis via mechanistic models. *Ann Appl Stat.* 2009; 3: 319–348. doi: [10.1214/08-AOAS201](#)
39. Scilab Enterprises. Scilab: Free and Open Source software for numerical computation [Internet]. Orsay, France: Scilab Enterprises; 2012. Available: <http://www.scilab.org>
40. Gaff H, Burgess C, Jackson J, Niu T, Papelis Y, Hartley D. Mathematical Model to Assess the Relative Effectiveness of Rift Valley Fever Countermeasures. *Int J Artif Life Res.* 2011; 2: 1–18. doi: [10.4018/jalr.2011040101](#)
41. Lawpoolsri S, Klein EY, Singhasivanon P, Yimsamran S, Thanyavanich N, Maneeboonyang W, et al. Optimally timing primaquine treatment to reduce *Plasmodium falciparum* transmission in low endemicity Thai-Myanmar border populations. *Malar J.* 2009; 8: 159. doi: [10.1186/1475-2875-8-159](#) PMID: [19604346](#)
42. Manore CA, Beechler BR. Inter-Epidemic and Between-Season Persistence of Rift Valley Fever: Vertical Transmission or Cryptic Cycling? *Transbound Emerg Dis.* 2013; doi: [10.1111/tbed.12082](#)
43. Pratt HD, Moore CG (Chester G. Mosquitoes of public health importance and their control [Internet]. 1993. Available: <http://stacks.cdc.gov/view/cdc/21944>
44. Clements AN. *The Biology of Mosquitoes: Development, nutrition and reproduction.* CABI Publ.; 2000.
45. Saltelli A, Chan K, Scott EM. *Sensitivity analysis.* Wiley Series in Probability and Statistics. New York USA: J. Wiley & sons; 2000.
46. R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing [Internet].* Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing; 2013. Available: <http://www.R-project.org>
47. Balenghien T, Cardinale E, Chevalier V, Elissa N, Failloux A-B, Nipomichene TNJJ, et al. Towards a better understanding of Rift Valley fever epidemiology in the south-west of the Indian Ocean. *Vet Res.* 2013; 44: 78. doi: [10.1186/1297-9716-44-78](#) PMID: [24016237](#)
48. Bagny L, Delatte H, Elissa N, Quilici S, Fontenille D. *Aedes* (Diptera: Culicidae) Vectors of Arboviruses in Mayotte (Indian Ocean): Distribution Area and Larval Habitats. *J Med Entomol.* 2009; 46: 198–207. doi: [10.1603/033.046.0204](#) PMID: [19351070](#)
49. Tillard E, Aubriot D, Balberini L, Berre D. Référentiel technique de l'élevage bovin mahorais. Mayotte: Cirad; 2013 May p. 90.
50. Lumley T. *Complex Surveys: A Guide to Analysis Using R.* John Wiley & Sons; 2011.
51. Reiner RC, Perkins TA, Barker CM, Niu T, Chaves LF, Ellis AM, et al. A systematic review of mathematical models of mosquito-borne pathogen transmission: 1970–2010. *J R Soc Interface.* 2013; 10. doi: [10.1098/rsif.2012.0921](#)

52. Mpeshe SC, Luboobi LS, Nkansah-Gyekye Y. Modeling the impact of climate change on the dynamics of rift valley Fever. *Comput Math Methods Med.* 2014; 2014: 627586. doi: [10.1155/2014/627586](https://doi.org/10.1155/2014/627586) PMID: [24795775](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24795775/)
53. Sissoko D, Giry C, Gabrie P, Tarantola A, Pettinelli F, Collet L, et al. Rift Valley Fever, Mayotte, 2007–2008. *Emerg Infect Dis.* 2009; 15: 568–570. doi: [10.3201/eid1504.081045](https://doi.org/10.3201/eid1504.081045) PMID: [19331733](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19331733/)
54. Charron MVP, Seegers H, Langlais M, Ezanno P. Seasonal spread and control of Bluetongue in cattle. *J Theor Biol.* 2011; 291: 1–9. doi: [10.1016/j.jtbi.2011.08.041](https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2011.08.041) PMID: [21945148](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21945148/)
55. Le Goff G, Goodman SM, Elguero E, Robert V. Survey of the Mosquitoes (Diptera: Culicidae) of Mayotte. *PLoS ONE.* 2014; 9: e100696. doi: [10.1371/journal.pone.0100696](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100696) PMID: [25004163](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25004163/)
56. Maquart M, Pascalis H, Abdourohmane S, Roger M, Abdourahime F, Cardinale E, et al. Phylogeographic Reconstructions of a Rift Valley Fever Virus Strain Reveals Transboundary Animal Movements from Eastern Continental Africa to the Union of the Comoros. *Transbound Emerg Dis.* 2014; n/a–n/a. doi: [10.1111/tbed.12267](https://doi.org/10.1111/tbed.12267)
57. DAAF Direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt de Mayotte. Recensement agricole 2010—Mayotte [Internet]. 2010. Available: <http://daf.mayotte.agriculture.gouv.fr/RA-2010-les-resultats>
58. FAO. Climate models predict increased risk of precipitations in the Horn of Africa for end of 2008. *EMPRES Watch.* 2008; September 2008: 4.
59. Roger M, Beral M, Licciardi S, Soulé M, Faharoudine A, Foray C, et al. Evidence for Circulation of the Rift Valley Fever Virus among Livestock in the Union of Comoros. *PLoS Negl Trop Dis.* 2014; 8: e3045. doi: [10.1371/journal.pntd.0003045](https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0003045) PMID: [25078616](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25078616/)
60. InVS. bulletin hebdomadaire internationale n°372 31 octobre au 6 novembre 2012 [Internet]. 2012 p. 3. Report No.: 372. Available: [http://www.invs.sante.fr/content/download/49620/212231/version/40/file/bhi\\_372\\_311012\\_061112.pdf](http://www.invs.sante.fr/content/download/49620/212231/version/40/file/bhi_372_311012_061112.pdf)
61. Maquart M, Temmam S, Héraud J-M, Leparco-Goffart I, Cêtre-Sossah C, Dellagi K, et al. Development of real-time RT-PCR for the detection of low concentrations of Rift Valley fever virus. *J Virol Methods.* 2014; 195: 92–99. doi: [10.1016/j.jviromet.2013.10.001](https://doi.org/10.1016/j.jviromet.2013.10.001) PMID: [24120571](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24120571/)
62. Charron MV, Kluiters G, Langlais M, Seegers H, Baylis M, Ezanno P. Seasonal and spatial heterogeneities in host and vector abundances impact the spatiotemporal spread of bluetongue. *Vet Res.* 2013; 44: 44. doi: [10.1186/1297-9716-44-44](https://doi.org/10.1186/1297-9716-44-44) PMID: [23782421](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23782421/)
63. Barrera R, Amador M, MacKay AJ. Population Dynamics of *Aedes aegypti* and Dengue as Influenced by Weather and Human Behavior in San Juan, Puerto Rico. *PLoS Negl Trop Dis.* 2011; 5: e1378. doi: [10.1371/journal.pntd.0001378](https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0001378) PMID: [22206021](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22206021/)
64. Tran A L'Ambert G, Lacour G, Benoît R, Demarchi M, Cros M, et al. A Rainfall- and Temperature-Driven Abundance Model for *Aedes albopictus* Populations. *Int J Environ Res Public Health.* 2013; 10: 1698–1719. doi: [10.3390/ijerph10051698](https://doi.org/10.3390/ijerph10051698) PMID: [23624579](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23624579/)
65. Yamar BA, Diallo D, Kebe CMF, Dia I, Diallo M. Aspects of bioecology of two Rift Valley Fever Virus vectors in Senegal (West Africa): *Aedes vexans* and *Culex poicilipes* (Diptera: Culicidae). *J Med Entomol.* 2005; 42: 739–750. PMID: [16363157](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16363157/)
66. Service M. *Medical Entomology for Students.* Cambridge University Press; 2008.
67. McIntosh BM, Jupp PG, dos Santos I, Barnard BJ. Vector studies on Rift Valley Fever virus in South Africa. *South Afr Med J Suid-Afr Tydskr Vir Geneesk.* 1980; 58: 127–132.
68. Turell MJ, Linthicum KJ, Patrican LA, Davies FG, Kairo A, Bailey CL. Vector competence of selected African mosquito (Diptera: Culicidae) species for Rift Valley fever virus. *J Med Entomol.* 2008; 45: 102–108. PMID: [18283949](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18283949/)
69. Moutailler S, Krida G, Schaffner F, Vazeille M, Failloux A-B. Potential Vectors of Rift Valley Fever Virus in the Mediterranean Region. *Vector-Borne Zoonotic Dis.* 2008; 8: 749–754. doi: [10.1089/vbz.2008.0009](https://doi.org/10.1089/vbz.2008.0009) PMID: [18620510](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18620510/)
70. Turell MJ, Bailey CL, Beaman JR. Vector competence of a Houston, Texas strain of *Aedes albopictus* for Rift Valley fever virus. *J Am Mosq Control Assoc.* 1988; 4: 94–96. PMID: [3193106](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3193106/)
71. McIntosh BM, Jupp PG, Anderson D, Dickinson DB. Rift Valley Fever. 2. Attempts to transmit virus with seven species of mosquito. *J S Afr Vet Assoc.* 1973; 44: 57–60.
72. McIntosh BM, Jupp PG, dos Santos I, Rowe AC. Field and laboratory evidence implicating *Culex zombaensis* and *Aedes circumluteolus* as vectors of Rift Valley Fever virus in coastal South Africa. *South African J Oj Sci.* 1983; 79: 61–64.
73. Turell MJ, Linthicum KJ, Beaman JR. Transmission of Rift Valley fever virus by adult mosquitoes after ingestion of virus as larvae. *Am J Trop Med Hyg.* 1990; 43: 677–680. PMID: [2267972](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2267972/)
74. Turell MJ, Faran ME, Comet M, Bailey CL. Vector Competence of Senegalese *Aedes fowleri* (Diptera: Culicidae) for Rift Valley Fever Virus. *J Med Entomol.* 1988; 25: 262–266. PMID: [3404545](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3404545/)

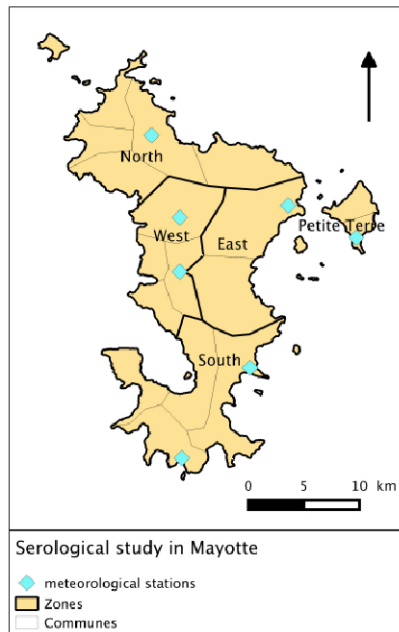
75. Patrican LA, Bailey CL. Ingestion of immune bloodmeals and infection of *Aedes fowleri*, *Aedes mcintoshi*, and *Culex pipiens* with Rift Valley fever virus. *Am J Trop Med Hyg.* 1989; 40: 534–540. PMID: [2729509](#)
76. Turell MJ. Effect of environmental temperature on the vector competence of *Aedes taeniorhynchus* for Rift Valley fever and Venezuelan equine encephalitis viruses. *Am J Trop Med Hyg.* 1993; 49: 672–676. PMID: [8279634](#)
77. Gad AM, Hassan MM, el Said S, Moussa MI, Wood OL. Rift Valley fever virus transmission by different Egyptian mosquito species. *Trans R Soc Trop Med Hyg.* 1987; 81: 694–698. PMID: [2895516](#)
78. Turell M, Presley S, Gad A, Cope S, Dohm D, Morrill J, et al. Vector competence of Egyptian mosquitoes for Rift Valley fever virus. *Am J Trop Med Hyg.* 1996; 54: 136–139. PMID: [8619436](#)
79. Turell MJ, Lee JS, Richardson JH, Sang RC, Kioko EN, Agawo MO, et al. Vector competence of Kenyan *Culex zombaensis* and *Culex quinquefasciatus* mosquitoes for Rift Valley fever virus. *J Am Mosq Control Assoc.* 2007; 23: 378–382. PMID: [18240513](#)
80. Turell MJ, Dohm DJ, Mores CN, Terracina L, Walette DL Jr, Hribar LJ, et al. Potential for North American mosquitoes to transmit Rift Valley fever virus. *J Am Mosq Control Assoc.* 2008; 24: 502–507. PMID: [19181056](#)
81. Dohoo I, Martin W, Stryhn H. *Veterinary Epidemiologic Research*. 2nd ed. Charlotte, P.E.I.: VER Inc.; 2009.

Supporting Information : S1

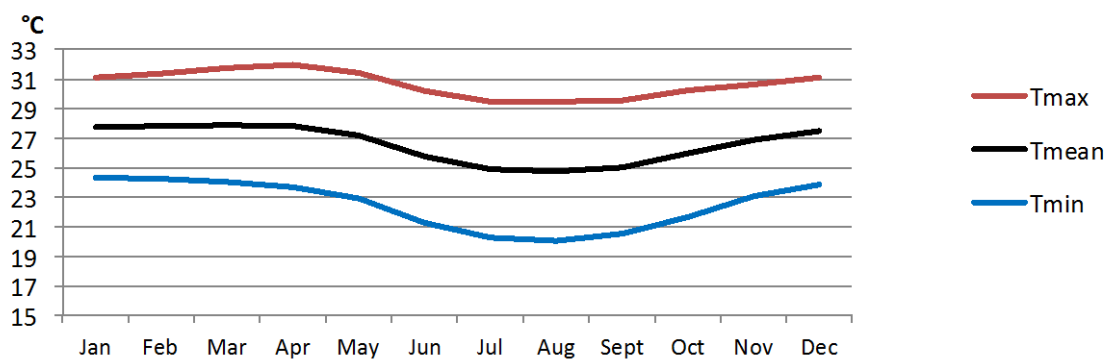
**Mean Rainfall 2004-2010 per month in different location in Mayotte**



**Location of the meteorological stations used in the graphics above :**



**Mean Temperatures in Mayotte 2000-2009**



## Supporting Information : S2

```

////////////////////////////////////
// FVR PERSISTENCE SEIR SEI stochastic MODEL SEIR //
// Lisa Cavalerie, Maud Charron, Pauline Ezanno //
// Laure Dommergues, Betty Zumbo, Eric Cardinale //
// last revised 04/04/2015 //
////////////////////////////////////

clear
stacksize("max");
tic();

// MODEL PARAMETERS

// repetition PARAMETRES
nbAnnee = 6; // Number of years (virus is introduced after 1 year)
step = 365; // step per year (here days)
tmax = step*nbAnnee; // Total step number (here days)
nbrun = 1500; // Number of repetitions
time = 1:tmax;

// Host PARAMETERS (demographics and infection)
bh = 1/(5*365); // Birth rate
mh = bh; // Mortality rate
chh = 1/1000; // Direct transmission rate
cvh = 0.4; // Transmission probability from vector to host
deltaH = 1/2; // 1/duration of incubation = 2 days
p = 1/6; // 1/duration of viraemia = 6 days

// Vector PARAMETERS (demographics and infection)

//rain = 1/2*ones(tmax,1); //scenario A
//rain = (sin(2*pi*time'./365)+1)*1/2; //scenario B
//rain = ((sin(2*pi*time'./365)+1)*1/2)^3; //scenario C
rain = sin(2*pi*time'./365); //scenario D

//SS = 1; //scenario A or B or C
SS = 0; //scenario D allows to force vector population to 0 for the dry season (see
equations below)

theta = 5; // Minimum development time before emergence in optimum conditions
phi = rain./theta; // Emergence rate
bv = 4; // Renewal rate
mv = 1/20; // Adult mortality rate
ma = 0; // Aquatic mortality rate already included in bv
chv = 0.6; // Transmission probability from host to vector
deltaV = 1/6; // Duration of extrinsic incubation period
q = 1/4; // Biting rate
alpha = 1/279*0.5; // Trans-ovarian transmission probability
KNA = 10^6; // Carrying capacity
epsilon = 0.44; // Proportion of eggs in the aquatic stages

```

```

// Initial CONDITIONS
// HOSTS
SH = zeros(nbrun,tmax); // Initialization of SH (sensitive hosts)
EH = SH; // Initialization of EH (exposed hosts)
IH = SH; // Initialization of IH (infectious hosts)
RH = SH; // Initialization of RH (recovered hosts)
NH = SH; // Initialization of NH (total host population)

// VECTORS
SV = SH; // Initialization of SV (sensitive vectors)
EV = SH; // Initialization of EV (exposed vectors)
IV = SH; // Initialization of IV (infectious vectors)
NV = SH; // Initialization of NV (total adult vector population)
ponteSV = SH; // Initialization of ponteSV (new non infected aquatic stage = "eggs laid at step t-1")
ponteIV = SH; // Initialization of ponteIV (new infected aquatic stage = "eggs laid at step t-1")
SA = SH; // Initialization of SA (sensitive aquatic stage)
IA = SH; // Initialization of IA (infectious aquatic stage)
NA = SH; // Initialization of NA (total aquatic stage population)

// Initialization
NHint = 30000; // Initial number of hosts
NVint = 10000; // Initial number of adult vectors
NAint = 0; // Initial number of vectors at aquatic stages
NH(:,1) = NHint; // Initial size of host population
SH(:,1) = NH(:,1); // Initial number of sensitive hosts
IH(:,1) = 0; // Initial number of infectious hosts
NV(:,1) = NVint; // Initial size of vector population
SV(:,1) = NV(:,1); // Initial number of sensitive vectors

NvxCasTransDirecte = zeros(nbrun,tmax); // New host cases by direct transmission
NvxCasTransVect = zeros(nbrun,tmax); // New host cases by vector transmission

// output
sor4 = zeros(nbrun,1); sor5 = sor4; sor6 = sor4; sor8 = sor4; sor9 = sor4; tr_dir = sor4; tr_vect = sor4;
m=0; k=0; f=0; j=0;

////////////////////////////////////
////////// MODEL SEIR stochastic //////////
////////////////////////////////////

// Repetitions loop
for n = 1:nbrun do

// Time loop
for t = 2:tmax do

// Introduction time of the 1st infectious host
if t == 367 then
    IH(n,t-1) = 1;
end

```

```

// if scenario D
if SS == 0 then
    if t>(183+20) & t<366 | t>(183+20)+365 & t<366+365 | t>(183+20)+365*2 & t<366+365*2 |
    t>(183+20)+365*3 & t<366+365*3 | t>(183+20)+365*4 & t<366+365*4 | t>(183+20)+365*5 &
    t<366+365*5 | t>(183+20)+365*6 & t<366+365*6 | t>(183+20)+365*7 & t<366+365*7 |
    t>(183+20)+365*8 & t<366+365*8 | t>(183+20)+365*9 & t<366+365*9 | t>(183+20)+365*10 &
    t<366+365*10 then
        SV(n,t-1) = 0;
        IV(n,t-1) = 0;
        EV(n,t-1) = 0;
    end
end

    if t>(182) & t<366 | t>(182)+365 & t<366+365 | t>(182)+365*2 & t<366+365*2 |
    t>(182)+365*3 & t<366+365*3 | t>(182)+365*4 & t<366+365*4 | t>(182)+365*5 & t<366+365*5 |
    t>(182)+365*6 & t<366+365*6 | t>(182)+365*7 & t<366+365*7 | t>(182)+365*8 & t<366+365*8 |
    t>(182)+365*9 & t<366+365*9 | t>(182)+365*10 & t<366+365*10 then
        phi(t,1) = 0;
    end
end

// Births in hosts
naisH = grand(1,1,"bin",SH(n,t-1)+RH(n,t-1),1-exp(-bh));

// Other transitions
// Compartments SH, EH, IH & SV, EV, & SA, IA
R_SH = zeros(3); // Sorties, Infection directe , Infection vectorielle
R_EH = zeros(2); // Sorties, Incubation
R_IH = zeros(2); // Sorties, Guerison
R_SV = zeros(2); // Mortalite, Infection vectorielle
R_EV = zeros(2); // Mortalite, EIP
R_SA = zeros(2); // Emergence, Mortalite densite dependante
R_IA = zeros(2); // Emergence, Mortalite densite dependante

R_SH(1:3) = [mh chh*IH(n,t-1)/NH(n,t-1) cvh*q*IV(n,t-1)/NH(n,t-1)]; // mortality, direct infection,
vector infection
R_EH(1:2) = [mh deltaH]'; // mortality, viraemia
R_IH(1:2) = [mh p]'; // mortality, recovery
R_SV(1:2) = [mv chv*q*IH(n,t-1)/NH(n,t-1)]; // mortality, vector infection
R_EV(1:2) = [mv deltaV]'; // mortality, incubation
R_SA(1:2) = [phi(t-1,1) (ma + (bv*NV(n,t-1) - ma*NA(n,t-1))/KNA)]'; // emergence, mortality
R_IA(1:2) = [phi(t-1,1) (1-epsilon)*(ma + (bv*NV(n,t-1) - ma*NA(n,t-1))/KNA)]'; // emergence,
mortality DD
tampon_SH = (1-exp(-sum(R_SH)))/(sum(R_SH));
tampon_EH = (1-exp(-sum(R_EH)))/(sum(R_EH));
tampon_IH = (1-exp(-sum(R_IH)))/(sum(R_IH));
tampon_SV = (1-exp(-sum(R_SV)))/(sum(R_SV));
tampon_EV = (1-exp(-sum(R_EV)))/(sum(R_EV));
tampon_SA = (1-exp(-sum(R_SA)))/(sum(R_SA)+0.000000001);
tampon_IA = (1-exp(-sum(R_IA)))/(sum(R_IA)+0.000000001);

// Probabilities of going out of compartment x
P_SH = tampon_SH * R_SH;

```



```

P_EH = tampon_EH * R_EH;
P_IH = tampon_IH * R_IH;
P_SV = tampon_SV * R_SV;
P_EV = tampon_EV * R_EV;
P_SA = tampon_SA * R_SA;
P_IA = tampon_IA * R_IA;

// Transfers from X to the other compartments + Population staying in X
T_SH = grand(1,'mul',SH(n,t-1),P_SH);
T_EH = grand(1,'mul',EH(n,t-1),P_EH);
T_IH = grand(1,'mul',IH(n,t-1),P_IH);
T_RH = grand(1,'mul',RH(n,t-1),1-exp(-mh)); // mortality only
T_SV = grand(1,'mul',SV(n,t-1),P_SV);
T_EV = grand(1,'mul',EV(n,t-1),P_EV);

T_IV = grand(1,'mul',IV(n,t-1),1-exp(-mv)); // mortality
T_SA = grand(1,'mul',SA(n,t-1),P_SA);
T_IA = grand(1,'mul',IA(n,t-1),P_IA);

// Eggs laid by vectors
ponteSV(n,t) = grand(1,1,'poi',(SV(n,t-1) + EV(n,t-1) + (1-alpha)*IV(n,t-1))*bv); // Number of non
infected eggs laid at step t
ponteIV(n,t) = grand(1,1,'poi',IV(n,t-1)*bv*alpha); // Number of eggs
transovarially infected laid at step t

// Update of compartment populations
SH(n,t) = T_SH(4) + naisH; // remaining population + births
EH(n,t) = T_EH(3) + T_SH(2) + T_SH(3); // remaining population + direct infection + vector
infection
IH(n,t) = T_IH(3) + T_EH(2); // remaining population + new infectious
RH(n,t) = T_RH(2) + T_IH(2); // remaining population + recovered
NH(n,t) = SH(n,t) + EH(n,t) + IH(n,t) + RH(n,t); // total host population

SV(n,t) = T_SV(3) + T_SA(1); // remaining population + sensitive emerging
EV(n,t) = T_EV(3) + T_SV(2); // remaining population + vector infection
IV(n,t) = T_IV(2) + T_EV(2) + T_IA(1); // remaining population + new infectious + infected
emerging
NV(n,t) = SV(n,t) + EV(n,t) + IV(n,t); // total vector population

SA(n,t) = T_SA(3) + ponteSV(n,t); // remaining population + Number of non infected eggs
laid at step t
IA(n,t) = T_IA(3) + ponteIV(n,t); // remaining population + Number of eggs transovarially
infected laid at step t
NA(n,t) = SA(n,t) + IA(n,t); // total aquatic stage population

NvxCasTransDirecte(n,t) = T_SH(2); // new host cases by direct transmission
NvxCasTransVect(n,t) = T_SH(3); // new host cases by vector transmission

end // end of loop of time

// OUTPUT
// maximum % of infectious hosts for repetition n in the 1st year after virus introduction

```

```

[m,k] = max(IH(n,366:730));
sor4(n,1) = m/NH(n,k);
// maximum % of infectious hosts for repetition n in the 2nd year after virus introduction
[m,k] = max(IH(n,731:3*365));
sor5(n,1) = m/NH(n,k);
// maximum % of infectious hosts for repetition n in the 3rd year after virus introduction
[m,k] = max(IH(n,3*365+1:4*365));
sor6(n,1) = m/NH(n,k);
// nb of new host cases by direct or vector transmission
tr_dir(n,1) = sum(NvxCasTransDirecte(n,1:tmax));
tr_vect(n,1) = sum(NvxCasTransVect(n,1:tmax));
// seroprevalence from 3rd year on
sor8(n,1) = mean(RH(n,(3*365+1):tmax)./NH(n,(3*365+1):tmax));

end // en of repetition loop

nrep = find(EH(:,tmax)+IH(:,tmax)+EV(:,tmax)+IV(:,tmax)+IA(:,tmax) > 0); // number of repetitions
with persistence 5 years after introduction
nbnrep = size(nrep);

for t = 1:tmax
    persist(t,1) =
sum(ceil((EV(:,t)+IV(:,t)+IH(:,t)+EH(:,t)+IA(:,t))./(NV(:,t)+NH(:,t)+NA(:,t)+0.00001)))/nbrun;
end

// outputs
// %mean IA J365->end
SOR(1) = 100*mean(IA(nrep,2*365+1:tmax)./NA(nrep,2*365+1:tmax));
// Persistence year 1
SOR(2) = persist(365*2,1);
// Persistence year 5
SOR(3) = persist(tmax,1);
// max IH1
SOR(4) = mean(sor4(nrep,1));
// max IH2
SOR(5) = mean(sor5(nrep,1));
// max IH3
SOR(6) = mean(sor6(nrep,1));
// % direct infection
SOR(7) = mean(tr_dir(nrep,1)./(tr_dir(nrep,1)+tr_vect(nrep,1)));
// mean RH
SOR(8) = mean(sor8(nrep,1));

// plot PERSISTENCE
xset("window",1)
plot2d([1:tmax],persist,5)
xtitle("Persistence probability")
legends(["Persistence probability"],[5],4)

///// plot SH EH IH RH SV EV IV SA IA
//xset("window",2)
//subplot(1,3,1) // 3 lines, 1 column, 1st graph

```

```
//plot2d([366:tmax],[SH(nrep,366:tmax)',EH(nrep,366:tmax)',IH(nrep,366:tmax)',RH(nrep,366:tmax)'
],style=[3*ones(1,nbnrep(2)) 1*ones(1,nbnrep(2)) 5*ones(1,nbnrep(2)) 2*ones(1,nbnrep(2))])
//xtitle("SEIR SEI FVR model","time","number of individuals")
//legends(["S","E","I","R"],[3,1,5,2],4)
//
//subplot(1,3,2) // 3 lines, 1 column, 2nd graph
//plot2d([366:tmax],[SV(nrep,366:tmax)',EV(nrep,366:tmax)',IV(nrep,366:tmax)'],style=[3*ones(1,nb
nrep(2)) 1*ones(1,nbnrep(2)) 5*ones(1,nbnrep(2))])
//xtitle("SEIR SEI FVR model","time","number of individuals")
//legends(["SV","EV","IV"],[3,1,5],4)
//
//subplot(1,3,3) // 3 lines, 1 column, 3rd graph
//plot2d([366:tmax],[SA(nrep,366:tmax)',IA(nrep,366:tmax)'],style=[3*ones(1,nbnrep(2))
5*ones(1,nbnrep(2))])
//xtitle("SEIR SEI FVR model","time","number of individuals")
//legends(["SA","IA"],[3,5],4)

toc()

// FIN DU PROGRAMME
```

	Persistence year 1				Persistence years				max I <sub>1st</sub>				max I <sub>2d</sub>				max I <sub>3d</sub>				% direct infection				mean R <sub>H</sub>				%mean I/ISSI->end							
	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d				
Host parameters	$D_{\text{def}}/M_H$	<2%	<2%	<2%	-	<2%	-	10%	<2%	<2%	<2%	<2%	-	5%	34%	60%	-	5%	39%	57%	5%	5%	4%	3%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	15%	14%	10%	<2%
	$C_H$	<2%	<2%	<2%	-	<2%	-	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	-	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	29%	34%	47%	43%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%
	$1/\delta_H$	<2%	<2%	<2%	-	<2%	-	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	-	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%
	$1/\rho$	<2%	7%	43%	-	<2%	-	24%	45%	56%	67%	61%	-	<2%	13%	27%	-	2%	16%	26%	<2%	<2%	4%	3%	2%	3%	2%	<2%	13%	13%	14%	4%				
	$NH/M_H$	-	9%	11%	5%	-	9%	-	<2%	5%	4%	2%	3%	-	3%	<2%	<2%	-	3%	<2%	<2%	6%	5%	3%	4%	7%	6%	4%	4%	<2%	<2%	<2%	3%			
	$C_H$	-	<2%	<2%	<2%	-	<2%	-	2%	5%	4%	3%	3%	-	3%	<2%	<2%	-	3%	<2%	<2%	6%	5%	4%	4%	7%	6%	4%	5%	<2%	<2%	<2%	3%			
	$b_V$	-	<2%	<2%	4%	-	<2%	-	6%	<2%	<2%	<2%	<2%	-	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	5%			
	$m_V$	-	15%	15%	21%	-	15%	-	4%	8%	4%	3%	4%	-	64%	44%	<2%	-	64%	34%	<2%	11%	10%	7%	6%	37%	42%	51%	11%	22%	24%	15%	52%			
	$q$	-	19%	22%	9%	-	19%	-	17%	18%	15%	11%	12%	-	13%	<2%	4%	-	12%	<2%	5%	22%	21%	15%	17%	26%	22%	16%	19%	16%	16%	4%	<2%			
	$C_H/m_V$	-	10%	12%	5%	-	10%	-	6%	4%	3%	3%	3%	-	3%	<2%	<2%	-	3%	<2%	<2%	5%	5%	4%	4%	7%	6%	4%	5%	15%	15%	11%	<2%			
Vector parameters	$1/\delta_V$	-	<2%	<2%	<2%	-	<2%	-	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	-	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%			
	$\epsilon$	-	<2%	<2%	<2%	-	<2%	-	5%	<2%	<2%	<2%	<2%	-	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	16%	14%	23%	8%			
	$\theta$	-	<2%	<2%	<2%	-	<2%	-	13%	<2%	<2%	<2%	<2%	-	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	7%	9%			
	$K_A$	-	9%	11%	<2%	-	9%	-	<2%	5%	4%	3%	4%	-	3%	<2%	<2%	-	3%	<2%	<2%	6%	5%	4%	5%	7%	6%	4%	3%	<2%	<2%	3%	<2%			
	$K_A$	-	10%	12%	4%	-	10%	-	7%	5%	4%	3%	3%	-	3%	<2%	<2%	-	3%	<2%	<2%	6%	5%	4%	5%	7%	6%	4%	5%	<2%	<2%	<2%	3%			
Interactions	$cu/q$	-	<2%	<2%	<2%	-	<2%	-	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	-	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%			
	$mv/q$	-	<2%	<2%	<2%	-	<2%	-	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	-	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%			
	$ch/vq$	-	<2%	<2%	<2%	-	<2%	-	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	-	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%			
	$q/KNA$	-	<2%	<2%	<2%	-	<2%	-	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	-	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%			
	$q/NH/m$	-	<2%	<2%	<2%	-	<2%	-	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	-	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%	<2%			
contribution of parameters above 2%		72%	90%	90%	72%	93%	93%	93%	98%	98%	99%	98%	97%	91%	91%	91%	99%	89%	89%	89%	95%	95%	96%	95%	94%	96%	99%	97%	97%	96%	87%	88%				

\* not normally distributed

## CHAPITRE IV : Identification des priorités sanitaires et de la place de la FVR du point de vue des éleveurs de ruminants à Mayotte par une approche participative

### I. Préambule sur l'épidémiologie participative et les travaux conduits à Mayotte en santé animale

Après la description de la surveillance de la FVR à Mayotte et la modélisation de sa persistance par des outils de l'épidémiologie quantitative « classique » (cf. **Chapitres I et II**), ce chapitre vise à compléter les connaissances sur la FVR à Mayotte et adapter sa gestion en interrogeant directement les éleveurs mahorais en utilisant « l'épidémiologie participative » (cf. encadré ci-dessous).

#### **Encadré : Principe de l'épidémiologie participative**

L'épidémiologie participative correspond au recours à des méthodes participatives pour résoudre des problématiques épidémiologiques : comprendre les maladies et les maîtriser. Ces méthodes permettent une plus grande implication des parties prenantes dans l'élaboration des projets relatifs à la santé publique qu'il s'agisse de recherche, de lutte, de prévention ou de surveillance (Catley et al., 2012; Jost et al., 2007).

L'épidémiologie participative a connu un essor important dans les années 1990 faisant suite aux approches de diagnostic participatif « *participatory rural appraisal* » développées dans les années 1970 et dans les pays en développement en particulier (Catley et al., 2012). Ces approches permettaient d'impliquer d'avantage les connaissances et les communautés rurales dans les programmes de développement notamment des organisations non gouvernementales (ONG), en tenant compte de contraintes logistiques et financières particulières.

Ces méthodes prennent en compte l'existence d'un « savoir épidémiologique » (Mariner and Paskin, 2000) existant dans les communautés rurales même si elles sont isolées des connaissances académiques scientifiques. En effet, si une maladie a un impact en élevage, il est très probable que les éleveurs la connaissent et soient capables de décrire précisément la présentation épidémioclinique voire les lésions associées à cette maladie ainsi que les facteurs de risque. C'était le cas des Maasai qui avaient identifié un lien entre la période de mise bas des gnous et la fièvre catarrhale maligne de leur troupeau et utilisaient d'ailleurs le même mot pour désigner la maladie et les gnous (Mariner and Paskin, 2000). Ceci est vrai même si l'éleveur n'utilise pas le même vocabulaire et n'a pas les mêmes connaissances de la physiologie et la pathologie qu'un épidémiologiste ou un vétérinaire. Un autre des principes de ces méthodes est la nécessité de valider les informations obtenues en croisant les résultats de diverses méthodes d'enquête ou sources, c'est ce qu'on appelle « la triangulation », principe hérité des sciences sociales (Denzin, 2009).

Les principaux outils de l'épidémiologie participative sont les différentes méthodes d'entretiens dont les entretiens semi-directifs et les réunions participatives (« *focus-groups* »), des méthodes de classement et de score ainsi que de visualisation par des diagrammes, cartes participatives, dessins, calendrier saisonniers, frises temporelles, etc. (Jost et al., 2007).

Depuis sa détection à Mayotte en 2008, différentes mesures ont été prises par les autorités : des actions de communication (communiqués de presse de la préfecture, sensibilisation par l'ADEM des éleveurs sur la déclaration des avortements, etc.) ont d'abord été mise en œuvre puis la surveillance a été renforcée. Or, le **Chapitre I** a mis en évidence une participation des éleveurs encore très faible à la surveillance obligatoire des avortements et les difficultés à conduire la surveillance programmée (difficultés pour contacter les éleveurs, trouver des disponibilités, etc.) alors, qu'il est possible que la FVR persiste à bas bruit ou qu'elle soit réintroduite. Une meilleure connaissance des perceptions des éleveurs vis-à-vis de la FVR ou de la santé animale permettrait de comprendre et peut-être d'améliorer cette faible participation. Plus généralement, concernant la gestion des risques sanitaires, décrire la perception du risque est une étape incontournable de la gestion au même titre que la caractérisation du danger.

Outre l'approche par des réunions participatives qui sera décrite ci-après, une étude sociologique exploratoire a été conduite dans le cadre de cette thèse avec l'appui d'une étudiante en Master 2 de sociologie politique. Elle a porté sur les pratiques sanitaires des éleveurs de ruminants à Mayotte et les contacts entre élevages afin d'en étudier les possibles effets sur la gestion de la FVR (Chauvet, 2013a). Douze éleveurs ont été interrogés lors d'entretiens semi-dirigés permettant une première description à Mayotte des mécanismes de pensée relatifs à des pratiques données (gestion de l'abattage, des avortements, recours à la médecine traditionnelle ou moderne, gestion des contacts entre troupeaux, etc.). En complément, une analyse socio-politique pour illustrer les enjeux territoriaux et les stratégies d'acteurs à Mayotte à partir de l'exemple de la mise en œuvre des politiques publiques de santé animale à Mayotte a été réalisée en se basant sur la conduite d'une vingtaine d'entretiens avec des parties prenantes (Chauvet, 2013b).

Nous avons prolongé l'étude qualitative auprès des éleveurs avec un échantillonnage plus importants (60 éleveurs) permettant de décrire quantitativement le lien entre typologie de l'élevage et les connaissances, attitudes et pratiques en santé animale des éleveurs mahorais (cf. **ANNEXE VII**). Cette étude devrait faire l'objet prochainement d'une publication (Cavalerie et al., 2017).

**Résumé de la démarche :**

Des réunions participatives (« *focus groups* » en anglais) ont été organisées dans différentes communes pour réaliser un exercice de priorisation des problèmes sanitaires dont les éleveurs ont connaissance.

**Principaux résultats :**

- 8 réunions ont été organisées rassemblant un total de 164 éleveurs.
- 35 problèmes sanitaires ont été listés, la FVR n'a été citée qu'une seule fois, par un seul participant.
- Les cinq problèmes spontanément rapportés comme les plus importants chez les bovins sont dans l'ordre le charbon symptomatique, les tiques, le syndrome « bavite-fièvre-grippe », le syndrome « dermatophilose-boutons » et la diarrhée.
- Les critères d'importance ne sont pas toujours bien définis par les éleveurs eux-mêmes, mais ils ont évoqué : le coût, la fréquence, le « risque », la « gêne », la gravité. Le risque semble lié à la notion de peur, et selon ce critère, ce sont les avortements au sens large qui préoccupent le plus les éleveurs. La « gêne » et la « gravité » sont des notions ambiguës qui mériteraient d'être approfondies pour comprendre s'il s'agit d'un lien émotionnel avec l'animal ou d'une autre dimension culturelle ou spirituelle.

## I. Contexte et objectif de l'étude

La FVR représente une menace importante tant d'un point de vue sanitaire qu'économique, d'où son classement comme maladie à déclaration obligatoire par l'OIE et comme danger sanitaire de première catégorie dans la réglementation française. Cependant, l'expérience de l'île de Mayotte vis-à-vis de la FVR est assez singulière puisque malgré une circulation importante attestée par l'observation d'un niveau de séroprévalence élevé chez les ruminants, elle n'a provoqué de façon identifiée et déclarée aucune vague d'avortements chez les ruminants. Par ailleurs, seulement dix cas humains ont été détectés positifs à la recherche du virus FVR (présence d'ARN spécifique du virus FVR ou taux d'IgM spécifiques) grâce à une étude rétrospective réalisée sur les patients ayant consulté pour des syndromes fébriles dans le cadre de la surveillance des virus de la dengue et du chikungunya ; sans quoi, ils seraient probablement passés inaperçus (Sissoko et al., 2009).

La surveillance de la FVR à Mayotte repose désormais sur une surveillance programmée conduite régulièrement dans des élevages sentinelles depuis 2009 et une surveillance événementielle des avortements et des mortalités anormales. Le **Chapitre I** a mis en évidence une participation des éleveurs encore très faible à la surveillance obligatoire des avortements, mais aussi la difficulté à impliquer de façon concrète les éleveurs dans la surveillance programmée (difficulté à retrouver les éleveurs, à se rendre disponible pour effectuer des prélèvements).

Les travaux d'entretiens semi-directifs menés en 2013 chez une douzaine d'éleveurs mahorais au sujet des connaissances, perceptions et pratiques en lien avec la FVR et la santé (Chauvet, 2013a, 2013b) ont débouché sur la volonté d'interroger les éleveurs sur leurs priorités sanitaires et ce de façon collective cette fois. Cette volonté permettait de répondre également aux attentes de la

COOPADEM en impliquant les éleveurs par la même occasion le plus activement possible au développement du réseau de surveillance SESAM. Il a été décidé d'organiser des réunions participatives d'éleveurs réalisées sous forme de groupes de discussion (« *focus groups* » (Jost et al., 2007; Morgan, 1997)) pour mener un travail de recensement et de priorisation des problèmes sanitaires connus en s'inspirant de méthodes participatives décrites notamment par Catley et ses collaborateurs (Catley, 2005; Catley et al., 2012; Mariner and Paskin, 2000). En particulier, nous avons utilisé des matrices de comparaison et des scores proportionnels (« *proportional piling* » en anglais) qui sont classiquement réalisés avec des graines ou des pierres pour estimer des quantités relatives. Les matrices (des tableaux à double entrée) permettent de comparer plusieurs indicateurs d'une même maladie ou de maladies différentes : symptômes, incidence, etc.

L'objectif de ces réunions participatives était triple : (1) Replacer la FVR dans le contexte sanitaire tel que perçu par les éleveurs afin *in fine* d'adapter la communication autour des projets de recherche, des dispositifs de surveillance et de prévention de la FVR et atteindre une adhésion satisfaisante des acteurs autour de ces projets, (2) mieux prendre en compte le point de vue des éleveurs pour adapter l'offre de formation et de conseils de la COOPADEM et adapter les travaux de recherche associés, (3) initier la formalisation d'un réseau d'éleveurs délégués sanitaires permettant notamment de renforcer la surveillance événementielle vis-à-vis d'événements sanitaires anormaux (dont la FVR). L'organisation de ces réunions participatives a été effectivement l'occasion d'identifier des éleveurs intéressés par ces sujets et de créer une dynamique de groupe autour du partage d'informations sanitaires.

## II. Matériel et Méthodes

### A. Organisation des réunions participatives

Un déroulé de réunion a été préparé sur la base de la bibliographie scientifique puis travaillé avec les vétérinaires et les techniciens de la COOPADEM. L'équipe réalisant les réunions était composée *a minima* d'un vétérinaire épidémiologiste de la COOPADEM en charge de l'animation et d'une technicienne qui assurait la traduction. Nous étions présents (ou un autre vétérinaire de la COOPADEM) en tant qu'observateur extérieur pour assurer la prise de note, analyser et commenter *a posteriori* le déroulé de la réunion.

Les réunions ont été organisées en s'appuyant sur le découpage administratif communal. Tous les adhérents de la COOPADEM répertoriés dans chaque commune concernée ont été invités par téléphone (appel +/- SMS) à participer à une réunion d'information et de formation en santé animale. Il était précisé lors de l'invitation que l'adhérent pouvait venir seul, accompagné d'autres éleveurs, accompagné de son employé ou se faire représenter par son employé. Pour avoir un nombre de participants le plus homogène possible, certaines réunions ont été regroupées (Petite Terre) ou réparties en plusieurs groupes (Tsingoni).

Les réunions se déroulaient sur une demi-journée découpée en trois séquences :

- L'introduction de la séance commençait par une présentation des enquêteurs et des éleveurs (nom, espèces élevées, nombre d'animaux/espèce, statut : chef d'exploitation ou salarié, exercice d'un autre métier en plus de celui d'éleveur, lieu d'exploitation) (cf. Figure 32). Les enquêteurs faisaient ensuite une courte présentation de la COOPADEM et des



missions du GDS (objectifs, fonctionnement, activité et services). Les objectifs de la demie journée étaient présentés aux participants à savoir : réaliser un exercice de priorisation des problèmes sanitaires où les éleveurs allaient être les principaux acteurs puis participer à une formation pratique. La perspective d'organiser des formations selon les résultats de l'exercice de priorisation, et de maintenir des échanges réguliers sur les thématiques sanitaires au sein de ces groupes était annoncée.

- L'exercice de priorisation participative des problèmes sanitaires a été conduit sous forme de « jeu » selon les étapes ci-après. Un moment d'échange était prévu à la fin de ce jeu pour discuter des résultats de la priorisation ou d'un problème sanitaire particulier, notamment si des réponses immédiates ou des actions pouvaient être envisagées suite à un problème sanitaire particulier évoqué par les participants.
- A la fin, une formation théorique et pratique sur un sujet variable concernant la santé animale concluait la matinée (les parasites internes et les vermifuges, la contention, prendre la température, etc.).



Figure 32. Exemples de lieux de réunion (© Lisa Cavalerie)

## B. Exercice de priorisation des maladies

### 1. Etape 1 : Recensement des maladies rencontrées

Pour cette étape, tous les éleveurs participant à la réunion (dénommés ensuite « les éleveurs », « les participants » ou « le groupe ») étaient réunis autour des enquêteurs et d'une table. Les participants devaient lever la main pour prendre la parole.

Les enquêteurs demandaient aux éleveurs de lister toutes les « maladies » qu'ils connaissaient. Chacun pouvait prendre la parole. Tout type de « maladie » a été accepté par les enquêteurs : il pouvait s'agir d'une maladie infectieuse, d'un syndrome, d'un symptôme ou autre phénomène lié à la santé des animaux. L'objectif était en effet de prioriser les « problèmes sanitaires » des bovins connus des éleveurs et qui leur posent des difficultés sans préjuger de leurs connaissances scientifiques sur les agents étiologiques en cause. Cela a permis par exemple de ne pas passer à côté d'une maladie dont les éleveurs ne connaissent pas précisément le nom et la clinique exacte mais dont ils connaissent simplement l'un des symptômes.

Chaque « maladie » ou problème cité faisait l'objet d'une représentation graphique pour pouvoir être ré-évoqué par la suite facilement. Des feuilles plastifiées avec un dessin de vache et des feutres de couleur étaient à la disposition des éleveurs. Les éleveurs ont dû se mettre d'accord pour représenter graphiquement la « maladie » et réaliser un dessin évocateur (cf. Figure 33 et Figure 36).

L'éleveur ayant cité le problème réalisait le dessin ou désignait un autre éleveur pour le faire s'il préférait. L'éleveur prononçait et écrivait (ou désignait quelqu'un qui le pouvait) le nom qu'il donnait à la maladie en français et/ou en shimaoré, avec l'aide du technicien traducteur si besoin (Daudin and Michailesco, 2014).

L'opération s'est répétée jusqu'à ce que les éleveurs aient fini de décrire toutes les maladies qu'ils connaissaient.

## 2. Etape 2 : Sélection des cinq maladies les plus importantes par vote individuel

Pour cette étape, les éleveurs devaient voter individuellement afin de réaliser une première étape de priorisation. Au vu du nombre de maladies et de problèmes généralement recensés, et du temps limité de réunion, une méthode de vote rapide a été mise en œuvre : chaque éleveur disposait de cinq voix maximum à attribuer aux cinq maladies qu'il considère comme les plus « importantes ». Chacun leur tour, les éleveurs devaient distribuer leur cinq voix en faisant un trait au feutre (ou une croix) sur le dessin de ces cinq maladies. Les éleveurs n'étaient pas obligés d'utiliser les cinq voix : si l'un considérait que seulement deux maladies étaient importantes à ses yeux, il pouvait n'en choisir que deux. En revanche, un éleveur ne pouvait en théorie pas voter deux fois pour la même maladie. Lors de chaque réunion, le nombre de votes pour chaque maladie était divisé par le nombre total de votes afin d'enregistrer le pourcentage de votes attribués à cette maladie.



Figure 33 : Illustrations du vote pour les maladies les plus importantes (© Lisa Cavalerie)

Pour comparer finalement les maladies entre elles, la moyenne des pourcentages de votes obtenus à toutes les réunions a été calculée.

Les fiches dessins des cinq problèmes sanitaires ayant reçu le plus de votes étaient conservés pour l'étape suivante.

### 3. Etape 3 : Description de l'impact des cinq problèmes les plus importants

Lors de cette étape, les éleveurs pouvaient prendre la parole en levant la main comme pour la première étape. Il était demandé aux éleveurs de décrire pour chacun des cinq problèmes recensés comme prioritaires pourquoi ils les considéraient comme tels. Les enquêteurs relevaient ainsi les critères qui permettaient aux éleveurs de juger ce problème sanitaire comme important et prioritaire.

Entre deux et trois des critères les plus fréquemment ou clairement évoqués étaient conservés pour l'étape suivante afin de comparer quantitativement l'impact des cinq maladies classées comme les plus importantes lors de la deuxième étape. A défaut de critère clairement explicité, il était proposé aux participants de parler du coût et de la fréquence de ces cinq problèmes sanitaires.

### 4. Etape 4 : Priorisation des cinq maladies par critère

En fonction des critères conservés à l'étape précédente, le groupe recevait vingt « jetons » par critère à évaluer. Le groupe devait se mettre d'accord, cette fois-ci de façon collective, sur la répartition de ces vingt jetons entre les maladies. Les éleveurs devaient ainsi quantifier proportionnellement quelle était la maladie la plus fréquente ou la plus coûteuse. (cf. Figure 34).

Lors de cette étape, en fonction de leur nombre, les éleveurs ont parfois été répartis en sous-groupes d'une dizaine de personnes maximum (Catley, 2005). Ces sous-groupes étaient constitués de façon à optimiser la participation de chacun (regroupement des femmes lorsqu'elles étaient assez nombreuses, en fonction des personnalités -plus ou moins introverties- ou des types de productions animales). Chaque sous-groupe recevait alors vingt jetons et les résultats des sous-groupes étaient additionnés par critère et maladie.

Le pourcentage de jetons attribués par critère et maladie pour une réunion donnée était retenu afin de comparer les réunions entre elles.



Figure 34. Illustrations des discussions entre éleveurs permettant de pondérer l'importance de cinq problèmes sanitaires retenus en fonction de critères définis (© Lisa Cavalerie)

## III. Résultats

### A. Organisation des réunions participatives

Huit réunions ont été organisées dans huit communes différentes de Mayotte entre les mois de

février 2014 et juin 2015 (cf. Tableau 21 et Figure 35) avec au total 164 éleveurs, soit une moyenne de 21 participants par réunion (minimum de 10 participants et maximum de 32 participants). Les participants étaient majoritairement des hommes, adhérents à l’ADEM et propriétaires de leurs animaux.

Tableau 21. Détail des réunions organisées

Communes	Petite Terre = Dzaoudzi + Pamandzi	Tsingoni (Combani)	Kani Keli	Bandraboua	Ouangani	Sada	Tsingoni	Chirongui	TOTAL
N° de la réunion	1	2	3	4	5	6	7	8	
Date de la réunion	06/02/14	18/02/14	20/02/14	06/03/14	15/05/14	12/06/14	19/06/14	04/06/15	
Nombre participants	10	19	29	21	13	19	21	32	164

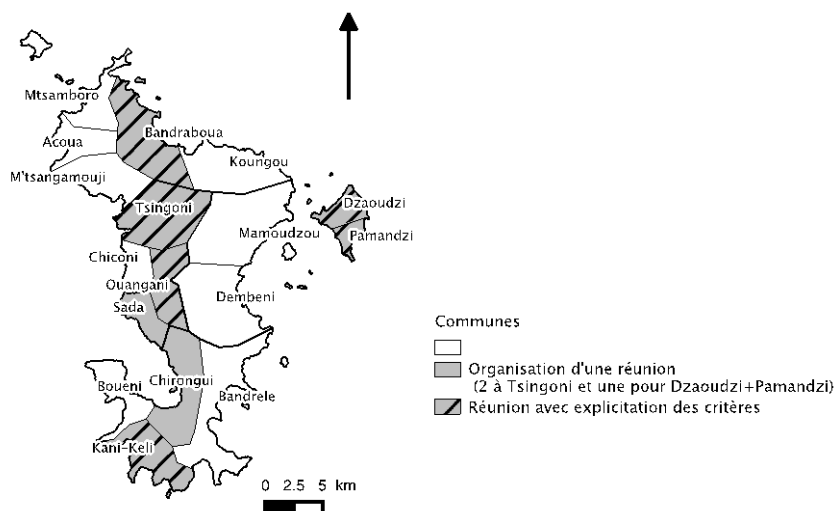


Figure 35. Représentation des communes de Mayotte où les réunions ont été organisées

## B. Exercice de priorisation des maladies

### 1. Etape 1 : Recensement des maladies rencontrées

Au total, 35 maladies/problèmes sanitaires ont été cités par les éleveurs, ils sont listés dans le Tableau 22.

Parmi ces problèmes sanitaires, la FVR n’a été évoquée que par un seul participant. Le groupe concerné a utilisé la même représentation graphique pour la FVR que celle qu’il avait utilisé pour les avortements, un problème qu’ils avaient cité par ailleurs.

En termes de maladies infectieuses, le charbon, la leptospirose et la dermatophilose ont été citées ainsi que plusieurs maladies parasitaires digestives (parasites internes en général ou *mjongo*, paramphistomes) ou externes. Plusieurs parasites externes ont été cités (poux, tiques ou « *pambazi* » en shimaore, mouches).

Un groupe a cité une maladie à laquelle ils ont donné le nom de « *muyu* » en shimaore. Il s’agit d’une maladie spécifique des jeunes animaux, qui provoque des problèmes respiratoires et une altération

de l'état du pelage, avec des poils piqués. Il n'a pas été possible de comprendre à quelle maladie précise cette description pouvait faire référence.

Pour comparer les résultats des différentes réunions, les enquêteurs ont regroupé certaines maladies qui leur ont semblé correspondre à une entité clinique unique ou proche. Elles sont représentées dans le Tableau 22 par un même nombre d'astérisques (\*, \*\*, \*\*\*).

Concernant les affections de type dermatologique évoquées par les éleveurs, le vocabulaire a probablement varié selon les communes pour désigner les mêmes affections. Dans certaines communes, les éleveurs ont parlé de « boutons », dans d'autres de « dermatophilose » et dans d'autres de « *tsoungou* ». « *Tsoungou* » est le mot mahorais qui se traduit littéralement en français par « bouton » et qui est communément employé en mahorais pour qualifier les lésions de dermatophilose. En effet, les croûtes épaisses et incrustées de poils présentes en cas de dermatophilose peuvent faire penser à des boutons pour un observateur non averti. Dans chaque groupe, un seul des trois termes a été employé (bouton ou *tsoungou* ou dermatophilose). Mais la description des lésions et des facteurs de risque (les tiques) a laissé penser qu'il s'agissait toujours de la même maladie. C'est pourquoi les trois termes ont été regroupés.

Un groupe a cependant cité deux catégories de « *tsoungou* », une forme habituelle et une autre forme d'apparition récente sur le territoire. Les « *tsoungous* habituels » correspondant bien à la description de la dermatophilose, ils ont été placés dans cette catégorie. L'autre type a été distingué.

Les éleveurs ont évoqué un syndrome associant jetage (les écoulements nasaux se traduisent littéralement par « *majongoma* » en shimaore) et baisse de l'état général de l'animal. La dénomination en français de cette association a varié selon les groupes : grippe (Petite Terre, Bandraboua) ou fièvre (Combani, Kani-Keli). A Ouangani, les éleveurs ont regroupé les trois termes « bavite », « grippe » et « fièvre » pour décrire cet unique tableau clinique. Notons que les éleveurs qui ont parlé de « fièvre » ne l'ont jamais associée à la notion de température corporelle. Ces entités ont été rassemblées par les observateurs sous un terme unique de « bavite/grippe ».

Tableau 22 : Liste des maladies citées (Certaines maladies ont ensuite été regroupées en une seule entité pour l'analyse des données : elles sont marquées d'un même nombre d'astérisques : « \* », « \*\* », « \*\*\* » ou « \*\*\*\* »)

Maladie citée	Nom en shimaoré
Avortement – « Veau mort » ****	
Bavite – grippe *	<i>Majongoma</i>
Boiterie ***	<i>gobo /skodza mindru</i>
Boutons **	<i>Tsougou</i>
Boutons (différents de <i>tsougou habituel</i> , nouveaux en 2014)	
Charbon	<i>Charbo</i>
Chiens errants	
Constipation	
Dermatophilose **	
Diarrhée	<i>Poudza</i>
Fièvre *	<i>Bouhouo</i>
Fièvre de la Vallée du Rift	
Insémination artificielle (IA) « ne marche pas » - Infertilité	
Intoxication	
Leptospirose	
Maladie veau avec poil piqué et problèmes respiratoires	<i>Muyu</i>
Malformations ****	
Malnutrition	
Mammite	<i>ouwadé wama mabele / mazimbaya bele</i>
« Mamelle bouchée »	
Mortalité cause inconnue	
Mortalité néonatale ****	
Mouches	<i>Ndzi</i>
Non délivrance	<i>Dzao</i>
Paralysies	
Paramphistome	
Parasites digestifs	<i>Mjongo</i>
Plaie et blessure	<i>Chondra</i>
Poux	
Problème d'allaitement	
Problème de pied ***	<i>Hadacofou</i>
Problème oculaire : larmes et/ou conjonctivite	
Problème de vêlage	<i>Oudzazi – Asoudza nayi</i>
Tiques	<i>Pambazi</i>
Vache gestante couchée	
Verrues	

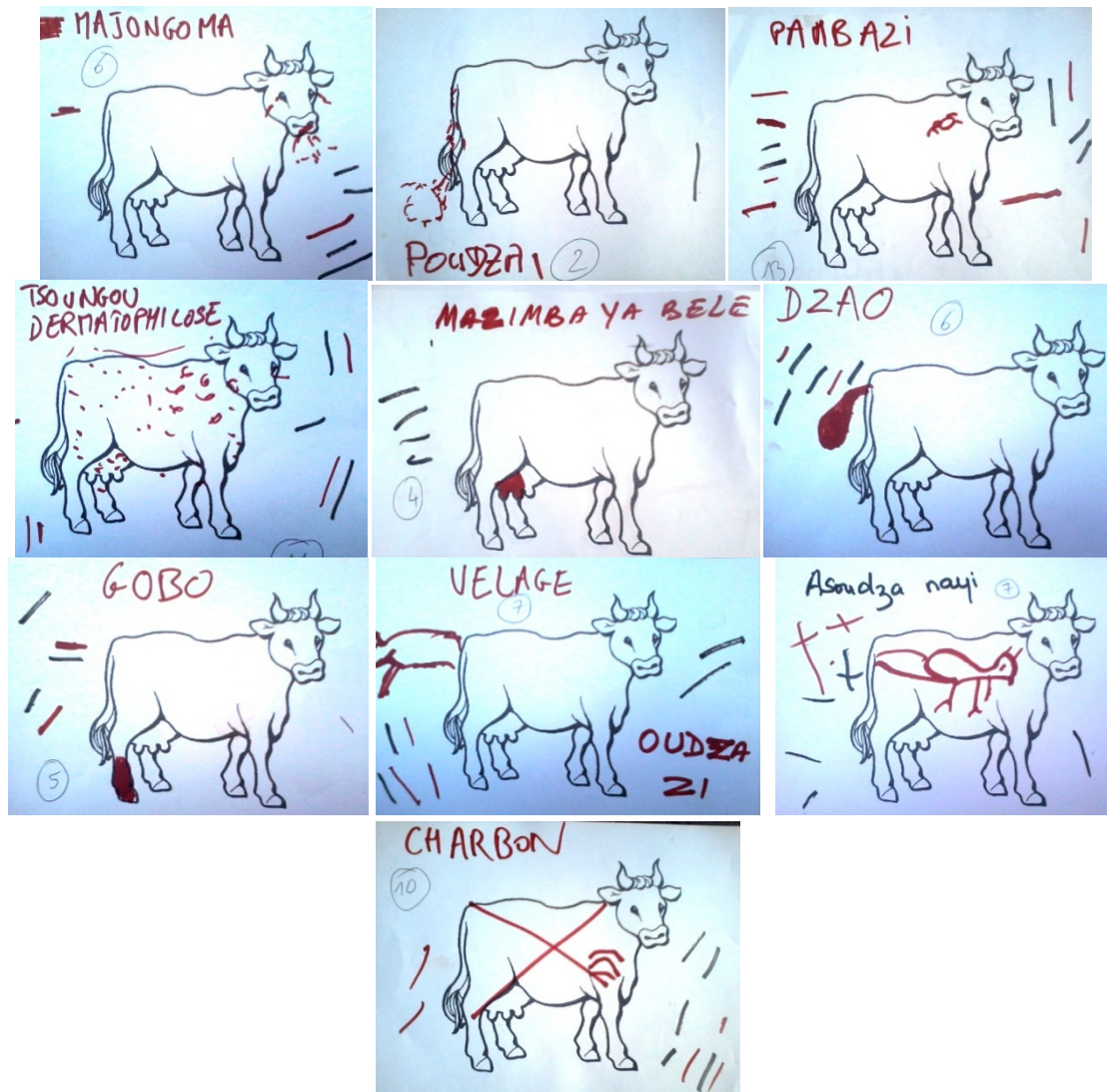


Figure 36 : Exemple d'illustrations des maladies décrites par les éleveurs avant l'étape de priorisation. Les traits présents autour des vaches résultent du vote issu de la seconde étape de priorisation .De Haut en bas et de gauche à droite : Bavite-grippe (Majongoma) ; Diarrhée (poudza) ; Tiques (Pambazi) ; Boîterie (Gobo) ; Problème de vêlage (Oudzazi et Asoudza nayi) ; Dermatophilose (tsoungou) ; Mammite (Mazimbaya bele) ; Non délivrance (Dzao) ; Charbon

## 2. Etape 2 : Sélection des cinq maladies les plus importantes par vote

Chaque participant devait ensuite voter pour les cinq problèmes qui lui semblaient les plus importants. *A posteriori*, en comptant le nombre de voix utilisées, il s'avère qu'un certain nombre de participants n'ont pas voté pour cinq problèmes. En moyenne, ils n'ont utilisé que quatre votes. En effet, entre 54 et 117 % des votes possibles (83% en moyenne) ont été utilisés par les éleveurs au cours des réunions.

Le Tableau 23 rassemble les treize problèmes sanitaires qui ont été décrits et classés parmi les cinq plus importants au cours d'au moins une réunion. Les quatre problèmes ayant le pourcentage moyen de votes le plus élevés et évoqués à toutes les réunions sont : le charbon, les tiques, le syndrome « bavite-grippe-fièvre » et la « dermatophilose – boutons » avec un pourcentage moyen de votes de 15% [min=5% ; max=19%], 13% [2% ; 20%], 9% [4% ; 15%], 8% [2% ; 16%], respectivement. Suivent ensuite, très rapidement les problèmes de « diarrhée » et de parasites digestifs, l'un, l'autre ou les

deux ayant été cités à chaque réunion. Les avortements (et mortalités néonatales, malformations) arrivent en 9<sup>ème</sup> position, ils ont été considérés comme appartenant aux cinq problèmes prioritaires dans quatre des huit réunions. La FVR est absente de ce classement.

Les mortalités de cause inconnue et les difficultés d'insémination artificielle (IA) ont été notés comme des problèmes prioritaires dans une réunion chacune (Petite Terre et Ouangani respectivement), recueillant chacune un pourcentage non négligeable des votes : 15,9%.

On observe une importante constance des résultats dans cette étape de vote, particulièrement frappante entre les réunions n°3 et n°7 (Kani-Kéli et Tsingoni). Les résultats de la réunion n°1 et n°8 étaient un peu plus hétérogènes avec des votes pour des maladies absentes du classement final : conjonctivite (5% réunion n°1), malnutrition (5% réunion n°1), paralysies (5% réunion n°1), non délivrance (6% réunion n°8), « nouveaux boutons apparus seulement depuis 2014 » (6% réunion n°8), perte de poids (6% réunion n°8) et manque d'appétit (6% réunion n°8).

**Tableau 23 : Pourcentage de votes obtenu à chaque réunion et pour chaque maladie (« - » = maladie non citée au cours de cette réunion). Ne sont détaillés dans ce tableau que les problèmes sanitaires ayant été classés dans les cinq principaux problèmes lors d'au moins une des réunions.**

N° de la réunion	1	2	3	4	5	6	7	8	Moyenne
<b>Problème sanitaire</b>									
<b>Charbon (<i>Charbo</i>)</b>	5%	18%	19%	15%	16%	15%	18%	11%	15%
<b>Tiques (<i>Pambazi</i>)</b>	2%	8%	16%	18%	20%	11%	16%	13%	13%
<b>Bavite – grippe – fièvre (<i>Majongoma- Bouhouo</i>) *</b>	11%	7%	13%	6%	5%	15%	13%	4%	9%
<b>Dermatophilose – boutons (<i>tsoungou</i>) **</b>	2%	16%	8%	5%	7%	8%	8%	13%	8%
<b>Diarrhée</b>	18%	-	10%	-	14%	9%	10%	6%	8%
<b>Parasites digestifs (<i>Mjongo</i>)</b>	-	8%	17%	13%	-	-	17%	9%	8%
<b>Mammite</b>	7%	9%	-	11%	-	12%	-	-	5%
<b>Mouches</b>	7%	-	14%	-	-	-	15%	-	5%
<b>Avortement – Veau mort – mortalité néonatale – malformations ****</b>	2%	6%	-	10%	-	-	-	8%	4%
<b>Chiens errants</b>	-	26%	-	8%	-	-	-	-	4%
<b>Boiterie ***</b>	2%	-	-	3%	7%	8%	-	3%	3%
<b>Mortalité de cause inconnue</b>	16%	-	-	-	-	-	-	-	2%
<b>Insémination artificielle (IA) « ne marche pas » - Infertilité</b>	-	-	-	-	16%	-	-	-	2%
<b>Pourcentage des voix recueilli par les autres problèmes cités lors de la réunion</b>	28%	2%	3%	11%	21%	15%	3%	33%	14%

### 3. Etape 3 : Description de l'impact des cinq problèmes les plus importants

Les étapes 3 et 4 très chronophages n'ont été faites que lors des cinq premières réunions. Lors des trois premières réunions, l'étape 3 a pu faire l'objet d'une retranscription précise des arguments



donnés, maladie par maladie, par les éleveurs pour expliquer l'importance des cinq principaux problèmes sanitaires pour lesquels ils avaient votés (cf. **ANNEXE VI**). Lors de la première réunion (en Petite Terre), plusieurs maladies parasitaires ont été regroupées (tiques, mouches et parasites internes), pour simplifier le travail de priorisation. Ce regroupement n'a pas été suivi lors des réunions suivantes pour rester le plus précis possible. Lors de cette première réunion, les éleveurs ont aussi insisté sur la différence de « coût » des problèmes sanitaires évoqués entre les races de bovins. Par exemple, les mortalités de cause inconnue étaient plutôt liées aux zébus, (un problème d'empoisonnement volontaire des zébus a été évoqué), tandis que les « diarrhées » et la « grippe » étaient exclusivement associées à la race montbéliarde<sup>44</sup>. Ils ont ensuite sélectionné les critères « risque » et « fréquence ». Lors de la seconde réunion (à Combani) les éleveurs ont retenu les critères de « coût » et de « fréquence ». Lors de la troisième réunion, les éleveurs ont également retenu ces deux critères ainsi que le critère de « gêne » pour l'animal en lui-même.

A la quatrième réunion (Bandraboua), les éleveurs n'ont pas été très réceptifs à cet exercice et ont simplement évoqué la fréquence des maladies. Les enquêteurs ont alors rajouté le « coût ».

Lors de la cinquième réunion (Ouangani), les éleveurs ont insisté sur le coût des traitements (« avant ça allait c'était gratuit », « on nous fait payer de plus en plus », « avec le département on a cru que ça allait s'améliorer, mais pas du tout ») et l'impact sur la santé et le bien-être de l'animal. Les enquêteurs ont ainsi conservé les critères de « coût » et « gravité ».

#### 4. Etape 4 : Priorisation des maladies

Les résultats de pondérations relatives des principales maladies en fonction de certains critères d'importance (coût, fréquence, risque, gêne, gravité) sont présentés dans le Tableau 24. En fonction du critère « coût », viennent en première place, les tiques, les parasites digestifs puis les blessures occasionnées par les chiens errants (bien que mentionnées à une seule réunion). Ce sont également les problèmes les plus fréquents, notamment en prenant les problèmes parasitaires de façon plus générale. Les avortements-mortalités néonatales et malformations ainsi que les mortalités de cause inconnue, ont été évalués comme les problèmes les plus à risque à la réunion n°1. Lors de la réunion n°3, les éleveurs ont évalué la gêne relative des maladies prioritaires. Le charbon puis les tiques et les mouches ont été considérés comme les plus gênants. Enfin, à la réunion n°5 qui a évalué la gravité des maladies, le charbon et les tiques arrivent en tête.

Les tiques sont à la fois fréquentes, coûteuses en termes de traitement et de perte de revenus, graves et gênantes.

Le charbon, classé premier à l'étape précédente est en réalité peu fréquent, mais se démarque par sa « gravité » et la « gêne » occasionnée à l'animal.

Le syndrome « bavite-grippe-fièvre », en 3<sup>ème</sup> position lors des votes spontanés à l'étape 2, semble plus secondaire en termes de coût et fréquence, mais arrive en 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> place en terme de risque et de gêne lors des deux réunions concernées.

---

<sup>44</sup> Les seules races de bovins présentes à Mayotte sont actuellement : les zébus traditionnels, les montbéliardes et les animaux issus de croisement entre ces deux races (cf. Introduction **III.E.2**)

Le syndrome « dermatophilose-boutons » classé 4<sup>ème</sup> à l'étape précédente est en réalité, d'après cette évaluation, ni fréquent, ni coûteux, ni très grave. L'importance « spontanée » de cette maladie à l'étape 2 peut s'expliquer par l'altération importante de l'aspect extérieur de l'animal.

Les parasites internes, classés en 6<sup>ème</sup> position à l'étape 2, se révèlent en fait particulièrement coûteux (2<sup>ème</sup> position) et fréquents (2 ou 3<sup>ème</sup> position) aux yeux des participants.

Tableau 24. Evaluation de l'importance relative des principaux problèmes sanitaires en fonction de critères particuliers (coût, fréquence, risque, gêne, gravité) et des réunions (R=réunion). Les pourcentages représentent la proportion de jetons attribuée à chaque maladie pour un critère donné à chaque réunion.

N° de la Réunion/Maladie	Coût					Fréquence					Risque	Gêne	Gravité		
	1	2	3	4	5	Moyenne	1	2	3	4				Moyenne	1
Tiques ( <i>Pambazi</i> )			40%	35%	38%	<b>23%</b>			43%	55%	<b>25%</b>			31%	<b>28%</b>
Parasites digestifs ( <i>mjongo</i> )		8%	38%	20%		<b>13%</b>		11%	8%	12%	<b>8%</b>			10%	
Chiens errants		47%				<b>9%</b>		52%			<b>13%</b>				
Avortement - Veau Mort - mortalité néonatale - malformations	39%			3%		<b>8%</b>		5%		5%	<b>3%</b>				
Mammite	0%	7%		35%		<b>8%</b>		3%		17%	<b>5%</b>				
Charbon ( <i>charbo</i> )		17%	7%	7%	10%	<b>8%</b>		7%	12%	12%	<b>8%</b>		<b>36%</b>	<b>38%</b>	
IA « ne marche pas » - Infertilité					38%	<b>8%</b>					<b>-</b>				10%
Bavite - fièvre - grippe ( <i>Majongoma-Bouhouo</i> )	20%		8%			<b>6%</b>		5%	8%		<b>3%</b>		10%		
Mortalité cause inconnue	24%					<b>5%</b>		10%			<b>3%</b>				
Diarrhée	17%				5%	<b>4%</b>		30%			<b>8%</b>				10%
Dermatophilose - boutons ( <i>tsoungou</i> )		22%			0%	<b>4%</b>			26%		<b>7%</b>				8%
Boîterie - problème de pied					10%	<b>2%</b>					<b>-</b>				8%
Mouches			7%			<b>1%</b>			28%		<b>7%</b>			12%	
Parasites (tous)	0%					<b>0%</b>		50%			<b>13%</b>				

## IV. Discussion

Les réunions participatives ont permis de mettre en évidence la place très discrète, pour ne pas dire absente de la fièvre de la Vallée du Rift, en tant qu'entité définie, dans les préoccupations des éleveurs mahorais, en revanche les avortements (au sens large avec les mortalités néonatales et les malformations) sont bien présents dans les préoccupations des éleveurs mais sont considérés comme peu fréquents. Ces réunions ont, en revanche, mis en relief les problèmes sanitaires prioritaires à leurs yeux (tiques, parasites digestifs, charbon, syndrome « bavite » pour lesquels, ils pourraient être demandeurs de formation, de conseils, d'appui technique qui sont autant de portes d'entrée vers une recherche plus fondamentale et une surveillance participative pouvant concerner des champs plus vastes que la FVR. La FVR n'en demeure pas moins une pathologie inquiétante pour les autorités.

### A. Méthode

La mise en œuvre de ces réunions participatives de priorisation des problèmes sanitaires nécessite une importante préparation mais permet de mieux connaître et comprendre les préoccupations sanitaires des éleveurs mahorais et apporte des bénéfices indirects en termes de renforcement du réseau d'acteurs profitables pour toutes actions futures (développement des capacités techniques, formation, surveillance).

L'organisation de ces réunions participatives a un certain aspect aléatoire, surtout pour les organisateurs débutants, qu'il convient de limiter en se documentant sur la théorie et la pratique participatives (Catley, 2005; Jost et al., 2007; Mariner and Paskin, 2000) et en préparant au maximum, en particulier en testant chaque étape du jeu. Malgré cette préparation, certaines difficultés ont tout de même été rencontrées.

Le lieu de réunion, sa configuration et son confort (protection des intempéries, chaises, chez un éleveur en particulier, etc.) se sont révélés déterminants sur l'attention et la participation des éleveurs.

La mise en œuvre complète des quatre étapes sur une même demi-journée s'est révélée difficile, surtout en cas d'effectifs limités en termes d'organisateur, ce qui était le cas des trois dernières réunions. La mobilisation des éleveurs qui ont souvent une autre activité que l'élevage n'était pas évidente. Rétrospectivement, il apparaît que la première étape de recensement aurait pu être dissociée des trois suivantes et qu'un travail intermédiaire de regroupement des syndromes avec un vocabulaire précis mahorais-français aurait permis une uniformisation plus facile des résultats des étapes 3 et 4. Par exemple, lors de la réunion n°1, toutes les maladies parasitaires ont été regroupées contrairement aux autres réunions. De nombreuses difficultés purement linguistiques ont aussi été soulevées, malgré la présence parmi les organisateurs d'un salarié de la COOPADEM maîtrisant le shimaore et le français et assurant une traduction quasi-simultanée. Un travail plus précis sur la description des affections de type dermatologique aurait ainsi peut-être permis de se rendre compte que différentes pathologies sont regroupables sous le terme mahorais de *tsoungou* –boutons- et de dermatophilose en français. Le mot dermatophilose, comme beaucoup de termes techniques ou scientifique français, n'existe pas en shimaore est donc probablement traduit par « *tsoungou* ». En revanche, quand les éleveurs mahorais veulent s'exprimer en français, ils utilisent variablement le mot « boutons » ou « dermatophilose » pour évoquer soit une « véritable dermatophilose » soit tout autre « bouton ». Cette barrière de la langue et les traductions successives peuvent amener, au

premier abord, à une perte de sens. Il convient en réalité d'adapter le vocabulaire et l'interprétation en ayant conscience de cette synecdoque ou d'autres métonymies. C'est ainsi que les éleveurs mahorais parlent souvent de « vache fatiguée » pour une « vache couchée », y compris si c'est pour une patte cassée, ou bien de « vache qui a froid » lorsqu'elle a le poil piqué, à cause de la fièvre ou de carences (Laure Dommergues, communication personnelle). La combinaison d'un dessin, d'un terme français et d'un terme mahorais a permis, somme toute et dans un temps limité, aux enquêteurs de parler un langage commun avec les éleveurs, y compris illettrés ou analphabètes. Pour plus d'objectivité, un traducteur indépendant aurait pu être préférable, mais le recours à un interlocuteur de confiance, car connu et maîtrisant les termes techniques du domaine de l'élevage, a, sans doute, aussi permis de fluidifier les échanges.

Ces réunions (choix et préparation du lieu, appel des éleveurs, déroulement avec traduction simultanée et bilans) prennent un temps considérable mais, permettent de dresser à un instant donné le tableau clinique complet des problèmes rencontrés par les éleveurs. Ceci permet ensuite de cibler les pathologies ou les syndromes sur lesquels travailler, faisant gagner du temps et de l'argent en comparaison d'un sondage sérologique ou virologique qui se ferait à l'aveugle. Ce travail se révèle en revanche inopérant pour des maladies sans expression clinique mais qui pourraient être d'intérêt tout de même, par exemple de type zoonotique comme la FVR en contexte endémique.

La représentativité des participants aux réunions a été recherchée en invitant tous les adhérents de la COOPADEM (environ 20% des détenteurs étaient adhérents à ce moment-là) de chaque commune concernée, mais aussi tous les éleveurs de la commune même non adhérents, le souhaitant, par le « bouche-à-oreille ». Toutes les zones de l'île ont été couvertes (Grande Terre/Petite Terre, Nord/sud). Lors de la première réunion, les éleveurs ont clairement exprimé que l'impact des pathologies variait en fonction de la race des bovins (race zébu versus race montbéliarde). Par la suite, cette distinction n'a pas été faite et les résultats de ce travail s'adressent finalement plutôt aux troupeaux de race zébu ou croisés, largement majoritaires à Mayotte. Les femmes, en minorité dans toutes les réunions, ont été sous-représentées malgré une mixité quasi-parfaite parmi les chefs d'exploitation agricoles (DAAF Mayotte, 2011b). Cela pourrait s'expliquer (1) par une plus grande difficulté à se déplacer et se libérer de tâches ménagères pour une réunion, le recensement agricole de 2010 soulignait en effet que les femmes, chef d'exploitation mono-actives, consacraient 20% de temps de moins que les hommes à l'agriculture, probablement en raison des activités ménagères qu'elles doivent aussi assurer (DAAF Mayotte, 2011b), (2) parce que le travail quotidien auprès des zébus semble plutôt assuré par des hommes, même si les femmes en sont officiellement propriétaires. Les groupes pour les étapes 3 et 4 ont été effectués en fonction de la participation des premières étapes (extraverti/introverti), et non pas en fonction du sexe (à l'exception de l'une des réunions, les femmes étaient de toutes façons peu nombreuses aux autres réunions), ni du statut chef d'exploitation/salarié. Les participants pouvaient être des salariés comme des chefs d'exploitation, les habitudes de suivi sanitaire des exploitations sont très variables, mais il est fréquent que les salariés changent (en particulier les « sans-papiers », majoritairement Anjouanais qui ne se sont probablement pas présentés aux réunions). Par ailleurs, certains chefs d'exploitations sont en fait très peu présents au quotidien (il peut s'agir d'une visite annuelle) sur leurs exploitations déléguant donc quasiment totalement le suivi aux salariés. Une des difficultés inhérentes de l'élevage mahorais pour conduire cet exercice participatif est le nombre très faible d'animaux par exploitation (4,8 en moyenne) qui ne permet pas à chaque éleveur individuellement d'avoir un recul important sur la fréquence ou la gravité des pathologies possibles.

Compte-tenu de la petite taille de l'île et du nombre limité de réunions, une approche purement descriptive a été présentée ici, sans recours à des outils statistiques perfectionnés, tel que le coefficient d'agrément de Kendal utilisé dans certaines études ayant étudié au moins une dizaine de groupes (Catley, 2005; Mochabo et al., 2005). Mariner et Paskin ont d'ailleurs défendu une approche très qualitative (2000), rappelant qu'une sélection aléatoire par exemple était contradictoire avec les bases de la démarche participative traditionnellement basée sur la recherche d'interviews de représentants-clés et la triangulation des interviews. Dans notre cas, une sélection aléatoire des participants aurait rendu inopérante notre démarche exploratoire visant également à créer une dynamique de groupe pour poursuivre les travaux de formation ou de surveillance participative et éventuellement proposer/choisir ensuite des éleveurs sentinelles-responsables de la santé animale de secteurs sur la base de leur motivation et leur implication dans cette activité.

Lors de l'étape 4, il est apparu que le nombre de jetons choisi (quatre par pathologie) aurait pu être augmenté pour faciliter la pondération des éleveurs et permettre des écarts de notations plus importants et donc plus évocateurs.

## B. Résultats

D'après les éleveurs, les cinq problèmes spontanément rapportés comme les plus importants chez les bovins (vote de l'étape n°2) sont dans l'ordre le charbon symptomatique, les tiques, le syndrome « bavite-fièvre-grippe », le syndrome « dermatophilose-boutons » et la diarrhée. Le pourcentage moyen cumulé des votes pour ces maladies atteint 54% [minimum de 39; maximum de 65]. Ce résultat est cohérent avec les autres informations disponibles au SESAM, notamment les motifs de consultation des vétérinaires qui sont en priorité les bavites et la dermatophilose (22% et 17% respectivement des consultations d'un des cabinets de l'île, données non publiées, source : Laure Dommergues). Ces pathologies sont fréquemment évoquées dans le bulletin d'information du SESAM (Cardinale et al., 2013, 2014; Dommergues et al., 2014a), mais la « triangulation » (Mariner and Paskin, 2000) permise par cette nouvelle étude et notamment la description plus fine et l'évaluation relative des impacts perçus par les éleveurs nuance ce classement. Les tiques sont aussi le principal problème de santé évoqué par les éleveurs lors des entretiens semi-dirigés, suivies par les boiteries et les diarrhées ainsi que la dermatophilose (Chauvet, 2013a).

Le charbon est la principale maladie infectieuse bien connue des éleveurs mahorais et donc très spontanément citée par les éleveurs. Cette maladie aurait été introduite à Mayotte en 1995 depuis Madagascar et aurait causé, à ce moment-là, des dégâts très importants. Depuis de nombreuses années, elle fait l'objet d'actions d'envergure gérées par les autorités locales avec l'intervention de la COOPADEM (depuis sa création en 2000) et des vétérinaires libéraux, à savoir, la mise en place d'une vaccination volontaire totalement puis partiellement subventionnée par l'Etat et de différentes actions de communication. Le taux de couverture vaccinale annuel oscille entre 20 et 30% (Dommergues et al., 2015) et concerne principalement les adhérents de la COOPADEM qui bénéficient d'une subvention pour la vaccination. L'incidence exacte du charbon n'était pas connue au moment de cette étude, les éleveurs l'ont classé en 3<sup>ème</sup> position selon ce critère, au même niveau que les parasites digestifs ou les diarrhées, ce qui peut sembler surestimé, l'influence marquante de sa gravité (avec une mort systématique) en est peut-être la cause. Ce résultat a conduit à mener une étude approfondie de l'incidence de cette maladie, toujours selon une approche participative qui a

révélé une incidence observée par les éleveurs de 15,2% (IC95% [4,6 ; 25,8]) des cheptels touchés par la maladie, en 2014 (Dommergues et al., 2015). Cette incidence, effectivement assez importante, peut laisser supposer une sur-déclaration par les éleveurs pour qui le charbon est une des rares causes de mortalité clairement identifiée.

Les tiques arrivent spontanément en deuxième position (Etape 2) mais sont aussi considérées au premier rang en termes de coût et de fréquence et en deuxième position pour la gravité et la gêne des animaux. Les éleveurs semblent avoir intégré que les tiques représentent un danger important à gérer pour plusieurs raisons : leur rôle en tant que facteurs de risque pour certaines maladies, mais aussi la gêne pour l'animal (tiques autour des yeux/oreilles) ou l'éleveur (tiques sur les trayons) et l'impact sur l'aspect physique qui est important pour l'usage culturel des animaux (abattages festifs). Le programme de formation veillera à aborder cette problématique lors des prochaines réunions avec les éleveurs.

Ont ensuite été évoqués deux syndromes (« bavite-fièvre-grippe » et « dermatophilose-boutons ») et un symptôme (diarrhée) qui méritent eux-aussi des investigations pour apporter des solutions aux préoccupations des éleveurs.

Le syndrome « bavite-fièvre-grippe » correspond globalement à ce que les vétérinaires de la région appellent « bavite » ou « syndrome grippal » (cf. Figure 37). Les virus de la FCO (Fièvre Catarrhale Ovine) et de l'EHD (Maladie Hémorragique Epizootique), dont la nature des sérotypes circulant sur le territoire Mahorais reste encore inconnue, sont certainement impliqués dans ce syndrome mais sans pouvoir pour autant établir de véritable lien de cause à effet. Des enquêtes sérologiques ont mis en évidence un niveau de séoprévalence important de la FCO chez les ovins (19 animaux positifs sur 94 testés) (Cardinale et al., 2013) et de l'EHD chez les bovins (34 animaux positifs sur 52 testés) (Dommergues et al., 2014a). Un protocole d'étude dédié devra être mis en place pour essayer d'identifier plus précisément le tableau clinique et rechercher le/les agents étiologiques précisément en cause.

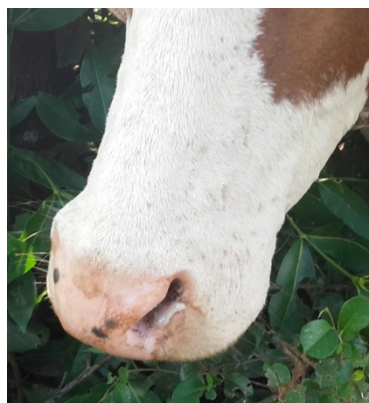


Figure 37. Illustration d'un bovin atteint du syndrome « bavite » (© Chouanibou Youssouffi)

La « dermatophilose » est probablement évoquée par les éleveurs pour décrire une large variété d'affections de type dermatologique pouvant provoquer des « boutons » ou des croûtes sans diagnostic différentiel précis. Fréquente en zone tropicale et due à une bactérie *Dermatophilus congolensis*, favorisée par les morsures de tiques, cette maladie donne une apparence particulièrement dévalorisante aux animaux dont l'aspect physique est très important surtout pour les zébus destinés à un abattage lors de fêtes culturelles. Son incidence précise à Mayotte est

cependant inconnue et devrait faire l'objet d'une étude approfondie afin de mieux guider les éleveurs dans leurs traitements et limiter notamment l'utilisation du traitement antibiotique pertinent pour la dermatophilose à cette seule affection. En réalité, de nombreuses affections dermatologiques sont présentes à Mayotte. Le cabinet vétérinaire de Mamoudzou recense ainsi la présence de démodécie et de verrues comme les deuxième et troisième motifs de consultation dermatologique après la dermatophilose. La gale et la teigne sont également évoquées, plus rarement toutefois (données non publiées, source : Laure Dommergues). Une suspicion de DNC (Dermatose Nodulaire Contagieuse) a été émise en 2014, suite à la détection de lésions dermatologiques inhabituelles par un vétérinaire mais n'a pas été confirmée. Les nouveaux « boutons » « différents de *tsoungou* habituel, à partir de 2014 » cités lors des réunions n°5 et n°8 sont peut-être liés à cette suspicion. Une investigation permettrait de mieux préciser les importances relatives de chaque pathologie.



Figure 38. Exemples de croûtes liées à la dermatophilose qui peuvent être confondues avec des « boutons » (© Laure Dommergues).

Par ailleurs, cette étude montre la faible importance représentée à première vue par les avortements-mortalité néonatale-malformation (classés par le vote spontané en 9<sup>ème</sup> position mais 4<sup>ème</sup> en termes de coût et premier en termes de risque) et l'évocation à une seule reprise de la FVR. Ce résultat est également cohérent avec la faible incidence trouvée par le suivi sentinelle et l'absence d'avortement rapporté qui aurait pu être lié à la FVR récemment. Il conforte aussi l'idée que les opérations de communication sur les avortements et la FVR en particulier n'ont pas complètement mobilisé les éleveurs alors que les avortements semblent pourtant bien faire « peur » aux éleveurs, comme en témoigne l'évaluation en première position en matière de risque (Etape 4). Les entretiens semi-dirigés exploratoires conduits auprès d'une douzaine d'éleveurs ont effectivement montré deux types de perceptions de l'avortement : soit une cause accidentelle (choc, carence alimentaire, etc.) soit une forme de fatalisme face à un événement aléatoire et provoqué par une intervention surnaturelle. La cause infectieuse y est quasiment exclue (Chauvet, 2013a). Outre l'incidence humaine et animale limitée de cette maladie à Mayotte, il faut noter que l'enjeu commercial représenté par cette maladie dans des pays exportateurs comme l'Afrique du Sud ou l'Éthiopie est



inexistant à Mayotte. La sensibilité des éleveurs dans d'autres pays concernés par la FVR est par ailleurs variable : en Tanzanie, également fortement touchée par l'épizootie de FVR de 2006-2007, et malgré une circulation inter-épidémique attestée, une étude a montré que les éleveurs ne citaient pas non plus spontanément la FVR comme une maladie importante de leur bétail (Wensman et al., 2015). Des éleveurs Somaliens sont, en revanche, capables de décrire précisément les symptômes et les facteurs de risque de la FVR (précipitations et moustiques) et pourraient contribuer ainsi efficacement au bon fonctionnement du système d'alerte précoce (Jost et al., 2010), alors que les éleveurs Mahorais, prompts à citer les tiques comme problème sanitaire n'évoquent jamais les moustiques. L'expérience propre de la maladie par chaque communauté est donc très importante, il n'en reste pas moins que la sensibilisation des éleveurs mahorais à la FVR et aux risques liés aux maladies abortives en général est encore faible malgré plusieurs actions de communication conduites en ce sens.

Les éleveurs mahorais évoquent peu de maladies infectieuses à l'étiologie clairement définie, en dehors de certaines maladies facilement identifiables macroscopiquement et assez fréquentes comme le charbon symptomatique. Ils sont en revanche conscients de la fréquence de certains parasites, qu'ils observent d'ailleurs facilement (tiques, mouches, parasites digestifs) et de leurs impacts. Ceci peut refléter un manque partiel de formations et d'informations épidémiologiques et vétérinaires alors que la présence de la fièvre Q, la chlamydie, la néosporose, l'EHD, la FCO est attestée par des taux de séroprévalence non-nuls (Dommergues et al., 2014b). Les éleveurs citent cependant peu de maladies infectieuses car Mayotte semble également avoir pour le moment été épargnée, en dehors de la FVR et du charbon, par un certain nombre de grandes maladies infectieuses telles que la peste des petits ruminants, la fièvre aphteuse, etc.

Finalement, en abordant la question des problèmes sanitaires, il était fréquent d'entendre les participants réagir sur le fait qu'ils avaient d'autres préoccupations plus importantes à savoir l'alimentation, l'accès à l'eau voire aux exploitations en elles-mêmes (les voies d'accès sont souvent impraticables en saison des pluies autrement qu'à pied). Certains faisaient d'ailleurs le lien entre les problèmes sanitaires et l'alimentation, en particulier sur la question des diarrhées, une forte demande d'appui technique et de formation s'est faite sentir qui pourrait être un préalable indispensable ou du moins un accompagnement parallèle nécessaire à la bonne poursuite des travaux sur le volet sanitaire. Le phénomène des attaques par les chiens errants ne doit pas non plus être négligé.

L'étape 3 de formalisation des critères d'importance des problèmes sanitaires a été une étape assez difficile à formaliser au cours des réunions. Les éleveurs ne comprenant pas toujours bien la question de « pourquoi cette maladie est importante ». Les organisateurs ont dû plusieurs fois guider les éleveurs vers les notions de coût, de fréquence, etc. Les éleveurs ont finalement cité spontanément des critères inattendus par les organisateurs : à savoir le « risque » et surtout la « gêne » ou la « gravité » pour l'animal en lui-même.

Il semble que les éleveurs aient vu la notion de « risque » comme une peur provoquée par l'impact radical (la mort), le coût (perte de l'animal ou d'un an de gestation) et une cause inconnue et inquiétante. L'impact économique semble encore fréquemment secondaire, indirect ou du moins inconscient pour des éleveurs qui n'ont en majorité pas de gestion monétisée de leur élevage (peu d'intrants et de ventes, mais une utilisation pour les célébrations liées aux fêtes culturelles et

religieuses et une comptabilité qui n'est pas que financière et formelle) avec de rares consultations chez le vétérinaire. « Moi je n'ai pas de compte à rendre à mes animaux » répond ainsi un éleveur interrogé sur ses dépenses pour la santé de son troupeau et son consentement à payer une éventuelle vaccination contre la FVR (Cavalerie et al., 2017). Quant à la « gêne » ou la « gravité », ces notions restent ambiguës et il est difficile de dire s'il s'agit d'une perception matérielle et indirectement financière ou bien plutôt affective et empathique, témoignant d'une prise en compte de la sensibilité de l'animal. Une dimension émotionnelle est très certainement présente comme les entretiens semi-directifs l'ont montré vis-à-vis des avortements avec l'évocation d'une forme de tristesse et de compassion pour l'animal (Chauvet, 2013a). Elle est peut-être aussi liée à la culture mahoraise, très influencée par les pratiques spirituelles (l'islam qui cohabite avec l'animisme) d'autant plus que les bovins sont principalement destinés aux manifestations culturelles et religieuses où les animaux doivent avant tout être « beaux », en bonne santé donc, pour être abattus. Tout problème sanitaire est alors bel et bien une « gêne » et « grave » vis-à-vis de cette finalité. Le débat n'a pas pu être prolongé dans le cadre des réunions participatives sur les aspects culturels et spirituels et sur les origines des problèmes sanitaires, mais il serait intéressant de le faire, étant donné qu'une partie des éleveurs ont attribué dans les entretiens semi-directifs les problèmes d'avortements à des épreuves divines ou à la fatalité, et que le « mauvais œil », les « djinn », ou la sorcellerie d'un ennemi ont aussi été clairement évoqués comme facteurs responsables des problèmes sanitaires dans d'autres études réalisées dans le contexte culturel mahorais (Blanchy, 1988; Bouleau - Béléc, 2012). Blanchy évoque ainsi le comportement de négligence apparente des mères envers leurs enfants « qu'elles ne mettent pas toujours à l'abri des dangers » (Blanchy, 1988), il peut en être ainsi des éleveurs vis-à-vis de leurs animaux, et parler de prévention des maladies aux éleveurs nécessite de s'adapter à ce contexte. Le lien entre religion, culture et santé ici évoqué, souligne l'intérêt de l'épidémiologie participative pour permettre d'identifier les facteurs culturels propre à une communauté influençant leurs préoccupations et leurs pratiques d'élevage, et donc la gestion des maladies (Mariner and Paskin, 2000). Une étude participative approfondie appuyée par une approche anthropologique plus développée permettrait de définir avec plus de précision les mécanismes de prises de décision des éleveurs et d'adapter les outils de communication pour la prévention et la lutte contre les maladies prioritaires.

### C. Perspectives

La mise en œuvre des réunions participatives, bien que chronophages tant pour les éleveurs que pour les organisateurs, a permis de donner une base plus solide que les impressions pré-existantes sur les priorités sanitaires des éleveurs. Ces réunions ont permis de construire une base de confiance entre les participants pour poursuivre un programme de formation adapté à chaque commune et à ses priorités telles que définies par les éleveurs. Les réunions et les formations devront être étendues aux autres communes de Mayotte. Une triangulation approfondie des résultats de cette étude avec les motifs de consultation de tous les vétérinaires permettrait de discuter des écarts entre les maladies perçues comme importantes par les éleveurs et celles qui déclenchent une consultation et d'identifier de potentiels problèmes « orphelins ». Une approche participative sur les gestes techniques maîtrisés ou non en matière de santé animale serait complémentaire (injection, vermifugation, vêlage, préparation du lait pour les veaux, nettoyage de plaie, administration de bolus, etc.).

Des besoins de recherche se sont dégagés de cette étude : l'évaluation de l'incidence réelle du charbon symptomatique, la description clinique précise de la dermatophilose et des différentes pathologies de type dermatologique les plus fréquentes et l'étude de l'efficacité de leur traitement ainsi que l'investigation du syndrome « bavite-fièvre-grippe ».

Cette étude permettra peut-être également de développer un réseau participatif d'éleveurs sentinelles plus formalisé qu'actuellement, qui pourrait à la fois permettre de diffuser des informations épidémiologiques d'éleveurs à éleveurs et de communiquer au SESAM des phénomènes anormaux, ce qui permettrait de connecter les différents réseaux d'information, permettant une plus grande efficacité de la surveillance (Figuié et al., 2013). Ceci pourra également bénéficier à la surveillance de maladies moins préoccupantes pour les éleveurs comme la FVR. Cependant, vu le faible niveau de vigilance des éleveurs vis-à-vis de la FVR, il reste nécessaire, de maintenir une surveillance programmée et de redoubler la vigilance des vétérinaires mais aussi des éleveurs sur la déclaration des avortements tant que le territoire sera considéré à risque pour cette maladie.

Ce travail marque un niveau avancé de participation des éleveurs aux activités du SESAM (niveau 4 voire 5 sur une échelle de sept niveaux de Catley *et al.* (Catley, 2005)). La participation des éleveurs reste fragile, car elle n'est pas spontanée et repose intégralement sur la dynamique de la COOPADEM dont les éleveurs attendent des contreparties directes (formation, notoriété pour les éleveurs qui accueillent des réunions). Il faudra suivre l'implication des éleveurs dans le temps et l'évolution du mode de décision dans le cadre du SESAM, pour déterminer si un niveau participatif plus avancé peut être atteint.

## DISCUSSION GENERALE

### I. Principaux résultats

#### A. Persistance de la FVR à Mayotte en 2012-2013

##### 1. Observations

La séroprévalence observée à Mayotte a subi une diminution significative passant de 22,5% (IC<sub>95%</sub> [18,1 ; 27,5]) en 2010 à 9,6% (IC<sub>95%</sub> [7,1 ; 12,8]) en 2013. Entre 2012 et 2013, le taux d'incidence observé est resté stable et faible : à hauteur de 2 séroconversions pour 100 animaux-an à risque. Il est en forte baisse par rapport aux observations faites sur la période 2010-2011 (12,9% IC<sub>95%</sub> [9,6 ; 16,2]) (Lernout et al., 2013).

Le calcul de l'incidence à partir de données de suivi de séroconversion n'est néanmoins pas trivial si l'on tient compte des incertitudes sur les périodes de séroconversion et de la sensibilité et la spécificité des tests sérologiques successifs dans le temps. Il serait donc très utile de développer et promouvoir les outils simples d'analyse de ces données à l'usage des réseaux de surveillance (sur le modèle par exemple d'*EpiTools* (Sergeant, ESG, 2017)).

##### 2. Modélisation

En tenant compte des données disponibles sur l'écologie vectorielle de Mayotte (Balenghien et al., 2013), un modèle dynamique a permis d'estimer le niveau de transmission hôte-vecteur attendu pour expliquer la séroprévalence observée de 2008 à 2013 à Mayotte. La probabilité de transmission hôte-vecteur serait cinq fois plus faible que décrit par ailleurs dans la littérature. Dans ces conditions, la probabilité de persistance, en l'absence de nouvelle introduction d'animaux virémiques reste inférieure à 10%, cinq ans après l'arrivée du virus.

##### 3. Etat de la situation épidémiologique mahoraise en matière de FVR

Après une première évaluation de probabilité de pérennisation de la FVR à Mayotte qualifiée de faible par l'Afssa (Afssa, 2008a), puis une hypothèse d'endémisation de la FVR face à l'importante incidence animale observée et aux cas humains sporadiques en 2010-2011 (Lernout et al., 2011, 2013), la seule certitude est que le niveau de circulation de la FVR a fortement diminué entre 2010 et 2013. Les preuves de transmission du virus sont en effet de plus en plus rares. La surveillance s'est poursuivie en 2014-2015, et a révélé une poursuite de la baisse de la séroprévalence avec une prévalence observée en 2014-2015 de 6% (IC<sub>95%</sub> [3 ; 10]) (Métras et al., 2016). C'est la valeur de séroprévalence observée la plus basse depuis la création du SESAM. L'analyse des données de la BDNI, disponibles depuis peu à Mayotte a permis d'observer un net vieillissement de la population des ruminants séropositifs, témoignant également d'une diminution de la circulation virale. La recherche d'un réservoir sauvage de la FVR à Mayotte continue de se révéler infructueuse après une enquête sérologique chez les lémuriens de Mayotte début 2016 (Métras et al., 2017a).

Il est cependant trop tôt pour conclure à une trajectoire d'extinction du virus. Une circulation endémique a été mise en évidence encore récemment dans plusieurs pays proches sur le continent africain : Kenya, Mozambique, Tanzanie, etc. (Sumaye et al., 2015; Blomström et al., 2016; Nanyingi et al., 2017). Si Mayotte, de par ses caractéristiques insulaires, semble être un territoire moins propice à l'endémisation de la FVR que les espaces continentaux abritant *a priori* un plus grand nombre d'hôtes sensibles connectés, un risque de réintroduction à partir d'Afrique continentale via les Comores existe toujours. La structure en métapopulation de l'archipel des Comores et sa connexion au continent via notamment des importations d'animaux vivants est propre à favoriser une persistance du virus et elle devrait être prise en compte pour mieux comprendre et prédire l'évolution de la situation épidémiologique (Keeling and Rohani, 2007; Jesse et al., 2008). La modélisation a d'ailleurs montré jusqu'ici l'importance de l'importation d'animaux infectés à Mayotte pour permettre l'émergence et un comportement épidémique de la maladie sur ce territoire insulaire (Cavalerie et al., 2015; Métras et al., 2017b). Le maintien d'une surveillance sur ces différents territoires dans les prochaines années sera essentiel pour mieux comprendre la dynamique de ce virus en fonction des différents écosystèmes. Une vigilance particulière sera à apporter lors des prochains épisodes *El Niño* à la situation épidémiologique à Mayotte ainsi qu'en Afrique de l'Est où le rythme d'épidémie a jusqu'ici été régulier et synchronisé avec ce phénomène, tous les 5-15 ans (Linthicum et al., 1999). La dernière alerte émise par la FAO fin 2015 sur le risque climatique et la FVR n'a pas été suivie d'une épidémie, peut-être, justement, grâce à la mise en place de mesures de prévention dans la Corne de l'Afrique. Une vaccination dans les zones les plus à risque, notamment au Kenya avait effectivement été mise en œuvre (FAO, 2015).

Au titre du code de l'OIE, d'après l'article 8.14.4, Mayotte est considérée comme une « zone infectée par le virus de la FVR en période inter-épizootique » et le restera au moins jusqu'en 2024, après un minimum de dix ans d'un programme de surveillance continu des ruminants avec des résultats favorables et sans cas humain autochtone détecté. Le contexte et les connaissances épidémiologiques *a priori* peuvent encourager une attention sélective entraînant l'ignorance de signaux faibles. L'exemple de la réémergence inattendue en 2015 de la FCO en France métropolitaine l'a rappelé. De jeunes animaux avaient été trouvés séropositifs lors des campagnes de surveillance précédentes mais l'hypothèse de circulation avait été écartée, le territoire étant considéré comme indemne (Anses, 2015).

Les travaux de modélisation de la FVR devraient être poursuivis, pour inclure l'hétérogénéité spatiale et les mouvements d'animaux, au niveau insulaire comme régional, avec les outils d'analyse des réseaux sociaux puis sous la forme d'une métapopulation en matière de modèle dynamique. Ces mouvements se sont en effet révélés cruciaux pour la dynamique épidémiologique lors de plusieurs observations empiriques et expérimentales (Favier et al., 2006; Lancelot et al., 2017; Nicolas et al., 2013, 2014b). De plus, Mayotte peut faire croire à un ensemble modélisable de façon homogène, pourtant elle est riche d'une mosaïque hétérogène avec de nombreux micro-environnements, comme en atteste sa typologie de couverture végétale par exemple, ou la dispersion des micro-élevages bovins (Lainé et al., 2010). Le lien entre dynamique vectorielle et épidémiologique doit être approfondi pour comprendre les écarts de performances des modèles de prédiction entre la situation mahoraise et Est-africaine notamment. La question de la réémergence de la FVR dans une

population de moins en moins immunisée et donc de plus en plus à risque doit aussi être étudiée avec attention. Notre étude a de plus mis en évidence un taux important de séronégativité qui questionne la durée de persistance des anticorps chez les animaux guéris. Cette observation peut soit biaiser les observations de séroprévalence, si ce sont des faux négatifs, soit conduire à surestimer le taux de protection du cheptel avec des modèles paramétrés sur l'hypothèse de persistance à vie des anticorps contre la FVR.

## **B. Evaluation du dispositif de surveillance de la FVR du SESAM**

### **1. Indicateurs de performances**

Le dispositif de surveillance de la FVR à Mayotte est un défi réussi depuis 2009, dans la mesure où avec des moyens limités, dans un environnement réglementaire et financier instable, une surveillance programmée et événementielle a pu être mise en œuvre pendant maintenant près de 8 ans. Tous les indicateurs de performances se sont même améliorés entre 2010 et 2013.

La qualité des données est en progrès grâce à une amélioration de l'identification animale (surtout bovine) et la création d'une base de données dédiée au SESAM. Des améliorations sont néanmoins encore nécessaires, notamment en termes de traçabilité des échantillons pour centraliser leur lieu de stockage et les résultats des analyses réalisées à plusieurs endroits et dans des délais très variables pour un même échantillon. La connexion de Mayotte à la base de données nationale d'identification et la dotation du SESAM d'un logiciel (AGDS) permettant d'y accéder facilement sont autant d'évolutions numériques qui vont permettre encore des progrès. Une dématérialisation sur smartphone des fiches de commémoratifs des vétérinaires est également envisageable. Ces révolutions numériques sont permises depuis que l'île est fournie en internet haut-débit, c'est-à-dire depuis 2012.

Une amélioration de la réactivité dans la réalisation des analyses est indispensable, même en l'absence de phénomène clinique d'ampleur. Le retour d'information rapide vers les éleveurs est en effet un motif important d'adhésion, tant au dispositif de surveillance programmée qu'à la surveillance événementielle où on leur demande d'être acteur de la déclaration.

La surveillance programmée semble plus sensible que la surveillance événementielle car cette dernière est pénalisée par un faible taux de déclaration des avortements par les éleveurs. Nous avons estimé que les éleveurs mahorais déclarent six fois moins les avortements que les éleveurs métropolitains. Cependant l'évaluation de la sensibilité des dispositifs reste incertaine en raison de plusieurs paramètres qui ne sont pas connus avec assez de précision comme le taux d'incidence réel de la FVR, la probabilité d'avortement lors de transmission en période inter-épizootique, etc. Par ailleurs, le taux de déclaration des avortements sera difficile à améliorer tant que les éleveurs seront convaincus, à tort ou à raison, que leur origine est d'origine essentiellement accidentelle ou surnaturelle.

Différents rapports coût-efficacité ont été calculés. En fonction de celui choisi, l'une ou l'autre forme de surveillance, programmée ou événementielle, est la plus performante : on compte respectivement 39 € [34 ; 44] de dépenses par échantillon pris en charge contre

189 € [125 ; 261], ou bien 4 k€ par cas détecté [4 ; 5] contre plus de 8 k€ [5 ; 11] ou encore 774 € par point de sensibilité [676 ; 1825] contre 215 € [52 ; 5401]. L'efficacité de la surveillance programmée pourrait facilement être améliorée par la mutualisation des prélèvements avec les visites de prophylaxies déjà effectuées par les vétérinaires libéraux pour d'autres maladies.

## **2. Propositions d'évolutions du dispositif**

Pour faciliter l'interprétation des données de séroprévalence et de séroconversion, il serait utile de réaliser une recherche spécifique d'IgM. Cette recherche pourrait être ciblée sur les animaux trouvés positifs avec le kit ELISA de compétition utilisé première intention et au moins dans le cadre de séroconversions. Les résultats positifs (séroconversions et une partie des séropositifs) devraient être confirmés par séroneutralisation, qui reste la méthode de référence pour le diagnostic indirect.

Une réévaluation régulière des indicateurs de performances proposés (qualité des données, réactivité, etc.) doit être envisagée. Une évaluation des performances de diagnostic par un essai inter-laboratoires encadré par le LNR devrait aussi être programmé. Une évaluation complète du réseau de surveillance SESAM, notamment sur les aspects organisationnels et fonctionnels, sur le principe de la méthode OASIS est conseillée (Hendriks et al., 2011). D'après les difficultés rencontrées dans notre étude, il est d'ores et déjà possible d'indiquer que la diffusion des résultats de surveillance pourrait bénéficier d'un bilan annuel, si possible public et dans des revues à comité de lecture (comme le bulletin épidémiologique DGAL-Anses) de façon à améliorer leur accessibilité et leur pérennité. Le fonctionnement du SESAM pourrait globalement gagner en formalisation avec une charte et un groupe de travail qui pourrait être rattaché à la plateforme nationale d'épidémiosurveillance. L'établissement d'une charte a d'ailleurs été proposé depuis notre étude.

## **C. Impact et perceptions de la FVR à Mayotte**

### **1. Impact clinique de la FVR**

D'après les données récoltées dans le cadre du SESAM et du PAZEM, l'impact de la FVR à Mayotte chez les ruminants est resté limité. Aucune vague d'avortements n'a été officiellement enregistrée. Malgré une amélioration du taux de déclaration des avortements depuis 2010, deux avortements seulement ont fait l'objet d'une confirmation d'infection par la FVR à Mayotte, en 2008 et 2010. Cependant, au pic de circulation, en 2009, aucune information sur le niveau de sensibilité de la surveillance événementielle n'était disponible. Notre étude n'a pas pu répondre quant à l'impact d'une infection naturelle en période inter-épizootique sur la production laitière ou la croissance en raison des faibles effectifs suivis.

Plusieurs facteurs sont susceptibles d'avoir limité l'impact de la FVR à Mayotte : le virus pourrait avoir perdu en virulence suite à une mutation ou une délétion, comme observé expérimentalement lors de cycles inter-mammifères (Balenghien et al., 2013) ; les probabilités de transmission vecteur/hôtes semblent être faibles ; la charge virale des animaux virémiques et des vecteurs en période inter-épizootique pourrait être plus faible qu'en période d'épizootie.

## 2. Place de la FVR dans les priorités sanitaires des éleveurs

La priorisation des problèmes sanitaires rencontrés par les éleveurs mahorais lors de réunions participatives a montré que la FVR ne fait pas partie de leurs priorités. Elle semble même méconnue puisque seul un éleveur sur 164 a évoqué l'existence de cette maladie. Cette méconnaissance a aussi été observée dans les entretiens semi-directifs, où les deux-tiers des éleveurs interrogés répondent connaître ou avoir déjà entendu le nom de cette maladie (d'ailleurs peut-être par simple politesse ou par peur de répondre le contraire) mais n'en connaissent pas vraiment les symptômes, ni les modes de transmission et ne l'associent pas à une zoonose (Chauvet, 2013a).

Cependant, la problématique des avortements inquiète les éleveurs, qui classent ce syndrome au premier rang des pathologies en fonction du « risque ». La définition de la notion de « risque » est d'ailleurs ambiguë : elle semble d'abord relever d'une inquiétude sur la perte d'un animal à naître et sur la gravité de la situation qui pourrait aussi entraîner la perte de la mère, mais pourrait aussi être rattachée à une notion plus spirituelle de perception des « accidents ». En effet, dans la culture mahoraise, ces événements sanitaires indésirables sont souvent imputés à des causes surnaturelles qui trouvent leur racine principalement dans la religion et la culture des *Djinns* (Blanchy, 1988; Bouleau - Béléc, 2012).

## II. Perspectives générales

### A. Gestion de la FVR à Mayotte

Les dispositifs de surveillance de la FVR, malgré des éleveurs peu mobilisés, ont su trouver leur place et structurer un réseau de surveillance épidémiologique aujourd'hui plus ouvert aux priorités exprimées par les éleveurs comme le charbon symptomatique et les maladies dermatologiques. Les deux dispositifs de surveillance de la FVR sont complémentaires et devraient être maintenus, même si leur forme doit évoluer : mutualisation des prélèvements, simplification des analyses de laboratoire et du traitement des données, sensibilisation/incitation des éleveurs à la déclaration des avortements, etc. Une réémergence de la FVR n'est pas exclue soit par la réintroduction d'animaux virémiques, soit à partir d'une circulation locale silencieuse du virus si les conditions éco-épidémiologiques y étaient favorables, par exemple avec des conditions climatiques exceptionnelles et une population de ruminants quasi naïve, sur le modèle de la réémergence de la FCO en France métropolitaine. La surveillance de la FVR à Mayotte doit nécessairement s'inscrire dans une réflexion régionale, le virus ayant circulé depuis 2007 étant issu de la même souche que celle circulant dans l'archipel des Comores et à Madagascar et originaire d'Afrique de l'Est.

Une réflexion plus approfondie sur les moyens de gestion à déployer en cas d'épizootie gagnerait à être conduite et anticipée par les autorités sanitaires locales et nationales avec l'appui d'experts scientifiques au besoin. Cette réflexion devrait *in fine* prendre la forme d'un plan d'urgence, comme prévu par la réglementation. Cette préparation à la gestion de



risque serait bénéfique pour d'autres problématiques sanitaires comme la fièvre aphteuse récemment introduite à l'île Maurice.

La modélisation peut également être utilisée pour tester les différentes options de lutte. Une évaluation coût-efficacité des scénarios de gestion, voire coût-bénéfice, peut être envisagée. L'outil Alive développé par le CIRAD et utilisé dans plusieurs pays aurait pu être utilisé à ces fins (Alary et al., 2014). Un certain nombre d'éléments sont à présent disponibles pouvant faciliter une modélisation économique des conséquences d'une épizootie ou d'un plan de lutte : la BDNI est en fonctionnement, des paramètres technico-économiques de l'élevage mahorais sont disponibles au format de la statistique agricole française, le CIRAD dispose également de données précises de performances zootechniques sur un pool d'éleveurs de bovins et de petits ruminants, etc. Une vigilance reste cependant de mise pour ce genre d'analyse, souvent chronophage alors que l'on est dans un contexte de ressources limitées et qu'il peut exister d'autres priorités sanitaires (sécurité sanitaire des aliments, de l'eau, etc.). Une analyse-coût efficacité est quoi qu'il en soit toujours profitable pour rendre plus efficient un dispositif. En revanche, il peut être important de rappeler les limites éthiques de l'analyse coût-bénéfice, régulièrement remise en question, puisque la recherche d'une maximisation purement quantitative du point de vue tant économique qu'en nombre de vies humaines épargnées n'est pas toujours fondée éthiquement (National Research Council (US) Steering Committee on Valuing Health Risks et al., 1990).

## **B. Les perspectives de l'élevage à Mayotte**

Les aspects sanitaires sont encore peu pris en compte par les éleveurs mahorais. Un premier facteur est le niveau d'éducation des exploitants, qui n'ont eu que très peu accès à des formations techniques voire même à l'éducation de base. Il est d'ailleurs observé que la moyenne d'âge des exploitants agricoles augmente avec de moins en moins de jeunes s'investissant dans les activités agricoles. Il sera difficile de modifier les connaissances, les pratiques et les perceptions de cette partie des éleveurs. En revanche, une nouvelle génération d'éleveurs, formés et qui peuvent entreprendre des projets agricoles de plus grande dimension est aussi en train de voir le jour. Accompagner ces deux types d'élevages sur le plan sanitaire est un défi, mais il est indispensable de tenir compte de ces deux populations, qui peuvent être toutes deux touchées par la FVR ou d'autres maladies.

L'amélioration des bonnes pratiques autour de l'abattage et de la commercialisation du lait, et à termes le respect de la réglementation européenne, sont d'autres défis pour la communauté des éleveurs de ruminants et les pouvoirs publics. En effet, la population mahoraise se plaint rarement des pratiques actuelles et reste partagée sur la nécessité d'un changement. Elle est demandeuse de plus de produits locaux, et reste attachée à un abattage de type traditionnel notamment en lien avec les festivités religieuses (Mansuy et al., 2013).

L'élevage mahorais, même s'il tend à s'intensifier et à s'occidentaliser pour répondre à une demande croissante en produits locaux, rencontre de nombreuses difficultés : un foncier contraint, un coût des intrants élevés à cause du coût d'acheminement, un climat tropical avec des pathologies différentes de la métropole, etc. Ces difficultés sont en partie partagées avec les autres départements et collectivités d'outre-mer et des solutions

spécifiques devront être apportées. L'importation d'animaux « européens » pour améliorer les performances zootechniques du cheptel local doit se faire avec la plus grande prudence, pour éviter l'introduction de pathologies inconnues, ou au contraire l'explosion de maladies auxquels les animaux autochtones sont résistants.

### C. L'avenir du SESAM

Le réseau d'épidémiosurveillance animale à Mayotte s'est construit autour de la FVR. Cette maladie représente aujourd'hui une menace de plus en plus lointaine et il est important que le SESAM ne soit pas affecté négativement par cette situation épidémiologique plutôt favorable. La FVR, en tant que danger sanitaire de première catégorie, peut en revanche être utilisée comme maladie structurante pour la surveillance sanitaire dans les élevages de ruminants, rôle qu'a joué la tuberculose bovine en France métropolitaine pour la création des GDS au siècle dernier et qu'elle joue encore aujourd'hui pour le maintien d'un réseau d'acteurs impliqués dans le sanitaire.

Le SESAM doit continuer son ouverture vers d'autres préoccupations sanitaires, jugées prioritaires par les autorités ou les éleveurs. Les syndromes et pathologies importantes à suivre à Mayotte sont prioritairement les mortalités et avortements. Il a été notamment observé que 45% des bovins morts en 2015 sont morts avant l'âge de trois ans, avant d'entrer en production (Dommergues et al., 2016). En l'absence d'équarrissage, les données peuvent uniquement être recueillies grâce aux déclarations directes des éleveurs et le suivi de ces déclarations nécessite des outils informatiques performants. Une des difficultés à surmonter est l'absence d'interlocuteur unique dans les élevages mahorais qui emploient souvent une main d'œuvre clandestine qui change régulièrement. Cette problématique de l'interlocuteur en élevage est également valable pour le développement zootechnique et avait déjà été soulevée dans le cadre du PAZEM (Tillard et al., 2013). L'usage de la BDNI est également une ressource importante pour suivre les mortalités, mais la fiabilité des informations que l'on peut en tirer dépend de la qualité de l'identification qui laisse encore à désirer.

Les autres problèmes sanitaires que les éleveurs de bovins citent comme prioritaires doivent obtenir une attention particulière : le charbon symptomatique, les tiques, le syndrome « bavite-fièvre-grippe », le syndrome « dermatophilose-boutons » et la diarrhée. Une étude épidémiologique sur le charbon semble nécessaire pour évaluer la situation épidémiologique de façon précise ainsi que l'efficacité de la vaccination qui fait toujours l'objet d'une subvention de l'Etat. Des solutions durables doivent aussi être apportées aux éleveurs sur la question des tiques. Quant aux problèmes de syndromes dermatologiques ou « bavite », là aussi des études épidémiologiques plus approfondies sont nécessaires pour identifier clairement les pathologies concernées (dermatophilose, démodécie, gale, teigne, etc. d'une part et FCO, EHD, etc. d'autre part) et y apporter les bonnes solutions prophylactiques et médicales.

Le travail participatif et interdisciplinaire initié ici doit être approfondi. Un renouvellement de l'exercice d'inventaire et de priorisation devrait être envisagé à intervalle régulier ainsi qu'une extension aux autres productions animales (petits ruminants et volailles). Ceci permettra de faire évoluer les programmes de travail, de recherche et de formation de la

coopérative, des autorités et des institutions de recherche. La priorisation établie dans cette étude devra être comparée à l'actuel travail de hiérarchisation des dangers sanitaires dans les DOM en cours de réalisation par l'Anses. Une adaptation de la réglementation nationale aux problématiques des DOM sera ensuite à réfléchir (FVR à Mayotte, Leucose à la Réunion, etc.). Pour le moment cette adaptation est difficile, la départementalisation ayant cet effet de revers que la réglementation s'applique uniformément sur le territoire français et donc y compris à Mayotte malgré toutes ses particularités. Certaines dérogations et des phases de transition ont toutefois été prévues, pour le droit du travail notamment avec une semaine de 39h et non 35, des jours fériés spécifiques, etc. Le mémoire d'Eva Chauvet fait d'ailleurs un état des lieux inquiétant des difficultés d'application des politiques publiques de santé animale à Mayotte décrivant le « fossé entre les volontés nationales et la faisabilité pratique à Mayotte ». Elle souligne cependant l'avantage de la taille humaine des institutions locales permettant une individualisation des relations et dans certains cas une certaine agilité dans l'action (Chauvet, 2013b).

La mobilisation des éleveurs reste limitée sur le volet sanitaire. Il a été imaginé qu'un réseau de surveillance participatif pourrait être plus formalisé avec des éleveurs délégués de secteurs. Une tentative en ce sens a été mise en œuvre en 2014-2015, mais a rapidement rencontré des difficultés d'implication bénévole des éleveurs et de communication entre éleveurs sur le terrain. Aucun problème sanitaire n'est survenu chez les éleveurs volontaires et les autres éleveurs n'ont pas communiqué d'information sanitaire aux éleveurs délégués.

Malgré, ou au contraire, grâce à une situation sanitaire plutôt calme ces dernières années pour les bovins mahorais, le SESAM doit enfin pleinement s'intégrer aux réseaux de surveillance régionaux (COI, Comores, etc.) et nationaux (Plateforme ESA, etc.), au-delà des actuelles réticences politiques. Compte-tenu de la proximité et des flux importants entre les îles, la situation sanitaire mahoraise est en effet directement dépendante de celle des Comores. De nombreux exemples (FVR, charbon, chikungunya) l'ont déjà montré et de nombreuses nouvelles menaces se présentent régulièrement (PPR, theilériose, etc.). Par ailleurs, dans un contexte de ressources limitées, les ressources disponibles pour la surveillance, la recherche et le développement doivent être mutualisées afin de potentialiser leurs impacts dans la zone (recherche de nouvelles méthodes de diagnostic et de traitement pour des maladies communes, travaux de modélisation, formation, etc.).



## REFERENCES

Afssa (2005). Evaluation du risque d'apparition et de développement de maladies animales compte tenu d'un éventuel réchauffement climatique. 78p.

Afssa (2008a). Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments sur le risque de propagation et de pérennisation de la fièvre de la vallée du Rift à Mayotte. 10p.

Afssa (2008b). Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments sur le risque de propagation de la fièvre de la vallée du Rift (FVR) dans un département et une collectivité départementale français de l'Océan Indien (la Réunion et Mayotte). 156p.

Afssa (2008c). Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments sur une demande de recommandations de gestion relatives à la situation de la de la fièvre de la vallée du Rift à Mayotte. 15p.

Alary, V., Dutilly, D., Bonnet, P., Lesnoff, M., and Juanes, X. (2014). The Livestock Sector Investment and Policy Toolkit (LSIPT) diagnostic phase, manual 2. CIRAD. 282p.

Al-Hazmi, M., Ayoola, E.A., Abdurahman, M., Banzal, S., Ashraf, J., El-Bushra, A., Hazmi, A., Abdullah, M., Abbo, H., Elamin, A., et al. (2003). Epidemic Rift Valley fever in Saudi Arabia: a clinical study of severe illness in humans. *Clin. Infect. Dis. Off. Publ. Infect. Dis. Soc. Am.* 36, 3, 245–252.

Anonyme (2009). Bulletin épidémiologique SESAM. Mai 2009. 1.

Anses (2015). Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à « l'évaluation du risque lié à la réapparition du sérotype 8 de la FCO en France continentale ». 56p.

Antonis, A.F.G., Kortekaas, J., Kant, J., Vloet, R.P.M., Vogel-Brink, A., Stockhofe, N., and Moormann, R.J.M. (2013). Vertical transmission of Rift Valley fever virus without detectable maternal viremia. *Vector Borne Zoonotic Dis. Larchmt. N* 13, 8, 601–606.

Anyamba, A., Chretien, J.-P., Small, J., Tucker, C.J., Formenty, P.B., Richardson, J.H., Britch, S.C., Schnabel, D.C., Erickson, R.L., and Linthicum, K.J. (2009). Prediction of a Rift Valley fever outbreak. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 106, 3, 955–959.

Anyamba, A., Linthicum, K.J., Small, J., Britch, S.C., Pak, E., de La Rocque, S., Formenty, P., Hightower, A.W., Breiman, R.F., Chretien, J.-P., et al. (2010). Prediction, Assessment of the Rift Valley Fever Activity in East and Southern Africa 2006–2008 and Possible Vector Control Strategies. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 83, 2 Suppl, 43–51.

Anyangu, A.S., Gould, L.H., Sharif, S.K., Nguku, P.M., Omolo, J.O., Mutonga, D., Rao, C.Y., Lederman, E.R., Schnabel, D., Paweska, J.T., et al. (2010). Risk factors for severe Rift Valley fever infection in Kenya, 2007. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 83, 2 Suppl, 14–21.

Archer, B.N., Weyer, J., Paweska, J., Nkosi, D., Leman, P., Tint, K.S., and Blumberg, L. (2011). Outbreak of Rift Valley fever affecting veterinarians and farmers in South Africa, 2008. *S. Afr. Med. J.* 101, 4, 263–266.

## Références

- Arsevka, E., Lancelot, R., Bezeid, E.M., and Cêtre-Sossah, C. (2016a). Situation épidémiologique de la fièvre de la Vallée du Rift en Afrique de l'Ouest et du Nord. *Bull. Épidémiologique* 74, 25–29.
- Arsevka, E., Hellal, J., Mejri, S., Hammami, S., Marianneau, P., Calavas, D., and Hénaux, V. (2016b). Identifying Areas Suitable for the Occurrence of Rift Valley Fever in North Africa: Implications for Surveillance. *Transbound. Emerg. Dis.* 63, 6, 658–674.
- Ayari-Fakhfakh, E., do Valle, T.Z., Guillemot, L., Panthier, J.-J., Bouloy, M., Ghram, A., Albina, E., and Cêtre-Sossah, C. (2012). MBT/Pas mouse: a relevant model for the evaluation of Rift Valley fever vaccines. *J. Gen. Virol.* 93, Pt 7, 1456–1464.
- Bagny, L., Delatte, H., Elissa, N., Quilici, S., and Fontenille, D. (2009). *Aedes* (Diptera: Culicidae) Vectors of Arboviruses in Mayotte (Indian Ocean): Distribution Area and Larval Habitats. *J. Med. Entomol.* 46, 2, 198–207.
- Balenghien, T., Cardinale, E., Chevalier, V., Elissa, N., Failloux, A.-B., Nipomichene, T.N.J.J., Nicolas, G., Rakotoharinome, V.M., Roger, M., and Zumbo, B. (2013). Towards a better understanding of Rift Valley fever epidemiology in the south-west of the Indian Ocean. *Vet. Res.* 44, 1, 78.
- Bird, B.H., Khristova, M.L., Rollin, P.E., Ksiazek, T.G., and Nichol, S.T. (2007a). Complete Genome Analysis of 33 Ecologically and Biologically Diverse Rift Valley Fever Virus Strains Reveals Widespread Virus Movement and Low Genetic Diversity due to Recent Common Ancestry. *J. Virol.* 81, 6, 2805–2816.
- Bird, B.H., Bawiec, D.A., Ksiazek, T.G., Shoemaker, T.R., and Nichol, S.T. (2007b). Highly sensitive and broadly reactive quantitative reverse transcription-PCR assay for high-throughput detection of Rift Valley fever virus. *J. Clin. Microbiol.* 45, 11, 3506–3513.
- Bird, B.H., Albariño, C.G., Hartman, A.L., Erickson, B.R., Ksiazek, T.G., and Nichol, S.T. (2008). Rift Valley Fever Virus Lacking the NSs and NSm Genes Is Highly Attenuated, Confers Protective Immunity from Virulent Virus Challenge, and Allows for Differential Identification of Infected and Vaccinated Animals. *J. Virol.* 82, 6, 2681–2691.
- Bird, B.H., Ksiazek, T.G., Nichol, S.T., and Maclachlan, N.J. (2009). Rift Valley fever virus. *J. Am. Vet. Med. Assoc.* 234, 7, 883–893.
- Blanchy, S. (1988). *La vie quotidienne à Mayotte (Comores): essai d'anthropologie compréhensive*. Thèse de doctorat d'Etat. Université de la Réunion. 328p.
- Blanchy, S. (1996). *Dictionnaire mahorais-français, français-mahorais*. L'Harmattan. 224p.
- Blomström, A.-L., Scharin, I., Stenberg, H., Figueiredo, J., Nhambirre, O., Abilio, A., Berg, M., and Fafetine, J. (2016). Seroprevalence of Rift Valley fever virus in sheep and goats in Zambézia, Mozambique. *Infect. Ecol. Epidemiol.* 6, 31343.
- Boiro, I., Konstaninov, O.K., and Numerov, A.D. (1987). Isolation of Rift Valley fever virus from bats in the Republic of Guinea. *Bull. Soc. Pathol. Exot. Filiales* 80, 1, 62–67.
- Bouleau - Béléc (2012). *Culture et traditions comoriennes face aux exigences du diagnostic anténatal*. Mémoire MASTER 2 ECHOGRAPHIE DIAGNOSTIC ANTENATAL Option DEPISTAGE Université de PARIS V PARIS DESCARTES. 74p.

- Bouloy, M., and Weber, F. (2010). Molecular Biology of Rift Valley Fever Virus. *Open Virol. J.* 4, 8–14.
- Bronner, A., Hénaux, V., Vergne, T., Vinard, J.-L., Morignat, E., Hendrikx, P., Calavas, D., and Gay, E. (2013a). Assessing the Mandatory Bovine Abortion Notification System in France Using Unilist Capture-Recapture Approach. *PLoS ONE* 8, 5, e63246.
- Bronner, A., Hénaux, V., Fortané, N., and Calavas, D. (2013b). Identification des facteurs influençant la déclaration des avortements chez les bovins par les éleveurs et les vétérinaires. *Bull. Épidémiologique Santé Anim. Aliment.* 57, 5–8.
- Bronner, A., Gay, E., Fortané, N., Palussière, M., Hendrikx, P., Hénaux, V., and Calavas, D. (2015a). Quantitative and qualitative assessment of the bovine abortion surveillance system in France. *Prev. Vet. Med.* 120, 1, 62–69.
- Bronner, A., Morignat, E., Touratier, A., Gache, K., Sala, C., and Calavas, D. (2015b). Was the French clinical surveillance system of bovine brucellosis influenced by the occurrence and surveillance of other abortive diseases? *Prev. Vet. Med.* 118, 4, 498–503.
- Brunhes, J. (1978). Les Insectes hématophages de l'Archipel des Comores (Diptera Culicidae, Ceratopogonidae, Simuliidae, Tabanidae, Hippoboscidae et Muscidae Stomoxyninae; Hemiptera Cimicidae), maladies transmises et méthodes de lutte. 193-246p.
- Calba, C., Goutard, F.L., Hoinville, L., Hendrikx, P., Lindberg, A., Saegerman, C., and Peyre, M. (2015). Surveillance systems evaluation: a systematic review of the existing approaches. *BMC Public Health* 15, 448.
- Cannon, R.M. (2002). Demonstrating disease freedom—combining confidence levels. *Prev. Vet. Med.* 52, 3–4, 227–249.
- Cardinale, E., Roger, M., Elissa, N., Faharoudine, A., Girard, S., Halifa, M., Jaumally, M.R., Heraud, J.M., Lalaonirina, B.A., Laurette, S., et al. (2011). Le réseau régional de surveillance AnimalRisk : de la surveillance à la recherche dans l'Océan Indien. *Bull. Épidémiologique Santé Anim. Aliment.* 43, 8–12.
- Cardinale, E., Roger, M., Esnault, O., and Cavalerie, L. (2012). Rapport PARDEC - Expertise santé animale. 42p.
- Cardinale, E., Dommergues, L., Mérot, P., and Pannequin, M. (2013). Bulletin épidémiologique SESAM. Mars 2013.
- Cardinale, E., Dommergues, L., Mérot, P., Pannequin, M., and Sutter, C. (2014). Bulletin épidémiologique SESAM. Septembre 2014.
- Cardinale, E., Cavalerie, L., Dommergues, L., Mérot, P., and Pannequin, M. (2015). Bulletin épidémiologique SESAM. Novembre 2015.
- Caron, A., Miguel, E., Gomo, C., Makaya, P., Pfukenyi, D.M., Foggin, C., Hove, T., and Garine-Wichatitsky, M. de (2013). Relationship between burden of infection in ungulate populations and wildlife/livestock interfaces. *Epidemiol. Amp Infect.* 141, 7, 1522–1535.
- Carroll, S.A., Reynes, J.-M., Khristova, M.L., Andriamandimby, S.F., Rollin, P.E., and Nichol, S.T. (2011). Genetic evidence for Rift Valley fever outbreaks in Madagascar resulting from

## Références

virus introductions from the East African mainland rather than enzootic maintenance. *J. Virol.* **85**, 13, 6162–6167.

Catley, A. (2005). *Participatory Epidemiology: A guide for trainers*. African Union, Interafrican Bureau for Animal Resources. 116p.

Catley, A., Alders, R.G., and Wood, J.L.N. (2012). Participatory epidemiology: approaches, methods, experiences. *Vet. J. Lond. Engl.* **197**, 2, 151–160.

Cavalerie, L. (2011). *Évaluation socio-économique de mesures réglementaires en santé animale. Abattage total et abattage partiel des foyers de tuberculose bovine en Côte-d'Or*. thèse vétérinaire ENVA. Créteil. 139p.

Cavalerie, L., Roger, M., Esnault, O., and Cardinale, E. (2012). *Analyse économique et financière de la gestion collective de maladies animales dans l'Union des Comores*. 43p.

Cavalerie, L., Charron, M.V.P., Ezanno, P., Dommergues, L., Zumbo, B., and Cardinale, E. (2015). A Stochastic Model to Study Rift Valley Fever Persistence with Different Seasonal Patterns of Vector Abundance: New Insights on the Endemicity in the Tropical Island of Mayotte. *PLoS ONE* **10**, 7, e0130838.

Cavalerie, L., Dommergues, L., Chauvet, E., and Cardinale, E. (2017). *Connaissances, attitudes et pratiques en santé animale chez les éleveurs de ruminants à Mayotte en 2013-2014 : application à la FVR*. Rapport technique - version provisoire. CIRAD.

CDC (2009). *Biosafety in Microbiological and Biomedical Laboratories (BMBL) 5th Edition*. 438p.

Cêtre-Sossah, C., Billecocq, A., Lancelot, R., Defernez, C., Favre, J., Bouloy, M., Martinez, D., and Albina, E. (2009). Evaluation of a commercial competitive ELISA for the detection of antibodies to Rift Valley fever virus in sera of domestic ruminants in France. *Prev. Vet. Med.* **90**, 1–2, 146–149.

Cêtre-Sossah, C., Zeller, H., Grandadam, M., Caro, V., Petinelli, F., Bouloy, M., Cardinale, E., and Albina, E. (2012a). Genome Analysis of Rift Valley Fever Virus, Mayotte. *Emerg. Infect. Dis.* **18**, 6.

Cêtre-Sossah, C., Pédarrieu, A., Guis, H., Defernez, C., Bouloy, M., Favre, J., Girard, S., Cardinale, E., and Albina, E. (2012b). Prevalence of Rift Valley Fever among Ruminants, Mayotte. *Emerg. Infect. Dis.* **18**, 6.

Chambers, P.G., and Swanepoel, R. (1980). Rift valley fever in abattoir workers. *Cent. Afr. J. Med.* **26**, 6, 122–126.

Chauvet, E. (2013a). *Enquête sociologique sur les pratiques sanitaires des éleveurs mahorais et les contacts entre élevages : quel impact sur la gestion de la FVR ?* Rapport de stage de MASTER 2 PAGERS. CIRAD. 78p.

Chauvet, E. (2013b). *Stratégies d'acteurs et enjeux territoriaux : la mise en oeuvre des politiques publiques de santé animale à Mayotte*. Mémoire de stage de MASTER 2 PAGERS. IEP Lyon. 66p.

Chevalier, V., Lancelot, R., Thiongane, Y., Sall, B., Diaité, A., and Mondet, B. (2005). Rift Valley Fever in Small Ruminants, Senegal, 2003. *Emerg. Infect. Dis.* *11*, 11, 1693–1700.

Chevalier, V., Thiongane, Y., and Lancelot, R. (2009). Endemic Transmission of Rift Valley Fever in Senegal. *Transbound. Emerg. Dis.* *56*, 9–10, 372–374.

Chevalier, V., Pépin, M., Plee, L., and Lancelot, R. (2010). Rift Valley fever - a threat for Europe? *Euro Surveill* *15*, 10.

Christensen, J., and Vallières, A. (2016). Scenario tree model for animal disease freedom framed in the OIE context using the example of a generic swine model for Aujeszky's disease in commercial swine in Canada. *Prev. Vet. Med.* *123*, 60–70.

Clements, A.C., Pfeiffer, D.U., and Martin, V. (2006). Application of knowledge-driven spatial modelling approaches and uncertainty management to a study of Rift Valley fever in Africa. *Int. J. Health Geogr.* *5*, 1, 57.

Comtet, L. (2010). ID Screen® Rift Valley Fever Competition Multi-species | IDVet (Lelystad, the Netherlands).

Consultative Group for RVF Decision Support (2010). Decision-support tool for prevention and control of Rift Valley fever epizootics in the Greater Horn of Africa. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* *83*, 2 Suppl, 75–85.

Cour des Comptes (2016). La départementalisation de Mayotte. Rapport public thématique. 164p.

DAAF Mayotte (2011a). Synthèse illustrée du recensement agricole 2010 - Mayotte. 32p.

DAAF Mayotte (2011b). L'essentiel du recensement agricole - Mayotte.

DAAF Mayotte (2016a). Evolution des profils d'exploitations à Mayotte - 2ème partie de l'analyse des 600 enquêtes de 2015 : Les élevages de petits et gros ruminants se professionnalisent. 4p.

DAAF Mayotte (2016b). MEMENTO AGRICOLE 2016 (données 2015). DAAF/SISE-AGRESTE MAYOTTE. 2p.

Daubney, R., Hudson, J.R., and Garnham, P.C. (1931). Enzootic hepatitis or rift valley fever. An undescribed virus disease of sheep cattle and man from east africa. *J. Pathol. Bacteriol.* *34*, 4, 545–579.

Daudin, V., and Michaïlesco, F. (2014). Quatre jeunes sur dix en grande difficulté à l'écrit à Mayotte. *INSEE MAYOTTE INFOS* 70.

Davies, F.G., and Karstad, L. (1981). Experimental infection of the African buffalo with the virus of Rift Valley fever. *Trop. Anim. Health Prod.* *13*, 1, 185–188.

Davies, F.G., and Martin, V. (2003). Recognizing Rift Valley Fever. *FAO Anim. Health Man.* *17*.

Davies, F.G., Linthicum, K.J., and James, A.D. (1985). Rainfall and epizootic Rift Valley fever. *Bull. World Health Organ.* *63*, 5, 941–943.



## Références

- De Deken, R., Martin, V., Saido, A., Madder, M., Brandt, J., and Geysen, D. (2007). An outbreak of East Coast Fever on the Comoros: a consequence of the import of immunised cattle from Tanzania? *Vet. Parasitol.* *143*, 3–4, 245–253.
- Defernez, C., Cardinale, E., and Girard, S. (2010). Bulletin épidémiologique SESAM. Mars 2010. 2.
- Denzin, N.K. (2009). *Sociological methods: a sourcebook*. Aldine Transaction.
- Dietrich, I., Jansen, S., Fall, G., Lorenzen, S., Rudolf, M., Huber, K., Heitmann, A., Schicht, S., Ndiaye, E.H., Watson, M., et al. (2017). RNA Interference Restricts Rift Valley Fever Virus in Multiple Insect Systems. *MSphere* *2*, 3.
- Digoutte, J.P., and Peters, C.J. (1989). General aspects of the 1987 Rift Valley fever epidemic in Mauritania. *Res. Virol.* *140*, 1, 27–30.
- Dohoo, I., Martin, W., and Stryhn, H. (2009). *Veterinary Epidemiologic Research*. VER Inc. 865p.
- Dommergues, L., Pannequin, M., Cardinale, E., and Mérot, P. (2014a). Bulletin épidémiologique SESAM. Mars 2014.
- Dommergues, L., Cavalerie, L., Pannequin, M., Duson, A.M., Mérot, P., Cetre-Sossah, C., and Cardinale, E. (2014b). SESAM: animal health surveillance in Mayotte from 2012 (Cuba).
- Dommergues, L., Pannequin, M., Cavalerie, L., and Cardinale, E. (2015). Etude épidémiologique sur le charbon symptomatique à Mayotte (2014). Rapport d'étude. 68p.
- Dommergues, L., Chouanibou, Y., and Cardinale, E. (2016). Mortalité des ruminants à Mayotte en 2015. Rapport d'étude. 14p.
- Drosten, C., Götting, S., Schilling, S., Asper, M., Panning, M., Schmitz, H., and Günther, S. (2002). Rapid detection and quantification of RNA of Ebola and Marburg viruses, Lassa virus, Crimean-Congo hemorrhagic fever virus, Rift Valley fever virus, dengue virus, and yellow fever virus by real-time reverse transcription-PCR. *J. Clin. Microbiol.* *40*, 7, 2323–2330.
- Dubroca, S. (2001). Enquêtes sur les foyers anciens et actuels de fièvre de la Vallée du Rift au Sénégal auprès des services vétérinaires et dans la bibliographie. Thèse d'exercice. Ecole nationale vétérinaire de Toulouse. 122p.
- Dufour, B. (2007). *Surveillance épidémiologique en santé animale*. Editions Quae. 291p.
- EFSA (2005). Opinion of the Scientific Panel on Animal Health and Welfare (AHAW) on a request from the Commission related to "The Risk of a Rift Valley Fever Incursion and its Persistence within the Community." *EFSA J.* *3*, 10, 238.
- El Mamy, A.B.O., Baba, M.O., Barry, Y., Isselmou, K., Dia, M.L., Hampate, B., Diallo, M.Y., El Kory, M.O.B., Diop, M., Lo, M.M., et al. (2011). Unexpected Rift Valley Fever Outbreak, Northern Mauritania. *Emerg. Infect. Dis.* *17*, 10, 1894–1896.
- Ellis, C.E., Mareledwane, V.E., Williams, R., Wallace, D.B., and Majiwa, P.A.O. (2014). Validation of an ELISA for the concurrent detection of total antibodies (IgM and IgG) to Rift Valley fever virus. *Onderstepoort J. Vet. Res.* *81*, 1.

- Evans, A., Gakuya, F., Paweska, J.T., Rostal, M., Akoolo, L., Van Vuren, P.J., Manyibe, T., Macharia, J.M., Ksiazek, T.G., Feikin, D.R., et al. (2008). Prevalence of antibodies against Rift Valley fever virus in Kenyan wildlife. *Epidemiol. Infect.* *136*, 9, 1261–1269.
- Fafetine, J., Neves, L., Thompson, P.N., Paweska, J.T., Rutten, V.P.M.G., and Coetzer, J.A.W. (2013). Serological Evidence of Rift Valley Fever Virus Circulation in Sheep and Goats in Zambézia Province, Mozambique. *PLoS Negl Trop Dis* *7*, 2, e2065.
- Fafetine, J.M., Tijhaar, E., Paweska, J.T., Neves, L.C.B.G., Hendriks, J., Swanepoel, R., Coetzer, J. a. W., Egberink, H.F., and Rutten, V.P.M.G. (2007). Cloning and expression of Rift Valley fever virus nucleocapsid (N) protein and evaluation of a N-protein based indirect ELISA for the detection of specific IgG and IgM antibodies in domestic ruminants. *Vet. Microbiol.* *121*, 1–2, 29–38.
- FAO (2002). Preparation of Rift Valley Fever contingency plans. 65p.
- FAO (2008). Climate models predict increased risk of precipitations in the Horn of Africa for end of 2008. *EMPRES Watch September 2008*, 4.
- FAO (2011). Rift Valley fever vaccine development, progress and constraints. In *Proceedings of the GF-TADs Meeting, (Rome, Italy)*, p. 35.
- FAO (2012). Rift Valley fever: vigilance needed in the coming months. *EMPRES Watch* *27*, 8.
- FAO (2015). El Niño and increased risk of Rift Valley fever – Warning to countries. *EMPRES Watch* *34*, 8.
- Favier, C., Chalvet-Monfray, K., Sabatier, P., Lancelot, R., Fontenille, D., and Dubois, M.A. (2006). Rift Valley fever in West Africa: the role of space in endemicity. *Trop. Med. Int. Health* *11*, 12, 1878–1888.
- Figuié, M., Peyre, M., and Binot, A. (2013). Surveillance des maladies animales infectieuses en Asie du Sud-Est: valoriser la pluralité des réseaux d'information. *Perspective* *23*.
- Flick, R., and Bouloy, M. (2005). Rift Valley fever virus. *Curr. Mol. Med.* *5*, 8, 827–834.
- Forar, A.L., Gay, J.M., and Hancock, D.D. (1995). The frequency of endemic fetal loss in dairy cattle: a review. *Theriogenology* *43*, 6, 989–1000.
- Gaborit, M. (2009). Typologie des élevages bovins de Mayotte. Rapport de stage. Cirad. 99p.
- Gaff, H.D., Hartley, D.M., and Leahy, N.P. (2007). An epidemiological model of rift valley fever. *Electron. J. Differ. Equ.* *2007*, 115, 1–12.
- Gerdes, G.H. (2004). Rift Valley Fever. *Rev. Sci. Tech. OIE* *23*, 2, 613–623.
- German, R.R., Lee, L.M., Horan, J.M., Milstein, R.L., Pertowski, C.A., Waller, M.N., and Guidelines Working Group Centers for Disease Control and Prevention (CDC) (2001). Updated guidelines for evaluating public health surveillance systems: recommendations from the Guidelines Working Group. *MMWR Recomm. Rep. Morb. Mortal. Wkly. Rep. Recomm. Rep. Cent. Dis. Control* *50*, RR-13, 1-35; quiz CE1-7.

## Références

Giannini, A., Salack, S., Lodoun, T., Ali, A., Gaye, A.T., and Ndiaye, O. (2013). A unifying view of climate change in the Sahel linking intra-seasonal, interannual and longer time scales. *Environ. Res. Lett.* 8, 2, 024010.

Girard, S., Biteau, F., Zumbo, B., Cetre-Sossah, C., and Cardinale, E. (2011). Encadré - Système de surveillance de la fièvre de la vallée du Rift à Mayotte. *Bull. Épidémiologique Santé Anim. Aliment.* 43.

Girod, R. (2004). First record of *Aedes albopictus* in Mayotte Island, Comoros archipelago. *Parasite Paris Fr.* 11, 1, 74.

Gray, G.C., Anderson, B.D., LaBeaud, A.D., Heraud, J.-M., Fèvre, E.M., Andriamandimby, S.F., Cook, E.A.J., Dahir, S., Glanville, W.A. de, Heil, G.L., et al. (2015). Seroepidemiological Study of Interepidemic Rift Valley Fever Virus Infection Among Persons with Intense Ruminant Exposure in Madagascar and Kenya. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 15-0383.

Hendrikx, P., Gay, E., Chazel, M., Moutou, F., Danan, C., Richomme, C., Boue, F., Souillard, R., Gauchard, F., and Dufour, B. (2011). OASIS: an assessment tool of epidemiological surveillance systems in animal health and food safety. *Epidemiol. Infect.* 139, 10, 1486–1496.

Hoogstraal, H., Meegan, J.M., Khalil, G.M., and Adham, F.K. (1979). The Rift Valley fever epizootic in Egypt 1977–1978 2. Ecological and entomological studies. *Trans. R. Soc. Trop. Med. Hyg.* 73, 6, 624–629.

House, C., Alexander, K.A., Kat, P.W., O'Brien, S.J., and Mangiafico, J. (1996). Serum Antibody to Rift Valley Fever Virus in African Carnivores. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 791, 1, 345–349.

IEDOM (2014). Rapport annuel 2013 Mayotte. 199p.

Ikegami, T., and Makino, S. (2009). Rift valley fever vaccines. *Vaccine* 27 *Suppl* 4, D69-72.

Ikegami, T., and Makino, S. (2011). The Pathogenesis of Rift Valley Fever. *Viruses* 3, 5, 493–519.

INGENASA (2017a). Fiche Technique : INgezim FVR COMPAC - R.13.FVR.K3.

INGENASA (2017b). Fiche Technique INgezim FVR IgM - R.13.FVR.K2.

Insee (2012). Recensement : 212 600 habitants à Mayotte en 2012. INSEE MAYOTTE INFOS 61.

Insee (2015). PIB de Mayotte en 2012 - Une croissance économique de 7 % en 2012. 4p.

InVS (2011). Bulletin hebdomadaire international du 19 au 25 octobre 2011. N°318.

InVS (2012). Bulletin hebdomadaire international du 31 octobre au 6 novembre 2012. N°372. 3p.

Janelle, J., Issoufi, A., Grimaldine, E., and Tillard, E. (2013). Référentiel technico-économique des élevages d'ovins et de caprins à Mayotte. *Cirad.* 31p.

Jansen van Vuren, P., Potgieter, A.C., Paweska, J.T., and van Dijk, A.A. (2007). Preparation and evaluation of a recombinant Rift Valley fever virus N protein for the detection of IgG and

- IgM antibodies in humans and animals by indirect ELISA. *J. Virol. Methods* *140*, 1–2, 106–114.
- Jesse, M., Ezanno, P., Davis, S., and Heesterbeek, J. a. P. (2008). A fully coupled, mechanistic model for infectious disease dynamics in a metapopulation: movement and epidemic duration. *J. Theor. Biol.* *254*, 2, 331–338.
- Jost, C.C., Mariner, J.C., Roeder, P.L., Sawitri, E., and Macgregor-Skinner, G.J. (2007). Participatory epidemiology in disease surveillance and research. *Rev Sci Tech Int Epiz* *26*, 3, 537–547.
- Jost, C.C., Nzietchueng, S., Kihu, S., Bett, B., Njogu, G., Swai, E.S., and Mariner, J.C. (2010). Epidemiological Assessment of the Rift Valley Fever Outbreak in Kenya and Tanzania in 2006 and 2007. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* *83*, 2 Suppl, 65–72.
- Keeling, M.J., and Rohani, P. (2007). *Modeling Infectious Diseases in Humans and Animals*. Princeton University Press. 408p.
- Kifaro, E.G., Nkangaga, J., Joshua, G., Sallu, R., Yongolo, M., Dautu, G., and Kasanga, C.J. (2014). Epidemiological study of Rift Valley fever virus in Kigoma, Tanzania. *Onderstepoort J Vet Res* *81*, 2.
- King, A.M., Lefkowitz, E., Adams, M.J., and Carstens, E.B. (2011). *Virus Taxonomy: Ninth Report of the International Committee on Taxonomy of Viruses*. Elsevier. 1462p.
- Kortekaas, J., Kant, J., Vloet, R., Cêtre-Sossah, C., Marianneau, P., Lacote, S., Banyard, A.C., Jeffries, C., Eiden, M., Groschup, M., et al. (2013). European ring trial to evaluate ELISAs for the diagnosis of infection with Rift Valley fever virus. *J. Virol. Methods* *187*, 1, 177–181.
- Ksiazek, T.G., Jouan, A., Meegan, J.M., Le Guenno, B., Wilson, M.L., Peters, C.J., Digoutte, J.P., Guillaud, M., Merzoug, N.O., and Touray, E.M. (1989). Rift Valley fever among domestic animals in the recent West African outbreak. *Res. Virol.* *140*, 1, 67–77.
- LaBeaud, A.D., Muchiri, E.M., Ndzovu, M., Mwanje, M.T., Muiruri, S., Peters, C.J., and King, C.H. (2008). Interepidemic Rift Valley Fever Virus Seropositivity, Northeastern Kenya. *Emerg. Infect. Dis.* *14*, 8, 1240–1246.
- LaBeaud, A.D., Cross, P.C., Getz, W.M., Glinka, A., and King, C.H. (2011). Rift Valley Fever Virus Infection in African Buffalo (*Syncerus Caffer*) Herds in Rural South Africa: Evidence of Interepidemic Transmission. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* *84*, 4, 641–646.
- Lainé, G., Dupuy, S., Tassin, J., and Sarrailh, J.-M. (2010). Étude de la typologie forestière de Mayotte. Contrat cadre EuropeAid Lot 6 Lettre de contrat n°2009/203776. 120p.
- Lancelot, R., Gonzalez, J.-P., Le Guenno, B., Diallo, B.C., Gandega, Y., and Guillaud, M. (1989). Epidémiologie descriptive de la fièvre de la vallée du Rift chez les petits ruminants dans le Sud de la Mauritanie après l'hivernage 1988. *Rev. Elev. Médecine Vét. Pays Trop.* *42*, 4, 485–491.
- Lancelot, R., Béral, M., Rakotoharinome, V.M., Andriamandimby, S.-F., Héraud, J.-M., Coste, C., Apolloni, A., Squarzoni-Diaw, C., de La Rocque, S., Formenty, P.B.H., et al. (2017). Drivers of Rift Valley fever epidemics in Madagascar. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* *114*, 5, 938–943.

Laxminarayan, R., and Macauley, M.K. (2012). *The Value of Information: Methodological Frontiers and New Applications in Environment and Health*. Springer Science & Business Media. 327p.

Le Goff, G., Goodman, S.M., Elguero, E., and Robert, V. (2014). Survey of the Mosquitoes (Diptera: Culicidae) of Mayotte. *PLoS ONE* 9, 7, e100696.

Léger, P., Lara, E., Jagla, B., Sismeiro, O., Mansuroglu, Z., Coppée, J.Y., Bonnefoy, E., and Bouloy, M. (2013). Dicer-2- and Piwi-Mediated RNA Interference in Rift Valley Fever Virus-Infected Mosquito Cells. *J. Virol.* 87, 3, 1631–1648.

Lernout, T., Biteau-Coroller, F., Defernez, C., Zumbo, B., Giry, C., Achirafi, A., Maeder, S., Malivert, M., De Montera, A., Petinelli, F., et al. (2009). Surveillance de la circulation de la fièvre de la vallée du Rift à Mayotte, 2009. *Bull. Veille Sanit.* 2.

Lernout, T., Zumbo, B., Girard, S., Aubert, L., Toty, C., Biteau-Coroller, F., Balenghien, T., Lajoinie, G., and Filleul, L. (2011). Etat des lieux sur la circulation du virus de la fièvre de la vallée de Rift à Mayotte. *Bull. Veille Sanit.* 12.

Lernout, T., Cardinale, E., Jago, M., Desprès, P., Collet, L., Zumbo, B., Tillard, E., Girard, S., and Filleul, L. (2013). Rift Valley Fever in Humans and Animals in Mayotte, an Endemic Situation? *PLoS ONE* 8, 9, e74192.

Lichoti, J.K., Kihara, A., Oriko, A.A., Okutoyi, L.A., Wauna, J.O., Tchouassi, D.P., Tigoj, C.C., Kemp, S., Sang, R., and Mbabu, R.M. (2014). Detection of Rift Valley Fever Virus Interepidemic Activity in Some Hotspot Areas of Kenya by Sentinel Animal Surveillance, 2009–2013. *Vet. Med. Int.* 2014, e379010.

Linthicum, K.J., Davies, F.G., Kairo, A., and Bailey, C.L. (1985). Rift Valley fever virus (family Bunyaviridae, genus Phlebovirus). Isolations from Diptera collected during an inter-epizootic period in Kenya. *J. Hyg. (Lond.)* 95, 1, 197–209.

Linthicum, K.J., Anyamba, A., Tucker, C.J., Kelley, P.W., Myers, M.F., and Peters, C.J. (1999). Climate and Satellite Indicators to Forecast Rift Valley Fever Epidemics in Kenya. *Science* 285, 5426, 397–400.

Linthicum, K.J., Britch, S.C., and Anyamba, A. (2016). Rift Valley Fever: An Emerging Mosquito-Borne Disease. *Annu. Rev. Entomol.* 61, 395–415.

Lorenzo, G., López-Gil, E., Warimwe, G.M., and Brun, A. (2015). Understanding Rift Valley fever: Contributions of animal models to disease characterization and control. *Mol. Immunol.* 66, 1, 78–88.

Lumley, T. (2014). *survey: analysis of complex survey samples*. R.

Magona, J.W., Galiwango, T., Walubengo, J., and Mukiibi, G. (2013). Rift Valley fever in Uganda: Seroprevalence and risk factor surveillance vis-à-vis mosquito vectors, anti-RVF virus IgG and RVF virus neutralizing antibodies in goats. *Small Rumin. Res.* 114, 1, 176–181.

Mandell, R.B., and Flick, R. (2011). Rift Valley Fever Virus: A Real Bioterror Threat. *J. Bioterrorism Biodefense* 02, 02.

- Mandret, G. (1996). Carences minérales des prairies sur andosol à la Réunion. *Fourrages* 146, 141–148.
- Mansfield, K.L., Banyard, A.C., McElhinney, L., Johnson, N., Horton, D.L., Hernández-Triana, L.M., and Fooks, A.R. (2015). Rift Valley fever virus: A review of diagnosis and vaccination, and implications for emergence in Europe. *Vaccine* 33, 42, 5520–5531.
- Mansuy, A., Corniaux, C., and Tillard, E. (2013). Analyse de la dynamique de la consommation de lait et de viande bovine dans les ménages à Mayotte. Rapport technique. Cirad. 110p.
- Maquart, M., Pascalis, H., Abdouroihmane, S., Roger, M., Abdourahime, F., Cardinale, E., and Cêtre-Sossah, C. (2014a). Phylogeographic Reconstructions of a Rift Valley Fever Virus Strain Reveals Transboundary Animal Movements from Eastern Continental Africa to the Union of the Comoros. *Transbound. Emerg. Dis.* n/a-n/a.
- Maquart, M., Temmam, S., Héraud, J.-M., Leparç-Goffart, I., Cêtre-Sossah, C., Dellagi, K., Cardinale, E., and Pascalis, H. (2014b). Development of real-time RT-PCR for the detection of low concentrations of Rift Valley fever virus. *J. Virol. Methods* 195, 92–99.
- Mariner, J.C., and Paskin, R. (2000). *Manual on Participatory Epidemiology - Method for the Collection of Action-Oriented Epidemiological Intelligence*. FAO.
- Martin, P. a. J., Cameron, A.R., and Greiner, M. (2007a). Demonstrating freedom from disease using multiple complex data sources 1: a new methodology based on scenario trees. *Prev. Vet. Med.* 79, 2–4, 71–97.
- Martin, P. a. J., Cameron, A.R., Barfod, K., Sergeant, E.S.G., and Greiner, M. (2007b). Demonstrating freedom from disease using multiple complex data sources 2: case study—classical swine fever in Denmark. *Prev. Vet. Med.* 79, 2–4, 98–115.
- Mathiot, C., Ribot, J.J., Clerc, Y., Coulanges, P., and Rasolofonirina, N. (1984). Rift valley fever and Zinga virus: a pathogenic arbovirus in man and animal new for Madagascar. *Arch. Inst. Pasteur Madagascar* 51, 1, 125–133.
- McIntosh, B.M., Russell, D., dos Santos, I., and Gear, J.H. (1980). Rift Valley fever in humans in South Africa. *South Afr. Med. J. Suid-Afr. Tydskr. Vir Geneesk.* 58, 20, 803–806.
- Meegan, J.M. (1979). The Rift Valley fever epizootic in Egypt 1977-78. 1. Description of the epizootic and virological studies. *Trans. R. Soc. Trop. Med. Hyg.* 73, 6, 618–623.
- Mesas, T. (2014). *Patrimoines de MAYOTTE. Couleurs métisses*. 492p.
- Métrás, R., Cavalerie, L., Dommergues, L., Mérot, P., Edmunds, W.J., Keeling, M.J., Cêtre-Sossah, C., and Cardinale, E. (2016). The Epidemiology of Rift Valley Fever in Mayotte: Insights and Perspectives from 11 Years of Data. *PLOS Negl Trop Dis* 10, 6, e0004783.
- Métrás, R., Dommergues, L., Ortiz, K., Pannequin, M., Schuler, C., Roux, P., Edmunds, J.W., Keeling, M.J., Cêtre-Sossah, C., and Cardinale, E. (2017a). Absence of Evidence of Rift Valley Fever Infection in *Eulemur fulvus* (Brown Lemur) in Mayotte During an Interepidemic Period. *Vector-Borne Zoonotic Dis.* 17, 5, 358–360.

## Références

- Métrás, R., Fournié, G., Dommergues, L., Camacho, A., Cavalerie, L., Mérot, P., Keeling, M.J., Cêtre-Sossah, C., Cardinale, E., and Edmunds, W.J. (2017b). Drivers for Rift Valley fever emergence in Mayotte: A Bayesian modelling approach. *PLoS Negl. Trop. Dis.* *11*, 7, e0005767.
- Miller, W.S., Demchak, P., Rosenberger, C.R., Dominik, J.W., and Bradshaw, J.L. (1963). Stability and infectivity of airborne yellow fever and rift valley fever viruses. *Am. J. Epidemiol.* *77*, 1, 114–121.
- Mochabo, K.O.M., Kitale, P.M., Gathura, P.B., Ogara, W.O., Catley, A., Eregae, E.M., and Kaitho, T.D. (2005). Community Perceptions of Important Camel Diseases in Lapur Division of Turkana District, Kenya. *Trop. Anim. Health Prod.* *37*, 3, 187–204.
- Monaco, F., Cosseddu, G.M., Doumbia, B., Madani, H., Mellouli, F.E., Jiménez-Clavero, M.A., Sghaier, S., Marianneau, P., Cetre-Sossah, C., Polci, A., et al. (2015). First External Quality Assessment of Molecular and Serological Detection of Rift Valley Fever in the Western Mediterranean Region. *PLOS ONE* *10*, 11, e0142129.
- Morgan, D.L. (1997). *Focus Groups as Qualitative Research*. SAGE. 92p.
- Morvan, J., Fontenille, D., Saluzzo, J.F., and Coulanges, P. (1991a). Possible Rift Valley fever outbreak in man and cattle in Madagascar. *Trans. R. Soc. Trop. Med. Hyg.* *85*, 1, 108.
- Morvan, J., Saluzzo, J.F., Fontenille, D., Rollin, P.E., and Coulanges, P. (1991b). Rift Valley fever on the east coast of Madagascar. *Res. Virol.* *142*, 6, 475–482.
- Morvan, J., Rollin, P.E., Laventure, S., and Roux, J. (1992a). Duration of immunoglobulin M antibodies against Rift Valley fever virus in cattle after natural infection. *Trans. R. Soc. Trop. Med. Hyg.* *86*, 6, 675–675.
- Morvan, J., Lesbordes, J.L., Rollin, P.E., Mouden, J.C., and Roux, J. (1992c). First fatal human case of Rift Valley fever in Madagascar. *Trans. R. Soc. Trop. Med. Hyg.* *86*, 3, 320.
- Morvan, J., Rollin, P.E., Laventure, S., Rakotoarivony, I., and Roux, J. (1992b). Rift Valley fever epizootic in the central highlands of Madagascar. *Res. Virol.* *143*, 407–415.
- Moutailler, S., Roche, B., Thiberge, J.-M., Caro, V., Rougeon, F., and Failloux, A.-B. (2011). Host alternation is necessary to maintain the genome stability of rift valley fever virus. *PLoS Negl. Trop. Dis.* *5*, 5, e1156.
- Nabeth, P., Kane, Y., Abdalahi, M.O., Diallo, M., Ndiaye, K., Ba, K., Schneegans, F., Sall, A.A., and Mathiot, C. (2001). Rift Valley fever outbreak, Mauritania, 1998: seroepidemiologic, virologic, entomologic, and zoologic investigations. *Emerg. Infect. Dis.* *7*, 6, 1052–1054.
- Nanyingi, M., Munyua, P., Kiama, S.G., Muchemi, G.M., Thumbi, S.M., Bitek, A.O., Bett, B., Muriithi, R.M., and Njenga, M.K. (2015). A systematic review of Rift Valley Fever epidemiology 1931-2014. *Infect. Ecol. Epidemiol.* *5*, 0.
- Nanyingi, M.O., Muchemi, G.M., Thumbi, S.M., Ade, F., Onyango, C.O., Kiama, S.G., and Bett, B. (2017). Seroepidemiological Survey of Rift Valley Fever Virus in Ruminants in Garissa, Kenya. *Vector Borne Zoonotic Dis. Larchmt. N* *17*, 2, 141–146.

National Research Council (US) Steering Committee on Valuing Health Risks, C., Hammond, P.B., and Coppock, R. (1990). *The Politics Of Benefit-Cost Analysis*. National Academies Press (US).

Nicolas, G., Durand, B., Duboz, R., Rakotondravao, R., and Chevalier, V. (2013). Description and analysis of the cattle trade network in the Madagascar highlands: potential role in the diffusion of Rift Valley fever virus. *Acta Trop.* *126*, 1, 19–27.

Nicolas, G., Durand, B., Rakotoarimanana, T.T., Lacote, S., Chevalier, V., and Marianneau, P. (2014a). A 3-year serological and virological cattle follow-up in Madagascar highlands suggests a non-classical transmission route of Rift Valley fever virus. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* *90*, 2, 265–266.

Nicolas, G., Chevalier, V., Tantely, L.M., Fontenille, D., and Durand, B. (2014b). A spatially explicit metapopulation model and cattle trade analysis suggests key determinants for the recurrent circulation of rift valley Fever virus in a pilot area of madagascar highlands. *PLoS Negl. Trop. Dis.* *8*, 12, e3346.

Ninot, G. (2001). *Typologie des élevages bovins de Mayotte, archipel des Comores. Rapport de stage*. Cirad. 64p.

Nin-Pratt, A., Bonnet, P., Jabbar, M., Ehui, S., and Haan, C. de (2004). Benefits and Costs of Compliance of Sanitary Regulations in Livestock Markets: the Case of Rift Valley Fever in Ethiopians. In *7th Annual Conference on Global Economic Analysis*, (Washington DC, USA), p. 64.

Njenga, M.K., Njagi, L., Thumbi, S.M., Kahariri, S., Githinji, J., Omondi, E., Baden, A., Murithi, M., Paweska, J., Ithondeka, P.M., et al. (2015). Randomized controlled field trial to assess the immunogenicity and safety of rift valley fever clone 13 vaccine in livestock. *PLoS Negl. Trop. Dis.* *9*, 3, e0003550.

Oelofsen, M.J., and Van der Ryst, E. (1999). Could bats act as reservoir hosts for Rift Valley fever virus? *Onderstepoort J. Vet. Res.* *66*, 1, 51–54.

OIE (2008). *Manual of Diagnostic Tests and Vaccines for Terrestrial Animals*.

OIE (2016a). *Manuel des tests de diagnostic et des vaccins pour les animaux terrestres 2016*.

OIE (2016b). *Code sanitaire pour les animaux terrestres*.

OIE (2017). *Fiches techniques: OIE - World Organisation for Animal Health*.

OIE *Fiches d'information générale sur les maladies : Fièvre de la Vallée du Rift*.

Olaleye, O.D., Tomori, O., and Schmitz, H. (1996). Rift Valley fever in Nigeria: infections in domestic animals. *Rev. Sci. Tech. Int. Off. Epizoot.* *15*, 3, 937–946.

Olive, M.-M., Goodman, S.M., and Reynes, J.-M. (2012). The Role of Wild Mammals in the Maintenance of Rift Valley Fever Virus. *J. Wildl. Dis.* *48*, 2, 241–266.

OMS (2016). *Fièvre de la vallée du Rift - Aide-mémoire N°207*.



## Références

Paweska, J.T., Burt, F.J., Anthony, F., Smith, S.J., Grobbelaar, A.A., Croft, J.E., Ksiazek, T.G., and Swanepoel, R. (2003). IgG-sandwich and IgM-capture enzyme-linked immunosorbent assay for the detection of antibody to Rift Valley fever virus in domestic ruminants. *J. Virol. Methods* 113, 2, 103–112.

Paweska, J.T., Mortimer, E., Leman, P.A., and Swanepoel, R. (2005). An inhibition enzyme-linked immunosorbent assay for the detection of antibody to Rift Valley fever virus in humans, domestic and wild ruminants. *J. Virol. Methods* 127, 1, 10–18.

Paweska, J.T., van Vuren, P.J., Kemp, A., Buss, P., Bengis, R.G., Gakuya, F., Breiman, R.F., Njenga, M.K., and Swanepoel, R. (2008). Recombinant nucleocapsid-based ELISA for detection of IgG antibody to Rift Valley fever virus in African buffalo. *Vet. Microbiol.* 127, 1–2, 21–28.

Pépin, M. (2011). Fièvre de la vallée du Rift. *Médecine Mal. Infect.* 41, 6, 322–329.

Pépin, M., Bouloy, M., Bird, B.H., Kemp, A., and Paweska, J. (2010). Rift Valley fever virus (Bunyaviridae: Phlebovirus): an update on pathogenesis, molecular epidemiology, vectors, diagnostics and prevention. *Vet. Res.* 41, 6, 40.

Pépin, M., Paweska, J.T., and Bouloy, M. (2010). Diagnostic specificity of ELISA-based tests for the detection of antibodies to Rift Valley Fever virus in French ruminants. 161, 3, 104–107.

Peyre, M., Chevalier, V., Abdo-Salem, S., Velthuis, A., Antoine-Moussiaux, N., Thiry, E., and Roger, F. (2015). A Systematic Scoping Study of the Socio-Economic Impact of Rift Valley Fever: Research Gaps and Needs. *Zoonoses Public Health* 62, 5, 309–325.

Pinault, G. (2009). Epizooties et géographie du commerce du bétail dans la Corne d’Afrique. *EchoGéo* 8.

Pipino, L.L., Lee, Y.W., and Wang, R.Y. (2002). Data Quality Assessment. *Commun ACM* 45, 4, 211–218.

Poivey, J.-P. (2007). Définition d’un schéma d’amélioration génétique des bovins. Rapport de mission. Cirad. 64p.

préfecture de Mayotte (2017). Bilan de la délinquance 2016. Communiqué de presse.

ProMED-mail (2007). RIFT VALLEY FEVER, HUMAN, BOVINE - COMOROS, RFI.

R Core Team (2015). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing.

Ringard, G. (2010). Caractérisation de la diversité des situations économiques dans les élevages bovins mahorais. Rapport de stage. Cirad. 112p.

Ristic, I., and McIntyre, I. (2013). Diseases of Cattle in the Tropics: Economic and Zoonotic Relevance. Springer, Dordrecht. 649p.

Rivière, J. (2016). Evaluation du dispositif de surveillance de la tuberculose bovine dans la faune sauvage en France à l’aide de méthodes épidémiologique, économique et sociologique. Thèse de doctorat en Santé publique - épidémiologie. Université Paris-Saclay.

- Rivière, J., Strat, Y.L., Dufour, B., and Hendrikx, P. (2015). Sensitivity of Bovine Tuberculosis Surveillance in Wildlife in France: A Scenario Tree Approach. *PLOS ONE* 10, 10, e0141884.
- Riziki, M. (2008). Une épidémie ravage les moutons à Mohéli. n°1199. 22/11/2008. *Al Watwan*.
- Roger, M., Girard, S., Faharoudine, A., Halifa, M., Bouloy, M., Cetre-Sossah, C., and Cardinale, E. (2011). Rift Valley Fever in Ruminants, Republic of Comoros, 2009. *Emerg. Infect. Dis.* 17, 7, 1319–1320.
- Roger, M., Beral, M., Licciardi, S., Soulé, M., Faharoudine, A., Foray, C., Olive, M.-M., Maquart, M., Soulaïmane, A., Madi Kassim, A., et al. (2014). Evidence for Circulation of the Rift Valley Fever Virus among Livestock in the Union of Comoros. *PLoS Negl Trop Dis* 8, 7, e3045.
- Saluzzo, J.F., Chartier, C., Bada, R., Martinez, D., and Digoutte, J.P. (1987). La Fièvre de la Vallée du Rift en Afrique de l'Ouest. *Rev. Elev. Médecine Vét. Pays Trop.* 40, 3, 215–223.
- Samy, A.M., Peterson, A.T., and Hall, M. (2017). Phylogeography of Rift Valley Fever Virus in Africa and the Arabian Peninsula. *PLoS Negl. Trop. Dis.* 11, 1.
- Schrijver, R.S., and Kramps, J.A. (1998). Critical factors affecting the diagnostic reliability of enzyme-linked immunosorbent assay formats. *Rev. Sci. Tech. Int. Off. Epizoot.* 17, 2, 550–561.
- Scilab Enterprises (2012). Scilab: Free and Open Source software for numerical computation. Scilab Enterprises.
- Scott, G.R., Coackley, W., Roach, R.W., and Cowdy, N.R. (1963). Rift valley fever in camels. *J. Pathol. Bacteriol.* 86, 1, 229–231.
- Selby, C. (1999). Interference in immunoassay. *Ann. Clin. Biochem.* 36 ( Pt 6), 704–721.
- Sergeant, ESG (2017). Epitools epidemiological calculators. Ausvet Pty Ltd. Available at: <http://epitools.ausvet.com.au>.
- Shebl, F.M., El-Kamary, S.S., Shardell, M., Langenberg, P., Dorgham, L.S., Maguire, J.H., and Magder, L.S. (2012). Estimating incidence rates with misclassified disease status: a likelihood-based approach, with application to hepatitis C virus. *Int. J. Infect. Dis.* 16, 7, e527–e531.
- Shoemaker, T., Boulianne, C., Vincent, M.J., Pezzanite, L., Al-Qahtani, M.M., Al-Mazrou, Y., Khan, A.S., Rollin, P.E., Swanepoel, R., Ksiazek, T.G., et al. (2002). Genetic analysis of viruses associated with emergence of Rift Valley fever in Saudi Arabia and Yemen, 2000-01. *Emerg. Infect. Dis.* 8, 12, 1415–1420.
- Sindato, C., Karimuribo, E., and Mboera, L.E.G. (2011). The epidemiology and socio-economic impact of rift valley fever epidemics in Tanzania: a review. *Tanzan. J. Health Res.* 13, 5 Suppl 1, 305–318.
- Sissoko, D., Giry, C., Gabriele, P., Tarantola, A., Pettinelli, F., Collet, L., D'Ortenzio, E., Renault, P., and Pierre, V. (2009). Rift Valley Fever, Mayotte, 2007–2008. *Emerg. Infect. Dis.* 15, 4, 568–570.

- Smith, B.P. (2014). *Large Animal Internal Medicine - E-Book*. Elsevier Health Sciences. 2024p.
- Smithburn, K.C. (1949). Rift Valley fever; the neurotropic adaptation of the virus and the experimental use of this modified virus as a vaccine. *Br. J. Exp. Pathol.* *30*, 1, 1–16.
- Smithburn, K.C., Haddow, A.J., and Gillett, J.D. (1948). Rift Valley Fever. Isolation of the Virus from Wild Mosquitoes. *Br. J. Exp. Pathol.* *29*, 2, 107–121.
- Soumaré, B., Thys, E., Berkvens, D., Hashi, A., and Van Huylbroeck, G. (2006). Effects of livestock import bans imposed by Saudi Arabia on Somaliland for sanitary reasons related to Rift Valley fever. *Outlook Agric.* *35*, 1, 19–24.
- Sueur, J.-P., Cointat, C., and Desplan, F. (2012). Mayotte : un nouveau département confronté à de lourds défis. *Sénat*. 140p.
- Sumaye, R.D., Geubbels, E., Mbeyela, E., and Berkvens, D. (2013). Inter-epidemic Transmission of Rift Valley Fever in Livestock in the Kilombero River Valley, Tanzania: A Cross-Sectional Survey. *PLoS Negl. Trop. Dis.* *7*, 8.
- Sumaye, R.D., Abatih, E.N., Thiry, E., Amuri, M., Berkvens, D., and Geubbels, E. (2015). Inter-epidemic Acquisition of Rift Valley Fever Virus in Humans in Tanzania. *PLoS Negl. Trop. Dis.* *9*, 2.
- Sutherst, R.W. (2004). Global Change and Human Vulnerability to Vector-Borne Diseases. *Clin. Microbiol. Rev.* *17*, 1, 136–173.
- Swecker, W.S., Thatcher, C.D., Eversole, D.E., Blodgett, D.J., and Schurig, G.G. (1995). Effect of selenium supplementation on colostral IgG concentration in cows grazing selenium-deficient pastures and on postsuckle serum IgG concentration in their calves. *Am. J. Vet. Res.* *56*, 4, 450–453.
- Taglioni, F. (2009). Mayotte s’ancre dans la république française. *EchoGéo*.
- Thonnon, J., Picquet, M., Thiongane, Y., Lo, M., Sylla, R., and Vercruysse, J. (1999). Rift valley fever surveillance in the lower Senegal river basin: update 10 years after the epidemic. *Trop. Med. Int. Health* *TM IH* *4*, 8, 580–585.
- Tillard, E. (2006). Situation et risques sanitaire de l’élevage à Mayotte Préparation d’un séminaire régional d’échanges d’informations épidémiologiques. *Cirad*. 60p.
- Tillard, E., Aubriot, D., Balberini, L., and Berre, D. (2013). *Référentiel technique de l’élevage bovin mahorais*. Cirad. 90p.
- Toma, B., Dufour, B., Benet, J.-J., Sanaa, M., Shaw, A., Moutou, F., and Association pour l’étude de l’épidémiologie des maladies animales (2010). *Épidémiologie appliquée à la lutte collective contre les maladies animales transmissibles majeures*.
- Tran, A., Trevennec, C., Lutwama, J., Sserugga, J., Gély, M., Pittiglio, C., Pinto, J., and Chevalier, V. (2016). Development and Assessment of a Geographic Knowledge-Based Model for Mapping Suitable Areas for Rift Valley Fever Transmission in Eastern Africa. *PLOS Negl Trop Dis* *10*, 9, e0004999.

UICN France (2014). Stratégie biodiversité pour le développement durable de Mayotte - 2013-2020. 84p.

USDA (2013). DISEASE RESPONSE STRATEGY RIFT VALLEY FEVER. 25p.

van Vuren, P.J., and Paweska, J.T. (2010). Comparison of enzyme-linked immunosorbent assay-based techniques for the detection of antibody to Rift Valley fever virus in thermochemically inactivated sheep sera. *Vector Borne Zoonotic Dis.* Larchmt. N 10, 7, 697–699.

Weiskopf, N.G., and Weng, C. (2013). Methods and dimensions of electronic health record data quality assessment: enabling reuse for clinical research. *J. Am. Med. Inform. Assoc.* 20, 1, 144–151.

Wensman, J.J., Lindahl, J., Wachtmeister, N., Torsson, E., Gwakisa, P., Kasanga, C., and Misinzo, G. (2015). A study of Rift Valley fever virus in Morogoro and Arusha regions of Tanzania – serology and farmers’ perceptions. *Infect. Ecol. Epidemiol.* 5, 0.

Williams, R., Ellis, C.E., Smith, S.J., Potgieter, C.A., Wallace, D., Mareledwane, V.E., and Majiwa, P.A.O. (2011). Validation of an IgM antibody capture ELISA based on a recombinant nucleoprotein for identification of domestic ruminants infected with Rift Valley fever virus. *J. Virol. Methods* 177, 2, 140–146.

## Textes réglementaires<sup>45</sup>

Décision du conseil européen du 11 juillet 2012 modifiant le statut à l’égard de l’Union européenne de Mayotte (2012/419/UE)

Article 73 de la Constitution du 4 octobre 1958

Article L 5139-1 et 2 du code de la santé publique

Article L 201-1 et 9 du Code rural et de la pêche maritime

Décret n° 2012-845 du 30 juin 2012 relatif aux dispositions générales organisant la prévention, la surveillance et la lutte contre les dangers sanitaires de première et deuxième catégorie

Arrêté du 13 octobre 1998 fixant les mesures techniques et administratives relatives à la prophylaxie collective et à la police sanitaire de la brucellose ovine et caprine

Arrêté du 22 avril 2008 fixant les mesures techniques et administratives relatives à la prophylaxie collective et à la police sanitaire de la brucellose des bovinés

Arrêté du 29 décembre 2009 désignant les laboratoires nationaux de référence dans le domaine de la santé publique vétérinaire et phytosanitaire

Arrêté du 30 avril 2012 fixant la liste des micro-organismes et toxines prévue à l'article L. 5139-1 du code de la santé publique

<sup>45</sup> Consultables sur les sites suivants :

<http://eur-lex.europa.eu/>

<https://www.legifrance.gouv.fr/>

## Références

Arrêté du 23 janvier 2013 relatif aux règles de bonnes pratiques tendant à garantir la sécurité et la sûreté biologiques mentionnées à l'article

Arrêté du 10 octobre 2013 fixant les mesures techniques et administratives relatives à la prophylaxie collective et à la police sanitaire de la brucellose ovine et caprine

Arrêté du 29 juillet 2013 relatif à la définition des dangers sanitaires de première et deuxième catégorie pour les espèces animales

Arrêté du 31 mars 2014 portant reconnaissance des organismes à vocation sanitaire dans le domaine animal ou végétal

Arrêté du 24 juillet 2014 fixant la liste des centres nationaux de référence pour la lutte contre les maladies transmissibles et des laboratoires associés

Arrêté du 7 mars 2017 fixant la liste des centres nationaux de référence, des centres nationaux de référence-laboratoires associés et des centres nationaux de référence-laboratoires experts pour la lutte contre les maladies transmissibles

## Sources de financements et constitution du comité de thèse

- Sources de financements :
  - Cette thèse a été financée dans le cadre d'une mise à disposition du Cirad de trois ans par le Ministère de l'Agriculture dans le cadre du dispositif FCPR (formation continue par la recherche) des Ingénieurs des Ponts des Eaux et des Forêts (IPEF).
  - Elle a pu bénéficier d'un appui financier du Cirad dans le cadre des actions incitatives « soutien aux doctorants » en 2012, 2013 et 2014 ainsi que d'un soutien de l'Université de la Réunion pour participation à un congrès international.
  - Elle a également fait l'objet de demandes de financement auprès du ministère de la Recherche :
    - Projet complémentaire SESAM FVR à Mayotte 2013-2014 (52 000 €)
    - Projet complémentaire SESAM FVR à Mayotte 2014-2015 (52 000 €)
  - Le réseau Animalrisk a financé au cours de cette thèse une mission ayant fait l'objet d'un rapport « *Analyse économique et financière de la gestion collective de maladies animales dans l'Union des Comores* » Lisa Cavalerie, Matthieu Roger, Olivier Esnault, Eric Cardinale, 2012, 42p
  
- Comité de thèse :

Nom	Prénom	Titre-Fonction	Organisme
CARDINALE	Eric	DVM, PhD, HDR, chercheur	Cirad
PENNOBER	Gwenaëlle	PhD, HDR, enseignant-chercheur	IRD
EZANNO	Pauline	PhD, HDR, chercheur	Oniris INRA
BONNET	Pascal	DVM, PhD, chercheur	Cirad
LANCELOT	Renaud	DVM, PhD, HDR, chercheur	Cirad
DUFOUR	Barbara	DVM, PhD, Pr, enseignant-chercheur	ENVA
HERBRETEAU	Vincent	chercheur	IRD
FOSSE	Julien	PhD, Chef du BAST	DGAI, ministère de l'agriculture

## ANNEXE I : Chapitre I - Tableau des animaux ayant changé de statut sérologique au cours du suivi sentinelle

Liste des animaux ayant eu un changement de statut sérologique au cours de l'étude et des pourcentages de compétition (pc) des tests ELISA. Le résultat est positif si  $pc \leq 40\%$ , négatif si  $pc > 50\%$  et douteux si  $40 < pc \leq 50\%$ . Une séroconversion (SC) correspond au passage de statut négatif à positif et une séronégativisation (SN) correspond à un passage de statut positif à négatif

	typo	zone	Pourcentage de compétition des tests ELISA				CCL	
			2010	A	B	C		D
animal_1	tradi	E	0,29	0,56	0,50	0,56	0,84	SN
animal_2	tradi	N	0,81		0,05	0,08	0,06	SC
animal_3	tradi	N		0,567	0,31	0,23		SC
animal_4	tradi	N		0,29	0,62	0,88	0,68	SN
animal_5	tradi	O	0,15				0,70	SN
animal_6	tradi	O		0,50	0,36	0,37	0,37	SC
animal_7	tradi	O		0,74	0,32	0,74	0,52	SC-SN
animal_8	tradi	S		0,28		0,51		SN
animal_9	tradi	S		0,28	0,37	0,55	0,34	SN-SC
animal_10	tradi	S		0,05	0,34	0,92	0,13	SN-SC
animal_11	tradi	S		0,62	1,05	0,20		SC
animal_12	tradi	S		0,82	1,08	0,33	0,84	SC-SN
animal_13	mod	E	0,70	0,34	0,53	0,39	0,55	SC-SN- SC-SN
animal_14	mod	E	0,10	0,84				SN
animal_15	mod	E	0,53	0,39				SC
animal_16	mod	E	0,78	0,32	0,63	0,62	0,51	SC-SN
animal_17	mod	E	0,27	0,63				SN
animal_18	mod	N		0,34	0,63			SN
animal_19	mod	N		0,12		0,98		SN
animal_20	mod	O	0,08	0,67	1,07		0,86	SN
animal_21	mod	O	0,29	0,62	0,81	1,04		SN
animal_22	mod	O		0,26	0,75	1,12	0,69	SN
animal_23	mod	O		0,15	0,674		0,95	SN
animal_24	mod	O	0,65	0,37	0,36	0,63	0,86	SC-SN
animal_25	mod	O	0,98	0,39	0,38	0,79	0,59	SC-SN
animal_26	inter	E	0,75	0,40				SC
animal_27	inter	E	0,05	0,52	0,85	0,99	0,72	SN
animal_28	inter	E	0,15	0,82	0,91	1,13		SN
animal_29	inter	E	0,04	0,67	0,89	0,96	0,91	SN
animal_30	inter	E				0,31	0,70	SN
animal_31	inter	E			1,04	0,38		SC
animal_32	inter	O		0,37	0,72	0,61		SN
animal_33	inter	O			0,82	0,96	0,39	SC
animal_34	Inter	O	0,60	0,38	0,52	0,60		SC-SN

## ANNEXE II : Chapitre I - Calcul de correction du taux d'incidence des séroconversions en tenant compte de la sensibilité et la spécificité du test ELISA

### A. Méthode

Une formule simple existe pour corriger un taux de séroprévalence pour tenir compte de faux positifs ou faux négatifs induits par un test imparfait (cf. Eq. 2). Cette correction est en revanche beaucoup plus complexe pour basé sur des séroconversions, ce qui induit plus de sources d'erreurs : la date précise de l'infection est inconnue et il faut tenir compte de la fiabilité de deux résultats aux tests, avant et après la séroconversion. Des propositions de calcul de taux d'incidence à partir de données de séroconversion existent, notamment avec les statistiques bayésiennes (Shebl et al., 2012) ou avec des logiciels de statistique spécialisés. Une proposition de calcul simplifié de la correction du taux d'incidence de séroconversion pour tenir compte de la sensibilité et la spécificité du test ELISA est présentée ci-après. L'objectif est d'estimer au plus près le taux d'incidence réel de séroconversions ( $\tau_{IR}$ ) ou le taux d'incidence réel de séronégativisation ( $\tau_{SR}$ ).

En effet, les cas incidents observés ou « observés » ( $SC_{obs}$ ) sur une période de temps entre une date  $t_i$  et  $t_j$ ,  $i < j$ , peuvent en réalité correspondre à différentes situations :

- une vraie séroconversion: l'animal est vraiment négatif (VN) lors d'une prise de sang à  $t_i$ , car, il n'a jamais eu la FVR et n'a pas d'anticorps contre la FVR (probabilité  $1-p_R$ ). Son résultat au test ELISA est bien négatif (probabilité  $Sp$ ). Ensuite il est vraiment positif (VP) lors d'une prise de sang à  $t_j$ , car il a entre-temps été atteint par la FVR (probabilité  $\tau_{IR}$ ), a développé des anticorps contre la FVR et son résultat au test ELISA est bien positif (probabilité  $Se$ ). Ces cas sont appelés « VNVP ».
- une fausse séroconversion dans les cas suivants :
  - o l'animal n'a pas été infecté par la FVR pendant la période  $t_i-t_j$ , sa prise de sang à  $t_i$  est bien négative (VN) mais à  $t_j$  elle est faussement positive (FP). Ces cas sont appelés des « VNFP ».
  - o l'animal a été infecté par la FVR avant  $t_i$ , sa prise de sang à  $t_i$  est faussement négative (FN) mais à  $t_j$  elle est vraiment positive (VP). Ces cas sont appelés des « FNVP ».
  - o l'animal a été infecté par la FVR avant  $t_i$  et sa prise de sang à  $t_i$  est faussement négative (FN). Ses anticorps ont disparu ou ne sont plus détectables à  $t_j$  et sa prise de sang est faussement positive (FP). Ces cas sont appelés des « FNFP ».

Un arbre permet de résumer les différents cas possibles et leurs probabilités de survenue (cf. Figure 39). Cet arbre fait l'hypothèse que les statuts à  $t_i$  et  $t_j$  sont indépendants. Cette hypothèse permet de simplifier les calculs mais ne tient pas compte de la durée attendue de l'immunité acquise suite à une infection par la FVR. A partir de cet arbre, on peut définir le nombre de cas incidents observés (IA) de la façon suivante  $SC_{obs} = VNVP + VNFP + FNFP + FNVP$ .

$$SC_{obs} = n_{tot} * [(1 - p_R) * Sp * \tau_{IR} * Se + (1 - p_R) * Sp * (1 - \tau_{IR})(1 - Sp) + p_R * (1 - Se) * \tau_{SR} * (1 - Sp) + p_R * (1 - Se) * (1 - \tau_{SR}) * Se]$$

$$\Leftrightarrow SC_{obs} = n_{tot} * [\tau_{IR} * Sp * (1 - p_R) * (Se + Sp - 1) - \tau_{SR} * (1 - Se) * p_R * (Se + Sp - 1) + p_R * Se * (1 - Se) + (1 - p_R) * Sp * (1 - Sp)]$$



$$\Leftrightarrow \tau_{IR} = \frac{\frac{IASC_{obs}}{n_{tot}} + \tau_{SR} * (1 - Se) * (Se + Sp - 1) - (1 - p_R) * Sp * (1 - Sp) - p_R * Se * (1 - Se)}{(1 - p_R) * Sp * (Se + Sp - 1)} \quad (Eq4)$$

De même, les séronégations apparentes ( $SN_{obs}$ ) peuvent être :

- des vrais positifs à  $t_i$  et vrais négatifs à  $t_j$  (le nombre d'animaux correspondant est  $VPVN$ )
- des vrais positifs à  $t_i$  et faux négatifs à  $t_j$  ( $VPFN$ )
- des faux positifs à  $t_i$  et vrais négatifs à  $t_j$  ( $FPVN$ )
- des faux positifs à  $t_i$  et faux négatifs à  $t_j$  ( $FPFN$ )

On peut calculer le nombre de séronégations apparentes ( $SN_{obs}$ ) de la façon suivante :

$$SN_{obs} = VPVN + VPFN + FPFN + FPVN$$

$$SN_{obs} = n_{tot} * [\tau_{SR} * Se * (Se + Sp - 1) - \tau_{IR} * (1 - Sp) * (Se + Sp - 1) + (1 - Sp) * Sp * (1 - p_R) + (1 - Se) * Se * p_R]$$

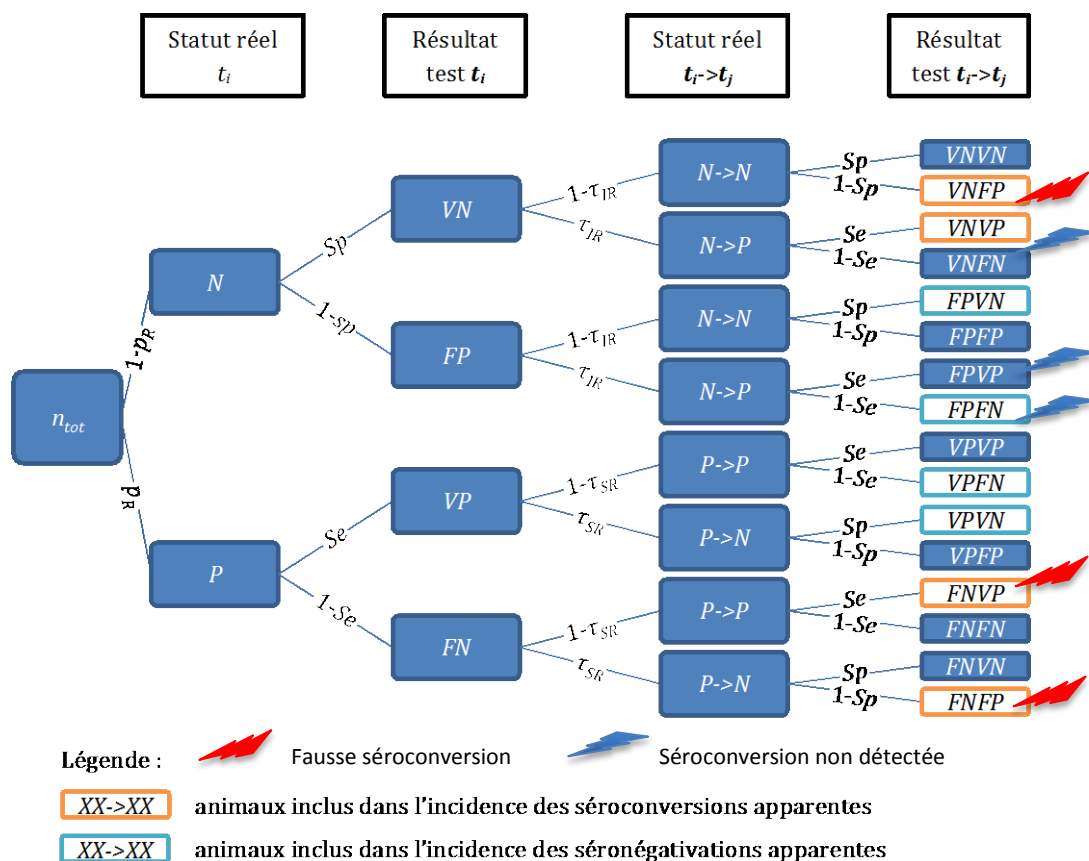
$$\tau_{SR} = \frac{SN_{obs}/n_{tot} + \tau_{IR} * (1 - Sp) * (Se + Sp - 1) - Se * (1 - Se) * p_R - (1 - Sp) * Sp * (1 - p_R)}{Se * (Se + Sp - 1)} \quad (Eq5)$$

De (Eq4) et (Eq5) on déduit le taux d'incidence réel (Eq6) :

$$\tau_{IR} = \frac{\frac{SC_{obs}}{n_{tot}} * Se + \frac{SN_{obs}}{n_{tot}} * (1 - Se) - Se * (1 - Se) * p_R - (1 - Sp) * Sp * (1 - p_R)}{(Se + Sp - 1)^2 * (1 - p_R)} \quad (Eq6)$$

Et de (Eq4) et (Eq6) on déduit le taux de séronégation réel (Eq7) :

$$\tau_{SR} = \frac{\frac{SC_{obs}}{n_{tot}} * Sp + \frac{SN_{obs}}{n_{tot}} * (1 - Sp) - Se * (1 - Se) * p_R - (1 - Sp) * Sp * (1 - p_R)}{(Se + Sp - 1)^2 * p_R} \quad (Eq7)$$



Abréviation	Définition	Valeur	Référence
$n_{tot}$	Nombre d'animaux-an suivis sur la période (avec au moins 2 résultats sérologiques)	Cf. Résultats	
$N$	Nombre d'animaux réellement séronégatifs à $t_i$	$n_{tot} \times (1 - p_R)$	
$P$	Nombre d'animaux réellement séropositifs à $t_i$	$n_{tot} \times p_R$	
$VN$	Nombre d'animaux vraiment négatifs à $t_i$ (l'animal est séronégatif et le résultat du test est négatif)	$n_{tot} \times (1 - p_R) \times Sp$	
$FN$	Nombre d'animaux faussement négatifs à $t_i$ (l'animal est séropositif mais le résultat du test est négatif)	$n_{tot} \times p_R \times (1 - Se)$	-
$N \rightarrow N$	Nombre d'animaux séronégatifs à $t_i$ et $t_j$	$n_{tot} \times (1 - p_R) \times Sp \times (1 - \tau_{IR})$	
$VN \rightarrow VN$	Nombre d'animaux séronégatifs à $t_i$ et $t_j$ avec des résultats négatifs à $t_i$ et $t_j$ (vrai négatif)	$n_{tot} \times (1 - p_R) \times Sp \times (1 - \tau_{IR}) \times Sp$	
$p_R$	prévalence réelle	Eq 3	
$Se$	sensibilité du test de détection des IgG	1 [0,91;1]	(Comtet 2010)
$Sp$	spécificité du test de détection des IgG	1 [0,9954;1]	
$\tau_{IR}$	taux d'incidence réel, c'est le taux de séroconversion (passage de séronégatif à séropositif)	Eq 6	
$\tau_{SR}$	taux de séronégativations réel (passage de séropositif à séronégatif)	Eq 7	

Figure 39. Arbre permettant d'estimer le taux d'incidence réel à partir de données de séroconversions obtenues avec un test sérologique imparfait

## B. Résultats

Le Tableau 25 présente les taux d'incidence calculés en fonction des performances (Sensibilité et Spécificité) du test ELISA de dépistage.

En tenant compte des performances attendues du test (Comtet, 2010; Kortekaas et al., 2013), le taux d'incidence reste faible et stable, avec une variation toujours comprise entre 0 et 3% de 2010 à 2013. Dans le cas d'un test moins sensible ou spécifique que prévu, le taux de séroconversion réel serait inférieur au taux d'incidence observé (cf. Tableau 25).

Tableau 25. Calcul du taux d'incidence réel corrigé par les différentes valeurs possibles de sensibilité et de spécificité

	Période de temps considérée			
	2010 - A	A - B	B - C	C - D
$\tau_{I_{obs}}$ [IC 95%]	2,9% [1,0;5,8]	2,3% [0,5;7,5]	2,0% [0,5;5,0]	2,1% [0,4;6,2]
$\tau_{IR}$ (Se=SP=100%)	2,99%	2,3%	2,0%	2,1%
$\tau_{IR}$ (si Se=91%)	0,5%	1,3%	0,9%	1,1%
$\tau_{IR}$ (si Sp=99,54%)	3,0%	2,2%	1,8%	1,9%
$\tau_{IR}$ (si Se= 91% Sp=99,54%)	0,0%	0,8%	0,3%	0,6%

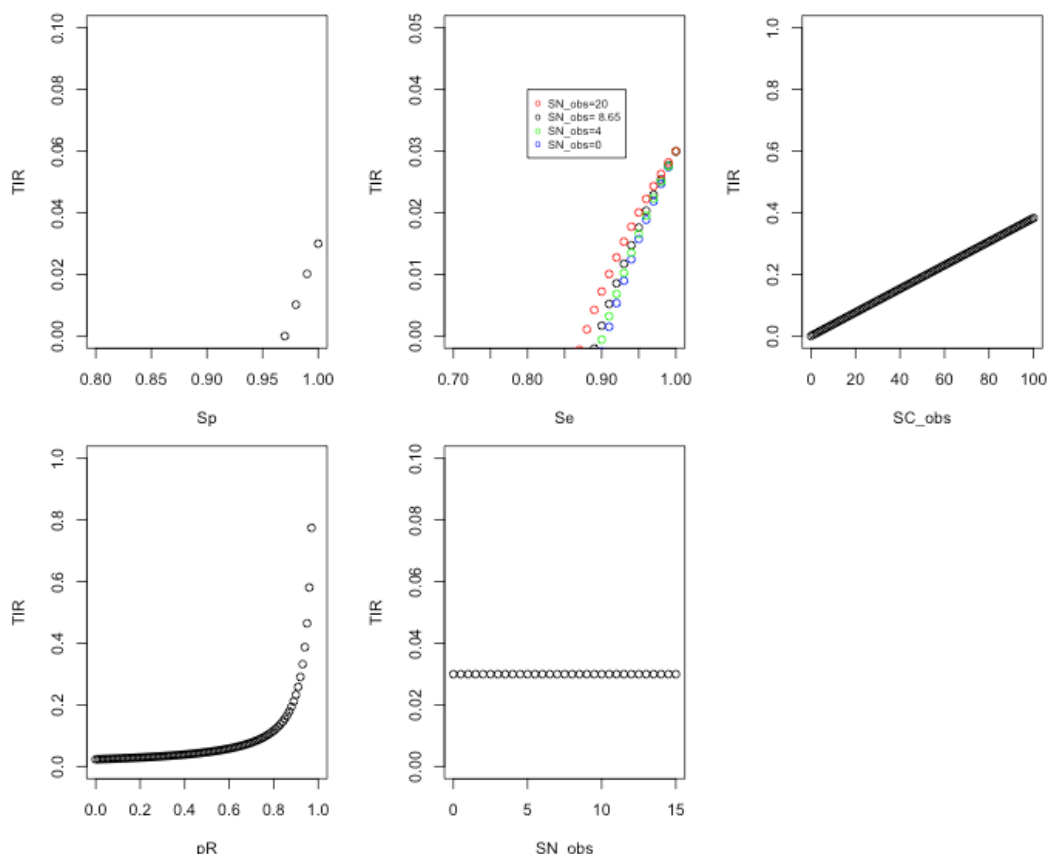


Figure 40. Evolution du taux d'incidence réel (TIR) en fonction de la valeur de chacun des différents paramètres (Sp=spécificité, Se= sensibilité, SC\_obs=nombre de séroconversions observées, pR=prévalence réelle, SN\_obs=nombre de séronégativations observées)

## ANNEXE III : Chapitre II - Fiche de prélèvement SESAM pour les déclarations d'avortements pour les années 2012-2013

N° fiche : .....

### PRELEVEMENTS SESAM

Nom de l'éleveur : Adresse de l'éleveur : ..... ..... Tel : ..... Site d'élevage concerné : ..... Point GPS du prélèvement : <i>alt (en m)</i> ..... <i>Lat (en dd)</i> : ..... <i>Long</i> : ..... N° IPG : FR 976.....	N° ADEM-GESAM : .....  Nom du vétérinaire : ..... Date de prélèvement : .....  Espèce : BV <input type="checkbox"/> CP <input type="checkbox"/> OV <input type="checkbox"/> N° de boucle : .....
---	--

**Motif :**

Avortement (tous les élevages) : 4 tubes secs + avorton (+2 frottis si élevage sentinelle)

« Syndrome grippal » (tous les élevages) : 2 tubes secs + 1 tube EDTA

Maladies à tiques (uniquement dans les élevages sentinelle) : 2 tubes secs + 2 frottis

Autre : .....

**Symptômes :** .....

.....

**Température :** .....

**Si avorton, stade de gestation :** ..... **Malformation :** .....

**Traitements entrepris :** .....

.....

<b>Epidémiologie :</b> Nombre de cas dans l'élevage : ..... Sexe : M <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> Age approximatif : ..... Type racial : ..... Présence de nombreuses tiques : oui <input type="checkbox"/> non <input type="checkbox"/>	<b>Prélèvements :</b> Prise de sang tube sec ..... <input type="checkbox"/> PS tube EDTA ..... <input type="checkbox"/> Frottis ..... <input type="checkbox"/> Avorton ..... <input type="checkbox"/> Conservation avec pains de glace ..... <input type="checkbox"/>
--	--

**Date de réception ADEM :** ..... **Etat de conservation :** .....

**Date de mise à -80°C :** .....

**Date d'envoi :** ..... **Laboratoire :** .....

Laure : 06.39.€

**ANNEXE III bis : Chapitre II - Fiche de prélèvement SESAM pour la surveillance sentinelle**

DIRECTION DES SERVICES VÉTÉRINAIRES  
**COMPTE RENDU D'EXAMEN SÉROLOGIQUE** N° **01913** F°

EXPLOITANT N° CHEPTEL [redacted]  
 NOM - PRÉNOM [redacted]  
 LIEU-DIT [redacted]  
 COMMUNE [redacted]

MOTIF DE L'EXAMEN				ANALYSES DEMANDÉES																																	
<input type="checkbox"/>	PROPHYLAXIE TOTALE	<input type="checkbox"/>	BRUCELLOSE BOVINE	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	BRUCELLOSE CAPRINE	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	BRUCELLOSE OVINE	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	LEUCOSE (INDIVIDUELLE)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	LEUCOSE (MÉLANGÉ)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	IBR (INDIVIDUELLE)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	IBR (MÉLANGÉ)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	IBR (MÉL. ET IND. SUR MÉL.POSITIF)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	AUJESZKY (INDIVIDUELLE)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	AUJESZKY (MÉLANGÉ)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	AUTRE 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	AUTRE 2	<input type="checkbox"/>

*Carber*

Adh. GDS		BOVIN		PORCIN		Sélectionneur			
<input type="checkbox"/>	OUI	<input type="checkbox"/>	Allaitant	<input type="checkbox"/>	Laitier	<input type="checkbox"/>	Multiplicateur	<input type="checkbox"/>	Naisseur
<input type="checkbox"/>	NON	<input type="checkbox"/>	Engraisseur	<input type="checkbox"/>	Mixte	<input type="checkbox"/>	Engraisseur	<input type="checkbox"/>	Naisseur Eng.
<input type="checkbox"/>	NON	<input type="checkbox"/>	Ovin	<input type="checkbox"/>	Caprin	<input type="checkbox"/>	Engraisseur	<input type="checkbox"/>	Naisseur Eng.

VÉTÉRINAIRE SANITAIRE		ANIMAUX ÉPROUVÉS									
Date prélèvement	NOM N° [redacted]	Signature	BRUCEL.	LEUC.	IBR/AUJ*	AUTRE 1	AUTRE 2	LEUC.	IBR/AUJ*	AUTRE 1	AUTRE 2
Date réception Labo		Signature Directeur Labo	NBRE TOTAL								
Date résultat Labo			NÉG.								
			NON NÉG.								

N° IDENTIFICATION DE L'ANIMAL		N° LIGNE	N° D'IDENTIFICATION DU PRÉLÈVEMENT	LEUCOSE		BRUCELLOSE			IBR/AUJ*		AUTRE 1		AUTRE 2
NATIONAL	TRAVAIL			MÉLANGÉ	IND IDG	ELI	EAT	FC	CONC	Mél.	Ind.	Mél.	Ind.
	37037	1				neg							
	34993	2				neg							
	00105	3				neg							
	34994	4				neg							
	37038	5				neg							
	32062	6				neg							
	05534	7				neg				AC			
	34992	8				neg							
	37088	9				neg							
	08561	10				neg							
	21543	11				neg							
	34996	12				neg							
	13326	13				neg							
		14											
		15											
		16											
		17											
		18											
		19											
		20											

# ANNEXE IV : Chapitre II - Poster de présentation du SESAM (Dommergues et al., 2014b)



## SESAM: Animal Health Surveillance in Mayotte in 2012-2013

L Dommergues<sup>1,2,4\*</sup>, L Cavalerie<sup>1,2,3</sup>, M Pannequin<sup>4</sup>, A-M Duson<sup>1,2,4</sup>, P Mérot<sup>5</sup>, C Cêtre-Sossah<sup>1,2</sup>, E Cardinale<sup>1,2</sup>

1. CIRAD UMR CMAEE F-97491 Sainte-Clotilde, La Réunion, France
  2. INRA, UMR1309 CMAEE, F-34398 Montpellier, France
  3. Université de la Réunion, F-97715 Saint-Denis, La Réunion, France
  4. GDS Mayotte - Coopérative Agricole Des Éleveurs Mahorais (GDS976-CoopADEM), Coconi, Mayotte, France
  5. Service de l'Alimentation de la Direction de l'Agriculture et de la Forêt, Mayotte, France
- \*ldommergues@gmail.com

### Longitudinal survey on RVF

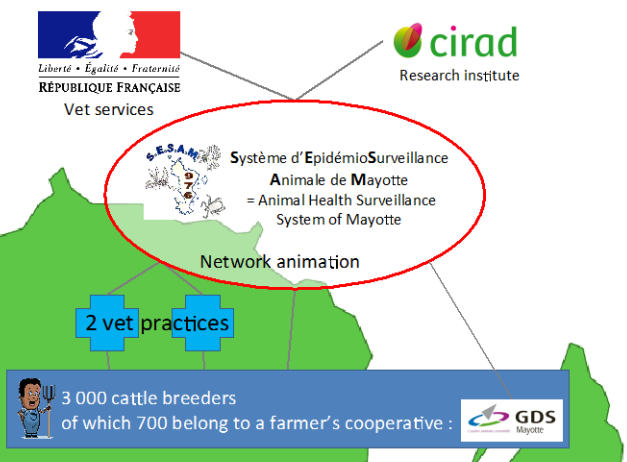
**Method :**

- 30 randomly sampled farms (▲), 100 cattle
- 3 series of blood samples for ELISA\*\* on all cattle

**Results :**

#### RVF : time trends

**Herd seroprevalence :**  
66% in 2012 (95% CI [48;83]), 52% in 2013 (95% CI [33;70])



### "Flu-like" syndrome

- 11 samples from cattle with nasal discharge + fever +/- diarrhoea +/- lameness collected by private vets
- ▶ 1 EHDV positive (PCR)
- 52 samples from the 2013 RVF cattle survey
- ▶ 34 EHD positives (ELISA\*\*)

### Inventory of digestive parasites in cattle

**Method :**

- 192 stool examinations, 28 cultures and 18 necropsies

**Results:**

Nematodes	<i>Strongyloides papillosus</i>	
	Digestive tract strongyles :	
	- <i>Nematodirus</i> spp.	
	- <i>Cooperia</i> spp.	
Trematoda	- <i>Haemonchus</i> spp.	
	- <i>Bunostomum</i> spp.	
	<i>Trichouris</i> spp.	
	<i>Toxocara vitulorum</i>	
Other	- <i>Paramphistomum</i> spp.	
	- <i>Dicrocoelium hospes</i>	
	- <i>Eurytrema pancreaticum</i>	
	- <i>Schistosoma</i> spp.	
	Coccidia	

### Serological cross-sectional survey on abortive diseases

**Method :**

- Sheep diseases : 12 farms, 98 sheep
- Cattle diseases : 30 farms, 100 cattle from RVF longitudinal survey
- Serological tests : ELISA \*\*

**Results :**

test	% positive samples	95% confidence interval (CI)
Visna-Maedi	1.1	[0 ; 3.2]
PPR*	0	[0 ; 3.1]
BTV*	21.3	[12.8 ; 29.7]
EHD*	0	[0 ; 3.1]
Q Fever	5.3	[0.7 ; 9.9]
SBV*	0	[0 ; 3.1]
Neospora	3	[0 ; 7]
IBR*	0	[0 ; 3.1]

test	% positive samples	CI
Chlamydiosis	9.7	[4 ; 15]
Q Fever	5.3	[0 ; 12]
Neospora	2.6	[0 ; 6]
IBR	7.7	[0 ; 18]

\* PPR : Peste des Petits Ruminants . BTV : Bluetongue Virus. EHD : Epizootic Haemorrhagic Disease. SBV : Schmallenberg Virus. IBR : Infectious Bovine Rhinotracheitis

### Main findings

- Rift Valley Fever : decreasing seroprevalence, enzootic persistence
- Epizootic Haemorrhagic Disease : evidence of circulation among cattle

### Limits

- None of the studied disease was observed by the farmers included in the survey (and vice versa) ! Either the impact of these diseases in Mayotte is low or farmers are not able to identify them.
- Is SESAM able to detect emergence of a disease and react?

### Outlook

- Be prepared for an emergency response
- Improve farmer's involvement in SESAM through participatory epidemiology

\*\* ELISA kits used : RVF: competitive ID-Screen IgG RVF ELISA (ID-Vet, Grabels, France). EHDV: LSVet Ruminant EHDV, Life Technologies, France. Q Fever: LSVet Ruminant QFever VET-EHDV, Life Technologies, France. Chlamydiosis: LSVet Ruminant Chlamydiosis ELISA-CHIAM, Life Technologies. Neospora: LSVet Ruminant Neospora caninum ELISA-Neospora, Life Technologies. IBR: LSVet Bovine IBR Screening, Life Technologies  
 Acknowledgements : Dr Schuler, Dr Doméon, Dr Bouyer, M. Slaka, the farmers and butchers of Mayotte

## ANNEXE V : Chapitre II - Budget partiel détaillé des composantes du dispositif de surveillance de la FVR du SESAM 2012-2013

	Libellé (source d'information)	Prix de base	Quantité	COMPOSANTE 1 Surveillance programmée (sentinelles sérologiques)			COMPOSANTE 2 Surveillance événementielle (avortements)					
				% affecté à la composante 1	Total min	Total	Total max	% affecté à la composante 2	Total min	Total	Total max	
I n v e s t i s s e m e n t s	ALGECO (compta ADEM NIP 2012)	14 333,00 €	1,5 à 80%* pour le SESAM FVR	96% [94;98]	12 934 €	16 512 €	20 227 €	4% [2;6]	275 €	688 €	1 238 €	
	INSTALLATION algéco (compta ADEM NIP 2012)	1 797,61 €	1 à 80%* pour le SESAM FVR	96% [94;98]	1 081 €	1 381 €	1 691 €	4% [2;6]	23 €	58 €	104 €	
	FRIGO (compta ADEM NIP 2012)	299,00 €	1	96% [94;98]	281 €	287 €	293 €	4% [2;6]	6 €	12 €	18 €	
	CONGELATEUR -80° (facture)	7 649,20 €	1	96% [94;98]	7 190 €	7 350 €	7 496 €	4% [2;6]	153 €	300 €	459 €	
	GROUPE ELECTROGENE + installation du déclenchement automatique (facture)	6 403,73 €	1	96% [94;98]	6 020 €	6 153 €	6 276 €	4% [2;6]	128 €	251 €	384 €	
	SPECTROPHOTOMETRE (facture Cirad)	7 447,00 €	1	100%		7 447 €						
	PSM (hotte) + étuve (facture Cirad)	7 133,33 €	1	96% [94;98]	6 705 €	6 854 €	6 991 €	4% [2;6]	143 €	279 €	428 €	
	ORDINATEUR (cf facture +75% SESAM FVR)	580,00 €	utilisé à 80% pour le SESAM FVR	96% [94;98]	349 €	446 €	546 €	4% [2;6]	7 €	18 €	33 €	
	CLIMATISATION (facture 2013)	599,00 €	utilisé à 80% pour le SESAM FVR	96% [94;98]	360 €	460 €	564 €	4% [2;6]	8 €	19 €	35 €	
	AMENAGEMENT labo (compta ADEM NIP 2012)	3 374,00 €	1	96% [94;98]	3 172 €	3 242 €	3 307 €	4% [2;6]	67 €	132 €	202 €	
	GLACIERE (compta ADEM NIP 2012)	24,00 €	1	96% [94;98]	23 €	23 €	24 €	4% [2;6]	0 €	1 €	1 €	
	CENTRIFUGEUSE (internet, 50% pour le SESAM FVR)	1 561,12 €	50%*	96% [94;98]	587 €	749 €	918 €	4% [2;6]	12 €	31 €	56 €	
	DEWAR (estimation 10% pour le SESAM FVR)	5 000,00 €	10%*	96% [94;98]	376 €	480 €	588 €	4% [2;6]	8 €	20 €	36 €	
<b>TOTAL INVESTISSEMENTS</b>					<b>46 525 €</b>	<b>51 384 €</b>	<b>56 366 €</b>		<b>831 €</b>	<b>1 808 €</b>	<b>2 995 €</b>	
P e r s o n n e l	ANIMATEUR (estimation temps passé par dispositif)	2300 €/mois	20 mois à 80%* sur le SESAM FVR	96% [94;98]	27 674 €	35 328 €	43 277 €	4% [2;6]	589 €	1 472 €	2 650 €	
	VETERINAIRES Visites avortement (Arrêté préfectoral n°2014-011/DAAF Mayotte, estimation des vétérinaires: 1visite à 3AMV + 2PS/visite à 0,4 AMV/PS + en moyenne 40kmA/R à 1/12 AMV/km )	13,85 €	41 visites vétérinaires pour un équivalent de 292 AMV*					100%	3 241 €	4 051 €	4 861 €	
	TECHNICIEN (compta ADEM NIP 2012 et 2013)	9 646,29 €	1	100%		9 646 €						
	DOCTORANT Appui design-analyse des données (Estimation temps passé par dispositif)	1 700,00 €	7,5 mois	90% [85;95]	10 838 €	11 475 €	12 113 €	10% [5;15]	638 €	1 275 €	1 913 €	
	STAGIAIRE (appui création BDD SESAM)	436,50 €	1 mois	96% [94;98]	410 €	419 €	428 €	4% [2;6]	9 €	17 €	26 €	
	SUPERVISION chercheur sénior CIRAD pour le dispositif global (non chiffré car équivalent entre les deux dispositifs)			50%				50%				
	<b>TOTAL Personnel</b>					<b>48 568 €</b>	<b>56 869 €</b>	<b>65 463 €</b>		<b>4 476 €</b>	<b>6 815 €</b>	<b>9 449 €</b>
	<b>TOTAL FONCTIONNEMENT</b>					<b>18 983 €</b>	<b>20 037 €</b>	<b>21 167 €</b>		<b>636 €</b>	<b>924 €</b>	<b>1 261 €</b>
F o n c t i o n n e m e n t	CARBURANT et ENTRETIEN VEHICULES (compta ADEM NIP 2012 et 2013)	2407,85 €	à 80%* sur le SESAM FVR	96% [94;98]	2 130 €	2 722 €	3 331 €	4% [2;6]	45 €	111 €	204 €	
	CRYOTUBES par 1000 (F.00577 HF aout 2012)	189,00 €	5	96% [94;98]	888 €	908 €	926 €	4% [2;6]	19 €	37 €	57 €	
	CONES par 1000 (pointes F.00577 HF aout 2012)	29,00 €	3	96% [94;98]	82 €	84 €	85 €	4% [2;6]	2 €	3 €	5 €	
	EPENDORF par 1000 (F.00577 HF aout 2012)	12,30 €	5	100%			62 €					
	BOITES (devis 2014 HF)	4,06 €	30	96% [94;98]	115 €	117 €	119 €	4% [2;6]	2 €	5 €	7 €	
	MICROPIPETTES (F.00577 HF aout 2012)	1 160,00 €	1 lot	96% [94;98]	1 090 €	1 115 €	1 137 €	4% [2;6]	23 €	45 €	70 €	
	TUBE (Facture 20546 4/05/2012)	0,08 €	5000*	100%	320 €	400 €	480 €					
	AIGUILLES (boîte de 100) (Facture 20546 4/05/2012)	6,66 €	22*	100%	117 €	147 €	176 €					
	GANTS (Facture 20546 4/05/2012)	3,49 €	5	100%		17 €						
	PORTOIRS à tubes (Facture 20546 4/05/2012)	1,92 €	2	100%		4 €						
	PORTE TUBE (Facture 20546 4/05/2012)	0,07 €	25	100%		2 €						
	KIT ELISA IdVet FVR IgG (devis OD702682)	1 771,00 €	3	100%		5 313 €						
	PCR (Cirad)	19,50 €	16 (7 organes + 9 pools de serum)					100%		312 €		
	MANCHE autopsie (Facture 20546 4/05/2012)	3,32 €	2					100%		7 €		
	LAMES autopsie (Facture 20546 4/05/2012)	11,83 €	4 autopsies par le SESAM, 2 boîtes de 10					100%		24 €		
	GANTS (Facture 20546 4/05/2012)	3,49 €	4 autopsies par le SESAM, 1 boîte de 100					100%		3 €		
	FRET avion et assurance (F.00577 aout 2012 + 20546 4/05/2012)		entre 10 et 50% des commandes*		456 €	570 €	684 €		21 €	27 €	32 €	
DEWARS	1 550,00 €	5	96% [94;98]	7 285 €	7 440 €	7 595 €	4% [2;6]	155 €	303 €	465 €		
TELEPHONE Cirad : 40 euros/mois x 12 mois	480,00 €	à 80%* sur le SESAM FVR	96% [94;98]	289 €	369 €	452 €	4% [2;6]	6 €	15 €	28 €		
BILLET AVION missions Cirad Réunion	400,00 €	2	96% [94;98]	752 €	769 €	784 €	4% [2;6]	16 €	32 €	48 €		
<b>TOTAL FONCTIONNEMENT</b>					<b>18 983 €</b>	<b>20 037 €</b>	<b>21 167 €</b>		<b>636 €</b>	<b>924 €</b>	<b>1 261 €</b>	
<b>COUT TOTAL</b>					<b>114 076 €</b>	<b>128 289 €</b>	<b>142 996 €</b>		<b>5 943 €</b>	<b>9 547 €</b>	<b>13 705 €</b>	
Nb éch traités // nb d'avortement						1963			41			
Nb de séroconversions // RT PCR positive						18			0			
COUT/échantillon traité					58 €	65 €	73 €		145 €	233 €	334 €	
COUT/détection FVR					6 338 €	7 127 €	7 944 €		> 5 943 €	> 9 547 €	> 13 705 €	
COUT TOTAL hors investissements					67 551 €	76 906 €	86 630 €		5 111 €	7 739 €	10 710 €	
Nb éch traités // nb d'avortement						1963			41			
Nb de séroconversions // RT PCR positive						18			0			
COUT/échantillon traité					34 €	39 €	44 €		125 €	189 €	261 €	
COUT/détection FVR					3 753 €	4 273 €	4 813 €		> 5 111 €	> 7 739 €	> 10 710 €	

## ANNEXE V bis : Chapitre II - Budget partiel détaillé pour estimer l'efficiency des composantes du dispositif de surveillance de la FVR du SESAM

	Libellé (source d'information)	Prix de base	Quantité	COMPOSANTE 1 Surveillance programmée (sentinelles sérologiques)			COMPOSANTE 2 Surveillance événementielle (avortements)				
				% (ou quantité) affecté à la composante 1	Total min	Total	total max	% (ou quantité) affecté à la composante 2	Total min	Total	Total max
P e r s o n n e l	ANIMATION SESAM (vétérinaire épidémiologiste en CDI)	3500 € / mois	10%* sur 2 ans	90% [85;95]	5 712 €	7 560 €	9 576 €	10% [5;15]	336 €	840 €	1 512 €
	TECHNICIEN (ramassage des prélèvements dans les cliniques + gestion des prélèvements et saisies des données dans la BDD SESAM)	2750 €/mois		1h30 de déplacement pour ramassage des tubes 1/semaine pendant 6 mois + 15 minutes de manipulation au laboratoire et de saisie des données par plvt pour 1963 plvts => 540h soit 3,5 mois de travail*	7 700 €	9 625 €	11 550 €	1h ramassage / avortement + 15 minutes de BDD/plvt => 61,5H = 0,4 mois de travail*	880 €	1 100 €	1 320 €
	VETERINAIRES Prophylaxie (Arrêté préfectoral n°2014-011/DAAF Mayotte, 3 AMV/visite, 2PS/visite à 0,4 AMV/PS + 40kmA/R en moyenne* à 1/12 AMV/km) 1 visite de prophylaxie/an servira aux PS aussi et 1 visite supplémentaire devra être payée intégralement	1 AMV = 13,85 €		50 élevages visités 4 fois + 10 PAZEM 1 fois : PS sur 50 élevages + 110 x (visites + plvts)	10 960 €	11 976 €	12 991 €				
	VETERINAIRES Visites avortement (Arrêté préfectoral n°2014-011/DAAF Mayotte, estimation des vétérinaires: 1visite à 3AMV + 2PS/visite à 0,4 AMV/PS + 1,5 AMV/autopsie avorton + plvts foie et rate à 0,5 AMV/plvt + 40kmA/R en moyenne* à 1/12 AMV/km)	1 AMV = 13,85 €						41 visites	1 948 €	1 976 €	2 003 €
	EPIDEMIOLOGISTE (Post-doctorant: préparation/analyses/restitution des données (estimation séroprévalence))	2500 € / mois	2 mois *	96% [94;98]	3 760 €	4 800 €	5 880 €	4% [2;6]	80 €	200 €	360 €
SUPERVISION chercheur sénior CIRAD pour le dispositif global (non chiffré car équivalent entre les deux dispositifs)											
<b>TOTAL Personnel</b>					<b>28 132 €</b>	<b>33 961 €</b>	<b>39 997 €</b>	<b>3 244 €</b>	<b>4 116 €</b>	<b>5 195 €</b>	
F o n c t i o n n e m e n t	CARBURANT et ENTRETIEN VEHICULES (ramassage prise de sang)	0,59 €/km		distance tournée ADEM-cliniques = 40km 32 tournées	606 €	758 €	909 €	distance moyenne clinique vétérinaire-élevage = 35 km A/R* 41 trajets	677 €	847 €	1 016 €
	CRYOTUBES par 1000 (F.00577 HF aout 2012)	189,00 €	5 lots	96% [94;98]	888 €	907 €	926 €	4% [2;6]	19 €	38 €	57 €
	CONES par 1000 (pointes F.00577 HF aout 2012)	29,00 €	3 lots	96% [94;98]	82 €	84 €	85 €	4% [2;6]	2 €	3 €	5 €
	EPENDORF par 1000 (F.00577 HF aout 2012)	12,30 €	5*	100%	49 €	62 €	74 €				
	BOITES (devis 2014 HF)	4,06 €	30 boîtes	96% [94;98]	115 €	117 €	119 €	4% [2;6]	2 €	5 €	7 €
	MICROPIPETTES (F.00577 HF aout 2012)	1 160,00 €		96% [94;98]	1 090 €	1 114 €	1 137 €	4% [2;6]	23 €	46 €	70 €
	GANTS (Facture 20546 4/05/2012)	3,49 €	2 boîtes	96% [94;98]	7 €	7 €	7 €	4% [2;6]	0 €	0 €	0 €
	PORTOIRS à tubes (Facture 20546 4/05/2012)	1,92 €	2,00 €	96% [94;98]	4 €	4 €	4 €	4% [2;6]	0 €	0 €	0 €
	FRET avion et assurance (F.00577 aout 2012 + 20546 4/05/2012)	25% [10-50%] des commandes			223 €	573 €	1 176 €		5 €	23 €	70 €
	ANALYSE SERO (Cirad Réunion) PCR (Cirad)	7,5€* 19,50€*		1963	11 778 €	14 723 €	17 667 €	41	640 €	800 €	959 €
FRAIS d'ENVOI des échantillons à la Réunion			1 colis de 3 kg/mois à 15,60€ *	300 €	374 €	449 €	1 colis de 1kg/avortement à 10,90€ *	358 €	447 €	536 €	
<b>TOTAL Fonctionnement</b>					<b>15 142 €</b>	<b>18 721 €</b>	<b>22 554 €</b>	<b>1 726 €</b>	<b>2 209 €</b>	<b>2 721 €</b>	
B I L A N	<b>COÛT TOTAL OPTIMISE</b>				<b>43 274 €</b>	<b>52 682 €</b>	<b>62 551 €</b>	<b>4 970 €</b>	<b>6 325 €</b>	<b>7 916 €</b>	
	Nb éch // nb d'avortements					1963		41			
	COÛT OPTIMISE/échantillon traité				22 €	27 €	32 €	121 €	154 €	193 €	
	RAPPEL COÛT ESTIME /échantillon traité				34 €	39 €	44 €	125 €	189 €	261 €	
<b>INDICATEUR efficacité = optimisation des ressources (cout OPTIMISE/cout réel ESTIME)</b>					<b>64%</b>	<b>69%</b>	<b>72%</b>	<b>97%</b>	<b>82%</b>	<b>74%</b>	

\* +/-20%

PS : prise de sang

éch : échantillon

plvt : prélèvement



## ANNEXE VI : chapitre IV - Etape 3 : Retranscription de la description de l'impact des cinq maladies les plus importantes lors des trois premières réunions

- Réunion n°1

Maladies	Critères
Diarrhée	<ul style="list-style-type: none"> <li>• liée à l'alimentation</li> <li>• amaigrissement / problème de digestion</li> <li>• « ventre gonflé »</li> <li>• effort d'affouragement pour rien</li> <li>• « saleté »</li> </ul>
Mortalité (cause inconnue)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• coût : perte d'argent +++</li> <li>• le fait de ne pas savoir, impossibilité de prévoir</li> </ul>
Grippe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• « peut entrainer la mort »</li> </ul>
Parasites internes / mouches / tiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• « perturbe les repas »</li> <li>• animal maigrir / perte de poids</li> <li>• risque de mort</li> </ul>
Mammite	<ul style="list-style-type: none"> <li>• surtout les animaux croisés</li> <li>• le lait diminue</li> <li>• le veau grandit mal</li> </ul>
Avortement / mortalités néonatales / malformations	<ul style="list-style-type: none"> <li>• perte énorme</li> <li>• « une année de travail perdue »</li> </ul>

- Réunion n°2

Maladies	Critères
Chiens errants	<ul style="list-style-type: none"> <li>• « les chiens mangent le travail d'une année », « on travaille tous les jours, du matin au soir et le chien vient détruire tout notre travail »</li> <li>• perte économique</li> <li>• pas de médicament pour soigner cette « maladie », pas de remède</li> </ul>
Charbon	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mort subite</li> <li>• « on ne sait pas le reconnaître »</li> <li>• « on ne peut plus vendre la viande après »</li> <li>• perte économique</li> <li>• à la question « est ce que ça peut se soigner ? » : « peut se soigner avant, sinon c'est trop tard »</li> </ul>
Dermatophilose	<ul style="list-style-type: none"> <li>• fréquent, surtout en saison des pluies</li> <li>• « ça peut tuer l'animal »</li> <li>• à la question « est-ce que ça peut se soigner ? » : oui</li> </ul>
Mammites	<ul style="list-style-type: none"> <li>• à cause des tiques</li> <li>• « quand le veau meurt, ça peut faire une mammite »</li> <li>• « ça fait mal à la vache »</li> <li>• problème pour la lactation suivante : le veau ne pourra pas téter</li> <li>• à la question « est ce que ça peut se soigner ? » : oui</li> </ul>

ANNEXES

Parasites internes – <i>Mjongo</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ne grossit pas, même avec de l'aliment, perte de poids</li> <li>• boit mal</li> <li>• à la question « est ce que ça peut se soigner ? » : oui</li> </ul>
--	---

• Réunion n°3 :

Maladies	Critères
Charbon	<ul style="list-style-type: none"> <li>• « ça tue »</li> <li>• « quand ça arrive on n'a pas le temps de faire quelque chose »</li> <li>• la viande n'est pas mangeable</li> </ul>
<i>Mjongo</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• perte d'appétit</li> <li>• l'animal ne grossit pas</li> <li>• « gros ventre ». D'autres éleveurs ne sont pas d'accord et disent qu'au contraire ça fait un ventre plat</li> </ul>
<i>Pambazi</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• « ça les gêne, ça les embête, ça les dérange »</li> <li>• « ça fait des plaies, la vache est agitée »</li> <li>• « ça ne grossit pas »</li> <li>• « ça suce le sang »</li> </ul>
Mouches	<ul style="list-style-type: none"> <li>• « ça embête la vache : elle n'a pas le temps de manger »</li> <li>• la vache est tellement agitée qu'elle peut se blesser ou blesser la personne qui s'en occupe</li> </ul>
Fièvre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ne mange pas</li> <li>• elle tremble, elle a froid, elle peut mourir</li> <li>• poil piqué =&gt; « ne protège plus des insectes, ils peuvent piquer directement »</li> </ul>

ANNEXE VII : Poster ICAHS 2014



# Rift Valley Fever surveillance in Mayotte



## Tracking an invisible disease from the society point of view



L. Cavalerie<sup>1,2,3,4,5</sup>, L. Dommergues<sup>1,2,3,6</sup>, E. Chauvet<sup>1,2,3,7</sup>, M. Pannequin<sup>8</sup>, C. Cêtre-Sossah<sup>1,2,3</sup>, E. Tillard<sup>9</sup>, M. Figuié<sup>9</sup>, E. Cardinale<sup>1,2,3</sup>.  
\*lisa.cavalerie@gmail.com

1. CIRAD, plateforme de recherche CYROI, F-97400 Sainte Clotilde, La Réunion, France  
2. CIRAD, UMRI CMAEE, F-97400 Sainte Clotilde, La Réunion, France  
3. INRA, UMRI 1209 CMAEE, F-34318 Montpellier, France  
4. AgroParisTech, F-75005 Paris, France  
5. Université de la Réunion, F-97715 Saint-Denis, La Réunion, France

6. GDS Mayotte - Coopérative Agricole Des Eleveurs Mahorais, F-97600 Cocconi, Mayotte, France  
7. Institut d'Etude Politique de Lyon, F-69000 Lyon, France  
8. CIRAD, UMRI SELMET, F-97410, La Réunion, France  
9. CIRAD, UMRI MOISA, F-34318 Montpellier, France

### RVF History in Mayotte

- 2004** • Earliest proof of IgG against RVFv presence in cattle sera (Cetre 2012)
- 2007-08** • Epidemics in Eastern Africa  
• 1<sup>st</sup> human RVF case detected in Mayotte  
• 10 more human RVF cases were found retrospectively (2 strains were genetically close to the east-african strain) (Sissoko 2009, Cetre 2012)
- 2009** • Comoros islands seroprevalence study : 32% [28.6 ; 36.9] of ruminants with IgG against RVFv (Roger 2011)
- 2010-11** • Seroconversions in ruminants in Mayotte and Union of Comoros (incidence= 12.9% [9.6-16.2] and 17.54% [8.95 - 26.14]) (Lernout 2013, Roger in prep.)  
• RVFv RT-PCR positive on an aborted goat (Maquart 2013)
- 2012-13** • 1 human case in Grande Comore. 1 human case in Mayotte



### Cohort study: How silent was RVF circulation between 2010-2013 ?

**Method :**  
• RVF ELISA<sup>a</sup> on 24 farms sampled in 2010 and 2013  
• 2012 to 2013 : longitudinal RVF ELISA<sup>a</sup> survey on 50 farms (420-557 ruminants)  
• Comparison with the abortion notifications (compulsory in France)

	Mayotte		Farms with longitudinal serological survey	
	Number of notified abortion	Number of notified abortion (number of farms in the survey)	Did aborted ruminant sero-converted ?	Number of sero-conversion in the farms with/without abortion
2010	8	1(17)	No	***
2011	12	4 (17)	No	***
2012	24	6 * (50)	***	0 / 3
2013	28	2 (50)	***	0 / 3
2014**	9	1 (0)	***	0 / 3

**Results :**  
• Increase of abortion declaration (more awareness thanks to the cohort study? weather? Disease? Cattle selection ?)  
• so far no link between RVF status and abortion (ongoing analysis)



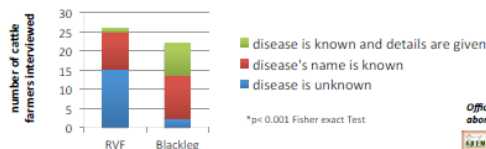
\* one abortion was not officially declared  
\*\* January & February  
\*\*\* ongoing analyses

### Knowledge, attitude and practice on Animal Health and RVF

**Method :**  
55 closed ended questionnaires on farmers representing Mayotte's farming diversity (modern, traditional and intermediate status based on a previous study (Tillard 2013) )



**Results :**  
• Farmers' knowledge on RVF and Blackleg\* :



**Attitude (perception)**  
- Abortions are due to lack of feed or accident (RVF is never cited)  
- RVF is never cited as a disease which happened in the herd

**Practice :**  
- No specific action against RVF  
- Passive adoption of Blackleg vaccination (Subsidized)  
- Health management  
• 42/55 farmers use preventive medicine regularly but only 23/41 called the vet last year  
• use of salt water and lemon as nutraceutical treatment (16/55)  
- At risk behaviour :  
• No control of animal movements (strong confidence for exchange between friends and family for breeding)  
• No protection for abortion or slaughter  
• Various burying and slaughtering places



### Health problems prioritization by focus groups

**Method :**  
• Focus groups in 4 different areas  
• Step 1 = Free listing of health problems by the group  
• Step 2 = Selection of the 5 "most important" health problems: every participant is given 5 voices  
• Step 3 = Description of the important criteria for these 5 problems  
• Step 4 = Matrix scoring of the health problems on 2 of these criteria (for example : frequency, economical loss)

Conducting focus groups sessions



**Results :**  
• 10 to 19 participants/focus group  
• FVR was mentioned only by one participant (n=78)

Step 2 : Proportion of votes received by the 5 most important health problems only per zone

Health Problem	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Mean
Ticks (Pambazi)	2,3%	10,9%	15,8%	19,3%	12,1%
Blackleg	4,5%	25,0%	0,0%	15,8%	11,3%
Internal parasites (Mjongo)	-	10,9%	17,3%	14,0%	10,6%
Mastitis	6,8%	12,5%	-	12,3%	7,9%
Dermatophilosis	2,3%	21,9%	-	5,3%	7,4%
Diarrhea	18,2%	-	9,8%	0,0%	7,0%
*Flu-like* syndrome	11,4%	9,4%	-	7,0%	6,9%
Abortion	2,3%	7,8%	-	10,5%	5,2%
Stray dogs	-	-	18,8%	-	4,7%
Sudden death	15,9%	-	-	-	4,0%
Fever	-	-	12,8%	-	3,2%

### Conclusions

- RVF has been circulating between 2004 and 2011
- Since 2011 : possible extinction or silent circulation?
- Impact seems very low : so far no seroconversion linked to abortion
- RVF information has been given (Radio, training, etc.) but farmers do not feel concerned
- Farmers know syndromes more than diseases (bias of owner/herder)

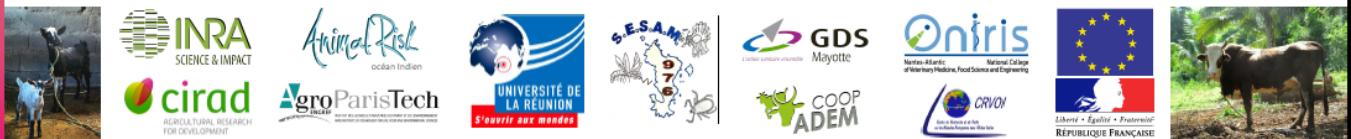
### Perspectives

- Increase the sensitivity of our surveillance  
⇒ risk based and syndromic (abortion) + participatory surveillance
- Clustering farmers on their knowledge, attitude and practices to match with economical type
- On-going serology and PCR to track RVF circulation

#### References:

Cêtre-Sossah, Catherine, Aurélie Pédriani, Hélène Guis, Céline Defernez, Michèle Boulay, Jacques Favre, Sébastien Girard, Eric Cardinale, et Emmanuel Albani. 2012. « Prevalence of Rift Valley Fever among Ruminants, Mayotte ». Emerging Infectious Diseases 18 (6). doi:10.3201/eid1806.111165. [http://www.cdc.gov/eid/article/18/6/111165\\_article.htm](http://www.cdc.gov/eid/article/18/6/111165_article.htm)  
Cêtre-Sossah, Catherine, Hervé Zeller, Marc Grandadam, Valérie Caro, Françoise Petrucci, Michèle Boulay, Eric Cardinale, et Emmanuel Albani. 2012. « Genome Analysis of Rift Valley Fever Virus, Mayotte ». Emerging Infectious Diseases 18 (5). doi:10.3201/eid1805.110994. [http://www.cdc.gov/eid/article/18/5/110994\\_article.htm](http://www.cdc.gov/eid/article/18/5/110994_article.htm)  
Lernout, Tine, Eric Cardinale, Maki Jago, Philippe Desjeux, Louis Collet, Betty Zimba, Emmanuel Tillard, Sébastien Girard, et Laurent Filéul. 2013. « Rift Valley Fever in Humans and Animals in Mayotte, an Endemic Situation? ». PLoS ONE 8 (9): e74292. doi:10.1371/journal.pone.0074192.  
Maquart, Marianne, Sarah Terremam, Jean-Michel Hiraux, Isabelle Legrain-Coffart, Catherine Cêtre-Sossah, Koussay Dellag, Eric Cardinale, et Hervé Pascalis. 2014. « Development of real-time RT-PCR for the detection of low concentrations of Rift Valley fever virus ». Journal of Virological Methods 195 (January): 90-99. doi:10.1016/j.jvmet.2013.10.001.  
Roger, Matthieu. 2011. « Rift Valley Fever in Ruminants, Republic of Comoros, 2009 ». Emerging Infectious Diseases 17 (7): 1319-1320. doi:10.3201/eid1707.130081.  
Tillard, Emmanuel, O Aubriot, Laura Balbarin, et David Berne. 2013. « Référentiel technique de l'élevage bovin mahorais ». Mayotte: CIRAD.  
Sissoko, Daouda, Claude Giry, Philippe Gabrre, Anouar Taramtala, François Pettreilli, Louis Collet, Eric D'Ortenzio, Philippe Renault, et Vincent Pierre. 2009. « Rift Valley Fever, Mayotte, 2007-2008 ». Emerging Infectious Diseases 15 (4): 569-570. doi:10.3201/eid1504.081945.

**Acknowledgements:** We thank Johnny Hoareau, Marina Béral, Jérôme Janelle, the technicians from CoopADEM and all the farmers who made this work possible



## Résumé

### **Titre : Persistance de la fièvre de la Vallée du Rift à Mayotte : surveillance, modélisation et perceptions**

La fièvre de la Vallée du Rift (FVR) est une zoonose due à un virus transmissible par une large variété de vecteurs. Au cours des quinze dernières années, elle a rendu malades des dizaines de milliers de personnes, entraîné des centaines de décès humains et provoqué la mort de plus de 100 000 ruminants domestiques en Afrique et dans la péninsule arabique. Suite à la découverte de la présence du virus à Mayotte, les autorités sanitaires, le Cirad (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) et les éleveurs ont créé en 2009 un système de surveillance en santé animale, le SESAM. L'objectif de cette thèse était de faire un état des lieux de la situation épidémiologique de la FVR chez les ruminants à Mayotte en 2012-2013, d'évaluer les perspectives de persistance de la maladie et d'étudier les perceptions et les priorités des éleveurs vis-à-vis de cette maladie.

En 2012, le fonctionnement du dispositif de surveillance de la FVR a été révisé avec un renouvellement partiel du groupe d'éleveurs sentinelles et un renforcement de la surveillance événementielle basée sur la recherche systématique de la FVR en cas d'avortement ou de mortalité anormale. Une baisse continue de la séroprévalence de 2010 à 2013 a été observée. En 2012-2013, le taux d'incidence est resté stable avec environ deux séroconversions pour 100 animaux-ans. Ce taux est très inférieur au taux d'incidence de 18% observé en 2011. Le virus de la FVR n'a été détecté dans aucun des prélèvements réalisés dans le cadre de la déclaration officielle des avortements chez les ruminants (n=41). Des critères d'évaluation de la performance du dispositif de surveillance ont été proposés et ont mis en évidence une amélioration de la qualité des données entre 2010 et 2013.

Un modèle dynamique de type SIR a permis d'estimer le niveau de transmission hôte-vecteur attendu qui expliquerait au mieux la séroprévalence observée de 2008 à 2013 à Mayotte. La probabilité de transmission hôte-vecteur estimée par ce modèle est cinq fois plus faible qu'attendue. Dans ces conditions, la probabilité de persistance de la FVR, en l'absence de nouvelle introduction d'animaux virémiques reste inférieure à 10%, cinq ans après l'arrivée du virus.

Enfin, la priorisation des problèmes sanitaires à Mayotte par une démarche d'épidémiologie participative et des réunions d'éleveurs a mis en évidence que les cinq problèmes spontanément rapportés comme les plus importants chez les bovins sont dans l'ordre le charbon symptomatique, les tiques, le syndrome « bavite-fièvre-grippe », le syndrome « dermatophilose-boutons » et la diarrhée. La FVR est absente de ce classement mais les avortements arrivent en 9<sup>ème</sup> position et à la première selon le critère de « risque ».

La surveillance, et les approches interdisciplinaires de modélisation et de sciences humaines doivent être poursuivies pour évaluer plus précisément le risque de réémergence de la FVR à Mayotte et anticiper les réponses à y apporter. La surveillance doit aussi s'adapter aux attentes des éleveurs et développer l'approche syndromique ainsi que s'intégrer pleinement aux dispositifs régionaux et nationaux.

**Mots-clés :** Fièvre de la Vallée du Rift, Mayotte, surveillance, modèle SIR, épidémiologie participative

## Summary

### **Title : Persistence of Rift Valley fever in Mayotte : surveillance, modelling and perceptions**

Rift Valley fever (RVF) is a vector-borne zoonosis, with a wide variety of potential competent vectors. During the last fifteen years, RVF caused tens of thousands of human cases, hundreds of human deaths and more than 100,000 domestic ruminant deaths in Africa and in the Arabic peninsula. After the first detection of RVF in Mayotte, an animal health surveillance network has been created in 2009, namely the SESAM. The aim of this PhD was to assess the epidemiological situation of Mayotte toward RVF in 2012-2013, to assess the persistence probability of RVF in the territory and to document farmers' perceptions and health priorities.

In 2012, RVF surveillance has been revised in order to partially renew the pool of the sentinel herds. The passive surveillance with systematic RVF detection assay on abortion and abnormal mortality was enforced. A continuous decrease in the seroprevalence was observed based on 2010-2013 data. During 2012-2013, a steady incidence rate of about 2 seroconversions per 100 animal-year was observed. This rate is much lower than the previous assessment of 18% during 2011. RVF virus was not detected in any of the 41 declared abortion cases. Surveillance performance criteria were discussed and assessed showing mainly an increase in data quality between 2010 and 2013.

A SIR dynamic model was built based on vector knowledge and observed seroprevalence in Mayotte from 2008 to 2013. Estimated host-vector transmission rate was fivefold lower than expected according to current literature. Persistence probability, without reintroduction of viremic animals, was predicted to be 10% five years after virus introduction.

Finally, health problem prioritization in Mayotte was studied through focus groups, gathering 164 farmers. The five main issues stated were: blackleg, ticks, a respiratory « fever/flu-like» syndrome, a dermatologic syndrome and diarrhoea. RVF was absent from the priority problems list in which abortions were ranked 9th. However abortions came first when « risk » criteria was taken into account, raising issues of cultural risk perceptions.

Further surveillance and research using transdisciplinary approaches that mix mathematical modelling and the humanities should be continued with the view to assess more precisely reemergence probability in Mayotte and anticipate mitigating measures. Surveillance and research should also align with farmers' expectations. The development of syndromic surveillance (abortion, death, etc.) requires strengthening surveillance network and identification data quality. Mayotte surveillance components should also be fully integrated within the regional and national schemes.

Keywords: Rift Valley fever, Mayotte, surveillance, SIR model, participatory epidemiology