



Ecole nationale Vétérinaire
d'Alfort

MASTER 2eme ANNEE
Santé publique Paris Sud-Saclay et Santé UPEC
Dominante

**SURVEILLANCE EPIDEMIOLOGIQUE DES
MALADIES HUMAINES ET ANIMALES**

RAPPORT DE STAGE

**Disposition du zonage et l'estimation des risques pour orienter la
surveillance et la gestion de la fièvre aphteuse en Tunisie**

Présenté par

Oumaima MTAALLAH

Réalisé sous la direction de : Caroline COSTE*, Cécile SQUARZONI-DIAW*, Rachid BOUGUEDOUR**

Organisme et pays : * CIRAD (France) & ** OIE(Tunisie)

Période du stage : 08/01/2018-15/06/2018

Date de soutenance : 26/06/2018

Année universitaire 2017-2018

Remerciements

Un grand merci au Dr Pascal HENDRIKX et Dr Julie RIVIERE qui ont eu la gentillesse d'accepter de participer à ce jury. Veuillez recevoir l'expression de toute ma reconnaissance et de mon profond respect.

Mes vifs remerciements à mes maîtres de stage : Caroline COSTE, Cécile SQUARZONI-DIAW et Rachid BOUGUEDOUR pour leur suivi, soutien et conseils judicieux tout au long de mon stage. Un remerciement particulier à Caroline pour ses encouragements et son soutien moral durant toute la période de la réalisation de ce travail. J'ai énormément appris d'elle. Je la remercie encore une fois.

A Dr Chedia SEGHAIER pour ses conseils avisés et son soutien au quotidien. Je la remercie très chaleureusement.

Mes sincères reconnaissances aux docteurs Sana KALTHOUM, Noel FATNASSI, Anissa DHAOUADI et Jamel CHERNI pour les discussions fructueuses qui m'ont aidée énormément à la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont également à l'équipe du CNVZ, du CIRAD, de l'OIE de Tunis et de la DGSV-Tunis

Un grand merci à Jean-Charles SICARD, Annelise TRAN, Raphaëlle METRAS, Facundo MUNOZ, Etienne LOIRE, Mounir KHAYLI et Alessandro RIPANI

Je remercie Dr LabibBakkali-Kassimi pour ses encouragements.

Je souhaite aussi remercier Anne-Laure ROY, Christine HORNAIN, Marie-Caroline ESTIENNE et David CHAVERNAC pour leur accueil durant ma scolarité et mon stage.

Il se peut que j'ai oublié quelques personnes qui m'ont aidée tout au long de ce travail : qu'ils trouvent ici mes meilleures reconnaissances et mes sincères et profondes excuses.

Liste des figures

Figure 1: Carte de distribution des sérotypes et des sept bassins de virus de la fièvre aphteuse dans le monde entre 2013 et 2017(FAO, 2018)	17
Figure 2: Flux des animaux et des produits d'origines animales(Ripani et <i>al.</i> , 2018).....	19
Figure 3: Carte du statut officiel des pays membres de l'OIE vis à vis de la fièvre aphteuse.	20
Figure 4 : Concept du zonage	21
Figure 5 : Composantes de l'analyse de risque	24
Figure 6 : Raster de chaque obstacle identifié	33
Figure 7 : Probabilité d'introduction de la FA à partir des pays frontaliers et les pays exportateurs vers la Tunisie.....	36
Figure 8 : Probabilité d'émission de la fièvre aphteuse en Tunisie	37
Figure 9: Probabilité d'exposition de la fièvre aphteuse en Tunisie.....	38
Figure 10: Superposition de la carte d'exposition avec les foyers de la FA en Tunisie en 2014 et 2017	39
Figure 11: Carte de friction sans pondération	40
Figure 12 : Courbes des avis des experts	41
Figure 13: Carte de friction avec pondération.....	42
Figure 14 : Analyse de sensibilité de la carte de friction avec pondération.....	43
Figure 15: Superposition de la probabilité d'exposition de la FA et la carte de friction avec pondération.....	44
Figure 16: Superposition de la carte de probabilité d'exposition avec la zone A (Cap-BON)	48

Liste des tableaux

Tableau 1: Sérotypes de la FA qui ont circulé dans la région du Maghreb	18
Tableau 2 : Facteurs utilisés pour estimer et représenter la probabilité d'émission et d'exposition de la fièvre aphteuse en Tunisie	27
Tableau 3 : Les couches identifiées pour le zonage et leurs sources	31
Tableau 4: Matrice de la comparaison par paire	33
Tableau 5: Echelle de comparaison par paire	34
Tableau 6: Tableau de notation des facteurs relatifs à l'introduction de la FA en Tunisie	35
Tableau 7: Poids des obstacles attribués par les huit experts.....	41
Tableau 8: Répartition du cheptel dans les trois zones identifiées	47

Liste des abréviations

AHP : Analyse hiérarchique de pondération

AQC R : Analyse qualitative et cartographique du risque

AQR : Analyse qualitative du risque

ASTRE : Animale-Santé-Territoire-Risque-Ecosystème

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

CNVZ : Centre national de veille zoo sanitaire

EMPRESS-i: Global Animal Disease Information System

ESB : Encéphalopathie spongiforme bovine

EU-FMD : Commission européenne de lutte contre la fièvre aphteuse

Eu-FMD: European Commission of the control of Foot-and-Mouth Disease

FA : Fièvre aphteuse

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

ha : hectare

MCDA : Analyse multicritère d'aide à la décision

MCDA-GIS : Analyse multicritère d'aide à la décision couplée au système d'information géographique

OEP : Office d'élevage et de pâturage

OIE : Organisation mondiale de la santé animale

ONAGRI: Observatoires national de l'agriculture

PCP-FMD: The Progressive Control Pathway for Foot and Mouth

PPCB : Péripneumonie contagieuse bovine

PPR : Peste des petits ruminants

QGIS : Quantum GIS

Rc: Ratio de cohérence

SAT : South African Territories

SIG : Système d'information géographique

SNA : Analyse des réseaux sociaux

Résumé (court)

Ce travail est basé sur l'utilisation d'une méthode intégrant les outils d'information géographique (SIG) et l'analyse qualitative de risque (AQR), en tenant compte des caractéristiques locales de l'élevage et des mouvements des animaux et du zonage tel que défini par l'OIE.

L'objectif de ce travail est de contribuer à travers une approche originale, à contrôler et éradiquer la fièvre aphteuse à l'échelle régionale puis de l'étendre à tout le pays. Pour ce faire, deux méthodes ont été déployées qui sont :

- i) Analyse qualitative et cartographique de risque pour identifier les imadas (nom des communes en Tunisie) à risque élevé et très élevé.
- ii) Analyse multicritère d'aide à la décision couplée au système d'information géographique (MCDA-SIG) pour identifier les zones les plus propices au sens de l'OIE en utilisant les obstacles naturels et artificiels existants dans le pays.

L'association de ces deux méthodes a permis d'identifier les imadas à risque élevé et très élevé à l'intérieur des zones au sens OIE en vue d'orienter la surveillance et le contrôle de la fièvre aphteuse en mettant en place un système de surveillance adapté à l'intérieur de ces zones.

L'évaluation qualitative et cartographique du risque, intégrant la mobilité des animaux a permis de déterminer des zones à risque pour la fièvre aphteuse dans le pays. Une gestion et une surveillance basée sur le risque, ciblant les zones à risques élevé et très élevé, pourraient désormais être mises en œuvre dans le pays pour optimiser les moyens alloués à la surveillance de la santé animale et pouvoir identifier à l'intérieur du pays des zones au sens OIE.

L'approche MCDA-SIG a été explorée en se basant sur les caractéristiques du pays et à dire d'experts. Cela a permis d'identifier trois zones au sens de l'OIE. Parmi ces zones, celle du Cap Bon (zone A), presque délimitée du reste du pays par une route nationale, une voie ferrée et une autoroute de 40 km environ est la zone qui se prête le mieux à l'application du principe du zonage.

La combinaison de ces deux approches : l'analyse qualitative et cartographique du risque et l'approche MCDA-SIG a permis d'identifier à l'intérieur de cette zone les communes à probabilité d'exposition élevée et très élevée qu'il faudrait cibler pour contrôler la maladie.

Mots clés : Fièvre aphteuse, zonage, analyse qualitative du risque, cartographie du risque, Tunisie

SOMMAIRE

Remerciements	1
Liste des figures	4
Liste des tableaux	5
Liste des abréviations.....	6
Résumé (court).....	7
SOMMAIRE	8
Résumé long	11
Introduction	14
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	15
1. Le secteur de l'élevage en Tunisie.....	15
1.1 L'élevage des petits ruminants en Tunisie	15
1.2 L'élevage des bovins en Tunisie	16
2. La fièvre aphteuse	16
2.1. Distribution mondiale de la fièvre aphteuse.....	16
2.2. La Fièvre aphteuse au Maghreb.....	17
2.3. Statut des pays vis-à-vis de la fièvre aphteuse	19
3. Concept du zonage	20
4. Présentation des outils et des méthodes.....	22
4.1. Analyse des réseaux sociaux.....	22
4.2. Analyse qualitative du risque.....	23
4.3. Cartographie du risque	24
4.4. Surveillance basée sur le risque	25
4.5. Analyse multicritère d'aide à la décision	25
TRAVAIL PERSONNEL	25
1. Introduction	25
2. Matériel et méthode	27
2.1 Analyse qualitative et cartographique du risque	27
2.1.1. Facteurs de risque et données utilisées	27
2.1.2. Estimation de la probabilité d'émission	28
2.1.2.1. La probabilité d'introduction de la FA en Tunisie	28
2.1.2.2. La probabilité de la diffusabilité externe	29
2.1.3. Estimation de la probabilité d'exposition	30
2.2 Zonage.....	30
2.2.1. Identification des obstacles.....	31

2.2.2. La cartographie de ces obstacles	31
2.2.3. Pondération des couches	33
2.2.4. Génération de la carte de friction	34
2.2.4.1. Carte de friction sans pondération :	34
2.2.4.2. Carte de friction avec pondération	35
2.2.4.3. L'analyse de sensibilité :	35
2.3 Combinaison analyse qualitative et zonage	35
5. Résultats	35
5.1. Analyse qualitative et cartographie du risque.....	35
5.1.1. Probabilité d'émission de la fièvre aphteuse en Tunisie	35
5.1.2. La probabilité d'exposition de la fièvre aphteuse en Tunisie.....	37
5.1.3. Validation des résultats : Confrontation des résultats avec les foyers enregistrés	38
5.2. Zonage	39
5.2.1. Sans pondération	39
5.2.2. Avec pondération.....	40
5.2.3. Analyse de sensibilité.....	43
5.3. Combinaison analyse qualitative et zonage	44
6. Discussion	45
6.1. Matériel et méthode	45
6.1.1. Analyse qualitative et cartographie du risque.....	45
6.1.2. Zonage	45
6.2. Résultats.....	45
6.2.1. Analyse qualitative et cartographie du risque :.....	45
6.2.2. Zonage	46
6.2.3. Combinaison analyse qualitative et zonage	47
7. Conclusion.....	50
Annexe 1 : Pays membres de l'OIE comportant une ou plusieurs zones indemnes de fièvre aphteuse où la vaccination n'est pas pratiquée (source OIE, 2018).....	51
Annexe 2 : Pays membres de l'OIE comportant un ou plusieurs Zones indemnes de fièvre aphteuse où la vaccination est pratiquée (source OIE, 2018)	53
Annexe3 : Les représentations spatiales dans le SIG.....	54
Annexe 4 : Analyse qualitative du risque.....	56
Annexe 5 : Enquête origine / destination (Marchés).....	57
Annexe 6 : Liste des experts présents dans l'atelier EUFMD-CIRAD.....	59

Annexe 7 : Tableau de notation qui permet de calculer la probabilité d'introduction d'une maladie pour un pays donné.....	60
Annexe8 : Liste des experts consultés pour remplir le tableau de comparaison par paire	62
Annexe 9 : Carte de friction avec pondération	63
Annexe 10 : Voie d'entrée des animaux :	64
Références bibliographiques	66

Résumé long

La fièvre aphteuse est une maladie virale très contagieuse due à un Aphtovirus appartenant à la famille des *Picornaviridae*, c'est une maladie qui touche les animaux artiodactyles. Sa gravité réside dans les répercussions économiques qu'elle entraîne pour le contrôle et la lutte contre la maladie. C'est une maladie à déclaration obligatoire et c'est la première maladie pour laquelle l'OIE a mis en place un système de reconnaissance de statut indemne. Le concept de zonage a été mis en place d'abord pour la fièvre aphteuse. La notion de zonage est actuellement appliquée dans plusieurs pays. En effet, il existe 21 zones reconnues indemnes de la FA par l'OIE où la vaccination est pratiquée et 22 zones reconnues indemnes de la FA par l'OIE où la vaccination n'est pas pratiquée.

La problématique de la FA est due à la diversité et la complexité de l'allure épidémiologique de la maladie dans les différents pays, la diversité des sérotypes du virus circulant, l'absence d'une immunité croisée entre les sérotypes et le mouvement transfrontalier des animaux, de façon informelle et des sous-produits rendant la lutte contre cette maladie difficile.

Les pays de l'Afrique du Nord (Maroc, Tunisie, Algérie), n'ont pas notifié des cas de fièvre aphteuse de 1999 jusqu'à 2014.

En préparation à une éventuelle reconnaissance officielle du statut « officiellement indemne de fièvre aphteuse », le programme de contrôle de la fièvre aphteuse de ces trois pays a été reconnu et approuvé par l'OIE en mai 2012. Des campagnes annuelles de vaccination contre la fièvre aphteuse sont menées chez les bovins en Algérie et chez les bovins et les petits ruminants en Tunisie. Le Maroc n'a pas mis en œuvre une campagne de vaccination depuis 2007.

Malheureusement, en avril 2014, la Tunisie a notifié à l'OIE son premier cas depuis 1999. En juillet 2014, l'Algérie à son tour a signalé des foyers de fièvre aphteuse, le sérotype incriminé était le « O ». La maladie s'est rapidement propagée dans les deux pays. En réponse à cette incursion de la fièvre aphteuse dans la région, les pays ont procédé à une campagne de vaccination d'urgence et ont mis en place différentes mesures de contrôle pour limiter la propagation de la maladie et la maîtriser. En 2017, la fièvre aphteuse a frappé encore une fois l'Algérie puis la Tunisie et le sérotype « A », absent de la région depuis plus de 30 ans a été identifié.

Les besoins en matière de surveillance des maladies animales transfrontalières sont de plus en plus grands mais les moyens financiers et humains alloués à cette surveillance restent limités. C'est dans ce cadre que la surveillance basée sur le risque trouve son importance.

Les cartes de risque représentent un outil intéressant pour optimiser les systèmes de surveillance épidémiologique. L'analyse qualitative et cartographique du risque a été menée selon la méthode développée par Cécile Squarzoni-Diaw et Caroline Coste de l'UMR ASTRE du Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) qui vise à identifier avec précision les imadas dont la probabilité d'émission et d'exposition est élevée et très élevée.

Ces cartes générées par cette méthode sont utilisées pour optimiser les plans de surveillance et de contrôle. L'analyse est conduite à l'échelle du découpage administratif disponible le plus fin. L'unité épidémiologique utilisée est l'imada qui est l'équivalent de la commune.

L'objectif principal de ce travail est d'orienter la surveillance et le contrôle de la fièvre aphteuse en Tunisie en appliquant l'analyse qualitative du risque et le principe du zonage tel que préconisé par l'OIE.

Les méthodes déployées dans ce travail sont :

- * L'analyse qualitative et cartographique du risque pour estimer la probabilité d'émission à partir des pays voisins et la probabilité d'exposition dans le pays en tenant compte de plusieurs facteurs de risque dont la mobilité animale.
- * La méthode MCDA-SIG pour identifier les zones telles que définies par l'OIE en se basant sur les frontières naturelles et artificielles existantes dans le pays.

L'association de ces deux méthodes a permis d'identifier les imadas dont la probabilité d'exposition est élevée et très élevée à l'intérieur des zones au sens OIE pour optimiser la surveillance et contrôler la maladie à l'intérieur de ces zones.

Pour l'analyse qualitative et cartographie du risque, les facteurs de risque influant sur l'émission et la diffusion de la FA en Tunisie ont été identifiés, collectés, discutés et validés avec le concours d'experts nationaux et des experts internationaux au cours du stage passé dans le bureau sous régional de l'OIE en Tunisie et lors de la participation à l'atelier organisé par l'EU-FMD et le CIRAD sur l'« Analyse qualitative et cartographie du risque pour l'optimisation de la surveillance FA ». Certaines de ces données appartiennent au domaine public comme la densité animale et l'accessibilité, d'autres ont été obtenues à partir des enquêtes effectuées par les services vétérinaires tunisiens comme la mobilité animale et les points de rassemblement. La combinaison de ces facteurs a été réalisée et validée par des experts internationaux et nationaux selon le contexte épidémiologique du pays.

Pour le zonage, les obstacles freinant les mouvements des animaux sur pieds, ont été identifiés selon la littérature et les caractéristiques du terrain. Une validation de ces obstacles par les experts nationaux a été effectuée.

Ces obstacles ont été rastérisés à l'aide du logiciel R. Puis, une comparaison par paire a été effectuée en faisant appel à des experts nationaux et internationaux selon la méthode de Saaty (Saaty, 1987).

L'empilement des obstacles a permis de réaliser la carte de friction avec pondération pour ne déceler que les zones propices au zonage.

Une analyse de sensibilité a été effectuée pour évaluer la robustesse du modèle en calculant le coefficient de variations des avis des experts.

L'analyse qualitative et la cartographie du risque sont des approches simples, rapides et fiables même si on dispose de peu de données. Elle fournit des cartes de probabilité qui sont dynamiques, pouvant être mises à jour régulièrement.

Pour affiner les résultats et augmenter la précision de ces cartes, d'autres facteurs comme la vaccination, les prix des marchés du bétail entre les pays frontaliers auraient pu être utilisés si nous avions disposé de l'information correspondante. Cela n'a pas été le cas.

Durant les discussions avec les experts nationaux et internationaux, dans le cadre de l'atelier EU-FMD-CIRAD, relatif à « Analyse qualitative et cartographie du risque pour l'optimisation de la surveillance FA » qui s'est déroulé en mai 2018, il a été recommandé de ne pas utiliser la carte probabilité de survenue de la FA pour la surveillance basée sur le risque. Cette recommandation a deux justifications :

- 1) La perte d'information précise en combinant les deux cartes
- 2) La surveillance basée sur le risque va se faire principalement sur la carte de la probabilité d'émission (introduction) en renforçant la surveillance sur les imadas à probabilité d'émission élevée et très élevée pour éviter l'introduction de la maladie à partir des pays frontaliers. Si toutefois, la maladie est introduite dans le pays, on peut

recourir à la carte de la probabilité d'exposition en ciblant les imadas à probabilité d'exposition élevée et très élevée

Ce travail a permis de déceler trois zones. Les données qui ont servi à la réalisation de la carte de friction appartiennent au domaine public et sont peu précises, non mises à jour et de faible résolution d'où la nécessité (avec plus de temps et de moyens) d'explorer d'autres sources de données qui seraient payantes et qui permettrait de mettre en évidence plus de trois zones. Ces trois zones sont principalement le cap-Bon et les deux îles (Djerba et l'archipel de Kerkennah). Vu le contexte et les contraintes existantes, seule la zone du cap Bon constitue l'entité propice au zonage. Les deux zones insulaires peuvent faire partie d'un plan de zonage s'il y a un passage vers un système d'élevage à valeur ajoutée tel que l'élevage biologique. Mais ce n'est pas le cas actuellement.

Pour que ces zones répondent à la définition de l'OIE, des mesures d'accompagnement seront indispensables pour la mise en place et le maintien du statut indemne via un réseau de surveillance fiable dont les objectifs seraient :

- une détection précoce de la maladie dans ces zones,
- une intervention rapide lors d'une suspicion d'un cas,
- un contrôle du mouvement des animaux entrants.

L'association des deux approches (analyse qualitative et cartographique du risque et zonage) a permis de cibler la surveillance et d'adapter les efforts de contrôle au niveau des imadas dont la probabilité d'exposition est élevée et très élevée. Une fois la maladie éradiquée de la zone, l'utilisation de la probabilité d'émission et de la carte correspondante dans la zone, sera utile pour éviter l'introduction de la maladie.

Des informations plus précises et plus détaillées sur les différentes couches pourraient permettre d'identifier d'autres zones dans le pays. Une approche de type régional pourrait en effet constituer un atout majeur à la suite de ce travail pour identifier des zones régionales propices à un zonage au sens du code terrestre de l'OIE dans le but de contrôler et d'éradiquer la maladie dans la région du Maghreb.

Introduction

La fièvre aphteuse (FA) est une maladie animale transfrontière hautement contagieuse et l'une des maladies les plus dévastatrices du bétail, notamment les bovins, les caprins, les ovins, les porcins et les bi-ongulés sauvages. C'est la première maladie pour laquelle l'OIE a mis en place un système de reconnaissance de statut indemne et la notion de zonage qui est appliquée par plusieurs pays.

La forte prévalence de la maladie en Asie et en Afrique, la diversité génétique et immunologique de l'agent causal ainsi que les incursions récurrentes dans plusieurs pays après plusieurs années d'absence (Angleterre 2001, Maghreb 2014-2015, Bulgarie 2011, SAT 2 en Egypte 2012, ...) expliquent la préoccupation mondiale pour la maladie. Malgré une vaccination annuelle des bovins et des ovins depuis un quart de siècle et après une absence de 15 années pour le sérotype O et de 35 années pour le sérotype A, la Tunisie a connu l'incursion de ces deux sérotypes respectivement en 2014 et en 2017. Il s'agit d'une introduction de la maladie à travers les frontières terrestres ; la diffusion de la maladie est très rapide à cause de la mobilité animale très intense (**Kardjadj, 2018**).

Dans le cadre de la stratégie mondiale de lutte contre la fièvre aphteuse (FAO/OIE 2012), la FAO, a mis en place une approche progressive de la lutte contre la fièvre aphteuse (PCP-FMD) pour guider les pays à travers une série de mesures progressives pour développer des stratégies de contrôle basées sur le risque. Aider le pays à développer une telle stratégie passe par l'application de l'approche d'analyse de risque intégrant le facteur essentiel d'introduction et de diffusion de la maladie qui est la mobilité animale ainsi que l'exploration de la faisabilité du zonage tel que préconisé par l'OIE.

Ce travail a pour objectif d'appliquer ces approches pour la fièvre aphteuse dans le contexte tunisien. Après une synthèse bibliographique sur l'élevage en Tunisie, sur la maladie et ses particularités ainsi que sur les outils et approches utilisés, un travail personnel a été entrepris pour produire des cartes de probabilité d'introduction et de diffusion de la maladie pour la Tunisie et pour explorer l'approche du zonage, telle que définie par l'OIE, dans le pays.

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Le secteur de l'élevage en Tunisie

L'agriculture représente 9,4% du PIB en 2016. Sur une superficie totale de 163610 km², la Tunisie compte 10 millions d'hectares de terres agricoles, avec 5 millions d'hectares de terres cultivables, 4 millions d'hectares de parcours naturels et 1 million d'hectares de forêts et garrigues et environ 15% des emplois (**ONAGRI, 2016**). L'élevage représente une part importante de la production agricole ; il contribue à hauteur de 40% environ au produit agricole total. Dans la plupart des zones subhumides et semi-arides, les revenus des exploitations proviennent des céréales, de la vigne, des plantations arboricoles et de l'élevage. Les petits ruminants constituent la source de revenu fondamentale dans les zones arides. On compte 380 000 exploitations en Tunisie, dont 65% pratiquent l'élevage. La taille moyenne des exploitations est de 10 ha et 75% des exploitations sont en dessous de ce seuil (**Chedly, 2000**).

Le cheptel tunisien est principalement constitué d'ovins (6,4 millions de têtes) et de caprins (1,1 millions de têtes). Le cheptel bovin compte 646 000 têtes (**ONAGRI, 2017**). Les différentes espèces sont inégalement réparties sur le territoire : 65% des bovins se trouvent dans le nord, 60% des ovins et caprins dans le centre, et 80% des camelins dans le centre et le sud.

1.1 L'élevage des petits ruminants en Tunisie

Il est possible de distinguer quatre types d'éleveurs ovins :

- Les éleveurs-naisseur qui vendent leurs agneaux après le sevrage. Ils possèdent des troupeaux d'effectifs moyens à grands (20 à 200 têtes) (**Hammani et al., 2007; Jemaa et al., 2016**) ; Les parcours naturels et les résidus de cultures représentent les principales sources alimentaires des troupeaux (**Hammani et al., 2007**). Ce type d'élevage se rencontre principalement dans les terres arides et semi-arides dans le centre et le Sud du pays (**Chedly, 2000**).
- Les négociants-engraisseurs (semi-intensif à intensif) : ils achètent des lots d'agneaux sevrés, auprès de grands troupeaux naisseurs de Tunisie ou d'Algérie (**Jemaa et al., 2016**), qu'ils revendent après 2 à 3 mois d'engraissement, à l'âge de 8 à 12 mois. Les effectifs sont importants (plus de 200 têtes). Les agneaux sont conduits en bandes, pâturent sur des chaumes ou des parcours et reçoivent des concentrés.
- Les naisseurs-engraisseurs : ils font naître et engraisent leurs agneaux avant de les vendre à l'âge de 5 à 8 mois, ils pratiquent également l'agriculture (l'oléiculture, le maraîchage, l'arboriculture, céréales) (**Jemaa et al., 2016**).
- Les pluriactifs péri-urbains : ils détiennent de petits effectifs qu'ils engraisent jusqu'à plus de 8 mois et vendent selon le besoin ou à l'approche de la fête religieuse de l'Aïd (**Jemaa et al., 2016**).

1.2 L'élevage des bovins en Tunisie

L'élevage laitier, traditionnellement concentré dans le nord du pays, s'est développé dans les zones du Sahel et du Cap-Bon. Il est pratiqué selon deux modalités (**Chedly, 2000**):

- Le système intégré intensif : caractérisé par des exploitations mixtes (pratiquant aussi l'agriculture), qui peuvent être familiales possédant 1 à 40 vaches, ou bien des grandes exploitations commerciales avec plus de 100 vaches.
- Le système extensif concerne des troupeaux de taille faible (1 à 5 têtes), la source principale d'alimentation est le parcours.

Depuis quelques années, l'élevage bovin laitier se développe aussi dans d'autres régions telles que le Sahel et le Cap-Bon. Il s'agit d'exploitations familiales où la main d'œuvre est familiale et les éleveurs ont souvent une autre source de revenu. La plupart de l'alimentation (fourrage et concentrés) est achetée.

2. La fièvre aphteuse

La fièvre aphteuse est une maladie virale très contagieuse. Elle touche tous les artiodactyles domestiques (petits ruminants, bovins, porcs...) et sauvages (buffles, sangliers, cervidés...). Les bovins sont révélateurs de la maladie, les porcs sont des amplificateurs de la maladie et les petits ruminants sont des disséminateurs de la maladie (**Boisseleau et al., 2010**). Les équidés, les carnivores et les oiseaux ne sont pas réceptifs au virus, la transmission à l'homme est exceptionnelle.

La fièvre aphteuse est une maladie très redoutable à cause de sa forte contagiosité et des mesures très lourdes que nécessite son élimination. Toutes les sécrétions des animaux contaminés sont virulentes et peuvent propager la maladie sur de grandes distances par contact direct entre les animaux infectés et les animaux d'espèces sensibles (gouttelettes respiratoires, léchage, contact du pelage, tétée des jeunes) et par contact indirect (véhicules, aliments, homme, espèces animales résistantes, vents...) (**Toma et al., 2017**).

2.1. Distribution mondiale de la fièvre aphteuse

L'agent causal de la fièvre aphteuse est un virus appartenant à la famille des *Picornaviridae* du genre *Aphthovirus* dont sept sérotypes immunologiquement distincts (A, O, C, SAT (South African Territories) 1, SAT2, SAT3, Asia1) ont été identifiés. Sur cette base, on peut subdiviser le bassin mondial des virus de la fièvre aphteuse en sept « bassins régionaux » ou « pools » (**FAO, 2018**) dans lesquels des souches virales distinctes sur les plans génétique et antigénique circulent couramment (Figure 1).

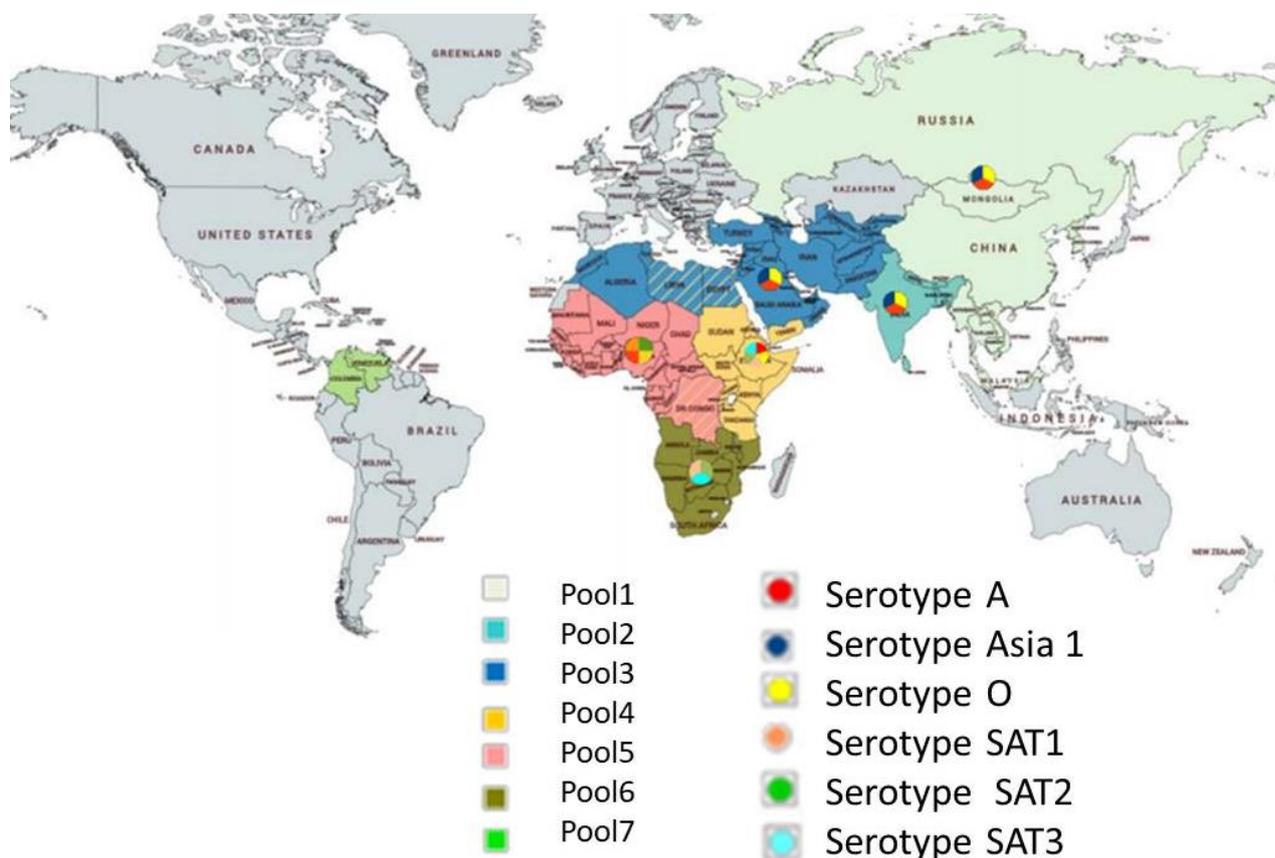


Figure 1: Carte de distribution des sérotypes et des sept bassins de virus de la fièvre aphteuse dans le monde entre 2013 et 2017 (FAO, 2018)

Il faut noter que le sérotype «C» n'a pas été déclaré depuis 164 mois.

Le développement de nouvelles méthodes de biologie moléculaire a permis de définir différents sous-types dans chaque sérotype de virus de la fièvre aphteuse (32 sous-types ou variantes pour le A, onze pour le O, cinq pour le C, six pour le SAT.1, trois pour le SAT.2, quatre pour le SAT.3, et trois pour Asia1). Ceci a permis de retracer le parcours des apparitions virales d'une région à une autre et on parle aujourd'hui de topotypes.

2.2. La Fièvre aphteuse au Maghreb

La région du Maghreb a été frappée par plusieurs épizooties de fièvre aphteuse et plusieurs sérotypes ont été incriminés (**Ripani et al., 2018**) (Tableau1).

L'absence de foyers de fièvre aphteuse dans les pays du Maghreb (Tunisie, Algérie, Maroc) depuis 1999 a incité ces trois pays à préparer un programme de contrôle de la fièvre aphteuse qui a été reconnu et approuvé en mai 2012 par l'OIE, cette initiative représentait une étape importante pour la région dans la reconnaissance officielle du statut « officiellement indemne fièvre aphteuse ». Malheureusement, le 1er cas depuis 1999 a été notifié à l'OIE par la Tunisie en avril 2014 puis par l'Algérie en juillet de la même année.

Tableau 1: Sérotypes de la FA qui ont circulé dans la région du Maghreb (Ripani et al., 2018)

Pays	Année *	Sérotypes
Algérie	1966-1990-1999-2014-2015	O
	1977- 2017	A
Maroc	1991-1992-1999-2015	O
	1977-1983	A
Libye	1959-1960-1962-1967-1968-1972-1981-1982-1983-1988-1989-1994	O
	1979-2009	A
	2003	SAT2
	2009-2013	A-O-SAT2
Tunisie	1965-1967-1969	C
	1979-1982 -2017	A
	1970-1975-1989-1990-1994-1999-2014	O
Mauritanie	1975-1976	SAT2
	1997	A
	2000	O

* Les foyers déclarés après 1999 sont en bleu

En Afrique du Nord, la mobilité animale transfrontalière est fréquente (Figure 2) et elle augmente pendant les fêtes (Aïd-el-Kebir, ramadan, la variation du prix des animaux entre les pays...). Cette mobilité représente le facteur majeur d'introduction et de diffusion de plusieurs maladies (Kardjadj, 2018). Ainsi, l'origine de l'épizootie de la FA qui a touché la Tunisie (en 2014), l'Algérie (en 2014 et 2015) et le Maroc (en 2015) a été attribuée aux mouvements illégaux des ruminants provenant de la Libye (Ripani et al., 2018). La région du Maghreb est caractérisée par des frontières perméables et difficiles à contrôler. La longueur de ces frontières est estimée à 460 km (Tunisie-Libye), 520 km (Tunisie-Algérie) et 1040 km (Algérie-Libye) ce qui explique ce flux d'animaux entre ces trois pays (Bouguedour et Ripani, 2016; Ripani et al., 2018).

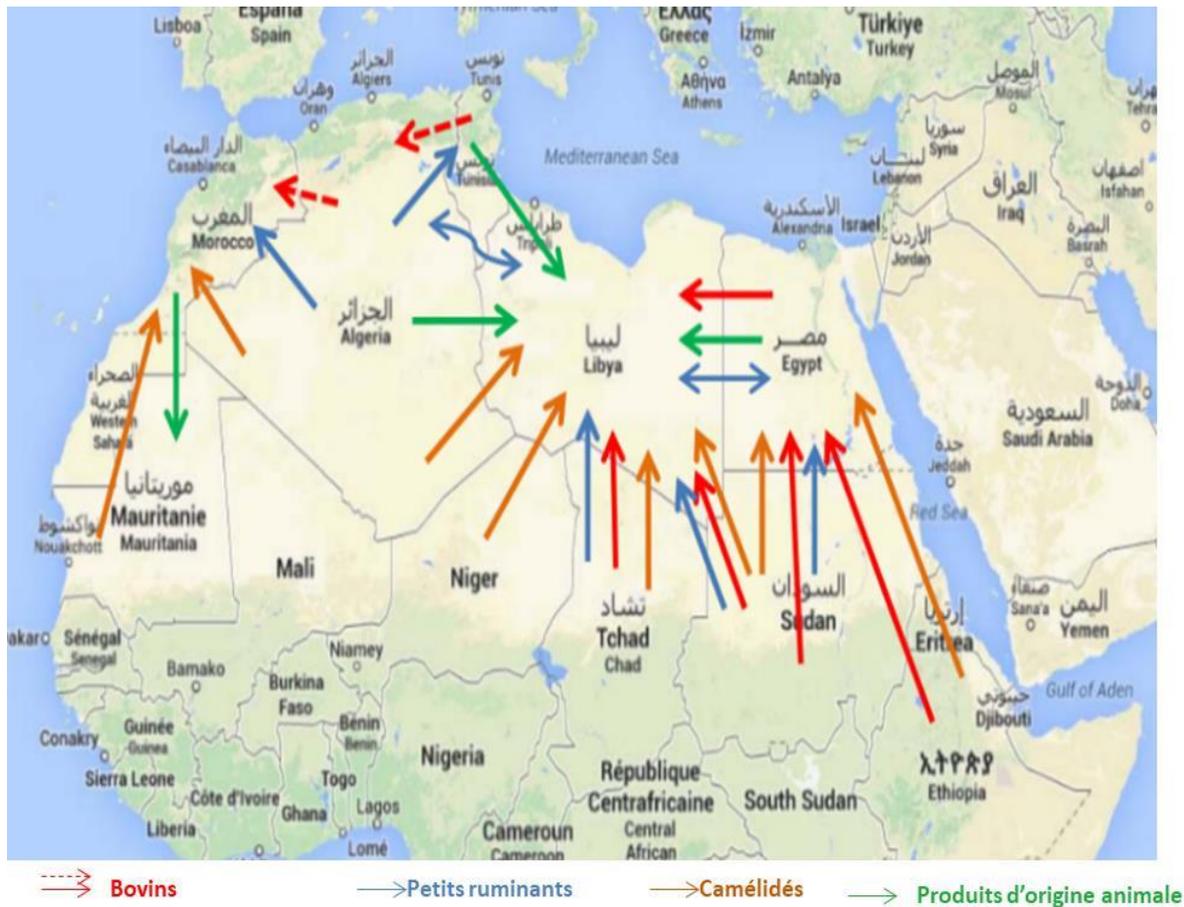


Figure 2: Flux des animaux et des produits d'origines animales (Ripani et al., 2018)
 (Les flèches en pointillé concernent les bovins importés légalement par la Tunisie et qui traversent ensuite illégalement les frontières pour être vendus en Algérie ou au Maroc)

2.3. Statut des pays vis-à-vis de la fièvre aphteuse

La FA est une maladie à déclaration obligatoire et c'est la première maladie pour laquelle l'OIE a publié les normes de reconnaissance de statut et a établi une liste officielle de pays et zones reconnus indemnes avec ou sans vaccination (Figure 3).

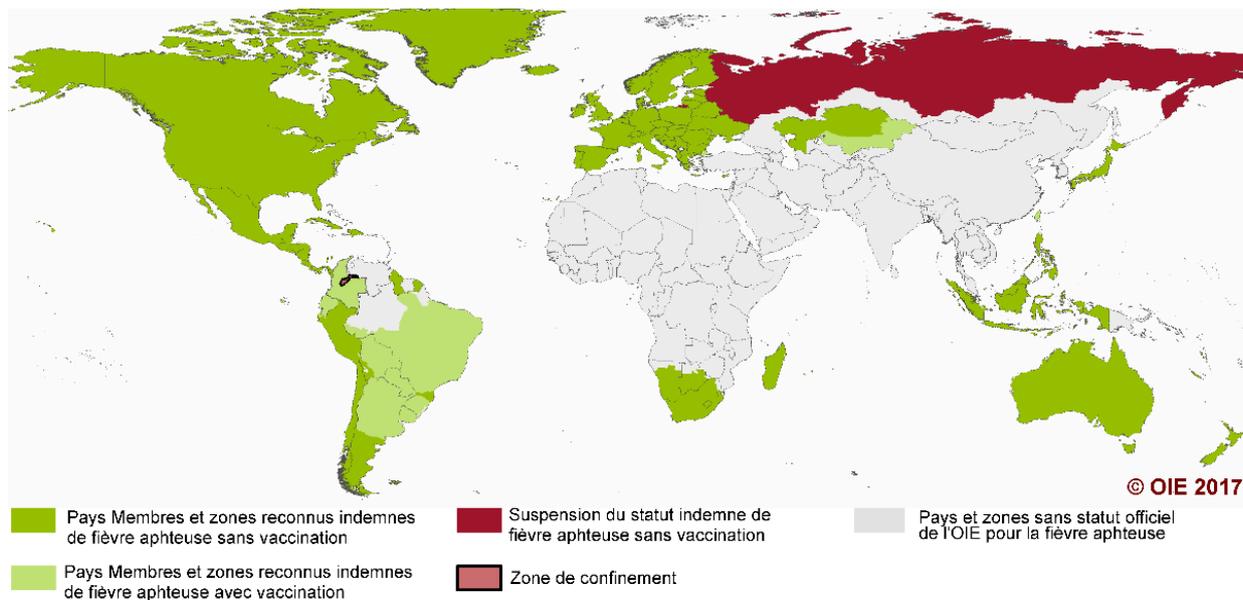


Figure 3: Carte du statut officiel des pays membres de l'OIE vis à vis de la fièvre aphteuse (OIE, 2018)

3. Concept du zonage

Pour soutenir les échanges commerciaux des animaux et de leurs produits et afin d'assurer leur sécurité du point de vue sanitaire, l'organisation mondiale de la santé animale (OIE) a mis en place des normes et des procédures pour la reconnaissance du statut sanitaire de ses pays membres. Les maladies jugées prioritaires pour cette reconnaissance sont la fièvre aphteuse (FA), la peste équine, la peste porcine classique, la peste des petits ruminants (PPR), la péripneumonie contagieuse bovine (PPCB) et l'encéphalopathie spongiforme bovine (ESB). Pour accompagner les pays membres qui ne sont pas en mesure de répondre aux exigences de la reconnaissance de statut indemne et pour les aider à s'y préparer, l'OIE a adopté des procédures pour la validation des programmes officiels de contrôle pour la fièvre aphteuse, la PPCB et la PPR.

Bien que l'obtention du statut indemne soit supportable pour plusieurs pays membres de l'OIE, son maintien est difficile pour certains pays à cause des dépenses et des difficultés techniques engendrées par la surveillance continue et la maîtrise du risque de réintroduction de l'agent pathogène (**Brückner, 2013**). L'OIE a introduit le concept du zonage en 1993 dans le code sanitaire de l'OIE pour les animaux terrestres pour aider les pays à contrôler et éradiquer la maladie. Ce concept a été appliqué d'abord pour la fièvre aphteuse puis pour d'autres maladies telles que la PPR. Il s'agit pour le pays concerné, de définir sur son territoire des sous-populations animales caractérisées par des statuts sanitaires distincts et de prouver sa capacité à maintenir le statut indemne de la sous population concernée (**Thiermann, 2008**).

Le zonage ou régionalisation repose essentiellement sur des limites géographiques qui peuvent être des frontières naturelles (les rivières, les montagnes...), artificielles (les routes,

les voies ferrées) ou administratives (Stone, 2017) et où le statut sanitaire de la sous-population est différent de celui de la population du pays (Figure 4).

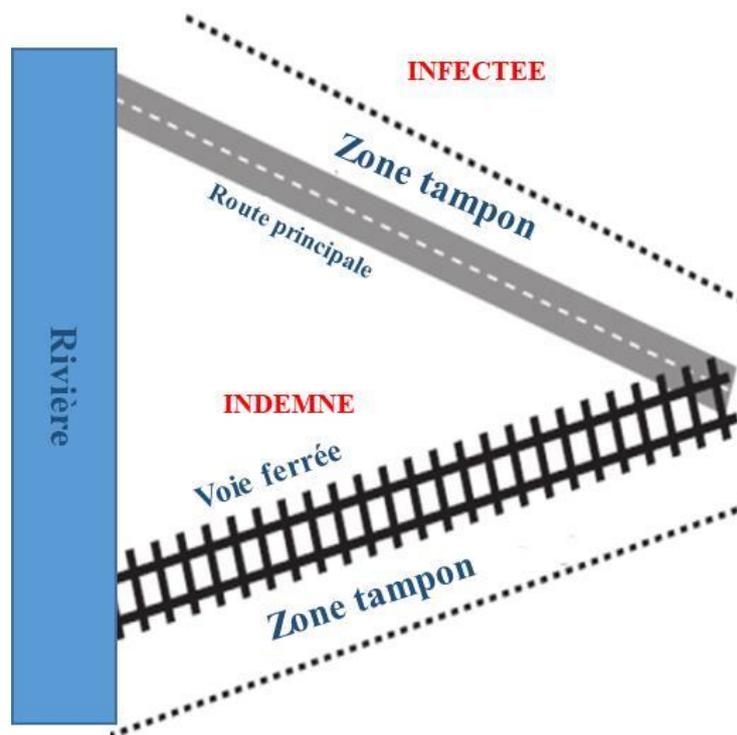


Figure 4 : Concept du zonage (Stone, 2017)

Les pays, souhaitant mettre en place le concept du zonage, doivent respecter les conditions décrites dans le code sanitaire terrestre de l'OIE ; Les zones doivent être définies par l'administration vétérinaire. Le pays doit prouver qu'il dispose d'un système fiable de contrôle, de surveillance épidémiologique et clinique et des mesures de biosécurité.

Les deux critères les plus importants qui prouvent que l'état maîtrise le zonage sont l'identification et la traçabilité animales avec un système d'inspection des marques d'identification et un système de permis de déplacement des animaux entre les zones.

Dans l'objectif de prévenir l'introduction de l'agent pathogène dans la zone indemne, Il faut un (des) point (s) de passage officiel (s) entre les deux zones et un animal issu d'une zone infectée n'a le droit d'entrer dans la zone indemne qu'après l'accomplissement des contrôles appropriés fixés par l'administration vétérinaire qui atteste l'absence d'infection avant son introduction dans la zone indemne.

Une fois maîtrisé le concept du zonage, le pays peut soumettre à l'OIE un dossier pour la reconnaissance d'une zone avec une description détaillée, conformément au questionnaire fourni dans le chapitre 1.6 du code terrestre de l'OIE (OIE, 2015).

Conformément à la Résolution No.22 votée pendant la 86^{ème} Session générale de l'assemblée mondiale tenue en mai 2018, on répertorie 11 pays membres de l'OIE disposant d'une ou plusieurs zones indemnes de fièvre aphteuse où la vaccination n'est pas pratiquée (annexe 1) ainsi que 8 pays membres disposant d'une ou plusieurs zones indemnes de fièvre aphteuse où la vaccination est pratiquée (annexe 2) (OIE, 2018).

4. Présentation des outils et des méthodes

Dans ce chapitre nous allons énumérer et décrire les méthodes et les outils qui ont été utilisés dans les différentes étapes de ce travail.

L'analyse qualitative et cartographique du risque (AQCR) a été basée sur trois approches à savoir :

- L'Analyse des réseaux sociaux pour décrire la mobilité animale transfrontalière et nationale en Tunisie en décrivant les paramètres spécifiques à utiliser dans l'analyse cartographique du risque
- L'analyse qualitative du risque (AQR) telle que décrite par l'OIE
- La cartographie proprement dite du risque

L'application de ces approches permettra de définir les localités à risque qu'il est utile de cibler en priorité pour la mise en œuvre d'une surveillance de la maladie dans le pays.

L'analyse multicritère d'aide à la décision couplée au Système d'information géographique (MCDA-SIG) a été utilisée pour identifier de zones au sens de l'OIE

L'AQCR et la MCDA-SIG ont été combinés pour définir les localités à cibler par la surveillance dans les zones définies au sens de l'OIE (surveillance basée sur le risque).

Tous les outils sus mentionnés sont développés dans les rubriques suivantes.

4.1. Analyse des réseaux sociaux

L'analyse des réseaux sociaux (SNA), approche largement utilisée en sociologie et en psychologie a été adoptée en médecine vétérinaire préventive au Royaume-Uni suite à l'épidémie de fièvre aphteuse de 2001 pour comprendre les mouvements des espèces sensibles à la maladie et leur rôle dans la diffusion de la maladie (**Martínez-López et al., 2009**). Il s'agit d'une approche qui permet d'explorer la nature et l'étendue des contacts entre animaux ou fermes, et comprendre le risque potentiel de propagation des maladies dans une population donnée. Cette approche est utilisée pour décrire la mobilité animale en représentant graphiquement les relations entre l'ensemble des nœuds (formés par les élevages, marchés, localités, abattoirs...) composant le réseau ; elle fournit des indicateurs pour décrire les propriétés de ce réseau dans son ensemble en termes de densités de liens et de distances (**Rautureau et al., 2011; Marquetoux et al., 2016**).

Les deux indicateurs utilisés dans ce travail sont :

- Le degré (« degree » en anglais) : Correspond à la somme de deux éléments qui sont les degrés entrants « in-degree » ce sont les liens reçus par le nœud (la probabilité d'introduction de la maladie) et les degrés sortants « out-degree » qui sont les liens émis par un nœud (probabilité de diffusion de la maladie) (**Marquetoux et al., 2016**). Ce paramètre indique le niveau d'activité du nœud. Un nœud qui a un degré important est qualifié d'un nœud à haute centralité (= 'hub').
- L'intermédiarité (« betweenness » en anglais) : Ce paramètre mesure la proportion de chemins les plus courts sur lesquels se trouve un nœud étudié qui a un point de passage obligé pour relier deux nœuds (**Rautureau et al., 2011**). Un nœud qui a une intermédiarité importante est qualifiée d'un nœud à haute intermédiarité (= 'hub').

Un nœud qui a une haute centralité ou une haute intermédiarité signifie que ce nœud est très vulnérable à l'introduction et/ou à la diffusion de la maladie dans le pays (Rautureau et al, 2011; Marquetoux et al., 2016).

L'analyse des réseaux sociaux est utilisée pour décrire le flux des mouvements des animaux national et transfrontalier et déterminer les lieux à forte mobilité en Tunisie qui peuvent jouer un rôle important dans l'introduction et la diffusion de la maladie. Les résultats obtenus sont utilisés pour l'analyse qualitative du risque pour pouvoir représenter cartographiquement le risque de la FA en Tunisie.

4.2. Analyse qualitative du risque

L'analyse du risque est utilisée dans le cadre des échanges internationaux d'animaux ou de produits d'origine animale entre les pays ou pour mettre en place une stratégie de surveillance et de lutte contre les maladies animales (AFSSA, 2008). C'est une méthode d'aide à la décision qui comprend quatre étapes (Figure 5) :

- L'identification du danger : elle consiste à identifier le ou les dangers associés au risque.
- L'appréciation du risque : elle doit s'adapter et tenir compte du contexte (marchandises ou produits en question), de la maladie concernée, des dangers potentiels, du système de gestion et de surveillance ainsi que de la quantité et la qualité des données disponibles. Elle se divise en quatre étapes (Toma et al ., 2008):
 - o Appréciation de l'émission : c'est la probabilité d'émission du danger à sa source. Dans notre cas, c'est la probabilité d'introduire dans un pays un animal infecté.
 - o Appréciation de l'exposition : c'est la probabilité de la diffusion du danger à partir de sa source. Dans notre cas, c'est la probabilité qu'un animal infecté introduit dans le pays diffuse la maladie dans tout le pays.
 - o Appréciation des conséquences : c'est décrire les effets néfastes de la survenue du danger qui peut être direct : conséquence économique, sanitaire... ou indirect (la perte du statut indemne, coût de la gestion de l'épizootie...).
 - o Estimation du risque : le croisement de la probabilité de l'émission et la probabilité de l'exposition permet de déterminer la probabilité de survenue du danger. La combinaison de la probabilité de survenue du danger avec la probabilité d'appréciation des conséquences, ça nous permet d'estimer le risque.
- La gestion du risque : actions et mesures mises en œuvre pour la réduction des risques identifiés par l'étape précédente.
- La communication sur le risque : se traduit par « *un échange d'information ouvert, interactif, itératif et transparent* » qui doit être défini à l'avance, et qui accompagne toutes les étapes de l'analyse de risque et se poursuit après la prise de décision.

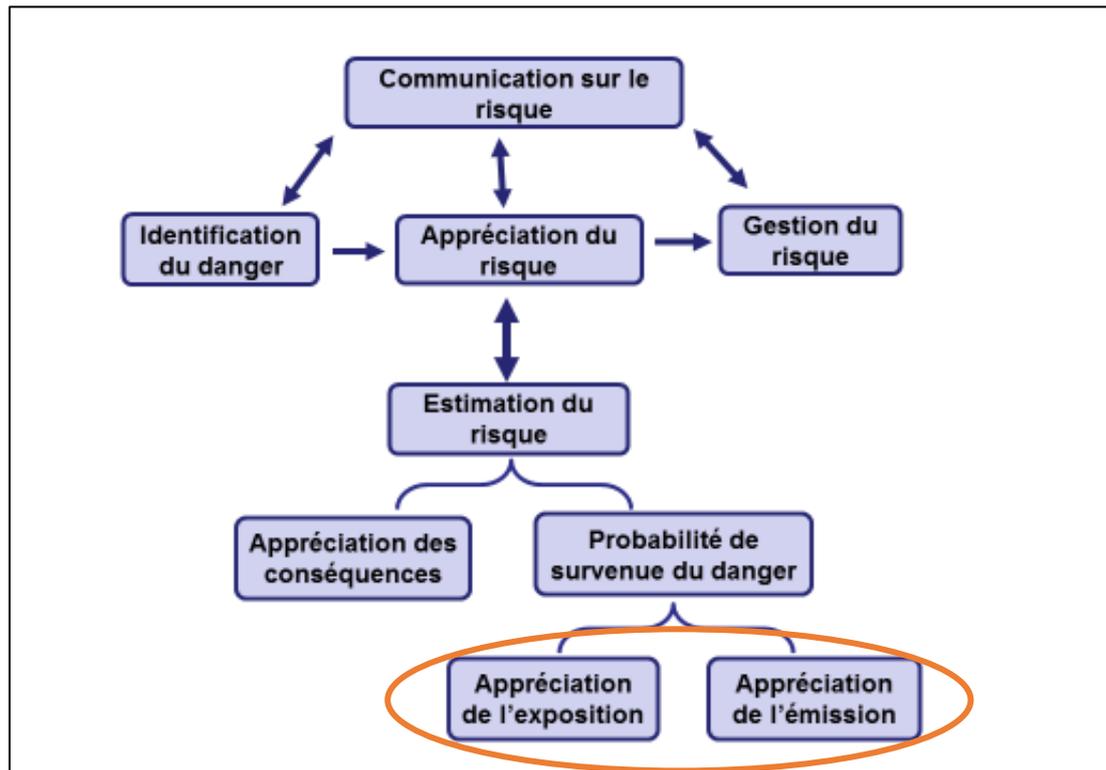


Figure 5 : Composantes de l'analyse de risque

L'appréciation du risque peut être qualitative ou quantitative. En analyse qualitative, on associe au risque un adjectif. Les paramètres, qui permettent d'estimer le risque, sont qualifiés séparément par ces adjectifs : négligeable, faible, élevé et très élevé. Cette estimation est subjective vu qu'elle s'appuie sur l'opinion de panels d'experts et ne nécessite pas des données précises. Le résultat qui en découle reflète une certaine incertitude (Sein, 2002; AFSSA, 2008).

L'analyse quantitative associe au risque un nombre numérique d'où la nécessité de connaître plusieurs informations comme : l'incidence, la prévalence, la spécificité et la sensibilité des tests, le nombre et la fréquence d'importation... Elle requiert, par conséquent, des données de bonne qualité et en quantité suffisante : cette appréciation du risque nécessite beaucoup de temps.

Au cours de ce travail, on a utilisé une démarche qualitative qui est une approche rapide, simple, fiable pour le calcul de la probabilité de l'émission et la probabilité l'exposition vis-à-vis de la FA en Tunisie.

4.3. Cartographie du risque

La cartographie du risque permet de représenter spatialement la probabilité d'émission et la probabilité de diffusion d'une maladie sur une carte du pays par un dégradé de couleur. Elle permet ainsi d'identifier visuellement et plus aisément les zones à haut risque (risque élevé et très élevé), de juger de la cohérence de ces zones avec la réalité et d'appuyer les mesures sanitaires prises.

4.4. Surveillance basée sur le risque

Les besoins en matière de surveillance des maladies animales transfrontalières sont de plus en plus grands mais les moyens financiers et humains alloués à cette surveillance n'augmentent pas. C'est dans ce cadre que la surveillance basée sur le risque trouve son importance dans l'optimisation des activités de surveillance en termes de coût/efficacité. Il s'agit de cibler les localités les plus propices à l'introduction et/ou la diffusion de la maladie. Elle permet ainsi de prioriser les ressources allouées pour la surveillance en cherchant la maladie là où il y a une grande chance de la trouver (**Annelise Tran et François Roger, 2018**). Dans le cadre de ce travail, les résultats de l'analyse qualitative du risque, l'analyse des réseaux sociaux et de la cartographie du risque permettront de déployer des protocoles de surveillance basée sur le risque de manière optimale.

4.5. Analyse multicritère d'aide à la décision

L'analyse multicritère d'aide à la décision (MCDA) consiste en une approche scientifique permettant d'obtenir des informations utiles pour la prise de décision (**Velasquez et Hester, 2013**). Au fil des décennies, il en a découlé plusieurs méthodes dont la plus répandue est l'analyse hiérarchique de pondération (AHP) (**Saaty, 1987, 2008.**). On procède à une hiérarchisation des paramètres qui s'effectue à l'aide d'une matrice de comparaison par paires et après recours à l'avis d'experts pour une pondération de chaque couche.

Dans ce travail, la hiérarchisation a concerné les obstacles naturels et artificiels par l'attribution d'un poids à chaque couche à l'aide d'une matrice de comparaison par paire et avec recours à l'avis d'experts. Le but est d'identifier d'éventuelles zones favorables qui répondent à la définition de zones au sens OIE.

L'approche multicritère est associée au système d'information géographique (SIG). Elle permet de combiner les données géographiques et les connaissances issues des experts et de la littérature pour obtenir des informations appropriées et utiles pour la prise de décision (**Malczewski, 2006**).

Le système d'information géographique permet de stocker, de manipuler et de visualiser des informations et des données référencées géographiquement. Ces informations géographiques sont organisées en couches. Les représentations spatiales permettant de stocker ces informations sont de deux types : format raster et format vecteur (=shapefile). Le raster est une image géo-référencée dont la plus petite unité de surface est le pixel. A chaque pixel est associée une ou plusieurs informations spatiales. Le vecteur représente l'espace sous forme d'entités géométriques (point, ligne ou polygone) (Annexe 3) (**Bernier et al., 2014.**).

TRAVAIL PERSONNEL

1. Introduction

Bien que la fièvre aphteuse soit très contagieuse, et avec des conséquences économiques graves pour les élevages intensifs, c'est une maladie qui n'est pas si redoutée dans les pays à élevage extensif notamment africains car la mortalité est faible et les pertes en productions ne sont pas toujours quantifiées. L'éradication de cette maladie pèse lourd sur les pays qui n'exportent pas et où les ressources dédiées à la santé animale sont limitées. Sa pérennité, dans les pays endémiques qui n'ont pas d'autres choix que de vivre avec la maladie, représente un danger global (mondial).

En effet, la diversité des sérotypes, des topotypes, ses souches et ses variants ainsi que la transmission de la maladie en dehors de sa zone endémique reconnue et sa réintroduction dans plusieurs pays après plusieurs années d'absence (Angleterre 2001, Maghreb 2014-2015, Bulgarie 2011, SAT 2 en Égypte 2012...) suscitent un intérêt mondial pour cette maladie. Elle est reconnue par la FAO et l'OIE comme une maladie hautement prioritaire, devant être combattue de manière synchronisée à l'échelle mondiale pour le bénéfice de tous les pays (FAO/OIE, 2012).

Lors de la Conférence mondiale FAO/OIE sur le contrôle de la fièvre aphteuse tenue à Bangkok, en Thaïlande, du 27 au 29 juin 2012, les participants ont préconisé d'utiliser les recommandations de l'OIE, en particulier « *les dispositions sur le zonage, la compartimentation, le confinement, les zones de protection et l'estimation des risques...* », pour le contrôle de la FA dans la monde.

L'objectif principal de ce travail est d'orienter la surveillance et le contrôle de la fièvre aphteuse en Tunisie en appliquant l'analyse qualitative du risque et le principe du zonage tel que préconisé par l'OIE. Pour cela, nous avons d'abord estimé la probabilité d'émission à partir des pays voisins et la probabilité d'exposition dans le pays en tenant compte de plusieurs facteurs de risque. Puis nous avons procédé à l'identification des zones telles que définies par l'OIE en se basant sur les frontières naturelles et artificielles existantes dans le pays. Le choix des facteurs ainsi que la définition des zones ont été discutés et validés par des experts nationaux et internationaux lors de séminaires dédiés organisés à Tunis et à Montpellier. La méthode MCDA-SIG a été appliquée.

Ce travail a été effectué au sein de l'unité ASTRE du CIRAD et en partenariat avec le bureau sous régional de l'OIE pour l'Afrique du Nord entre janvier et juin 2018 dont deux mois (février et mars) passés dans le bureau sous régional de l'OIE pour l'Afrique du Nord à Tunis. Ce travail a été supervisé et encadré par Dr. Cécile SQUARZONI-DIAW et Mme caroline COSTE du CIRAD de Montpellier et Dr Rachid BOUGUEUDOUR le représentant Sous régional de l'OIE pour l'Afrique du Nord.

Les trois étapes du déroulement de mon stage sont ainsi réparties :

- Du 08 au 31 janvier 2018, au CIRAD-Montpellier et consacrée à l'étude bibliographique sur la FA, le zonage, l'analyse qualitative du risque, l'analyse cartographique du risque, la mobilité animale, ainsi que les notions relatives à toutes ces thématiques (mobilité animale, accessibilité, Analyse des réseaux sociaux, ...)
- Du 01 février au 31 mars 2018, au Bureau sous régional de l'OIE basé à Tunis. Cette période a été dédiée à la collecte des données auprès de partenaires nationaux ; le Centre national de veille zoo-sanitaire (CNVZ), la direction générale des services vétérinaires (DGSV) et l'office d'élevage et pâturage (OEP). Au cours de cette période (du 27/02/ au 01/03/2018) a eu lieu l'atelier régional organisé par l'EU-FMD intitulé « *Fièvre aphteuse : surveillance pour la détection précoce et la confiance en l'absence de la circulation virale* ». Lors de cet atelier, les méthodes et les paramètres utilisés ont été discutés avec des représentants de l'EU-FMD et avec les vétérinaires maghrébins.
- Du 02/04 au 15/06/2016, au CIRAD-Montpellier, et consacrée au traitement et à l'analyse des données et la préparation du rapport de stage. Au cours de cette période a eu lieu l'atelier régional EU-FMD-CIRAD, relatif à « *Analyse qualitative et cartographie du risque pour l'optimisation de la surveillance FA* », regroupant les 3 pays du Maghreb et 2 pays d'Afrique de l'Ouest.

2. Matériel et méthode

2.1 Analyse qualitative et cartographique du risque

L'analyse qualitative et la cartographie du risque a été menée selon la méthode développée par Cécile Squarzoni-Diaw et Caroline Coste (**Coste et al., 2018**) (publication en cours) de l'UMR ASTRE du Cirad. Cette analyse est effectuée sur trois étapes (Annexe 4) :

- 1- Identifier les facteurs de risque influant sur l'émission et la diffusion de la FA en Tunisie.
- 2- Estimer la probabilité d'émission de la FA en Tunisie.
- 3- Estimer la probabilité de diffusion de la FA en Tunisie.
- 4- Construire les cartes de risque correspondantes

2.1.1 Facteurs de risque et données utilisées

Les facteurs de risque influant sur l'émission et la diffusion de la FA en Tunisie ont été identifiés en se basant sur la bibliographie. Le choix et la pertinence de ces facteurs ont été discutés et validés par des experts nationaux et des experts internationaux (de la région) lors d'ateliers organisés par le CIRAD en 2016, 2017 et 2018 (Tableau 2). Les données disponibles et de bonnes qualités, ont été intégrées dans un Système d'Information Géographique (SIG) à l'aide du logiciel QGIS (**QGIS Development Team, 2009**). L'unité épidémiologique pour toutes les données est l'imada qui est l'équivalent de la commune (en France). La Tunisie compte 2075 imadas.

Tableau 2 : Facteurs utilisés pour estimer et représenter la probabilité d'émission et d'exposition de la fièvre aphteuse en Tunisie

Données	Source	Utilisée pour déterminer
Situation épidémiologique dans les pays voisins	(OIE, WAHIS, 2018)	
Accessibilité	(Nelson, A, 2008)	La probabilité d'émission
Mobilité animale transfrontalière	(CNVZ, 2016)	
Mobilité animale nationale	(CNVZ, 2016)	
Unités d'engraissement	(DGSV, 2018)	
Marchés aux bestiaux	(CNVZ, 2016)	
Abattoirs	(CNVZ, 2016)	La probabilité d'exposition
Points d'eau	(CNVZ, 2016)	
Densité animale	(Robinson et al., 2014)	
Accessibilité	(Nelson, A, 2008)	

Densité animale

La densité animale joue un rôle important dans la diffusion de la maladie dans un territoire. La densité animale par imadas a été déterminée grâce à une carte de la distribution animale mondiale (Robinson *et al.*, 2014). Dans un premier temps, une coupe de la carte du monde selon les contours (frontières) de la Tunisie a été effectuée grâce à la fonction «découpe» du logiciel QGIS. Ensuite, la fonction «statistique de zone» a été utilisée pour obtenir la densité animale moyenne par imada.

Accessibilité

L'accessibilité est définie comme le temps de déplacement vers un lieu d'intérêt en utilisant des trajets terrestres (route / hors route) ou aquatiques (rivière navigable, lac et océan). Le temps de déplacement est estimé en fonction de la combinaison de plusieurs couches de données SIG qui sont fusionnées en une couche de coûts qui représente le temps nécessaire pour traverser chaque pixel. Le calcul de l'accessibilité est réalisé à l'aide d'un algorithme coût-distance, qui calcule le «coût» d'un déplacement entre deux emplacements sur une grille raster. Plus le coût d'un pixel est élevé, plus le temps requis pour le traverser est long.

Dans ce travail, une carte accessibilité mondiale (Nelson, A, 2008) a été utilisée. Dans un premier temps, une coupe de la carte du monde selon les contours de la Tunisie a été effectuée grâce à la fonction « découpe » du logiciel QGIS, ensuite la fonction « statistique de zone » a été utilisé pour obtenir le temps moyen pour traverser une imada.

Mobilité animale

La mobilité animale est un facteur capital dans la diffusion des maladies notamment la FA (Marquetoux *et al.*, 2016; Martínez-López *et al.*, 2009). Or, en Tunisie, l'identification des animaux ainsi que les bases de données dédiées et la traçabilité font défaut. Pour décrire et qualifier le mouvement des animaux, le Centre National de Veille Zoo sanitaire (CNVZ) a réalisé des enquêtes exhaustives dans les marchés à bestiaux en 2016 à l'aide de questionnaires de type « origine/destination » (Annexe 5) (CNVZ, 2016). Plus de 3000 mouvements ont été enregistrés et ont permis de décrire la mobilité animale dans le pays. Pour étudier la mobilité transfrontalière, une enquête au niveau des frontières a été effectuée en 2017 pour repérer les points informels d'entrée des animaux, ce qui a permis de capturer les flux majeurs des animaux à partir des pays voisins (Algérie et Libye). L'analyse des données issues de ces enquêtes a été effectuée à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2013) avec le package « SNA » (Carter T. Butts, 2016) et a permis de déterminer les imadas ou hubs les plus importants en terme de centralité (betweenness, et degree) pour les mouvements transfrontaliers.

2.1.2 Estimation de la probabilité d'émission

Pour pouvoir estimer la probabilité d'émission de la FA en Tunisie, deux probabilités ont été calculées indépendamment puis ont été combinées : la probabilité d'introduction et la probabilité de la diffusabilité externe.

2.1.2.1 La probabilité d'introduction de la FA en Tunisie

La probabilité d'introduction de FA en Tunisie à partir des pays voisins (Algérie et Libye) ou bien à partir des pays avec lesquels la Tunisie a des échanges commerciaux (pays appartenant l'union européenne) a été estimé à l'aide d'un tableau de notation rempli par les experts lors

de l'atelier organisé par le CIRAD et l'EU-FMD au mois d'avril 2018 (Annexe 6). Les experts de chaque pays ont rempli individuellement le tableau de notation pour leurs pays respectifs. Dans ce tableau de notations, les informations sur la situation épidémiologique du pays ; le type d'échange commerciaux (légaux et illégaux), les activités mises en place relatives à la surveillance (surveillance passive, active et basée sur le risque) et le contrôle de la maladie lors d'une suspicion d'un foyer (abattage sanitaire, vaccination en anneau) sont notées avec des coefficients de pondération spécifiques à chaque activité, en lien avec leur importance dans la propagation de la maladie (Annexe 7).

Une fois le tableau de notation rempli, les informations recueillies ont été ensuite validées collégialement avec des experts nationaux et internationaux présents dans l'atelier susmentionné et dans les précédents. La somme des lignes du tableau aboutit au calcul de la probabilité d'introduction, qui a été requalifiée en quatre niveaux :

- Si la probabilité estimée est entre]1-3] → La probabilité d'introduction est qualifiée de **Négligeable** et le score 1 est attribué à cette classe.
- Si la probabilité estimée est entre]4-6] → La probabilité d'introduction est qualifiée de **Faible** et le score 2 est attribué à cette classe.
- Si la probabilité estimée est entre]7-9] → La probabilité d'introduction est qualifiée de **Élevée** et le score 3 est attribué à cette classe.
- Si la probabilité estimée est entre]10-12] → La probabilité d'introduction est qualifiée de **Très élevée** et le score 4 est attribué à cette classe.

Pour les pays exportateurs d'animaux vers la Tunisie dans le cadre légal, le tableau de notation est complété à partir des données du système mondial d'information sur les maladies animales de l'OIE (**World Animal Health Database Interface, 2018**).

La probabilité d'introduction est appliquée aux imadas frontalières ainsi qu'aux imadas qui importent des animaux depuis les pays voisins (Libye et l'Algérie). Le score attribué à ces imadas est celui du pays.

2.1.2.2 La probabilité de la diffusabilité externe

Pour calculer la probabilité de la diffusabilité externe, deux paramètres ont été utilisés : les mouvements transfrontaliers des animaux (indegree) et l'accessibilité. Ces deux paramètres permettent de nuancer le risque en fonction de critère physique (accessibilité) ou de proportion des animaux entrants. Ce sont des variables continues, une discrétisation a été nécessaire à l'aide des quantiles pour les classer en quatre classes de probabilité : négligeable, faible, élevée et très élevée.

La probabilité d'émission (score du pays exportateur qui varie de 1 à 4 + probabilité diffusabilité externe qui varie 1 à 4) est ensuite ramenée aux quatre niveaux de risque en adoptant les combinaisons des facteurs suivantes :

- Si [imada est frontalière ou importatrice] ET [Accessibilité est très élevée OU «SNA indegree" transfrontalier est très élevé] → La probabilité d'émission est qualifiée de Très élevée et le score 4 est attribué à ces imadas.
- Si [imada est frontalière ou importatrice] ET [Accessibilité est élevée OU «SNA indegree" transfrontalier est élevé] → La probabilité d'émission est qualifiée d' élevée et le score 3 est attribué à ces imadas.
- Si [imada est frontalière ou importatrice] ET [Accessibilité est Faible OU «SNA indegree" transfrontalier est faible] → La probabilité d'émission est qualifiée de faible et le score 2 est attribuée à ces imadas.

- Pour les autres cas de figure → La probabilité d'émission est qualifiée de **Négligeable** et le score 1 est attribuée à ces imadas.

2.1.3 Estimation de la probabilité d'exposition

Pour le calcul de la probabilité d'exposition, plusieurs paramètres sont pris en compte (Tableau 4) : la densité des ruminants, la présence de points de rassemblement (marchés aux bestiaux, points d'eau, etc.), et les paramètres influant sur la diffusabilité de la maladie entre troupeaux (paramètres SNA de la mobilité nationale, accessibilité). Dans le SIG utilisé, les informations concernant ces différents paramètres sont agrégées au niveau de chaque imada.

La combinaison des facteurs de risque a été effectuée en discussion collégiale avec les experts nationaux et internationaux lors du même atelier (discussions à dire d'experts). La qualification des risques d'exposition sont présentées dans le tableau 6. Pour les variables continues, une discrétisation par quantile a été nécessaire pour les classer en quatre classes : négligeable(1), faible (2), élevée (3) et très élevée (4). Pour les marchés, les points d'eau ou les centres d'engraissement, on raisonne par présence (1)/absence (0). Ainsi la probabilité d'exposition est jugée :

- Si l'accessibilité est très élevée (4) OU la mobilité animale (SNA degree ou SNA betweenness) est très élevée (4) OU la densité est très élevée (4) avec présence de marchés secondaires(1) OU présence de points de rassemblement (marchés primaires, ou de centre d'engraissement ou de point d'eau) → **La probabilité d'exposition est qualifiée comme étant très élevée** et le score 4 est attribué à ces imadas.
- Si l'accessibilité est élevée (3) OU la mobilité animale (SNA degree ou SNA betweenness) est élevée (3) OU la densité élevée (3) avec présence de marchés secondaires (1) OU présence marchés secondaire ou de centre d'engraissement → **La probabilité d'exposition est qualifiée d'élevée et le score 3 est attribué à ces imadas.**
- Si l'accessibilité est faible (2) OU la mobilité animale (SNA degree ou SNA betweenness) est faible (2) OU la densité est faible (2) avec présence de marchés secondaires (1) OU présence de marchés secondaires ou de centre d'engraissement → **La probabilité d'exposition est qualifiée de faible et le score 2 est attribué à ces imadas.**
- Pour le reste des cas → La probabilité d'exposition est qualifiée de négligeable et le score 1 est attribué à ces imadas.

2.2 Zonage

Au cours de ce travail, la méthode MCDA-SIG a été utilisée pour identifier les zones propices au zonage tel que défini par l'OIE. Nous avons procédé en cinq étapes:

1. Identification des obstacles naturels ou artificiels existants en Tunisie
2. La cartographie de ces obstacles
3. Leur pondération
4. Génération de la carte de friction
5. Analyse de sensibilité

Ce travail a mobilisé des opérations de cartographie et de géo-traitement, qui ont été réalisées à l'aide d'un SIG (QGis) et du logiciel R.

2.2.1. Identification des obstacles

La première étape de ce travail fut d'identifier les obstacles présents dans le pays à partir de la littérature et selon les caractéristiques du pays (Brückner, 2013; OIE, 2015; Stone, 2017). Un obstacle est défini comme tous éléments artificiels ou naturels qui constituent un frein au mouvement des animaux. Les obstacles pouvant servir à la définition d'une zone sont peu décrites dans la littérature. Pour cela, le recours aux avis des experts nationaux a été jugé nécessaire pour valider la liste des obstacles retrouvés dans la littérature et compléter celle-ci. Dix experts ont été identifiés selon leurs connaissances du terrain et selon leurs connaissances sur les mouvements des animaux. Ces experts ont été contactés en direct. Quatre experts ont répondu à notre demande et leur opinion a été prise en compte. Au total, huit obstacles ont été retenus (Tableau 3).

Tableau 3 : Les couches identifiées pour le zonage et leurs sources

Couches	Source	Type de Fichier
Routes (Nationales et les autoroutes)	(Mapcruzin)	Shapefiles(ligne)
Rivières permanentes	(DIVA-GIS)	Shapefiles(ligne)
Zones humides permanentes	(DIVA-GIS)	Shapefiles(polygone)
Voies ferrées	(OpenStreetMap)	Shapefiles(ligne)
Océan	(Natural Earth)	Shapefiles (ligne)
Forêts	(Schneider et al., 2009, 2010)	Raster
Courbes de niveaux	(SRTM Tile Grabber)	Raster
Frontière	(Natural Earth)	shapefiles(ligne)

2.2.2. La cartographie de ces obstacles

Les couches géo-localisées contenant les huit obstacles précédemment identifiés ont été téléchargés à partir de bases de données en ligne. Etant donné que les couches téléchargées contiennent des informations autres que les obstacles d'intérêt. Des modifications ont été apportées à chaque couche. Ces dernières ont été décrites ci-dessous :

Réseau routier

Le shapefile représentant le réseau routier a été téléchargé à partir du site [Mapcruzin](#). Les routes nationales et les autoroutes ont été sélectionnées grâce aux requêtes disponibles sur le logiciel QGIS. L'hypothèse est que la vitesse du trafic des routes nationales et les autoroutes est importante et empêchera ainsi le passage des animaux.

Les voies ferrées

Le shapefile représentant les voies ferrées a été téléchargé à partir d'**OpenStreetMap** en utilisant l'extension « Open Layers » du logiciel QGIS. Cette couche a été validée à partir du site de la société nationale des chemins de fer Tunisiens (**“Société Nationale des Chemins de Fer Tunisiens”**).

Les forêts

Il faut noter qu'en Tunisie le pâturage dans les forêts est interdit. Les forêts sont protégées par les gardes forestiers et les animaux d'élevage trouvés dans la forêt sont confisqués et une amende est infligée à leur propriétaire. Ainsi, la forêt constitue un réel obstacle aux mouvements des animaux dans ce pays. Pour construire cette couche, un raster d'occupation du sol « Modis 500 » a été utilisé. La sélection des forêts a été effectuée à l'aide du logiciel R avec le package « Raster » et grâce à la fonction « reclassify » (**Hijmans, 2017**). La couche forêt a été validée ensuite sur googlemap.

Réseau hydrique:

Un shapefile représentant le réseau hydrique constitué de zones humides (Lacs) et de rivières a été retenu (**DIVA-GIS**). A partir de ce shapefile, les zones humides et les rivières permanentes ont été extraites.

La pente :

Un raster de courbes de niveaux composé de 4 tuiles a été téléchargé à partir de (**SRTM Tile Grabber**). La fusion de 4 tuiles a été faite grâce à la fonction « Fusion » du QGIS. La pente égale ou supérieure à 10% a été sélectionnée à partir du raster de courbe de niveau en utilisant l'extension « r.slope » du plugin Grass du logiciel QGIS. Selon les avis des experts du terrain, les animaux ne peuvent pas franchir une pente égale ou supérieure à 10%.

Océan :

La Tunisie est bordée au Nord et à l'Est par la mer méditerranée. Cette limite géographique naturelle a été extraite d'une couche vectorielle des côtes littorales du monde (**Natural Earth**).

Frontières :

La Tunisie est délimitée à l'ouest par l'Algérie et au sud-est par la Libye. Ces frontières politiques ont été extraites à partir d'une couche vectorielle des contours des pays (**Natural Earth**).

Toutes ces couches ont été transformées une à une en raster à l'aide du logiciel R avec le package « Raster » (**Hijmans, 2017**) avec une résolution de 1km/1km (Figure 6). Les rasters ont ensuite été découpés grâce à la fonction « Crop » pour que tous les fichiers aient la même délimitation. Pour cela, on a sélectionné l'étendue des fichiers pour qu'ils n'englobent que la Tunisie. Chaque pixel du raster prend une valeur de 0 ou 1. La valeur 0 est attribuée aux cellules sans données et la valeur 1 aux cellules dont l'information existe.

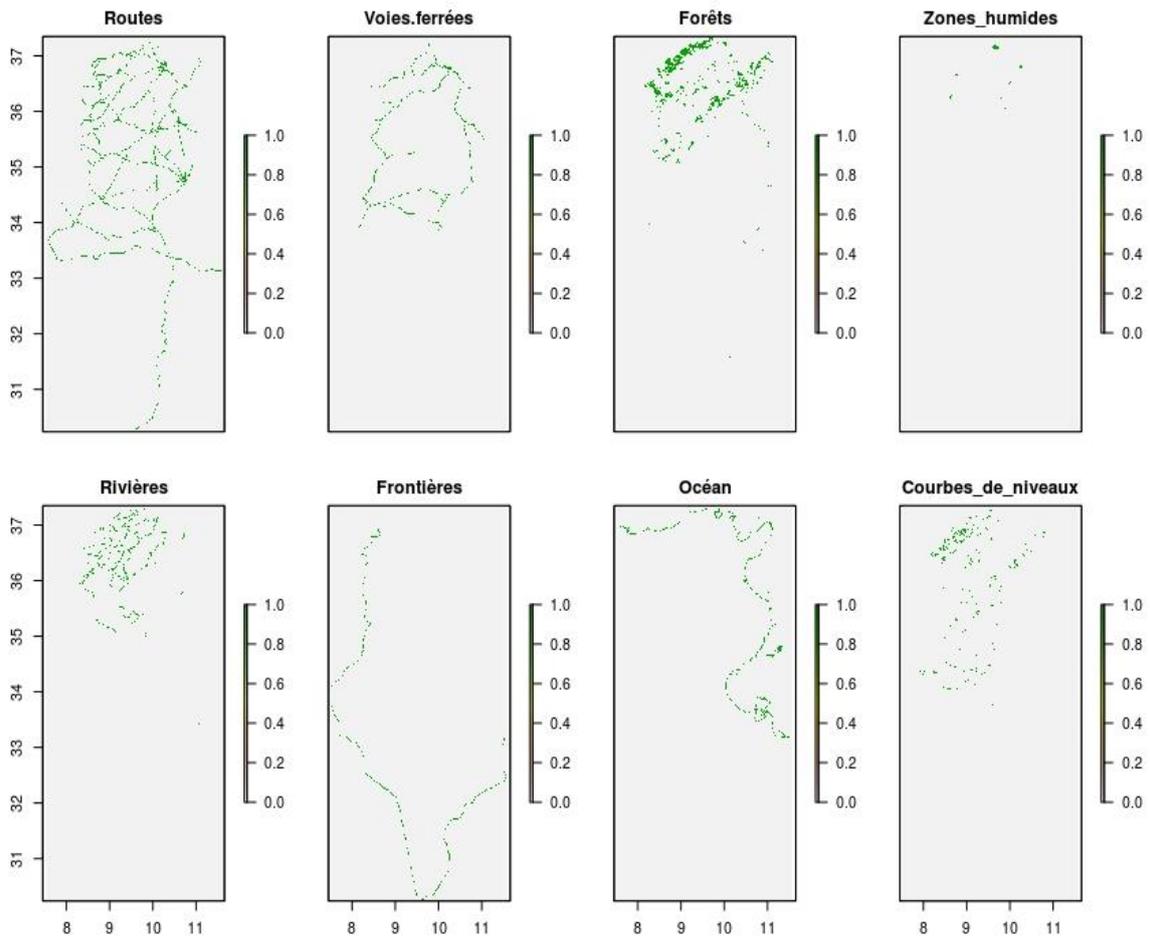


Figure 6 : Raster de chaque obstacle identifié (le logiciel R a été utilisé)

2.2.3. Pondération des couches

La pondération des couches a été effectuée en utilisant la méthode de comparaison par paires du processus de hiérarchie analytique (AHP). Pour ce faire, l’avis des huit experts a été sollicité dont quatre experts nationaux et quatre experts internationaux (Annexe 8). Le choix des experts internationaux a été effectué selon leurs connaissances sur les mouvements des animaux. La matrice de comparaison par paires a été créée sur un fichier Excel et a été remplie en présentiel et individuellement par les experts (Tableau 4).

Tableau 4: Matrice de la comparaison par paire

Les couches	Réseau routier	Voie ferrée	Zone humide	Rivière	Océan	Forêt	Frontière	Courbe de niveaux
Réseau routier								
Voie ferrée								
Zone humide								
Rivière								
Océan								
Forêt								
Frontière								
Courbe de niveaux								

Il a été demandé aux experts en premier temps pour chaque paire de préciser si un obstacle freine plus ou moins le mouvement des animaux sur pied qu'un autre, ensuite de quantifier le degré d'importance de cette différence en utilisant une échelle à cinq niveaux (Tableau 5).

Par exemple : soit 2 obstacles A et B, si A est beaucoup plus important que B, A obtient le score 4. Au contraire si A est beaucoup moins important que B, A obtient le score 1/4

Tableau 5: Echelle de comparaison par paire

Degrés d'importance	Définition de la valeur
1	Importance des deux critères est égale
2	Le critère est un peu plus important que l'autre
3	Le critère est plus important que l'autre
4	Le critère est beaucoup plus important que l'autre
5	Le critère est absolument plus important que l'autre
1/2	Le critère est un peu moins important que l'autre
1/3	Le critère est moins important que l'autre
1/4	Le critère est beaucoup moins important que l'autre
1/5	Le critère est absolument moins important que l'autre

La construction de la hiérarchie et la structuration de priorités doivent garantir une cohérence qui est représentée par le ratio de cohérence(RC) défini par Saaty (Saaty, 1987). Ainsi d'après Saaty, pour une valeur de $RC \leq 10\%$, la matrice est jugée cohérente. Dans le cas où cette valeur dépasse 10%, la matrice est considérée incohérente.

Une fois que la matrice est remplie par l'expert, le RC par matrice a été calculé. Parmi les huit experts sollicités, deux d'entre eux présentaient un RC supérieur à 10%. Une rectification de la matrice a été effectuée par l'expert en présentiel jusqu'à l'obtention d'une valeur de RC inférieure à 10%.

Pour chaque expert, le poids de chaque obstacle a été calculé en fonction de ses comparaisons par paires. Le poids final de chaque obstacle est égal au poids moyen donné par les huit experts.

2.2.4. Génération de la carte de friction

Au cours de ce travail, deux cartes de frictions ont été réalisés une sans pondération et une autre avec pondération.

2.2.4.1. Carte de friction sans pondération :

Les rasters ont été superposées pour aboutir à une carte finale, appelée carte de friction sans pondération. La superposition de tous ces rasters a été réalisée grâce à la fonction Stack du logiciel R du package « Raster » (Hijmans, 2017).

2.2.4.2. Carte de friction avec pondération

Le poids moyen de chaque obstacle attribué par les experts est appliqué à la matrice de chaque raster. Chaque raster ainsi pondéré est additionné pour donner la carte de friction avec pondération (Annexe 9). Ceci est effectué à l'aide du logiciel R grâce à la fonction Stack du package « Raster » (Hijmans, 2017).

2.2.4.3. L'analyse de sensibilité :

L'analyse de sensibilité permet d'évaluer la robustesse du modèle en estimant la divergence des avis des experts. Cette divergence a été estimée en calculant les coefficients de variations (CV=écart-type/moyenne). Pour calculer ces variations, le poids donné aux 8 obstacles par chaque expert a permis d'établir 8 cartes de friction. Leur superposition a donné une nouvelle carte à partir de laquelle on a extrait une carte de moyenne et une carte d'écart-type. Les coefficients de variations sont finalement obtenus en divisant la carte écart-type par la carte moyenne.

2.3. Combinaison analyse qualitative et zonage

Pour visualiser le statut de risque des imadas à l'intérieur des zones identifiées au sens OIE, la carte d'exposition au risque et la carte de friction avec pondération ont été superposées pour pouvoir identifier les imadas qui ont la probabilité d'exposition élevée et très élevée et leur appliquer une lutte et une surveillance adaptées.

5. Résultats

5.1. Analyse qualitative et cartographie du risque

5.1.1. Probabilité d'émission de la fièvre aphteuse en Tunisie

La probabilité d'introduction de la fièvre aphteuse par le commerce du bétail à partir des pays frontaliers et des pays exportateurs vers la Tunisie a été estimée à partir de la grille de notation présentée dans le Tableau 6.

Tableau 6: Tableau de notation des facteurs relatifs à l'introduction de la FA en Tunisie

PAYS	STATUT Infecté dans le passé (3)	Commerce échanges légaux avec pays à risque (1)	Mouvements illégaux (3)	Dispositifs de surveillance (2)				Dispositifs de contrôle (3)				
				D.O. (0,25)	Surv. Active (0,5)	Surv. Passive (0,5)	Surv. Basée sur le risque (0,75)	Contr. aux frontières (1)	Abat. sanitaire des foyers (0,5)	Abat. sanitaire autour des foyers (0,5)	Zonage et restriction des mvts(0,75)	Vaccination en anneau (0,25)
Lybie	3	1	3	0,25	0,5	0,5	0,75	1	0,5	0,5	0,75	0,25
Algérie	3	0	3	0	0,5	0	0,75	1	0,5	0,5	0,75	0,25
UE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Pour les pays frontaliers (Figure 7) : la probabilité d'introduction est jugée 'très élevée' pour la Libye et 'élevée' pour l'Algérie. Pour les pays exportateurs de l'Union européenne, la probabilité d'introduction est jugée négligeable.

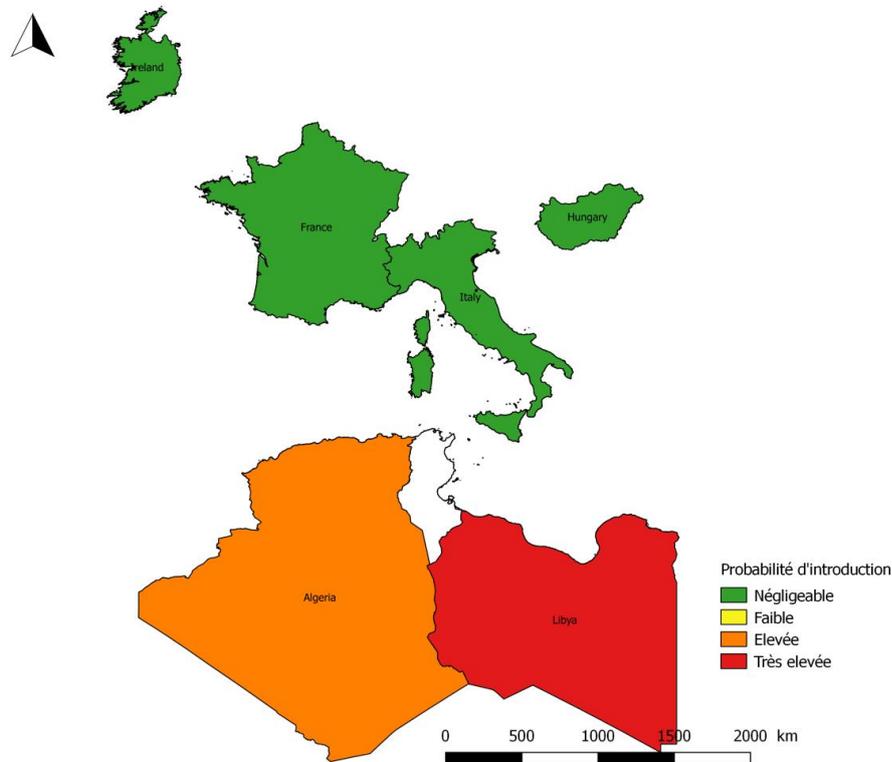


Figure 7 : Probabilité d'introduction de la FA à partir des pays frontaliers et les pays exportateurs vers la Tunisie

La carte d'émission de la FA a permis de mettre en évidence que sur 2075 imadas de la Tunisie, 23 présentent une probabilité d'émission très élevée, 480 présentent une probabilité d'émission élevée, 1081 présentent une probabilité d'émission faible et 491 présentent une probabilité d'émission négligeable (Figure 8).

Les imadas à probabilité d'émission très élevée sont en nombre relativement faible et sont celles qui ont des points de passage informels d'animaux à partir des pays frontaliers vers le pays.

Les imadas à forte probabilité d'émission est de l'ordre de 23%, elles sont concentrées principalement dans la partie sud du pays.

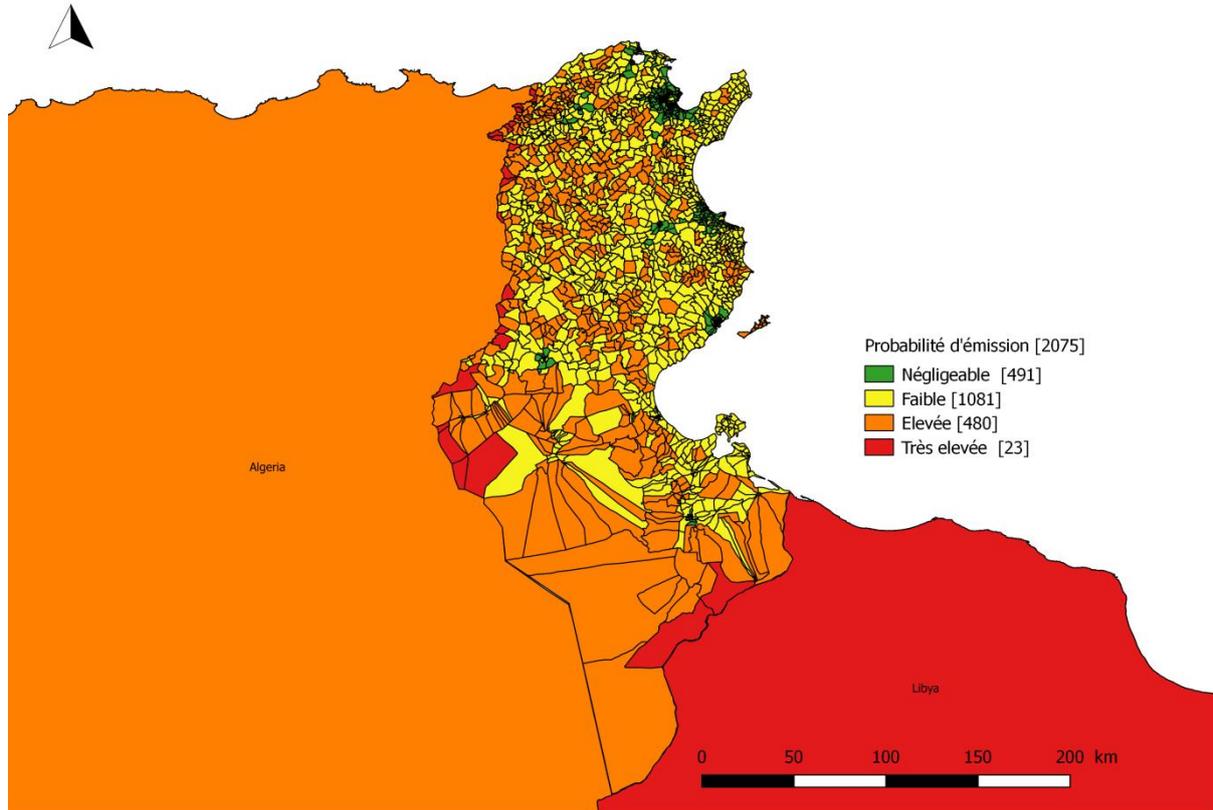


Figure 8 : Probabilité d'émission de la fièvre aphteuse en Tunisie

5.1.2. La probabilité d'exposition de la fièvre aphteuse en Tunisie

La carte d'exposition (Figure 9) a mis en évidence : sur 2075 imadas de la Tunisie, 59 présentent une probabilité d'exposition très élevée (couleur rouge), 1010 présentent une probabilité d'exposition élevée (couleur orange), 755 présentent une probabilité d'exposition faible (couleur jaune) et 251 présentent une probabilité d'exposition négligeable (couleur verte).

Les imadas à probabilité d'exposition très élevée sont en nombre relativement faible et sont dispersés dans le pays sauf pour la région de Sidi Bouzid (au centre du pays) où on trouve une agrégation de six de ces imadas. Cette localité abrite le marché aux bestiaux le plus important du pays.

Les imadas à forte probabilité d'exposition sont nombreuses (49%), en outre elles sont étendues sur plusieurs gouvernorats notamment au nord et au Centre-Est du pays. Au centre ouest et au sud du pays on trouve des imadas à forte probabilité d'exposition qui sont logées entre plusieurs autres à probabilité faible et négligeable.

Les imadas à probabilité d'exposition faible et négligeable sont concentrées dans le centre et le sud du pays.

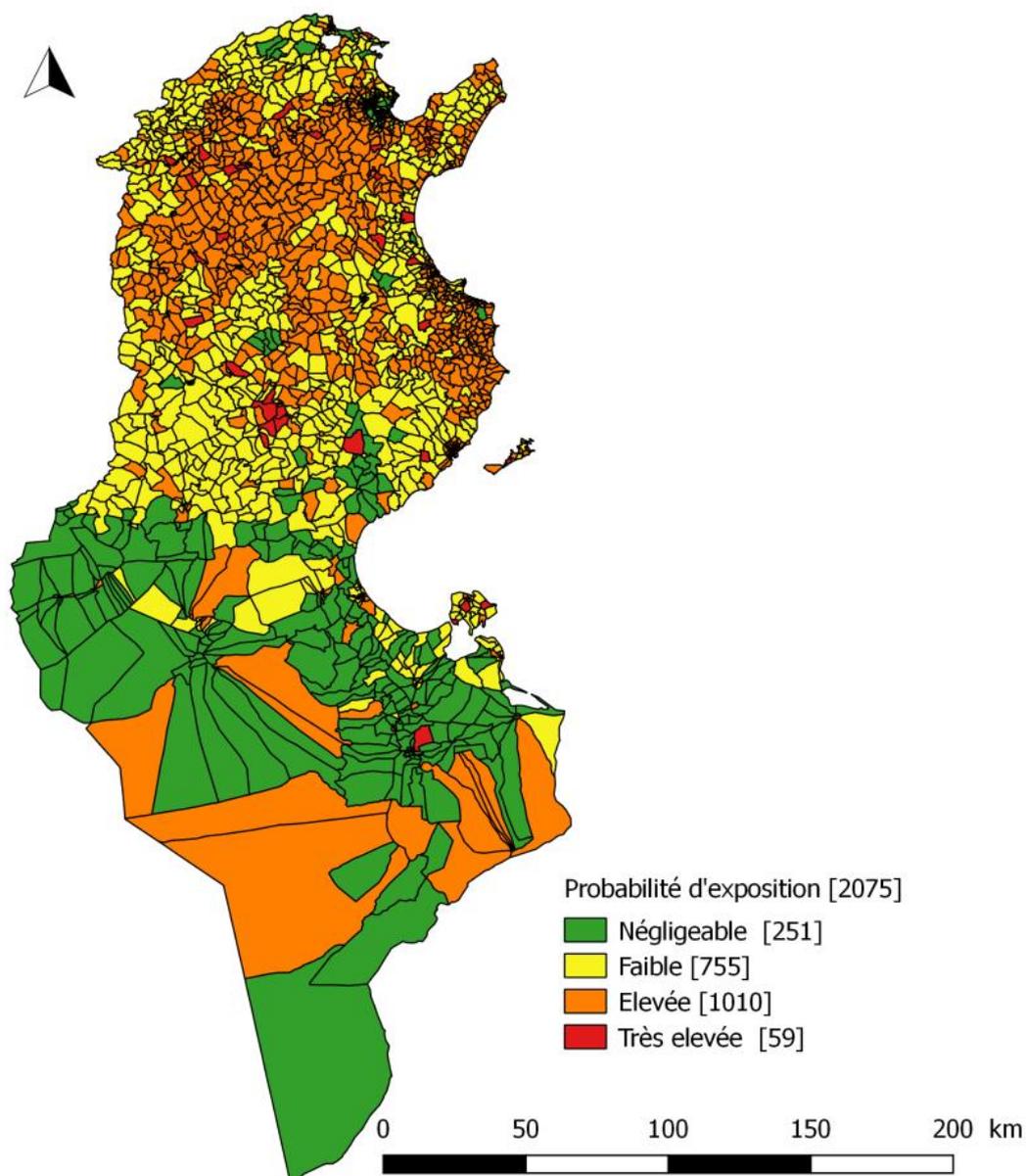


Figure 9: Probabilité d'exposition de la fièvre aphteuse en Tunisie

5.1.3. Validation des résultats : Confrontation des résultats avec les foyers enregistrés

Afin de valider *a posteriori* les résultats obtenus, la carte d'exposition de la FA générée a été confrontée avec les foyers de FA déclarés lors des épidémies de 2014 et 2017 en Tunisie (Figure 10). Les données relatives à ces foyers sont issues du site Global Animal Disease Information System EMPRES-i de la FAO.

Durant cette période (2014-2017), 146 foyers de FA ont été déclarés en Tunisie. Ils ont touché 102 des 2075 imadas. 67% des foyers déclarés étaient situés dans des communes où la probabilité d'exposition est jugée élevée ou très élevée.

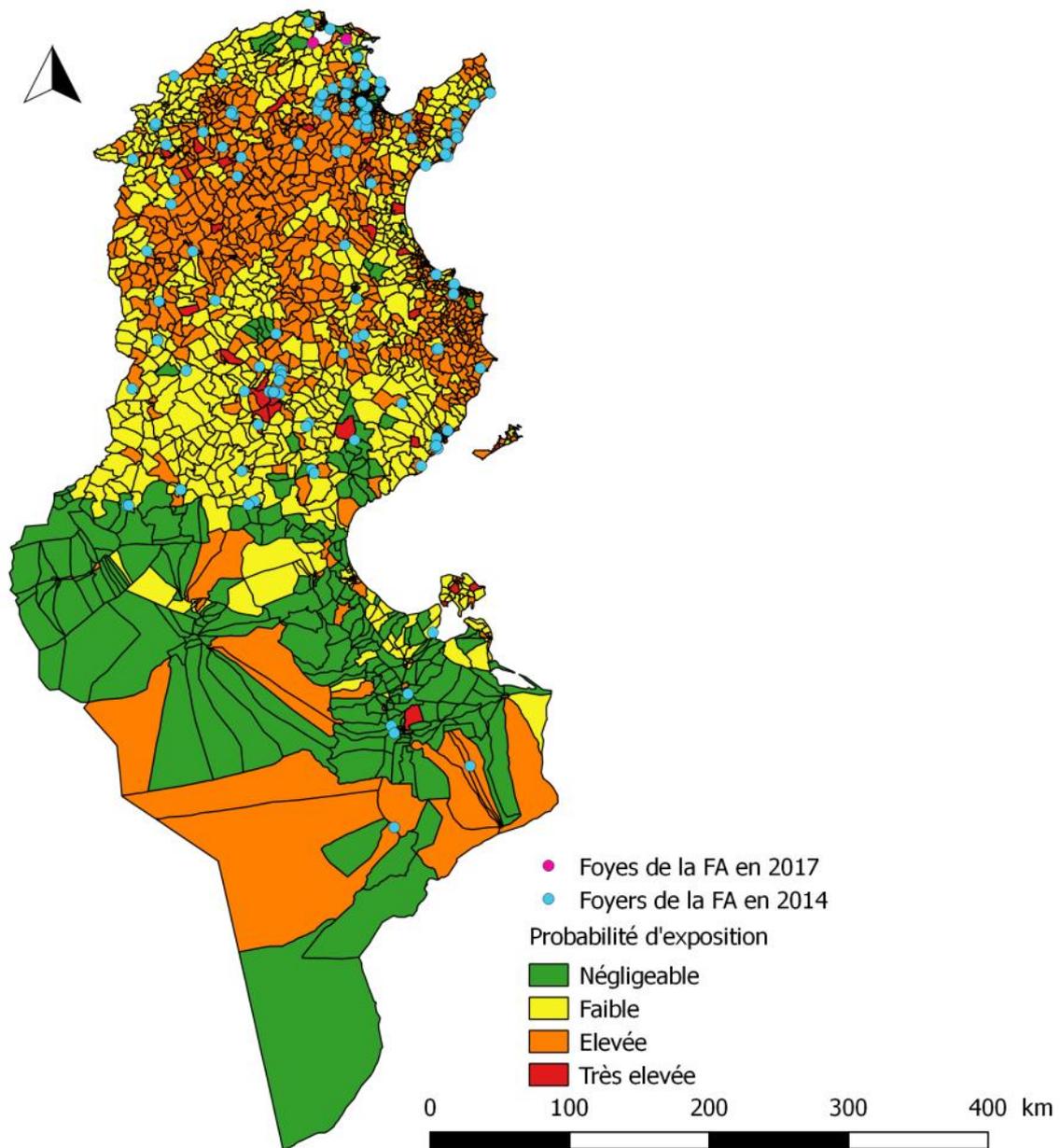


Figure 10: Superposition de la carte d'exposition avec les foyers de la FA en Tunisie en 2014 et 2017

5.2.Zonage

Le zonage a été réalisé en 3 étapes : tout d'abord, les facteurs identifiés ont été cartographiés sans pondération pour visualiser tous les paramètres, ensuite les poids attribués par les experts ont été intégrés pour identifier les zones les plus propices au zonage et enfin les cartes de zonage et la carte de la probabilité d'exposition ont été superposées.

5.2.1. Sans pondération

Les huit obstacles naturels ou artificiels retenus sont additionnés pour donner la carte de friction sans pondération illustrée par la figure 11. Le pays a été découpé en plusieurs zones qui sont limitées pour la plupart par un seul obstacle qui est la route, notamment au sud. Or

les routes principales sont prolongées par des routes secondaires, toutes utilisées pour transporter les animaux entre les différentes régions du pays.

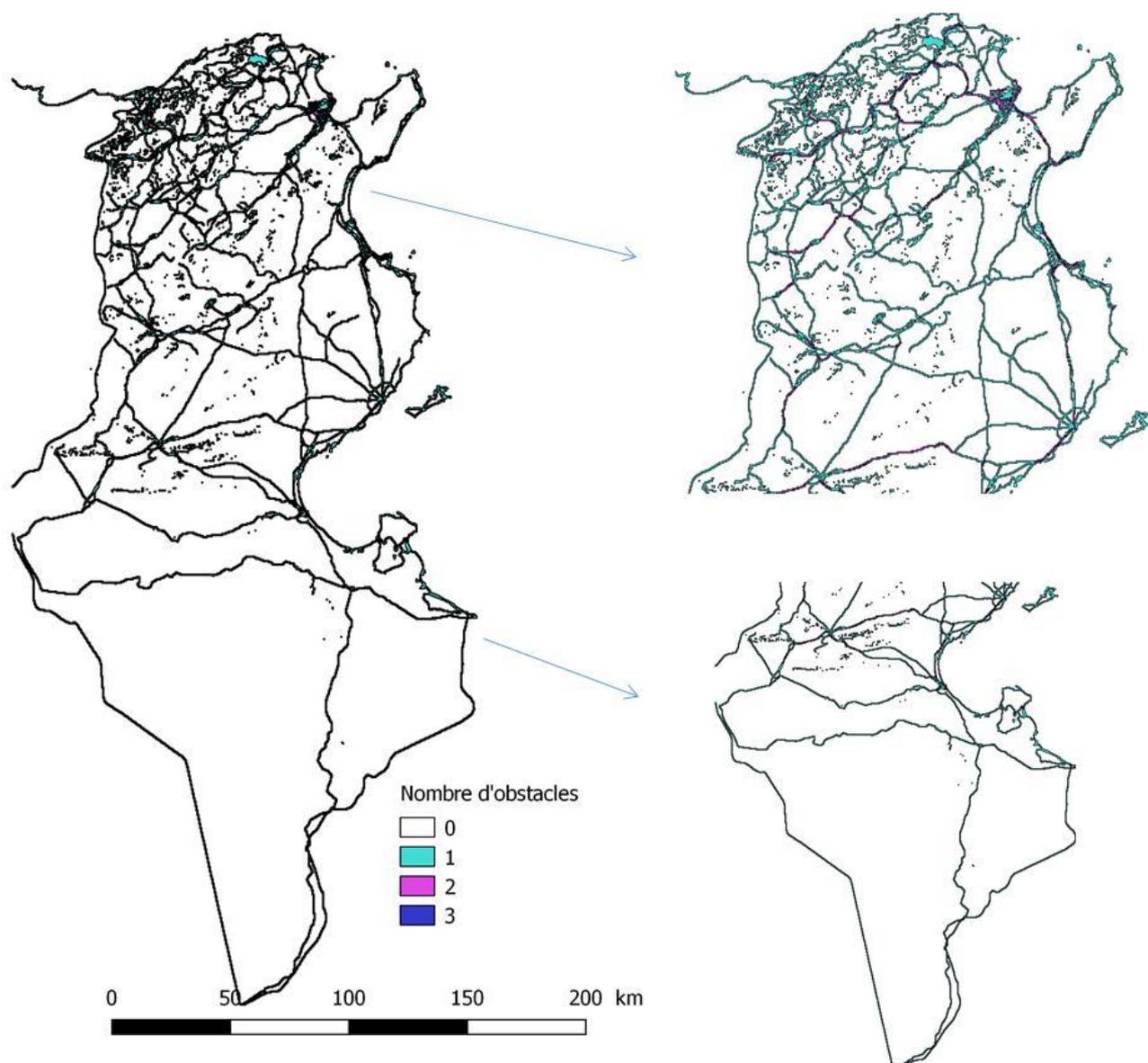


Figure 11: Carte de friction sans pondération

5.2.2. Avec pondération

Pour identifier les zones propices au zonage au sens de l'OIE, il est nécessaire d'intégrer le poids moyen émis par les experts pour aboutir à une carte de friction avec pondération. Les résultats du calcul des poids attribués par les experts pour chaque obstacle ainsi que le ratio de cohérence (RC) des jugements des experts sont représentés dans le tableau 7.

Tableau 7: Poids des obstacles attribués par les huit experts

Expert	Route	Voie ferrée	Zone humide	Rivière	Océan	Forêt	Frontières terrestres	Courbes de niveaux	RC
1.	0.039	0.032	0.178	0.118	0.391	0.091	0.049	0.102	8%
2.	0.033	0.034	0.138	0.098	0.395	0.068	0.075	0.159	6.8%
3.	0.039	0.035	0.074	0.097	0.23	0.154	0.108	0.263	6.5%
4.	0.038	0.038	0.086	0.2	0.368	0.078	0.107	0.085	8.3%
5.	0.094	0.054	0.088	0.136	0.31	0.056	0.064	0.198	5.6%
6.	0.055	0.042	0.24	0.192	0.26	0.056	0.053	0.102	6%
7.	0.034	0.043	0.094	0.163	0.39	0.08	0.089	0.107	8.3%
8.	0.065	0.124	0.17	0.103	0.34	0.037	0.075	0.086	8.7%
Moyenne	0.051	0.050	0.133	0.138	0.335	0.077	0.077	0.138	-
Ecart-type	0.021	0.030	0.058	0.041	0.063	0.035	0.022	0.064	

Les avis des experts sont peu divergents ; ils suivent la même allure bien qu'on remarque une différence dans l'attribution des poids pour chaque couche (Figure 12). Le poids utilisé pour la pondération est la moyenne des poids accordés par les différents experts.

Poids des obstacles en %

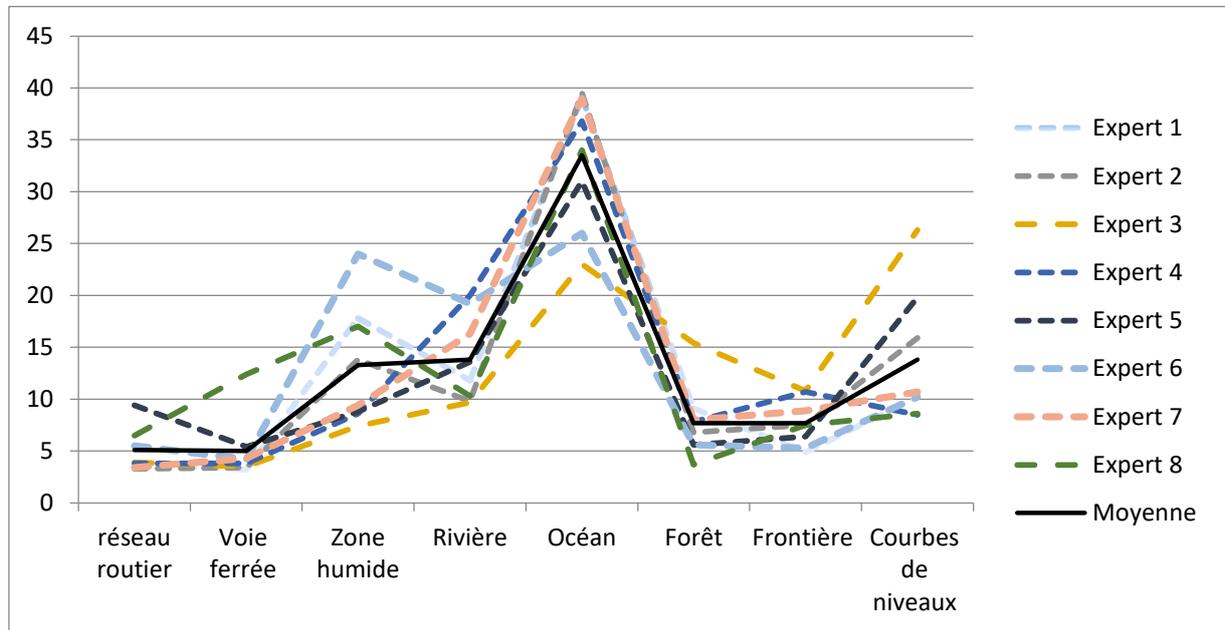


Figure 12 : Courbes des avis des experts

L'addition de l'ensemble des couches avec les poids émis par les experts a permis de donner la carte de friction avec pondération illustrant les zones les plus propices au zonage (au sens

de l'OIE) en Tunisie. Trois zones A, B et C ont pu être identifiées (Figure 13). Les autres zones visibles sur la carte n'ont pas été prises en considération vu que les routes qui représentent le seul obstacle pour délimiter la zone, ont un poids faible attribué par les experts d'autant plus que ces routes sont empruntées quotidiennement par les camions qui transportent les animaux à travers tout le pays.

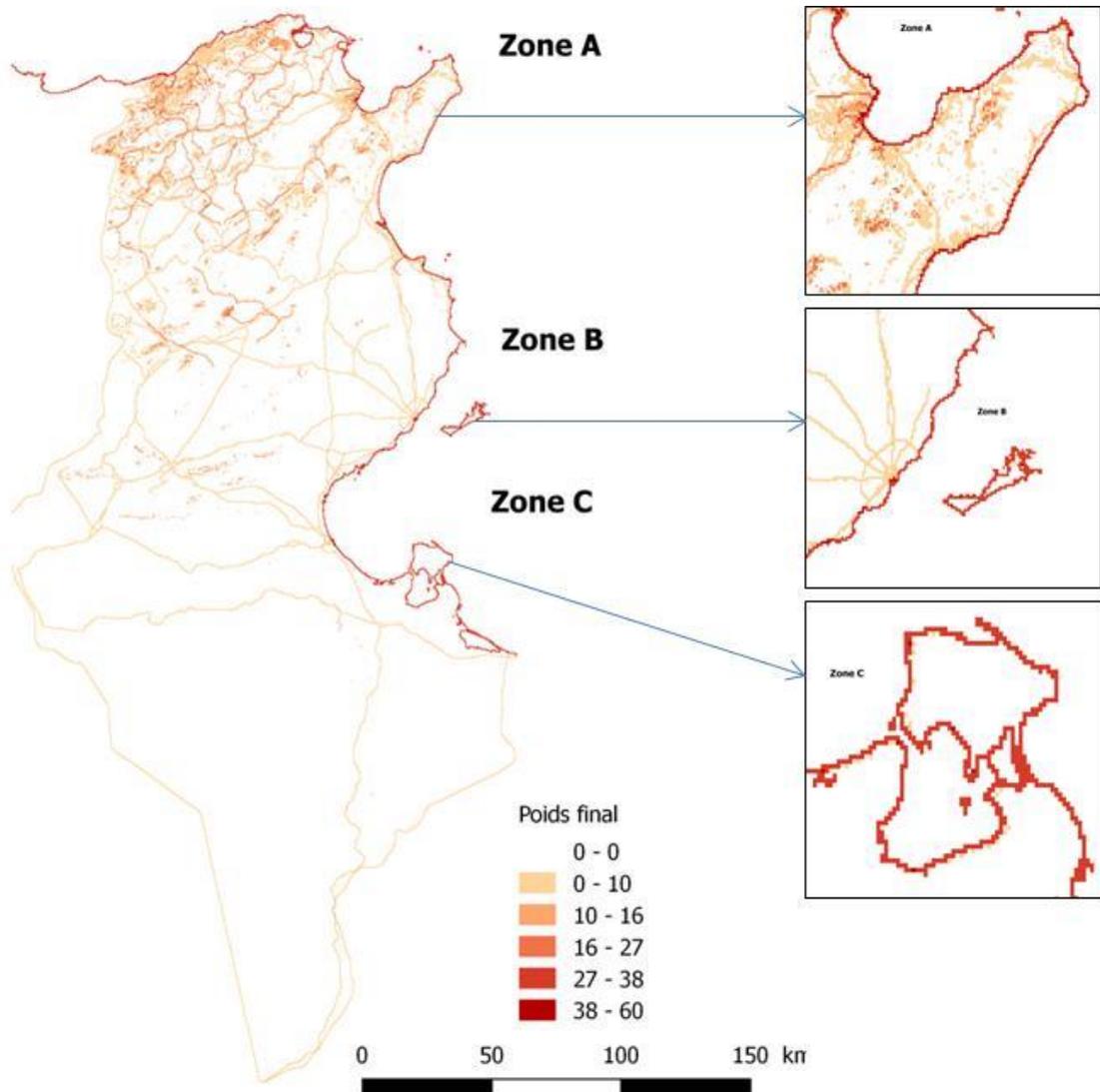


Figure 13: Carte de friction avec pondération

La zone A

La zone A correspond à la région du cap Bon, il s'agit d'une presqu'île, elle est délimitée par la mer méditerranée de 3 côtés et par une autoroute, une route nationale et une voie ferrée de l'autre côté. L'introduction des animaux se fait par voie terrestre à travers des routes secondaires desservies par la route nationale (Annexe 10).

La zone B :

La zone B est l'archipel de kerkennah délimitée par la mer méditerranée. Les mouvements d'animaux vers cette zone se font par un ferry à partir du port de Sfax (Annexe 11).

La zone C

La zone C correspond à l'île de Djerba qui est délimitée par la mer méditerranée. Les mouvements d'animaux vers cette zone se font par voie terrestre et maritime. Pour la voie terrestre, l'accès se fait par la chaussée romaine cordon qui relie l'île au continent par la ville de Zarzis et pour la voie maritime, l'accès se fait par un ferry : du port Joref au port de l'île de Djerba l'Adjim (Annexe12).

5.2.3. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité permet d'évaluer la robustesse du modèle en estimant la divergence des avis des experts. Plus le coefficient de variation est faible, plus les avis des experts est convergent. Le coefficient de variation observé dans les trois zones est égal à 0.2 ce qui reste faible et ne permet donc pas de mettre en évidence une divergence importante entre les avis des experts (Figure 14).

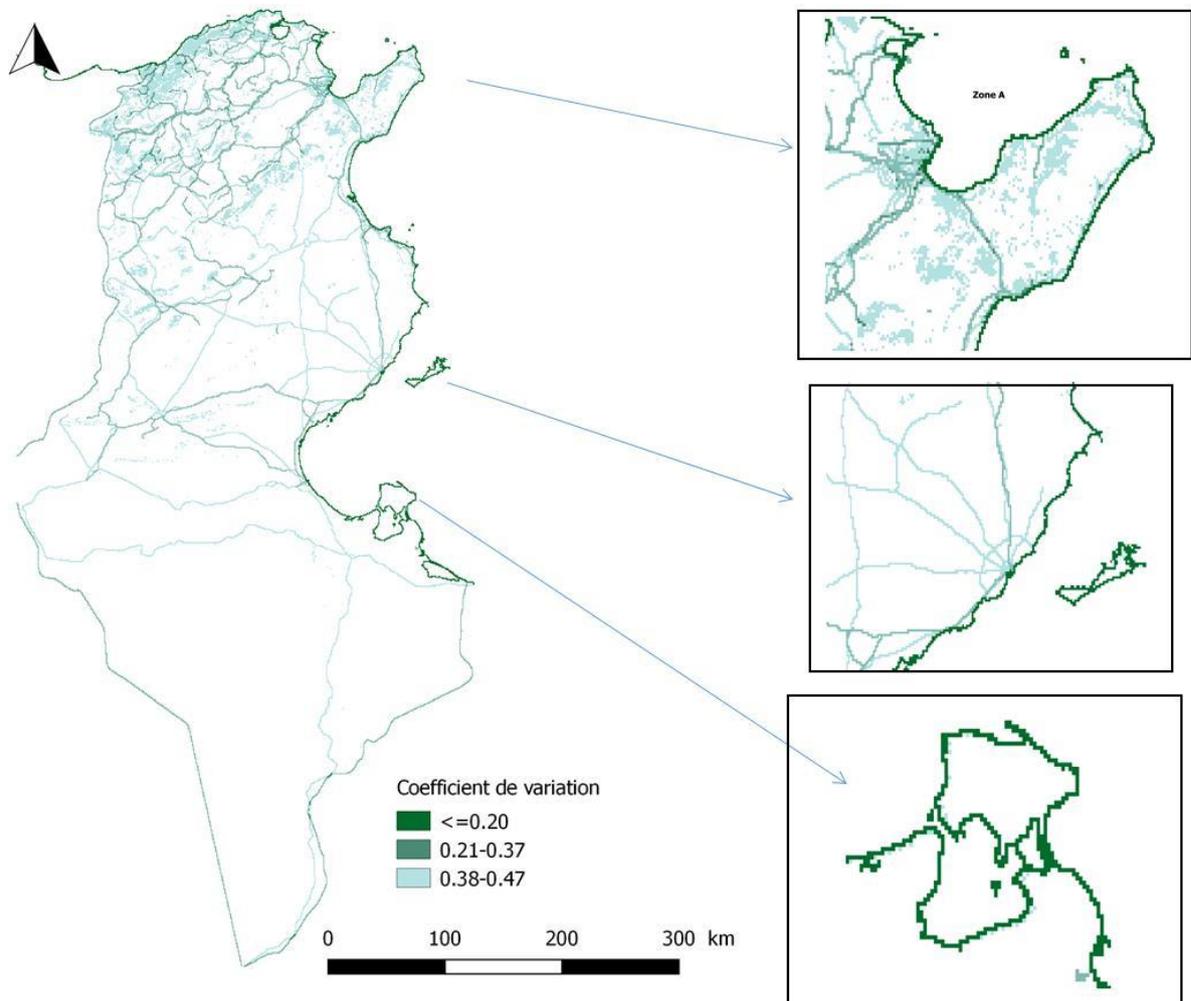


Figure 14 : Analyse de sensibilité de la carte de friction avec pondération

5.3. Combinaison analyse qualitative et zonage

La superposition de la carte de friction avec pondération et de la carte de la probabilité d'exposition de la FA (Figure 15) a mis en évidence pour les trois zones au sens OIE :

- Dans la zone A : sur un total de 87 imadas, 33 imadas présentent une probabilité d'exposition de la FA jugée faible, 50 imadas présente une probabilité d'exposition jugée élevée et 4 imadas présentent une probabilité d'exposition jugée très élevée
- Dans la zone B : sur 12 imadas, une imada présente une probabilité d'exposition jugée négligeable, 5 imadas présentent une probabilité d'exposition jugée faible, 3 imadas présentent une probabilité d'exposition jugée élevée et une imada présente une probabilité d'exposition jugée très élevée.
- Dans la zone C : sur 24 imadas ; 15 imadas présentent une probabilité d'exposition jugée faible, 6 imadas présentent une probabilité d'exposition jugée élevée et 3 imadas présentent une probabilité d'exposition jugée très élevée.

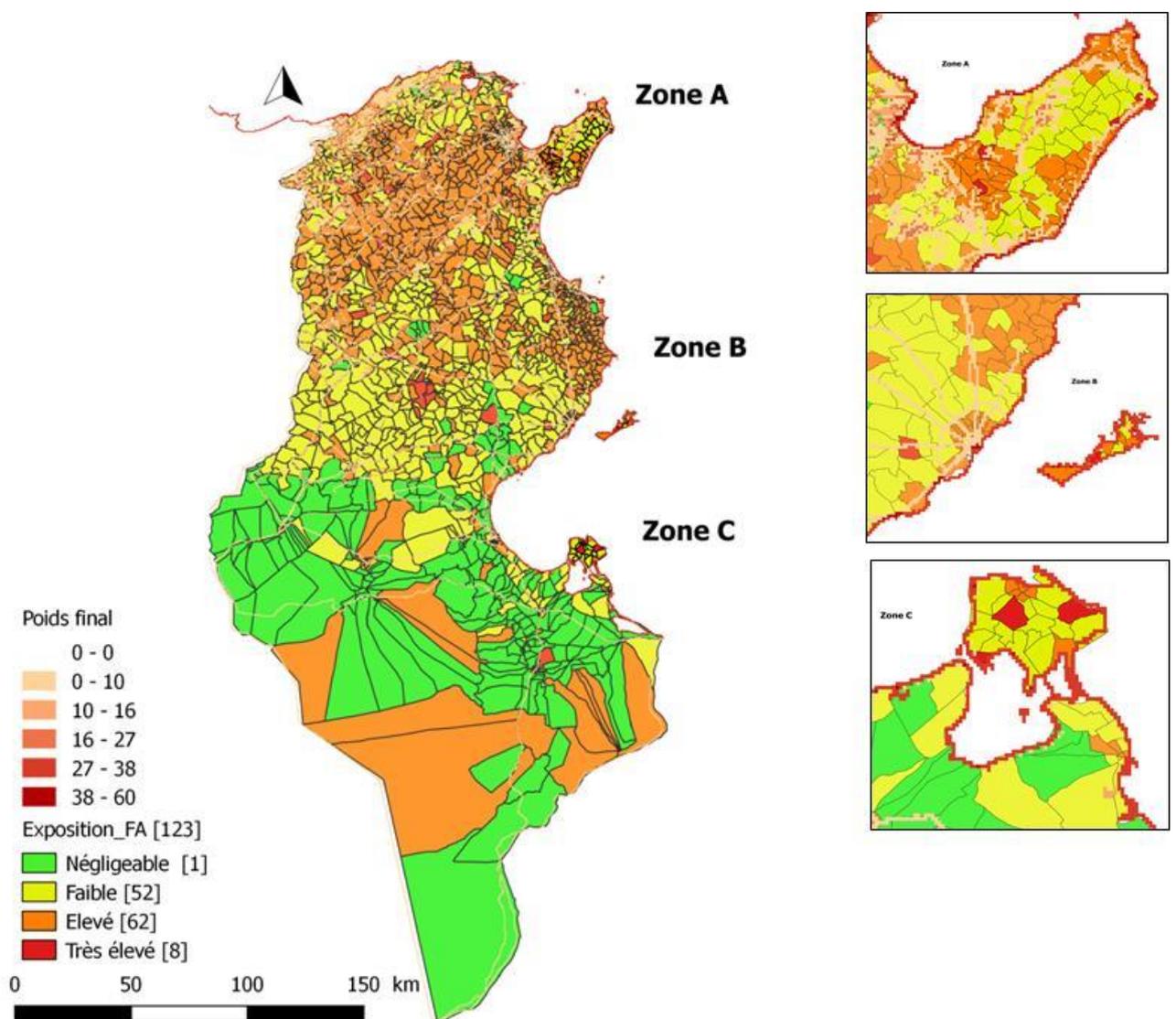


Figure 15: Superposition de la probabilité d'exposition de la FA et la carte de friction avec pondération

6. Discussion

6.1. Matériel et méthode

6.1.1. Analyse qualitative et cartographie du risque

Le souci majeur est d'identifier tous les facteurs pertinents à inclure dans l'analyse et de disposer des informations y afférentes (Kédowidé, 2010) pour les pondérer entre elles et les analyser. Pour l'exhaustivité des critères (facteurs de risque) pris en compte, il nous fallait surtout s'assurer qu'il n'y ait pas des critères pertinents qui aient été omis: La validation a été faite en se référant à la littérature et en ayant recours à l'avis, aux connaissances et à l'expérience de terrain des experts nationaux et internationaux aussi bien lors des ateliers organisés par le CIRAD que par contact direct avec les acteurs de terrain en Tunisie.

6.1.2. Zonage

Dans ce travail, faute de disponibilité de couches de données officielles dans les institutions sollicitées, les données utilisées appartiennent au domaine public ; elles sont peu précises, non mises à jour et de faible résolution d'où la nécessité (avec plus de temps et de moyens) d'explorer d'autres sources qui seraient payantes.

Dans ce travail, l'avis de 14 experts a été sollicité pour sélectionner et valider les obstacles ainsi que leur pondération, seuls 8 experts ont répondu. Le choix des experts a été effectué selon leurs connaissances du terrain et de la mobilité animale, de l'épidémiologie des maladies animales ; les experts étaient des vétérinaires sur le terrain de la région de Tunis, du Cap Bon et du Nord du pays, des épidémiologistes nationaux et internationaux. Le recours à un nombre plus important et de domaines plus variés d'experts, amoindrit le risque de subjectivité dû à leurs expériences professionnelles et à leurs opinions respectives (Dufour et al., 2011). Bien que le nombre d'experts soit relativement faible par rapport aux normes (10 à 18) (Okoli et Pawlowski, 2004), leurs réponses étaient peu divergentes (Figure 9).

En plus du nombre limité des experts, un seul tour de questionnaire a été réalisé. Il aurait été préférable de faire plusieurs tours de questionnaire (quatre tours). A chaque tour, les experts reçoivent de façon anonyme un résumé des résultats du tour précédent pour qu'ils révisent leurs opinions afin d'aboutir à un consensus entre les avis (Grime et Wright, 2016). Toutefois, l'analyse de la sensibilité a montré que le coefficient de variation dans les trois zones : A, B et C est de 0.2 démontrent que la divergence des avis des experts est faible. L'utilisation de la moyenne des réponses des experts est justifiée par le fait qu'elle est très proche de la médiane et qu'elle a été utilisée dans plusieurs articles qui ont sollicité les avis des experts pour la pondération des facteurs de risques de l'Influenza aviaire et de la Fièvre aphteuse (FA) (Stevens et al., 2009; Santos et al., 2017).

6.2. Résultats et discussions

6.2.1. Analyse qualitative et cartographie du risque :

La méthode d'analyse et de cartographie du risque développée par des épidémiologistes du CIRAD associe les approches de l'évaluation des risques à la cartographie des risques en intégrant la mobilité des animaux. Les résultats générés sont associés à la « surveillance basée

sur le risque ». Elle permet l'optimisation de la surveillance des maladies animales en se basant sur le risque. En effet, « la surveillance basée sur le risque » vise à prendre en compte les différences de risque pour les animaux dans la population afin d'optimiser et de maximaliser les activités de surveillance dans les zones présentant les plus hauts risques. En ciblant les animaux les plus susceptibles d'être infectés ou les plus susceptibles d'être détectés s'ils sont infectés, on augmente la sensibilité de la surveillance sans augmenter le nombre total d'animaux testés (FAO, 2014).

Les valeurs des critères utilisés pour l'analyse et la cartographie du risque ne sont pas figées. Elles sont appelées à changer et à évoluer dans le temps et dans l'espace. Les cartes de risque dépendent du contexte épidémiologique du pays, des pays voisins et des données disponibles et doivent être actualisées très régulièrement.

Pour affiner les résultats et augmenter la précision de ces cartes, d'autres facteurs comme la vaccination (Rawdon et al., 2018), les prix des marchés du bétail entre les pays frontaliers (Santos et al., 2017) auraient pu être utilisés si nous avions disposé de l'information correspondante. Les données relatives à la mobilité animale, fournies par les enquêtes effectuées par le CNVZ, dans tous les marchés du pays et sur les frontières, ont été d'un grand apport pour ce travail. Les mouvements des animaux (notamment commerciaux) sont un facteur déterminant pour l'introduction et la diffusion des maladies.

Cependant, des enquêtes complémentaires auprès des éleveurs et auprès des maquignons, vu qu'une partie du commerce d'animaux se fait entre les éleveurs et les maquignons, sont nécessaires pour avoir une description exhaustive de la mobilité des animaux dans le pays.

Lors des discussions avec les experts nationaux et internationaux, dans le cadre de l'atelier EU-FMD-CIRAD, relatif à « Analyse qualitative et cartographie du risque pour l'optimisation de la surveillance FA », il a été recommandé de ne pas utiliser la carte probabilité de survenue de la FA pour la surveillance basée sur le risque. Cette carte est le produit de la carte de la probabilité d'émission et celle de la probabilité d'exposition. Cette recommandation a deux justifications :

1) La perte d'information

2) La surveillance basée sur le risque va se faire principalement sur la carte de la probabilité d'émission en renforçant la surveillance sur les imadas à probabilité d'émission élevée et très élevée pour éviter l'introduction de la maladie à partir des pays frontaliers. Si toutefois, la maladie est introduite dans le pays, il faut recourir à la carte de la probabilité d'exposition en ciblant les imadas à probabilité d'exposition élevée et très élevée.

6.2.2. Zonage

Ce travail a permis de déceler trois zones, des informations plus précises et plus détaillées sur les différentes couches pourraient permettre d'identifier d'autres zones dans le pays. Ces informations concernent :

- Le réseau routier : la séparation des autoroutes des routes principales ainsi que la largeur des routes (nombre de voies).
- La voie ferrée : des informations sur le type des voies ferrées et leur élévation par rapport au sol.
- La profondeur et la largeur des rivières ainsi que la superficie des zones humides.

Ces trois zones sont (Figure 13) :

- Les zones B et C, avec un climat semi-aride et une pluviométrie faible et irrégulière, se caractérisent par un élevage faible avec des troupeaux de petite taille, pratiqué à la marge d'autres productions agricoles (Tableau 8) et ne constitue pas l'activité agricole principale. Pour nourrir leurs animaux, notamment les petits ruminants, les éleveurs doivent parcourir de longues distances pour les faire pâturer sur des parcours communs. Tous ces éléments ne sont pas motivants pour les éleveurs, qui doivent être les initiateurs pour établir un statut de troupeau (indemne de fièvre aphteuse) supérieur à celui de la population générale.
- Pour la Zone A, appelée « Le Cap Bon », caractérisée par des conditions climatiques plus propices avec des sols fertiles et une pluviométrie régulière de 750 mm par an, le cheptel est par conséquent important (Tableau 8). On y trouve 9 % du cheptel bovin national et 3% des petits ruminants, ainsi que 8% de la surface nationale destinée à la culture de fourrages saisonniers. La zone du Cap Bon (zone A) est la seule qui s'y prête vu qu'elle constitue une presqu'île. Elle est délimitée du reste du pays par une route nationale, une voie ferrée et une autoroute de 40 km environ dont le contrôle est envisageable.

Tableau 8: Répartition du cheptel dans les trois zones identifiées (ONAGRI, 2017)

	Bovins	Ovins	Caprins
Zone A	58500	210 000	35000
Zone B	33	4124	318
Zone C	640	13938	5401
National	646076	6406070	1184620

6.2.3. Combinaison analyse qualitative et zonage

Bien que le premier foyer de FA déclaré en Tunisie en 2014 soit localisé à Nabeul, une enquête effectuée par le CNVZ dans les foyers a conclu qu'il s'agissait d'un foyer secondaire et que le premier foyer survenu était localisé à Sidi Bouzid. Cette localité du centre du pays, abritant le marché aux bestiaux le plus important du pays, a été identifiée, par les enquêtes sur la mobilité animale, comme un carrefour pour le commerce des animaux notamment de petits ruminants qui sont diffuseurs de la maladie (CNVZ, 2016).

Dans la zone A, seule entité propice au zonage à notre sens, vu le contexte et les contraintes existantes, les imadas à probabilité d'exposition élevée et très élevée sont entourées par des imadas à probabilité d'exposition faible (Figure 16). Moyennant une gestion basée sur le risque, en ciblant les imadas à probabilité d'exposition élevée et très élevée, on doit parvenir à l'éradication de la maladie dans des délais courts. Cette zone au sens OIE pourrait être la première zone indemne de la maladie en Tunisie en axant la surveillance sur ces imadas et en contrôlant le mouvement des animaux entrants.

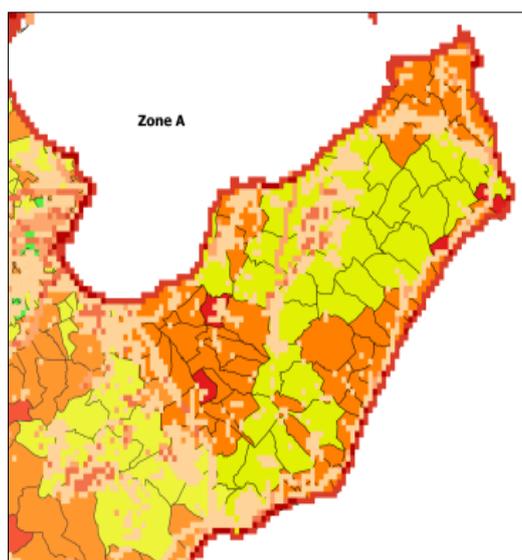


Figure 16: Superposition de la carte de probabilité d'exposition avec la zone A (le Cap-BON)

Etant donné que l'activité de l'élevage dans les zones insulaires : Kerkenah (zone B) et Djerba (zone C), est traditionnelle et secondaire par rapport à d'autres activités agricoles et que le cheptel et les ressources alimentaires sont faibles, ces deux zones ne peuvent pas faire partie d'un plan de zonage actuellement sauf s'il y a un passage dans le futur vers un système d'élevage à valeur ajoutée tel que l'élevage biologique par exemple.

Dans cette étude, la zone du cap-Bon (zone A) est la seule qui convient au concept du zonage tel que préconisé par l'OIE car elle constitue une presque île. Elle est limitée du reste du pays et sur une longueur de 40 km par une route nationale, une voie ferrée et une autoroute dont le contrôle est envisageable.

Pour répondre aux recommandations de l'OIE, des mesures d'accompagnement sont indispensables pour la mise en place et le maintien du statut sanitaire dans la zone A qui sont :

- Un contrôle rigoureux des animaux entrants est primordial. Il faut envisager :
 - Une identification des animaux (avec boucle auriculaire, permis de circulation et un système efficace de traçabilité)
 - La mise en place des « Check points » au niveau du croisement entre les routes principales et les routes secondaires
 - Examiner les animaux dans ces points et ne laisser passer que des animaux certifiés indemnes de la maladie et correctement vaccinés
 - Instaurer une surveillance active dans les communes à probabilités d'introduction et de diffusion très élevée et élevée
 - Prévoir un système de quarantaine pour les animaux avant leur entrée dans la zone

- Le programme de vaccination, adapté au virus circulant (et/ou menaçant), doit être périodiquement évalué par la sérologie pour s'assurer de la bonne couverture immunitaire des animaux vaccinés

- Un système de détection précoce et de réponse rapide, avec définition claire du cas, des procédures bien définies et un laboratoire réactif sont indispensables. Ils doivent être couplés avec la formation et la sensibilisation périodique et continue de tous les acteurs. L'information régulière et ciblée pour chaque type d'acteur sur les activités menées et les nouveautés nationales et internationales sur la maladie permettent le maintien de la motivation et de ces acteurs.
- Une sensibilisation des agents de terrain, des éleveurs, des maquignons et des commerçants à la notion de l'importance du zonage
- Une législation doit être mise en place : qui interdise et oblige l'abattage des animaux infectés de FA pour éliminer tout risque de propagation de la maladie dans la zone avec une possibilité d'indemnisation pour encourager les éleveurs à déclarer les suspicions.

7. Conclusion

Le code sanitaire pour les animaux terrestres définit les mesures sanitaires à appliquer par les autorités vétérinaires des pays membres de l'OIE pour la détection précoce, la déclaration ainsi que le contrôle des agents pathogènes. Ce code renferme des normes et des procédures pour la reconnaissance du statut sanitaire de ses pays membres. Des chapitres spécifiques à l'analyse du risque, au zonage et à la compartimentation, et à la surveillance y sont consacrés.

Dans ce travail, deux approches ont été déployées :

- L'approche de l'analyse qualitative et cartographique de risque en intégrant des facteurs majeurs d'introduction et de diffusion de la maladie et particulièrement la mobilité animale ;
- Le zonage au sens de l'OIE, pour explorer la possibilité de définir sur le territoire tunisien des sous-populations animales caractérisées par des statuts sanitaires distincts vis à vis de la fièvre aphteuse.

L'association de ces deux approches pour orienter la surveillance et la gestion dans les zones identifiées.

L'association des approches de l'évaluation qualitative du risque à la cartographie des risques en intégrant la mobilité des animaux a permis de déterminer des imadas à probabilité différente d'introduction et de diffusion de la fièvre aphteuse dans le pays. Une gestion et une surveillance basée sur le risque, ciblant les zones à probabilités élevées et très élevées, doivent désormais être appliquées dans le pays pour rationaliser les moyens alloués à la surveillance et à la gestion de la santé animale. Cependant, une étude sur la mobilité animale chez les éleveurs pour déterminer des différences de risque de transmission pour les animaux au sein des troupeaux devraient être menées. D'autres études incluant d'autres structures, comme les abattoirs, ou durant d'autres périodes de l'année (hors périodes des fêtes religieuses) apporterait plus de précision aux cartes générées et permettraient de mieux cibler les zones à probabilité élevée par des mesures de surveillance, de lutte et/ou de prévention appropriées dans le temps et dans l'espace, sans créer de contraintes sur le commerce des animaux (**Gates et al., 2014**).

Dans la présente étude, une seule zone présentant un intérêt géographique et économique (importance du cheptel et des ressources fourragères) a pu être identifiée pour éventuellement définir et préserver, une sous-population animale à statut sanitaire distinct vis-à-vis de la fièvre aphteuse en Tunisie. Une fois la maladie éradiquée de la zone, il faut une association de la probabilité d'émission dans la zone pour éviter l'introduction de la maladie.

La région du Maghreb constitue une seule entité épidémiologique et l'éradication de la fièvre aphteuse, ainsi que d'autres maladies transfrontalières ou endémiques, ne peut être efficace que dans une approche régionale. L'approche du zonage explorée dans ce travail pourrait être menée dans toute la région du Maghreb afin d'identifier des zones nationales voire régionales (si transfrontalières), propices à un zonage au sens du code terrestre de l'OIE et à partir de ces résultats décliner une approche régionale pour la lutte contre la fièvre aphteuse en Afrique du Nord, approche basée sur le risque pour les activités de surveillance et de contrôle.

Annexe 1 : Pays membres de l'OIE comportant une ou plusieurs zones indemnes de fièvre aphteuse où la vaccination n'est pas pratiquée (source OIE, 2018)

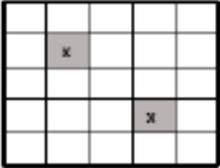
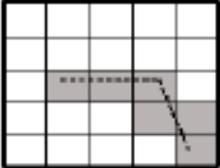
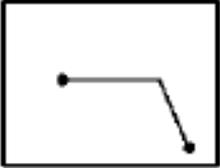
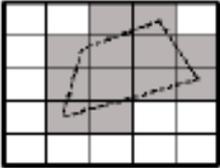
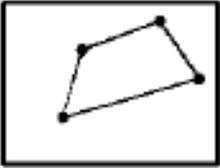
Afrique du Sud	une zone désignée par le Délégué de l'Afrique du Sud dans des documents adressés au Directeur général en mai 2005 et janvier 2014 ;
Argentine	une zone désignée par le Délégué de l'Argentine dans un document adressé au Directeur général en janvier 2007; la zone de pâturage d'été dans la province de San Juan, telle que désignée par le Délégué de l'Argentine dans un document adressé au Directeur général en avril 2011 ; la Patagonie Norte A, telle que désignée par le Délégué de l'Argentine dans un document adressé au Directeur général en octobre 2013 ;
Bolivie	une zone située dans la région de l'Altiplano désignée par le Délégué de la Bolivie dans des documents adressés au Directeur général en novembre 2011 ;
Botswana	quatre zones désignées par le Délégué du Botswana dans des documents adressés au Directeur général en août et novembre 2014, comme suit : une zone constituée des Zones 3c (Dukwi), 4b, 5, 6a, 8, 9, 10, 11, 12 et 13 ; une zone constituée de la Zone 3c (Maitengwe) ; une zone couvrant la Zone 4a ; une zone couvrant la Zone 6b ; une zone couvrant la Zone 3b, telle que désignée par le Délégué du Botswana dans un document adressé à la Directrice générale en août 2016 ;
Brésil	l'État de Santa Catarina désigné par le Délégué du Brésil dans un document adressé au Directeur général en février 2007 ;
Colombie	une zone désignée par le Délégué de la Colombie dans les documents adressés au Directeur général en novembre 1995 et en avril 1996 (zone I – région nord-ouest du département de Chocó); une zone désignée par le Délégué de la Colombie dans les documents adressés au Directeur général en janvier 2008 (archipel de San Andrés et Providencia);
Equateur	une zone couvrant le territoire insulaire des Galapagos, désignée par le Délégué de l'Equateur dans un document adressé au Directeur général en août 2014 ;
Kazakhstan	une zone couvrant les régions d'Akmola, d'Aktobe, d'Atyrau, du Kazakhstan-Occidental, de Karaganda, de Kostanay, de Mangystau, de Pavlodar et du Kazakhstan-Septentrional, désignée par le Délégué du Kazakhstan dans un document adressé au Directeur général en août 2014;

Malaisie	une zone couvrant les provinces de Sabah et Sarawak désignée par le Délégué de la Malaisie dans un document adressé au Directeur général en décembre 2003;
Moldavie	une zone désignée par le Délégué de la Moldavie dans un document adressé au Directeur général en juillet 2008;
Namibie	une zone désignée par le Délégué de la Namibie dans un document adressé au Directeur général en février 1997;

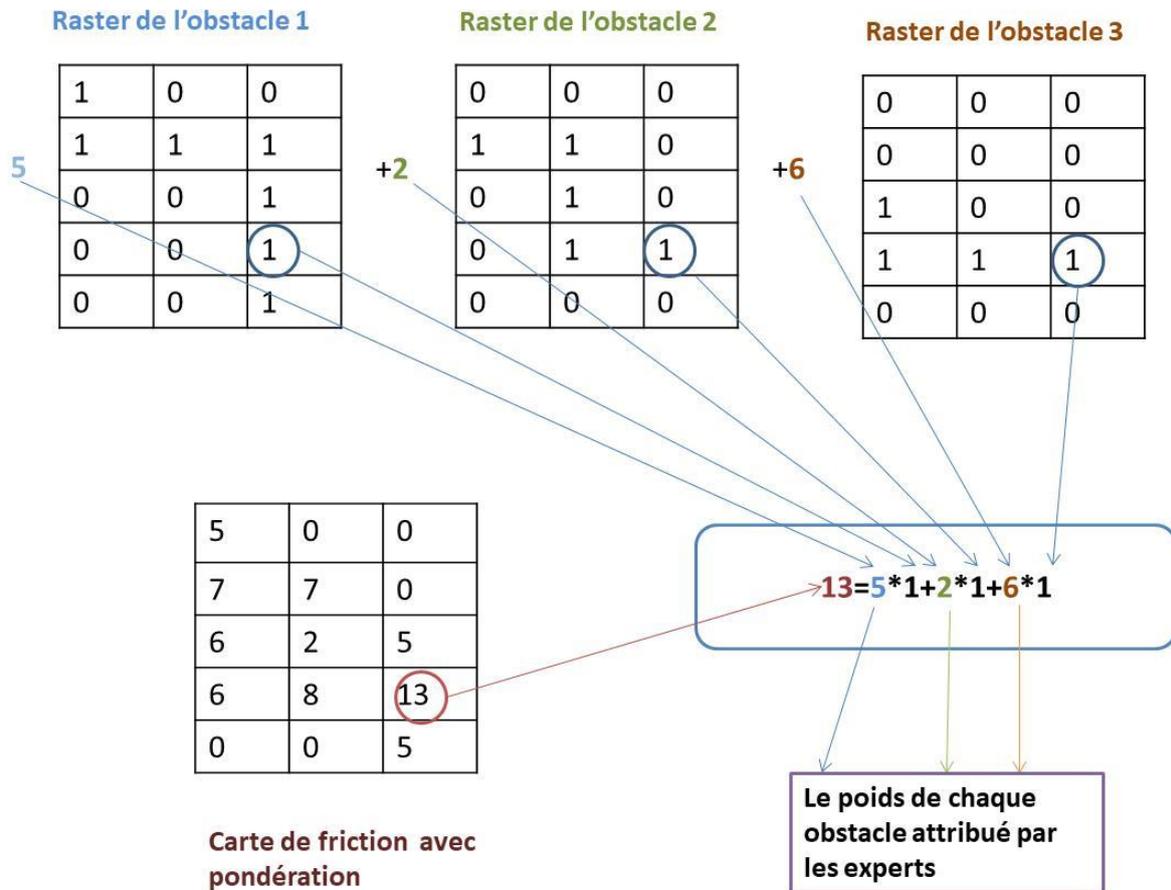
Annexe 2 : Pays membres de l'OIE comportant un ou plusieurs Zones indemnes de fièvre aphteuse où la vaccination est pratiquée (source OIE, 2018)

Argentine	deux zones distinctes désignées par le Délégué de l'Argentine dans des documents adressés au Directeur général en mars 2007 et octobre 2013, ainsi qu'en août 2010 et février 2014 ;
Bolivie	une zone composée de quatre zones fusionnées couvrant les régions de l'Amazonas, Chaco, Chiquitania, Valles et une partie d'Altiplano, telle que désignée par le Délégué de la Bolivie dans des documents adressés au Directeur général en janvier 2003 et mars 2007, en août 2010, en août 2012 ainsi qu'en octobre 2013 et février 2014;
Brésil	une zone couvrant le territoire de l'État de Rio Grande do Sul (document adressé en septembre 1997) ; une zone située dans l'État de Mato Grosso do Sul telle que désignée par le Délégué du Brésil dans des documents adressés au Directeur général en août 2010 ; une zone étendue telle que désignée par le Délégué du Brésil dans un document adressé à la Directrice générale de l'OIE en septembre 2017, composée des états d'Amapá, Roraima, Amazonas, Pará, Rondônia, Acre, Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Sergipe, Distrito Federal, Goiás, Mato Grosso, Paraná, São Paulo, Bahia, Tocantins, Alagoas, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte, et de parties de Mato Grosso do Sul ;
Colombie ⁽⁴⁾	une zone obtenue suite à la fusion de cinq zones distinctes désignées par le Délégué de la Colombie dans les documents adressés au Directeur général en janvier 2003, décembre 2004 (deux zones), janvier 2007 et janvier 2009 ;
Equateur	une zone couvrant la partie continentale de l'Equateur désignée par le Délégué de l'Equateur dans un document adressé au Directeur général en août 2014 ;
Kazakhstan	cinq zones désignées par le Délégué du Kazakhstan dans des documents adressés à la Directrice générale en août 2016, comme suit : une zone constituée de la région d'Almaty ; une zone constituée de la région orientale du Kazakhstan ; une zone comprenant une partie de la région de Kyzylorda, la partie nord de la région du sud du Kazakhstan, la partie nord et centrale de la région de Zhambyl ; une zone comprenant la partie sud de la région de Kyzylorda et le sud-ouest de la région du Kazakhstan du Sud ; une zone comprenant la partie sud-est de la région du Kazakhstan du Sud et la partie sud de la région du Zhambyl ;
Taipei chinois	une zone couvrant les régions de Taiwan, Penghu et Matsu, désignée par le Délégué du Taipei chinois dans un document adressé à la Directrice générale en août 2016 ; une zone constituée du Comté de Kinmen telle que désignée par le Délégué du Taipei Chinois dans un document adressé à la Directrice générale de l'OIE en septembre 2017 ;
Turquie	une zone désignée par le Délégué de la Turquie dans un document adressé au Directeur général en novembre 2009.

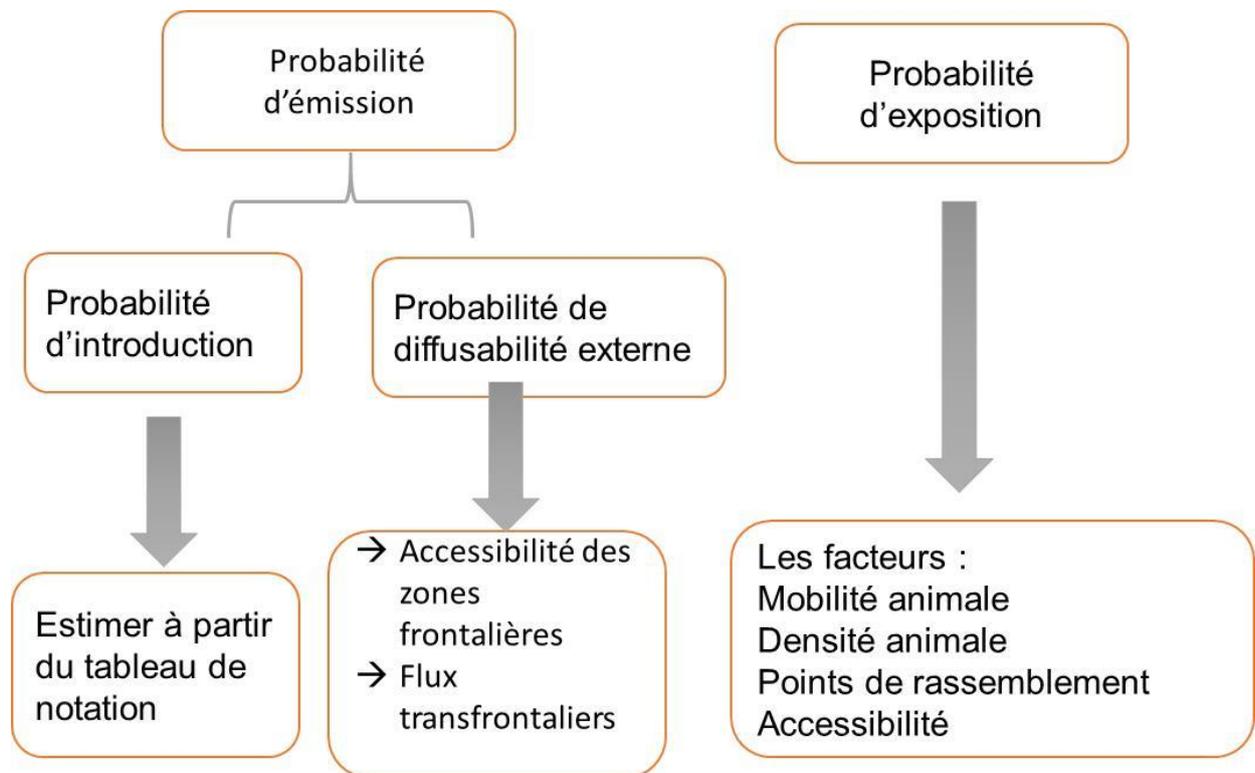
Annexe3 : Les représentations spatiales dans le SIG

	Mode raster	Mode vecteur
Point		
Ligne		
Polygone		

Annexe 4 : Carte de friction avec pondération



Annexe 4 : Analyse qualitative du risque



Annexe 5 : Enquête origine / destination (Marchés)

Nom de l'enquêteur :

Date de l'enquête :

Lieu de l'enquête : Localité:

<u>Entrants ou sortants?</u> S – S'ils quittent le lieu, sortant E – S'ils arrivent sur le lieu, entrant <u>Localité d'origine : s'il s'agit d'un propriétaire entrant</u> <u>Localité de destination : s'il s'agit d'un propriétaire sortant</u> <u>Localité de transit : s'il s'agit d'une escale</u>	<u>Espèces</u> B – Bovins C – Caprins O – Ovins	<u>Animaux identifiés et Lots</u> O- Oui N – Non <u>Rendu : au cas où les animaux ne sont pas vendus</u>
--	---	---

Entrants ou Sortants ?	Localité d'origine	Localité de transit	Animaux identifiés *	Espèces*	Race(s)*	Nombre Approximatif*	Nombre de femelles		Plusieurs lots ?*	Rendu	Localité de destination	Autres marchés visités
							Jeunes	Adultes				

(gras) informations obligatoires

() informations pouvant être recueillies visuellement par l'enquêteur*

Annexe 6 : Liste des experts présents dans l'atelier EUFMD-CIRAD

Expert nationaux représentant leurs pays :

Pour la Mauritanie

Dr. Yahya BARRY

Dr. Katia ISSELMOU

Pour le Maroc

Dr. Rachidkechna

Dr. Yassir LEZAAR

Pour la Tunisie

Dr. Jamel CHERNI

Dr. Heni HAJ AMMAR

Dr. Sana KALTHOUM

Pour le Sénégal

Dr. Adjamareme GAYE

Pour l'Algérie

Dr. Dalila DJAILEB

Dr. Hayat SOFTA

Pour le Tchad

Dr. Madina HADJER

Dr. Khamis Hamid DJAZIM

Les experts internationaux

Dr. Cécile Squarzoni-Diaw

CIRAD, Réunion

Dr. BAKKALI KASSIMI Labib

Anses, Paris

Dr. Rosso FABRIZIO

FAO, Rome

Dr. Paolo MOTTA

FAO, Rome

Dr. Renaud LANCELOT

CIRAD, Montpellier

Dr. Raphaëlle METRAS

CIRAD, Montpellier

Annexe 7 : Tableau de notation qui permet de calculer la probabilité d'introduction d'une maladie pour un pays donné.

NB : Les estimations qualitatives et les calculs doivent être menés collégalement avec des experts nationaux et internationaux, afin de confronter et valider les scores.

Pour les PAYS : Il faut lister le(s) pays frontalier(s) et les pays exportateurs (les échanges légaux et illégaux) au pays étudié

Pour le STATUT INFECTE :

Il faut remonter jusqu'à trois années.

- Si la maladie est présente au moment où vous remplissez le tableau, la valeur attribuée est de 3.
- Si la maladie était présente, il y a deux ans, la valeur attribuée est de $3 \times 0.9 = 2,7$.
- Si la maladie était présente, il y a 3 ans, la valeur attribuée est de $3 \times 0.8 = 2,4$.
- Au-delà de 3 ans ou si la maladie n'a jamais été déclarée, la valeur attribuée est de 0.

Pour le COMMERCE LEGAL AVEC LE PAYS À RISQUE :

- S'il y a des commerces légaux avec des pays où la maladie étudiée est présente, la valeur attribuée est de 1.
- S'il n'y a pas de commerces légaux avec des pays à risque, la valeur attribuée est de 0.

Pour les MOUVEMENTS ILLEGAUX :

- S'il y a des commerces illégaux entre les deux pays, la valeur attribuée est de 3.
- S'il n'y a pas de commerces illégaux entre les deux pays, la valeur attribuée est de 0.

Pour les DISPOSITIFS DE SURVEILLANCE :

il y a 4 rubriques à remplir :

Pour la rubrique D.O= Déclaration obligatoire :

- Si le pays déclare la maladie étudiée, la valeur attribuée est de 0.
- Si le pays ne déclare pas la maladie étudiée, la valeur attribuée est de 0.25.

Pour la rubrique Surveillance active :

- Si le pays effectue une surveillance active de la maladie étudiée ; la valeur attribuée est de 0.
- Si le pays n'effectue pas de surveillance active de la maladie étudiée ; la valeur attribuée est de 0.5.

Pour la rubrique Surveillance passive :

- Si le pays effectue une surveillance passive de la maladie étudiée ; la valeur attribuée est de 0.

- Si le pays n'effectue pas de surveillance passive de la maladie étudiée ; la valeur attribuée est de 0.5.
Pour la rubrique Surveillance basée sur le risque :
- Si le pays effectue une surveillance basée sur le risque ; la valeur attribuée est de 0.
- Si le pays n'effectue pas de surveillance basée sur le risque ; la valeur attribuée est de 0.75.

Pour les DISPOSITIFS DE CONTRÔLE

il y a 4 rubriques à remplir :

Pour la rubrique contrôle aux frontières :

- Si le pays effectue un contrôle aux frontières sur la maladie étudiée ; la valeur attribuée est de 0.
- Si le pays n'effectue pas un contrôle aux frontières sur la maladie étudiée ; la valeur attribuée est de 1.

Pour la rubrique abattage sanitaire des foyers :

- Si le pays effectue un abattage sanitaire des animaux lors d'une déclaration d'un foyer sur la maladie étudiée ; la valeur attribuée est de 0.
- Si le pays n'effectue pas un abattage sanitaire des animaux lors d'une déclaration d'un foyer sur la maladie étudiée , la valeur attribuée est de 0.5.

Pour la rubrique abattage sanitaire autour des foyers :

- Si le pays effectue un abattage sanitaire autour des foyers infectés sur la maladie étudiée ; la valeur attribuée est de 0.

Si le pays n'effectue pas un abattage sanitaire autour des foyers infectés sur la maladie étudiée, la valeur attribuée est de 0.5.

Pour la rubrique zonage et restriction des mouvements :

- Si le pays effectue un zonage et une restriction des mouvements autour du foyer suspecté ou infecté, la valeur attribuée est de 0.
- Si le pays n'effectue pas de zonage et ni de restriction des mouvements autour du foyer suspecté ou infecté, la valeur attribuée est de 0.75.

Pour la rubrique vaccination en anneau

- Si le pays effectue une vaccination autour du foyer suspecté ou infecté (une vaccination périfocale), la valeur attribuée est de 0.
- Si le pays n'effectue pas une vaccination autour du foyer suspecté ou infecté (une vaccination périfocale) , la valeur attribuée est de 0.25.

Exemple : Pour la valeur de 9.25, la probabilité d'introduction sera très élevée.

Annexe8 : Liste des experts consultés pour remplir le tableau de comparaison par paire

Les experts nationaux :

Dr. Chedia SEGHAIERCNVZ, Tunis (TUNISIE)

Dr. Sana KALTHOUM CNVZ, Tunis (Tunisie)

Dr. AnissaDHAOUADI CNVZ, Nabeul (Tunisie)

Dr. Jamel CHERNI CNVZ, Seliana (Tunisie)

Les experts internationaux

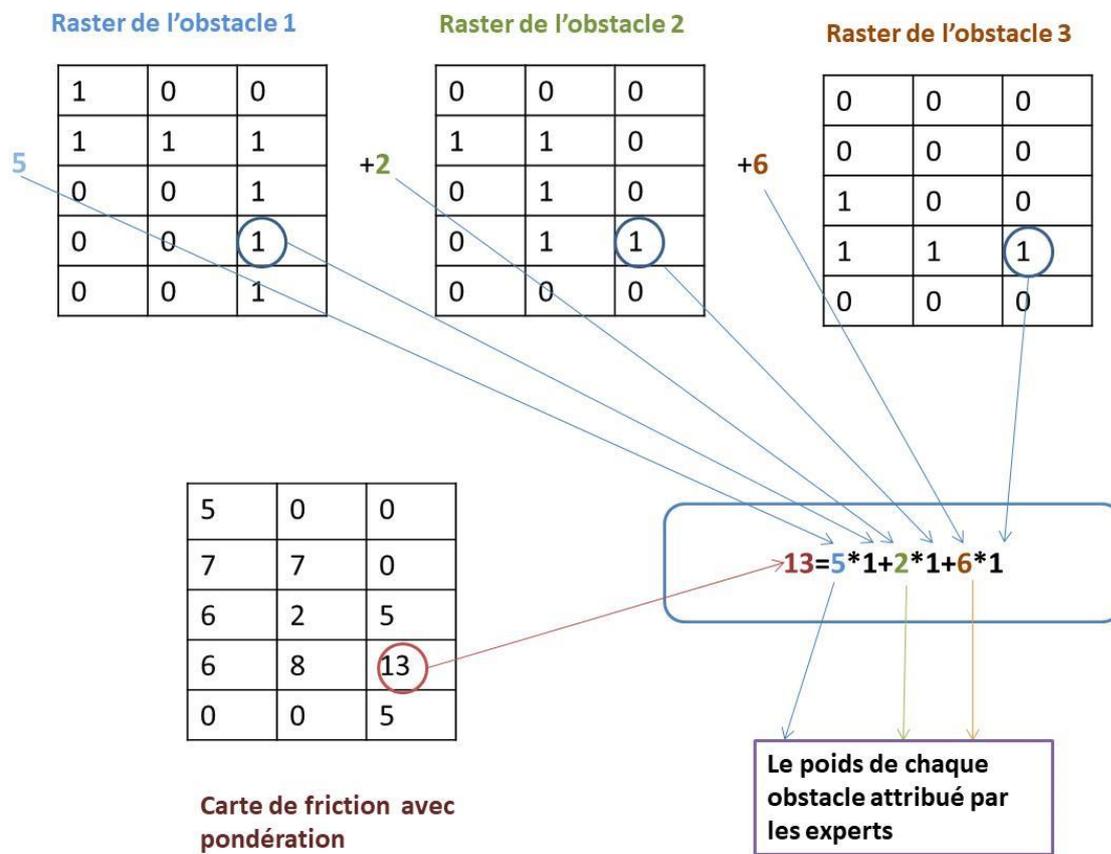
Dr. Renaud Lancelot CIRAD, Montpellier

Dr. Cécile Squarzoni-Diaw CIRAD, Réunion

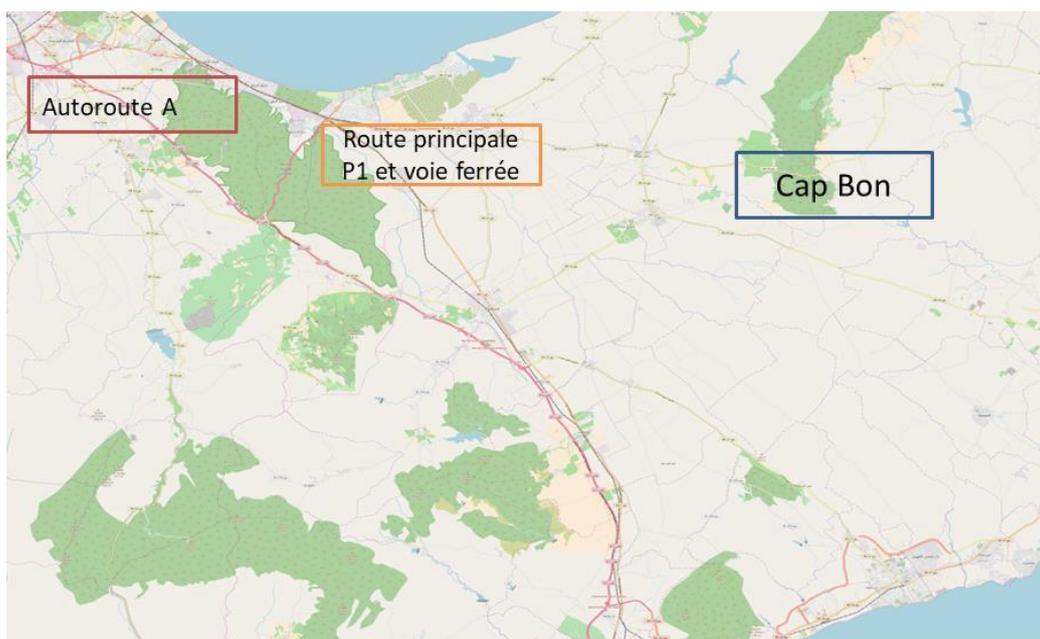
Dr. Raphaëlle METRAS CIRAD, Montpellier

Dr. Paolo MOTTA FAO, Rome

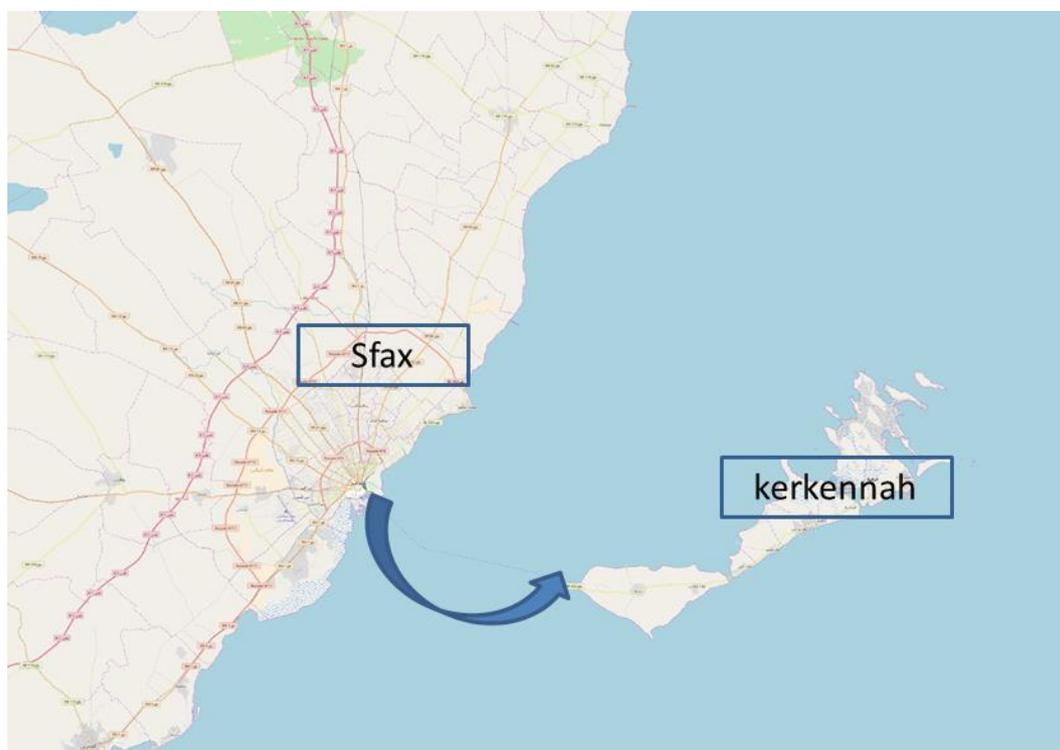
Annexe 9 : Carte de friction avec pondération



Annexe 10 : Voie d'entrée des animaux :
Pour la zone A



Pour la zone B



Pour la zone C



Références bibliographiques

- AFSSA, 2008. Une méthode qualitative d'estimation du risque en santé animale.
- Annelise Tran et François Roger, 2018. Renforcer les décisions en santé sur un territoire : l'appui opérationnel de l'évaluation multicritère spatialisée. Perspective 4.
- B,Toma., B, Dufour ., M, Sanaa., J.J, Bénet., A, Shaw., F, Moutou et A. Louza, 2008. Epidémiologie appliquée à la lutte collective contre les maladies animales transmissibles majeure, 2nd ed. AAEMA
- Bernier, S., Duthoit, S., Ladet, S., Baudet, D., 2014. Les concepts de base des systèmes d'information géographique (SIG): les données et les fonctions générales, Cahier des Techniques de l'INRA: 19 - 27
- Boisseleau, D., Diallo, A., Goffette, R., 2010. Guide pratique de diagnostic de gestion des épizooties. Direction Générale de l'Alimentation, Paris.
- Bouguedour, R., Ripani, A., 2016. Review of the foot and mouth disease situation in North Africa and the risk of introducing the disease into Europe. Revue scientifique et technique (International Office of Epizootics) 35 :757–768
- Brückner, G., 2013. De la reconnaissance officielle des statuts sanitaires à l'éradication mondiale. OIE, Bulletin, 3–9.
- Carter T. Butts, 2016. SNA: Tools for Social Network Analysis.
- Chedly, K. 2000. Profil fourrager de la Tunisie.
- Coste, C., Kalthoum, S., Cherni,J., Arsevska, E., Métras ,R., Daoudi A., Laoufi M,K., Lezaar,Y., Kechna, R., Dufour ,B., Lancelot ,R ., Squarzone-Diaw, C. Optimization of disease surveillance programs using risk assessment, risk mapping and animal movements: application to foot-and-mouth disease in Tunisia (en cours de publication)
- CNVZ, 2016. Mobilité animale en Tunisie; Enquêtes dans les marchés aux bestiaux. Projet FAO-TCP/TUN/3501, juillet 2016, 59.
- DGSV, 2018. La fièvre aphteuse en Tunisie : en l'absence de la circulation virale. Eu-FMD Atelier « Fièvre aphteuse : surveillance pour la détection précoce et la confiance. 27/02-01/03/2018 à Tunis
- DIVA-GIS Download data by country | DIVA-GIS <http://www.diva-gis.org/gdata>. Consulté le 02/02/2018
- Dufour, B., Plee, L., Moutou, F., Boisseleau, D., Chartier, C., Durand, B., Ganiere, J.P., Guillotin, J., Lancelot, R., Saegerman, C., Thebault, A., Hattenberger, A.M., Toma, B., 2011. A qualitative riskassessment methodology for scientific expert panels. Revue Scientifique et Technique de l'OIE.30 : 673–681.
- FAO, 2014. Risk-based disease surveillance – A manual for veterinarians on the design and analysis of surveillance for demonstration of freedom from disease. FAO Animal Production and Health Manual No. 17. Rome, Italy.
- FAO, 2018. Global Foot-and-Mouth Disease Situation March 2018, http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/eufmd_new/docs/March_GMR_2018.pdf, consulté le 15/5/2018
- FAO. <http://empres-i.fao.org/eipws3g/> Consulté le 03/03/2018.

FAO/OIE (2012); Conférence mondiale FAO/OIE "contrôle de la fièvre aphteuse" 27-29 Juin 2012; Bangkok (Thaïlande)

Gates M C, Humphry R W, Gunn G J, Woolhouse M E J, 2014, Not all cows are epidemiologically equal: quantifying the risks of bovine viral diarrhoea virus (BVDV) transmission through cattle movements. *Veterinary Research, BioMed Central*, 45 (1), pp.110.

Grime, M.M., Wright, G., 2016. Delphi Method, in: Balakrishnan, N., Colton, T., Everitt, B., Piegorsch, W., Ruggeri, F., Teugels, J.L. (Eds.), *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*. John Wiley. 1–6.

Hammani, M., Soltani, E., and Snoussi, S. 2007. Importance de la Filière viande ovine en Tunisie: stratégies des acteurs (cas de la région de Zaghuan). *New Medit*.

Jemaa, T., Huguenin, J., Moulin, C.-H., and Najar, T., 2016. Les systèmes d'élevage de petits ruminants en Tunisie Centrale : stratégies différenciées et adaptations aux transformations du territoire. *Cah. Agric.* 25: 45005.

Kardjadj, M., 2018. Epidemiological situation of transboundary animal diseases in North African countries—proposition of a regional control strategy. *Tropical Animal Health and Production*. <https://doi.org/10.1007/s11250-017-1453-y>

Kédowidé, C.M.G., 2010. Modélisation géomatique par évaluation multicritère pour la prospection des sites d'agriculture urbaine à Ouagadougou. *VertigO*.10(2) :1-20.

Malczewski, J., 2006. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*. 20 : 703–726.

Mapcruzin <http://www.mapcruzin.com>. Consulté le 10/02/2018

Marquetoux, N., Stevenson, M.A., Wilson, P., Ridler, A., Heuer, C., 2016. Using social network analysis to inform disease control interventions. *Preventive Veterinary Medicine* .126 : 94–104.

Martínez-López, B., Perez, A.M., and Sánchez-Vizcaíno, J.M. 2009. Social Network Analysis. Review of General Concepts and Use in Preventive Veterinary Medicine. *Transbound. Emerg. Dis.* 56: 109–120.

Natural earth data <https://www.naturalearthdata.com/downloads/10m-physical-vectors>. Consulté le 04/02/2018.

Natural earth data <https://www.naturalearthdata.com/downloads/10m-cultural-vectors/>. Consulté le 05/02/2018.

Nelson, A, 2008. Travel time to major cities: A global map of Accessibility. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg Available at <http://forobs.jrc.ec.europa.eu/products/gam/>

OIE, 2018. <http://www.oie.int/fr/sante-animale-dans-le-monde/statuts-officiels-des-maladies/fievre-aphteuse/fr-fmd-carte/> consulté le 17/05/2018

OIE. 2015. Code sanitaire pour les animaux terrestres.

OIE. 2018. World Animal Health Database Interface OIE World Animal Health Information System http://www.oie.int/wahis_2/public/wahid.php/Wahidhome/Home (situation epidemiowahis site oie)

Okoli, C., Pawlowski, S.D., 2004. The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications. *Information & Management*. 42 : 15–29.

ONAGRI, 2016. Annuaire statistique 2016. www.onagri.nat.tn/statistiques. Consulté en ligne le 01/03/2018

ONAGRI, 2017. Enquête de suivi de campagne (première partie), superficie des grandes cultures. Consulté en ligne le 01/03/2018

ONAGRI, 2017. Enquête de dénombrement du cheptel 2016-2017. www.onagri.nat.tn/uploadsstatistiques/cheptel2016-2017. Consulté en ligne le 01/03/2018

OpenStreetMap <https://www.openstreetmap.org>. Consulté le 10/02/2018.

QGIS Development Team, 2009. QGIS Geographic Information System.

R Core Team, 2013. R: A Language and Environment for Statistical Computing.

Rautureau, S., Dufour, B., Durand, B., 2011. Vulnérabilité du réseau d'échanges d'animaux face à la diffusion de maladies infectieuses : approche méthodologique appliquée au réseau d'élevages bovins français. Bulletin épidémiologique, santé animale et alimentation, 47 :8-13

Rawdon, T.G., Garner, M.G., Sanson, R.L., Stevenson, M.A., Cook, C., Birch, C., Roche, S.E., Patyk, K.A., Forde-Folle, K.N., Dubé, C., Smylie, T., Yu, Z.D., 2018. Evaluating vaccination strategies to control foot-and-mouth disease: a country comparison study. *Epidemiology and Infection*. 1–13.

Ripani, A., Bouguedour, R., Brocchi, E., 2018. Review of FMD situation in North Africa. URL http://www.izs.it/BENV_NEW/Engine/RAServePG.php/P/300010040609/L/1 (accessed 2.6.18).

Robert J. Hijmans, 2017. raster: Geographic Data Analysis and Modeling.

Robinson, T.P., Wint, G.R.W., Conchedda, G., Van Boeckel, T.P., Ercoli, V., Palamara, E., Cinardi, G., D'Aiotti, L., Hay, S.I., Gilbert, M., 2014. Mapping the Global Distribution of Livestock. *PLoS ONE* 9(5).

Saaty, R.W., 1987. The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. *Math. Model.* 9 : 161–176.

Saaty, T.L., 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*, 1(1) : 83-98

Santos, D.V. dos, Silva, G.S. e, Weber, E.J., Hasenack, H., Groff, F.H.S., Todeschini, B., Borba, M.R., Medeiros, A.A.R., Leotti, V.B., Canal, C.W., Corbellini, L.G., 2017. Identification of foot and mouth disease risk areas using a multi-criteria analysis approach. *PLOS ONE*. 12(5) :1-19.

Schneider, A., Friedl, M.A., Potere, D., 2009. A new map of global urban extent from MODIS satellite data. *Environmental Research Letters*. 4 :1-12.

Schneider, A.; Friedl, M. A.; Potere, D., 2010. Mapping global urban areas using MODIS 500-m data: new methods and datasets based on “urban ecoregions”. *Remote Sensing of Environment* 114 :1733–1746.

Sein, C.Z., 2002. L'analyse de risque : un outil d'aide à la décision pour la prophylaxie et la prévention des maladies animales. *Conf. OIE*. 7 :251-257

Société Nationale des Chemins de Fer Tunisiens http://www.sncft.com.tn/Fr/reseau_11_34 . Consulté le 20/03/2018

SRTM Tile Grabber <http://dwtkns.com/srtm/> . Consulté le 04/04/2018.

Stevens, K.B., Costard, S., Métras, R., Theuri, W., Hendrickx, S. and Pfeiffer. 2009.. Mapping the Likelihood of Introduction and Spread of Highly Pathogenic Avian Influenza Virus H5N1 in Africa, Ghana, Ethiopia, Kenya and Nigeria using Multicriteria Decision Modelling. 2-32 [remarque : nmbre de page, pas de numero de volume ni numero du rapport il y a que le numero de page].

Stone, M., 2017.OIE standards on zoning and compartmentalisation and their implementation. https://www.wto.org/english/tratop_e/sps_e/wkshop11july17_e/stone.pdf. consulté le 17/01/2018

Thiermann, A.B., 2008. Application pratique des normes et lignes directrices de l'OIE en matière de compartimentation. Conf. OIE .12,131-142

Toma, B., Dufour, B., Rivière, J. et al. 2017. LA FIÈVRE APHTEUSE. Polycopié des Unités de maladies contagieuses des Ecoles vétérinaires françaises, Merial (Lyon) 67.

Velasquez, M., Hester, P.T., 2013.An analysis of multi-criteria decision making methods.International Journal of Operations Research.10(2) : 56-66.