



Ecole nationale Vétérinaire  
d'Alfort

MASTER 2<sup>ème</sup> ANNEE

Santé publique Paris Sud et Santé UPEC

Dominante

**SURVEILLANCE EPIDEMIOLOGIQUE DES  
MALADIES HUMAINES ET ANIMALES**

---

# **RAPPORT DE STAGE**

**Mobilité animale et maladies infectieuses : le cas de la peste  
des petits ruminants en Mauritanie**

Présenté par

Aurélie GAUTHIER

Réalisé sous la direction de : Renaud LANCELOT

Organisme et pays : CIRAD (France)

Période du stage : 04/01/2016 - 15/06/2016

Date de soutenance : 28/06/2016

Année universitaire 2015-2016

Mobilité animale et maladies infectieuses : le cas de la peste des petits ruminants en Mauritanie, Animal movements and infectious diseases : the case of peste des petits ruminants in Mauritania, Aurélie Gauthier, CIRAD Campus international de Baillarguet, 34398 Montpellier Cedex 5.

### **Résumé court**

Avec un cheptel estimé à plus de 19 millions de petits ruminants, la Mauritanie est le plus grand pays exportateur de bétail sur pied du Sahel. Cependant la peste des petits ruminants (PPR), maladie infectieuse très contagieuse, entraîne de grandes pertes dans les troupeaux et menace la sécurité alimentaire et les moyens d'existence des plus pauvres. Les risques de propagation de cette maladie sont déterminés par la mobilité des animaux liés aux échanges commerciaux.

Les objectifs de cette étude sont de décrire les mouvements de petits ruminants réalisés en 2014 en Mauritanie et d'apporter de nouveaux éléments sur les facteurs explicatifs de la mobilité animale, en développant une analyse descriptive des flux et un modèle gravitaire. L'analyse a révélé 1252 mouvements concernant près de 5 millions d'animaux. La plupart des animaux ont été exportés de la Mauritanie vers d'autres pays voisins. Le nombre d'animaux déplacés a été plus important pendant les mois d'avril à juin, période de soudure, et septembre et octobre, période de la Tabaski. Si la PPR apparaissait entre janvier et juillet, où de nombreux échanges se font entre élevages pour l'engraissement des animaux, elle pourrait se propager rapidement en Mauritanie, au Sénégal, au Mali et en Guinée Bissau, infectant un grand nombre d'animaux.

Les modèles gravitaires n'ont pas permis d'affiner l'analyse descriptive. En conséquence, il n'a pas été possible d'expliquer les facteurs de la mobilité animale. Toutefois, les résultats de l'analyse descriptive permettront d'améliorer le contrôle de la PPR en Mauritanie. De plus, des données supplémentaires et l'utilisation de modèles d'interaction spatiale plus performants pourraient permettre une analyse plus fine que celle proposée dans cette étude.

**Mots-clés** : Mauritanie, petits ruminants, peste des petits ruminants, mouvements, modèle gravitaire.

### **Abstract**

With an estimated number of more than 19 million small ruminants, Mauritania is the largest livestock exporter in the Sahel region of Africa. However, peste des petits ruminants (PPR), a highly contagious infective disease in small ruminants, besides the losses of animals, threatens the food security and the existence of many families mainly depending on farming. The risk of propagation of this disease is determined by the movement of animals and the commercial exchanges.

The objective of this study was to describe the movements of the small ruminant population in 2014 in Mauritania and to bring new elements to the explicative factors of the animal mobility by developing a descriptive analysis of the animal fluxes and by using a gravity model.

The analysis revealed 1252 movements which concerned 5 million animals. Most of the animals were exported from Mauritania to other neighboring countries. The highest period of movement of animals were during the months from April to June, dry period and from September to October, during the period of Tabaski. If the PPR would occur between January and July, when there are numerous exchanges of animals between the farms, the disease can be rapidly propagated in Mauritania, Senegal, Mali and Guinea Bissau, infecting a large number of animals.

The gravity model did not however permit to refine the descriptive analysis. In consequence, it was not possible to explain the factors of the animal mobility. However the results of the descriptive analysis allow to improve the control of the PPR in Mauritania. Finally, using models for spatial interaction on a larger data set, can provide a deeper analysis compared to the results obtained with our work.

**Key words** : Mauritania, small ruminants, peste des petits ruminants, movements, gravity model.

## **Remerciements**

Je tiens tout d'abord à remercier la personne sans qui ce travail n'aurait pu être mené à bien, Andréa Apolloni, qui m'a accompagné tout au long de ce stage. Merci pour son aide, ses enseignements, sa disponibilité et sa grande patience.

Je remercie également les personnes suivantes :

- Renaud Lancelot, pour son accueil au sein de son équipe ;
- Caroline Coste, pour ce qu'elle m'a appris et son écoute ;
- Ahmadou Dicko, qui m'a aidé de son plein gré et apporter soutien et conseils ;
- Elena Arsevska, pour ses enseignements et sa gentillesse ;
- Abdel-Aziz Arada Izzedine, pour son aide, sa disponibilité et sa générosité ;
- Sylvie Laurens, pour son soutien et son amitié ;
- tout le corps enseignant du master SEMHA.

Enfin et toujours, merci à mes parents pour leur présence et leur amour indéfectibles.

## Sommaire

<b>Liste des abréviations</b> .....	
<b>Liste des figures</b> .....	
<b>Liste des tableaux</b> .....	
<b>Résumé long</b> .....	
<b>PARTIE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	1
<b>I. GENERALITES SUR LA MAURITANIE</b> .....	1
1.1. Situation géographique et administrative.....	1
1.2. Climats.....	1
1.3. Population humaine.....	2
<b>II. ELEVAGE DES PETITS RUMINANTS EN MAURITANIE</b> .....	2
2.1. Importance de l'élevage.....	2
2.2. Races des petits ruminants exploitées.....	2
2.3. Modes d'élevage.....	2
2.4. Commercialisation du bétail.....	3
2.5. Système de surveillance des maladies animales.....	5
<b>III. PESTE DES PETITS RUMINANTS</b> .....	5
3.1. Définition et étiologie.....	5
3.2. Espèces affectées.....	5
3.3. Distribution géographique.....	5
3.4. Signes cliniques.....	6
3.5. Transmission et diffusion.....	6
3.6. Situation en Mauritanie.....	7
3.7. Mesures de contrôle.....	7
<b>IV. MODELE GRAVITAIRE</b> .....	8
4.1. Définition.....	8
4.2. Applications.....	8
<b>PARTIE II : TRAVAIL PERSONNEL</b> .....	10
<b>I. INTRODUCTION</b> .....	10
<b>II. MATERIEL ET METHODES</b> .....	10
2.1. Site de travail.....	10
2.2. Données disponibles.....	11
2.3. Nettoyage des données.....	12
2.4. Modèles de gravité.....	12
2.4.1. Construction des modèles et stratégie de comparaison.....	13

2.4.2. Choix des variables explicatives .....	14
2.4.3. Recherche de données pour les variables explicatives .....	14
<b>III. RESULTATS</b> .....	<b>15</b>
3.1. Analyse descriptive des flux de petits ruminants .....	15
3.2. Modélisation des flux de petits ruminants.....	24
<b>IV. DISCUSSION</b> .....	<b>26</b>
<b>V. CONCLUSION</b> .....	<b>28</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>29</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>34</b>

## Liste des abréviations

**AIC** : Akaike Information Criterion (critère d'information d'Akaike)

**AICc** : Critère d'information d'Akaike corrigé

**CIRAD** : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

**CMAEE** : Contrôle des Maladies Animales, Exotiques et Emergentes

**CNERV** : Centre National d'Élevage et des Recherches Vétérinaires

**DSV** : Direction des Services Vétérinaires

**FA** : Fièvre Aphteuse

**FAO** : Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture)

**FVR** : Fièvre de la Vallée du Rift

**OCHA** : Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (bureau de la coordination des affaires humanitaires)

**OIE** : Organisation Mondiale de la Santé Animale

**PPCB** : Péripleurmonie Contagieuse Bovine

**PPCC** : Pleuropneumonie Contagieuse Caprine

**PPR** : Peste des petits ruminants

**PR** : Petits Ruminants

**PPRV** : Virus de la Peste des petits ruminants

**REMEMA** : Réseau Mauritanien d'Épidémiologie des Maladies Animales

**UMR** : Unité Mixte de Recherche

## Liste des figures

Figure 1 : Carte administrative de la Mauritanie.....	1
Figure 2 : Carte des principaux marchés à bétail en Mauritanie .....	4
Figure 3 : Carte de distribution de la PPR.....	6
Figure 4 : Distribution géographique des localités étudiées.....	15
Figure 5 : Volume des petits ruminants à l'origine et à la destination .....	16
Figure 6 : Fréquence des mouvements des petits ruminants par mois .....	17
Figure 7 : Nombre de petits ruminants déplacés par mois .....	18
Figure 8 : Nombre de petits ruminants déplacés au niveau national et international par mois .....	19
Figure 9 : Nombre de petits ruminants déplacés par type de convoyage par mois .....	20
Figure 10 : Distance médiane parcourue par type de convoyage et de mouvements par mois .....	21
Figure 11 : Réseaux des mouvements entre janvier et juillet et entre août et décembre .....	22
Figure 12 : Fréquence des mouvements .....	23
Figure 13 : Distribution temporelle des mouvements .....	23

## Liste des tableaux

Tableau I : Effectifs du cheptel de ruminants en Mauritanie entre 2012 et 2016.....	2
Tableau II : Extrait du tableau des données de l'enquête mobilité animale .....	12
Tableau III : Nombre de mouvements selon l'activité des localités d'origine et de destination.....	16
Tableau IV : Pourcentage d'animaux impliqués dans chaque type de mouvement .....	17
Tableau V : Valeurs des coefficients et des indicateurs de qualité des modèles gravitaires .....	25

## Résumé long

La Mauritanie est le pays le plus aride et le plus vaste du Sahel. Le secteur de l'élevage occupe une place très importante au sein de l'économie de la Mauritanie. En effet, l'élevage constitue la principale activité du secteur rural et contribue jusqu'à 25% du PIB du pays (Soule, 2003).

En dépit de nombreuses contraintes liées notamment à la santé animale, à l'abreuvement, au climat, à l'alimentation, l'élevage fournit un important cheptel estimé par le ministère de l'élevage en 2016 à 1.8 million de bovins, 1.5 million de camelins et plus de 19 millions de petits ruminants. Ainsi, la Mauritanie est autosuffisante en viande et dispose d'un potentiel important pour l'exportation vers les pays limitrophes. En effet, la Mauritanie est considérée comme le plus grand pays exportateur de bétail sur pied vers les pays africains côtiers du Sud où la demande demeure forte. Il est estimé que le Sénégal reçoit les 2/3 des petits ruminants. Malgré les périodes de sécheresse, on constate un accroissement des effectifs qui laisse présager une constante augmentation de l'excédent exportable du bétail (Ould Souei, 2006). Cependant, l'élevage reste confronté à des problèmes sanitaires dominés par des maladies infectieuses comme la peste des petits ruminants (PPR).

La PPR est une maladie virale très contagieuse qui touche les petits ruminants domestiques. Cette maladie, d'évolution très rapide, est due à un virus à ARN du genre *Morbillivirus* de la famille des *Paramyxoviridae* (Gibbs et al., 1979). La PPR se caractérise cliniquement par un état typhique, des érosions des muqueuses buccales et une atteinte pulmonaire. Sous forme épizootique elle entraîne de fortes mortalités et sous forme enzootique elle favorise l'apparition de pneumopathies bactériennes (Roeder et al., 2000). Du fait des mortalités d'animaux, de la baisse de production et du coût de la lutte contre la maladie, la PPR cause des pertes économiques allant de 1,5 à 2 milliards de dollars chaque année (OIE and FAO, 2015). De plus, cette maladie a des conséquences dévastatrices sur une source de revenu vitale pour les paysans.

La majorité des pays touchés ne peuvent pas appliquer les mesures conventionnelles de gestion des foyers (séquestration, quarantaine, contrôle du mouvement des animaux). Une vaccination avec des taux de couverture conséquents ou une surveillance à large échelle ne sont pas envisageables dans certains pays où le mouvement et le renouvellement des animaux sont importants (Ben Romdhane, 2014).

En Mauritanie, la PPR est considérée comme enzootique. La maladie apparaît chaque année dans le Sud et à l'Est du pays sous forme de foyers saisonniers montrant un pic de fréquence en hiver et un silence relatif en été. La diffusion et l'entretien du virus de la PPR en Mauritanie sont favorisés par plusieurs facteurs : le système d'élevage et la densité animale, les mouvements de transhumance, et les échanges commerciaux (Ahmed, 2012). Afin de limiter les risques de propagation de cette maladie il est important de collecter des données sur la mobilité animale et de comprendre les facteurs expliquant cette mobilité.

Ainsi, cette étude a pour objectif de décrire les mouvements des petits ruminants en Mauritanie et d'émettre des hypothèses sur les facteurs explicatifs de la mobilité animale. Les hypothèses issues de la revue de littérature et de l'analyse descriptive ont été testées à l'aide de modèles d'interaction spatiale, plus particulièrement le modèle gravitaire.

Des données sur la mobilité animale en Mauritanie pour l'année 2014 ont été collectées par le Centre National d'Élevage et des Recherches Vétérinaires (CNERV) entre le 30 mai et le 14 juin 2015. Une enquête synthétique de type Origine/Destination sur la base d'un questionnaire a été réalisée auprès d'inspecteurs et chefs de poste vétérinaires. Ces derniers ont une connaissance synthétique des mouvements et disposent de supports tels que les certificats

zoo-sanitaires ou les certificats de transhumance. L'enquête a été effectuée sous forme d'entretiens, en face à face. Des informations telles que les localités d'origine et de destination des animaux, le type d'activité des localités (élevage, marché, abattoir, zone de repos), l'espèce des animaux déplacés, la date du mouvement, et le mode de convoyage ont été collectées. Ces données ont été nettoyées, géoréférencées, cartographiées et analysées afin de décrire les flux des petits ruminants en Mauritanie.

Après avoir procédé à une analyse descriptive des flux de petits ruminants, des modèles gravitaires ont été construits et testés pour connaître les différents facteurs impliqués dans la diffusion de la maladie et optimiser la surveillance. En effet, un modèle de gravité permettant de modéliser les flux d'animaux pourrait être un outil pour mieux comprendre l'épidémiologie de la PPR et ainsi améliorer le contrôle de la maladie.

Cette étude a montré le nombre important des mouvements de petits ruminants effectués en Mauritanie en 2014. En effet, 1252 mouvements ont été recensés dans l'année et près de 5 millions d'animaux ont été déplacés. La plupart des mouvements ont été réalisés au Sud de la Mauritanie, sur l'axe Est-Ouest. Les mouvements ont été faits principalement entre un élevage et un marché (53 %) ou entre deux élevages (40 %). Cependant la majorité des animaux ont été déplacés entre deux élevages. Les résultats ont montré que 70 % des animaux déplacés ont été envoyés dans d'autres pays (Sénégal, Mali, et Guinée Bissau). Le nombre d'animaux importés par la Mauritanie a été négligeable par rapport au nombre d'animaux exportés.

En raison de l'augmentation du nombre d'animaux déplacés et de la fréquence des mouvements, 2 périodes ont pu être distinguées pour l'année 2014 : d'avril à juin pendant la période de soudure, et de septembre à octobre, à l'occasion de la Tabaski.

Le réseau des mouvements a été cartographié sur 2 périodes : entre janvier et juillet et entre août et décembre. Le réseau impliquant le plus grand nombre de liens et de localités est celui de janvier à juillet. Durant cette période, le plus grand nombre d'animaux ont été déplacés entre le Sud-Est de la Mauritanie et le Mali. D'août à décembre, c'est en direction de Nouakchott, capitale de la Mauritanie, que les mouvements les plus importants en termes d'animaux déplacés ont été effectués.

La plupart des déplacements ont été faits à pied mais pendant la période de la Tabaski plus d'animaux ont été transportés en camion. Les distances parcourues ont été plus grandes au niveau national qu'international, les mouvements internationaux ayant été principalement réalisés entre 2 localités proches des frontières avec le Mali et le Sénégal.

Le réseau des mouvements a présenté des variations temporelles avec des axes de mouvements empruntés toute l'année et des axes empruntés occasionnellement. Les mouvements ont été classifiés en 3 réseaux selon leur présence dans le temps : le réseau annuel (mouvements réalisés les 12 mois de l'année), le réseau intermédiaire (mouvements effectués entre 3 mois et 12 mois), et le réseau occasionnel (mouvements réalisés pendant 1 et 2 mois). La plus grande partie des mouvements ont été effectués dans le réseau intermédiaire sur de courtes distances (échanges avec le Mali et le Sénégal), à l'exception des mouvements réalisés entre le Nord et le Sud de la Mauritanie et ceux dirigés vers la Guinée Bissau. La majorité de ces mouvements ont été réalisés entre janvier et juillet 2014. Dans le réseau annuel, la quasi-totalité des mouvements ont été effectués en direction de Nouakchott. Le réseau occasionnel a été constitué des mouvements de courte distance vers le Sénégal et des mouvements de longue distance vers la côte mauritanienne ainsi qu'entre le Nord-Ouest et le Sud de la Mauritanie. Ces mouvements ont été effectués lors de la période de la Tabaski.

Des hypothèses en termes de risque de transmission de la PPR ont été émises. Si le virus de la PPR était introduit en Mauritanie entre janvier et juillet, où les mouvements se font entre élevages pour l'engraissement, un animal infecté pourrait entrer en contact avec un grand nombre d'animaux. Les mouvements ont été réalisés entre localités proches au niveau des frontières avec le Mali et le Sénégal. Des mouvements de longues distances au Sud et entre le Sud et le Nord de la Mauritanie, ainsi qu'en direction de la Guinée Bissau, ont également été effectués. Ainsi, de nombreux foyers pourraient se déclarer dans l'ensemble de ces pays.

Plusieurs modèles ont été testés pour savoir si des variables socio-économiques pouvaient expliquer les flux d'animaux. Cependant, les modèles gravitaires de cette étude ont obtenu de mauvais résultats en termes d'indicateurs de la qualité d'ajustement des données. De plus certaines variables ont révélé des résultats difficilement interprétables. En effet, selon les modèles implémentés, plus il y avait d'animaux dans la localité d'origine moins il y avait de flux.

Ainsi, les modèles gravitaires ne sont pas de bons candidats pour expliquer les facteurs de la mobilité animale en Mauritanie. Cependant, il est fort probable que des variables importantes pouvant expliquer ces flux n'aient pas été collectées. Ainsi, d'autres variables pourraient être utilisées pour développer des modèles gravitaires et ces derniers pourraient également être testés sur d'autres jeux de données. La collecte et la saisie des données des enquêtes synthétiques doivent être améliorées. Les données du terrain pourraient aussi être vérifiées avec d'autres types d'enquêtes telles que celles utilisant les laissez-passer sanitaires par exemple.

Des études récentes (Simini et al., 2012) ont montré que les modèles de radiation donnaient de meilleurs résultats que les modèles gravitaires en termes de prédiction des mouvements de populations. Ce type de modèle pourrait être étudié à l'avenir pour expliquer les facteurs de la mobilité animale et prévoir les risques de diffusion des maladies.

Cependant, la richesse de l'analyse descriptive a mis en évidence un bon nombre d'informations sur la nature des flux de petits ruminants en Mauritanie et ces informations pourront servir à optimiser le contrôle de la PPR dans cette région.

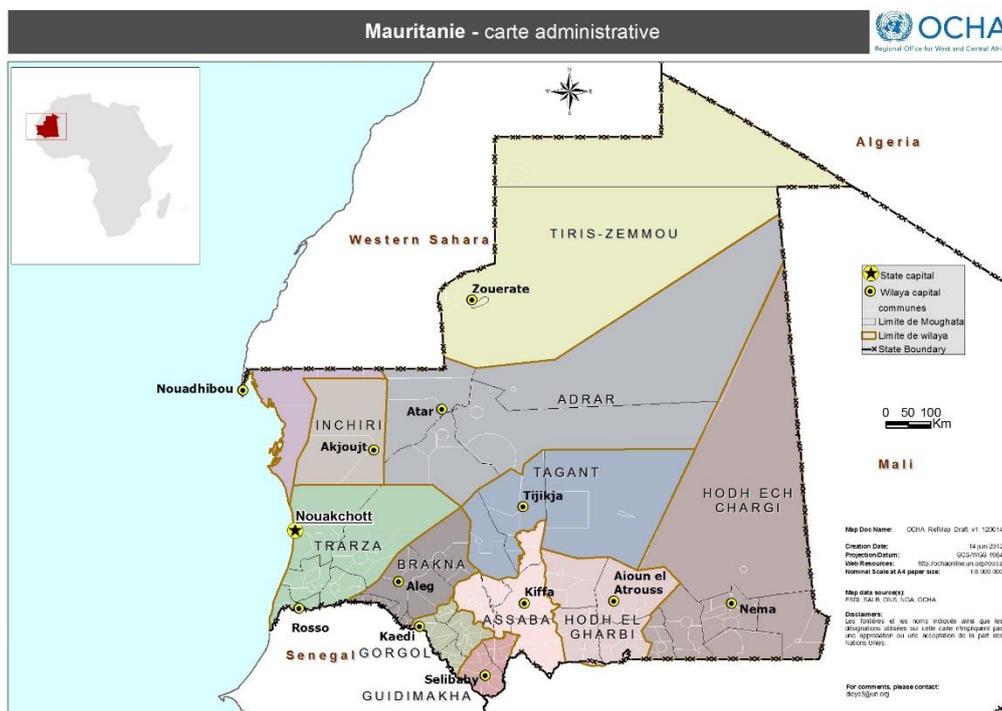
# PARTIE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

## I. GÉNÉRALITÉS SUR LA MAURITANIE

### 1.1. Situation géographique et administrative

La Mauritanie est située entre le 15<sup>ème</sup> et le 27<sup>ème</sup> degré latitude Nord et le 5<sup>ème</sup> et 17<sup>ème</sup> degré longitude Ouest. Elle est limitée à l'Est par le Mali, au Nord par l'Algérie, au Sud par le Sénégal, à l'Ouest par l'Océan Atlantique. Elle occupe dans l'Ouest Africain une superficie de 1.030.000 km<sup>2</sup>. Sur le plan administratif, la Mauritanie compte 13 *wilayas* ou régions et 53 *moughataas* ou départements (Figure 1).

Figure 1 : Carte administrative de la Mauritanie



Source : Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA), 2012

Ce pays est ainsi un trait d'union entre l'Afrique blanche et l'Afrique noire. La grande étendue du territoire en latitude explique la diversité des climats rencontrés.

### 1.2. Climats

Il existe quatre types de climats en Mauritanie :

- le climat saharien (Nord), dans la région de Zouerate et Atar ;
- le climat côtier, bande littorale de Nouakchott à Nouadhibou ;
- le climat sahélien, qui couvre la plus grande partie du territoire ;
- le climat soudanien, à l'enclave du Sud-Est du pays.

Mais pour mieux embrasser la réalité, la Mauritanie a été subdivisée en 3 zones climatiques (Diagana, 1998) :

- un climat tropical sec de type sahélo-soudanais, caractérisé par huit mois secs dans l'extrême sud du pays et une pluviométrie supérieure ou égale à 400 mm ;
- un climat subdésertique de type sahélo-saharien au centre, caractérisé par une forte amplitude thermique et une pluviosité comprise entre 200 et 400 mm ;

- un climat désertique de type saharien au nord, caractérisé par une pluviosité inférieure à 200 mm/an.

### 1.3. Population humaine

La population en Mauritanie a été estimée à 3 596 702 habitants en 2015, soit une densité de 3,48 habitants/km<sup>2</sup>, avec un taux de croissance démographique de 2,31% (Statistiques mondiales, 2015). Cette population est en majorité rurale (80% de la population totale).

## II. ELEVAGE DES PETITS RUMINANTS EN MAURITANIE

### 2.1. Importance de l'élevage

L'élevage constitue la principale activité du secteur rural en Mauritanie et contribue jusqu'à 25% du PIB du pays (FAO, 2001 cité par Soule, 2003). En effet, il intéresse la quasi-totalité de la population rurale qui vit essentiellement d'activité agropastorale. Le Ministère de l'Élevage a donné une évolution des effectifs du cheptel national de 2012 à 2016 (tableau I).

**Tableau I : Effectifs du cheptel de ruminants en Mauritanie entre 2012 et 2016**

	2012	2013	2014	2015	2016
<b>Bovins</b>	1 749 076	1 773 563	1 798 393	1 823 537	1 849 101
<b>Ovins</b>	9 593 464	10 073 138	10 576 795	11 105 634	11 660 916
<b>Caprins</b>	6 394 326	6 714 042	7 079 744	7 402 232	7 772 343
<b>Camelins</b>	1 379 417	1 389 037	1 398 796	1 408 588	1 418 448

Source : Ministère de l'Élevage, 2016

Ce tableau montre l'importance numérique du cheptel des petits ruminants par rapport aux bovins et camelins.

Plus de 50% du cheptel de petits ruminants sont concentrés dans les *wilayas* de l'Est où sont l'essentiel des pâturages (Hodh Ech Chargui, Hodh El Gharbi, Assaba et Tagant) et environ 35% du cheptel se localisent dans les *wilayas* de la vallée du fleuve Sénégal (Guidimakha, Gorgol, Brakna et Trarza) (Ahmed, 2012).

### 2.2. Races des petits ruminants exploitées

Les troupeaux de petits ruminants sont généralement mixtes (ovins et caprins) avec une prédominance d'ovins (jusqu'à 70% du troupeau).

Il existe 4 races caprines en Mauritanie dont les 2 premières sont beaucoup plus exploitées (Kane, 1995) :

- la chèvre du Sahel ou chèvre maure ;
- la chèvre du Sahara ou chèvre espagnole ;
- la chèvre naine de l'Est ou Diougry ;
- la chèvre de Maradi.

Pour les ovins, 3 races sont présentes (Kane, 1995) :

- le mouton maure à poils ras ou Touabire ;
- le mouton maure à poils longs ;
- le mouton peulh.

### 2.3. Modes d'élevage

En Mauritanie il existe essentiellement trois modes d'élevage (Ly, 1976) :

- l'élevage nomade ;

- l'élevage transhumant ;
- l'élevage sédentaire.

### **Elevage nomade**

Cet élevage est pratiqué par les populations du Nord de la Mauritanie qui sont éternellement en mouvement, soit autour d'un point d'eau ou *ouad*, soit aux abords immédiats d'une oasis.

Ces populations nomades ont une activité essentiellement pastorale ; en dehors du dromadaire qui sert à transporter le matériel du campement, le reste du troupeau se compose essentiellement de chèvres qui constituent une réserve potentielle de viande destinée à honorer l'arrivée d'un étranger. L'éleveur nomade lui-même n'utilise que le lait de chèvre pour son "*zrig*" (lait caillé coupé d'eau additionné de sucre ou de sel).

Ces éleveurs nomades, contrairement aux éleveurs transhumants, sont bien localisés dans la zone climatique du Nord qui n'est, du reste, accessible que par eux. Parmi les races caprines étudiées, la chèvre du Sahel est celle qui s'adapte le mieux à ce mode d'élevage (Ly, 1976).

### **Elevage transhumant**

Ce mode d'élevage est commun aux Maures et aux Peulhs. Ce type d'élevage est basé sur les mouvements de transhumance de grande amplitude (en moyenne 400 km) pour la recherche des pâturages. Les éleveurs suivent des itinéraires de transhumance saisonnière, soit pour valoriser les ressources fourragères naturelles, soit pour faire des cures salées ou éviter de soumettre leurs troupeaux aux piqûres des moustiques. Les circuits de transhumance saisonnière peuvent être résumés en deux grands mouvements (Ahmed, 2012) :

- un mouvement Nord-Sud : dès la fin de l'hivernage (novembre-avril), les troupeaux redescendent vers le Sud en passant par les couloirs de transhumance pour regagner les zones agropastorales vers les frontières avec le Mali et le Sénégal voire au-delà des frontières ;
- un mouvement Sud-Nord : dès le début de la saison des pluies et pendant l'hivernage (juillet-octobre), les éleveurs se déplacent du Sud (frontières avec le Mali et le Sénégal) vers le Nord jusqu'au nord de l'Assaba, des Hodhs et du Tagant.

L'élevage des caprins est secondaire. La production ovine est en grande partie tournée vers la production de béliers écoulés régulièrement vers les villes de l'intérieur ou commercialisés au Sénégal et au Mali.

### **Elevage sédentaire**

L'élevage sédentaire, autrefois inconnu en Mauritanie, commence à s'implanter. Ces dernières années de sécheresse ont durement éprouvé les populations d'éleveurs qui n'ont trouvé d'autres solutions que l'exode rural pour aller s'installer dans les villes régionales ou à Nouakchott, la capitale. Il en est résulté une montée en flèche du cours de la viande des petits ruminants tant appréciée lors des méchouis et même des repas familiaux. Ce mode d'élevage convient particulièrement à la chèvre saharienne. Cette dernière, peu exigeante sur le plan nutritionnel, se contente des restes de l'alimentation humaine (Ly, 1976).

## **2.4. Commercialisation du bétail**

Le commerce des petits ruminants sur pied est largement pratiqué à l'intérieur de la Mauritanie et au-delà des frontières. En effet, les animaux sont acheminés depuis les *wilayas* agropastorales de l'Est (Hodhs, Assaba, Guidimakha, Gorgol et Trarza) vers les *wilayas* du Centre et du Nord, et en particulier à Nouakchott où se trouve le plus grand marché à bétail.

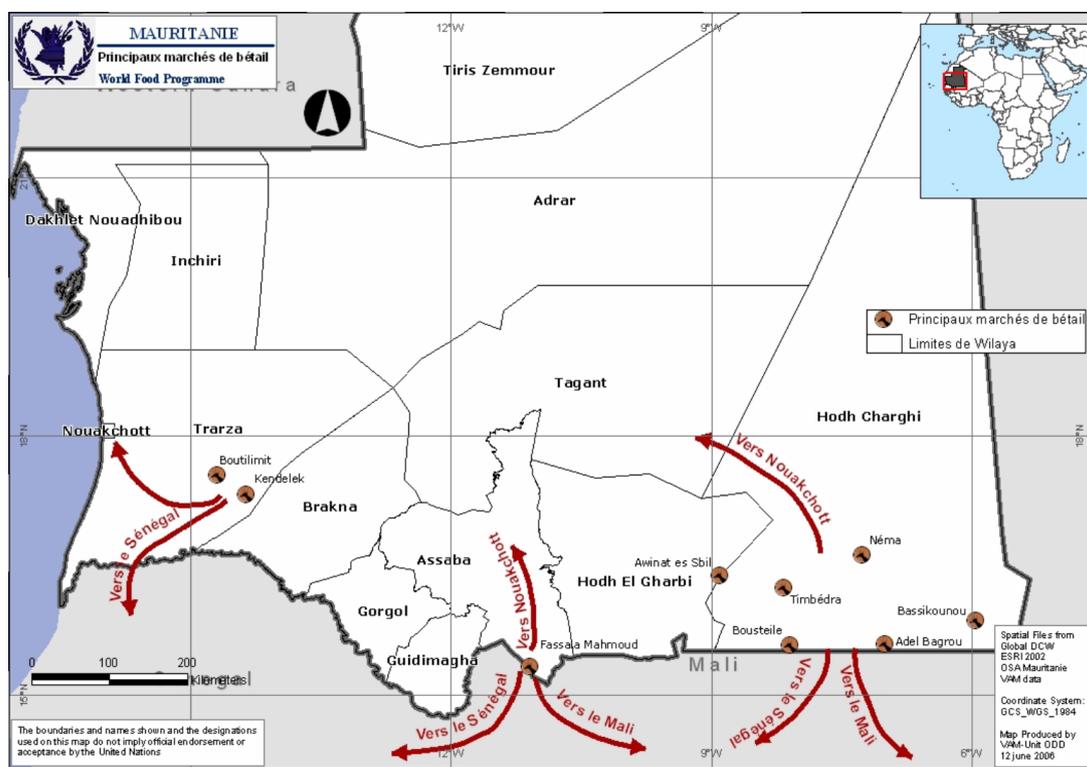
D'autre part, la Mauritanie exporte des centaines de milliers de têtes de petits ruminants sur le Sénégal, le Mali et la Gambie, notamment pendant les périodes de fêtes religieuses. Des mouvements d'exportation de dromadaires et de petits ruminants sur pied vers le Maroc et l'Algérie sont pratiqués dans un cadre illégal (Ahmed, 2012).

Les marchés de collecte et de regroupement sont situés dans les deux grandes zones d'élevage (Geert et al., 2006) :

- ❖ le Sud-Est du pays, dans les *wilayas* du Hodh Ech Chargui, du Hodh El Gharbi et de l'Assaba ;
- ❖ le Sud-Ouest, dans les *wilayas* du Trarza, du Brakna et du Gorgol. Bien qu'une spécialisation géographique stricte en termes de commercialisation ne semble pas exister, les collecteurs sénégalais sont beaucoup plus présents sur les marchés du Sud-Ouest.

La figure 2 montre les principaux marchés de bétail, ainsi que les circuits de commercialisation.

**Figure 2 : Carte des principaux marchés à bétail en Mauritanie**



Source : World Food Programme, Geert et al., 2006

Après le regroupement, le commerçant utilise généralement un véhicule pour le transport du bétail. Néanmoins, dans le cas de marchés non distants comme entre les *moughataas* et la capitale régionale, ou entre régions limitrophes, les services d'un berger suffisent. Cela se passe différemment pour la Tabaski, les animaux étant conduits à pied à Dakar 3 à 4 mois avant cette fête religieuse (Geert et al., 2006).

La bonne marche des exportations de l'excédent en bétail dépend des facteurs suivants : la demande forte dans les zones urbaines ; le taux de change ; les taxes formelles et informelles. Sur le plan conjoncturel, c'est surtout une dévaluation du Franc CFA qui pourrait entraîner des difficultés d'écoulement et une baisse des prix des animaux, comme ce fut le cas en 1994.

## **2.5. Système de surveillance des maladies animales**

Un réseau d'épidémiologie appelé "REMEMA" (Réseau Mauritanien d'Epidémiologie des Maladies Animales) a été créé en 1999 pour assurer le suivi de la situation sanitaire. Il est composé de 60 agents répartis sur l'ensemble du territoire. En effet, une surveillance passive continue, basée sur les suspicions, couvre tout le pays. Actuellement, plusieurs maladies considérées prioritaires font l'objet d'une surveillance étroite. Parmi ces maladies peuvent être citées la Péripleurite contagieuse bovine (PPCB), la fièvre aphteuse (FA), la Fièvre de la Vallée du Rift (FVR), et la peste des petits ruminants (PPR). Cette dernière fait l'objet de notre étude.

## **III. PESTE DES PETITS RUMINANTS**

### **3.1. Définition et étiologie**

La peste des petits ruminants (PPR) est une maladie virale, infectieuse et très contagieuse qui touche les petits ruminants domestiques. Elle peut cependant également toucher les ruminants sauvages lorsque ces derniers entrent en contact avec les ruminants domestiques (Khalafalla et al., 2010).

Cette maladie, d'évolution très rapide, est due à un virus à ARN du genre *Morbillivirus* de la famille des *Paramyxoviridae* (Gibbs et al., 1979). C'est un virus très proche du virus de la peste bovine.

La PPR se caractérise cliniquement par un état typhique, des érosions des muqueuses buccales et une atteinte pulmonaire. Sous forme épizootique elle entraîne de fortes mortalités et sous forme enzootique elle favorise l'apparition de pneumopathies bactériennes (Roeder et al., 2000).

### **3.2. Espèces affectées**

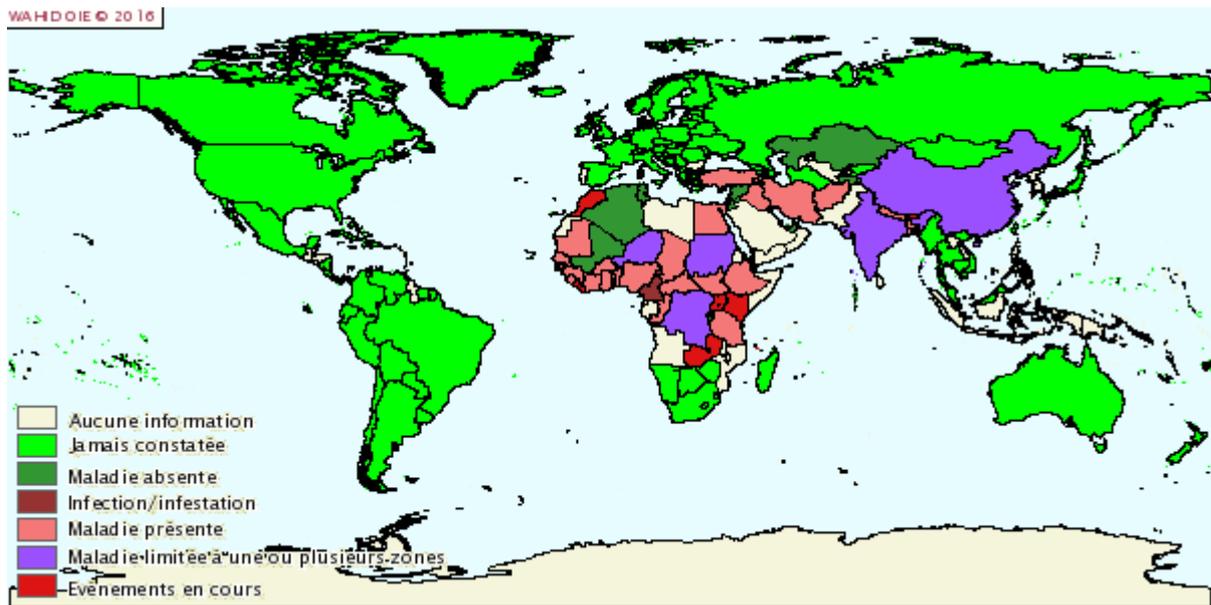
Cliniquement, la maladie touche les moutons et les chèvres. Dans certains parcs zoologiques, des cas cliniques de PPR ont été décrits sur des petits ruminants sauvages dont des moutons de Laristan, des gazelles Dorcas et gemsbock, ainsi que des ibex de Nubie. D'autres espèces, telles que les bovins, les buffles, les dromadaires et les porcs, peuvent être infectées par le virus de la PPR (PPRV), même s'il est difficile de détecter les symptômes de la maladie (Roeder et al., 2000).

Les ovins et les caprins ne sont pas toujours touchés avec la même fréquence ni la même gravité clinique. En Afrique, par exemple, la PPR est plus fréquemment observée chez les caprins que chez les ovins, alors que ces derniers semblent être les premières victimes de la maladie en Asie (Roeder et al., 2000).

### **3.3. Distribution géographique**

La PPR a été décrite pour la première fois en Côte d'Ivoire en 1942 (Gargadennec and Lalanne, 1942) et est aujourd'hui endémique dans toute l'Afrique sahélienne et équatoriale. La maladie a atteint la péninsule arabique, le Moyen-Orient, l'Asie, et l'Afrique du Nord (Sanz-Alvarez et al., 2008). Des cas ont également été enregistrés en Inde (Taylor et al., 2002), en Turquie (Özkul et al., 2002), en Chine (Wang et al., 2009) et au Pakistan (Zahur et al., 2011). De plus, dans certains pays où la présence de la maladie n'a pas été confirmée officiellement, des indications sérologiques et/ou cliniques démontrent la présence de l'infection. La distribution mondiale de la PPR est illustrée sur la figure 3.

**Figure 3 : Carte de distribution de la PPR**



**Source :** Organisation Mondiale de la Santé Animale (OIE), 2015

### **3.4. Signes cliniques**

La période d'incubation, variant de deux à six jours, est suivie de l'apparition très rapide de fièvre. Les animaux touchés semblent très abattus, somnolents, et ont des poils hérissés qui leur donnent un aspect ébouriffé. Un à deux jours après l'apparition de la fièvre, les muqueuses buccale et oculaire deviennent rouges. Des écoulements épais collent les paupières entre elles ou obstruent les voies nasales (annexe 1), rendant la respiration difficile. Des zones grises localisées, résultant de la nécrose épithéliale, apparaissent sur les gencives, sur le coussinet dentaire, sur le palais, les lèvres, à l'intérieur des joues, et sur le dessus de la langue (Roeder et al., 2000).

Dans la forme aiguë, forme typique de la maladie, le taux de mortalité s'élève à 70-80 %. En cas de guérison, la convalescence est rapide. La forme subaiguë, dont la gravité est fonction du degré de complication microbienne (souvent fréquente), se traduit par une faible hyperthermie. Les autres signes cliniques sont peu intenses, voire absents. La forme inapparente est assez fréquente, notamment dans les zones sahéliennes, et ne peut être révélée que lors d'enquêtes sérologiques (Minet et al., 2009).

### **3.5. Transmission et diffusion**

Les animaux infectés excrètent de grandes quantités de virus par le jetage, les larmes, la salive et les matières fécales. De très fines gouttelettes de matières virulentes se forment à partir de ces sécrétions et excréments et contaminent l'air ambiant. La toux et les éternuements contribuent à la formation de ces gouttelettes. Les animaux s'infectent en les inhalant, d'où la transmission rapide de la maladie quand le contact entre les animaux est étroit. D'autres sources de contamination sont représentées par l'eau, les aliments, les mangeoires, les abreuvoirs et les litières souillées par les matières virulentes. Néanmoins, la contamination à partir de ces sources n'est que de courte durée car le virus de la PPR ne survit pas longtemps en milieu extérieur en raison de sa très grande fragilité (Roeder et al., 2000). Certains animaux peuvent excréter le virus dans les fèces deux jours avant l'apparition des premiers symptômes de la maladie. La voie naturelle de contamination est la voie respiratoire.

Les animaux jeunes de plus de trois mois, dépourvus d'anticorps maternels, sont les plus sensibles à l'infection (Diallo, 2008 ; OIE, 2008).

Les facteurs qui influencent la transmission et l'apparition clinique de la PPR sont entre autres (Diallo, 2008 ; Grech-Angelini, 2012) :

- les mouvements ou rassemblements d'ovins et/ou de caprins de différents âges ;
- l'introduction de nouveaux animaux ou le retour au village des animaux invendus au marché ;
- le contact avec des animaux étrangers (animaux en transit pour les foires, animaux de nomades) partageant les mêmes pâturages, les mêmes sources d'eau ou les mêmes abris ;
- les stress liés à des modifications dans la conduite d'élevage (changement alimentaire, habitat, intensification d'élevage) ou à des changements de climat (début de la saison des pluies, période de l'harmattan en Afrique de l'Ouest) ;
- les zones où la PPR est enzootique. Dans ces cas, ce sont les animaux âgés de 4 à 18-24 mois qui paient les plus lourds tributs.

Le fait que le PPRV circule chez les animaux sauvages et agit comme une source potentielle de virus pour les espèces domestiques n'a pas été prouvé (Banyard et al., 2010).

### **3.6. Situation en Mauritanie**

En Mauritanie, la PPR est considérée comme enzootique. Les premières observations sérologiques datent de 1985 dans la région du Gorgol (Le Jan et al., 1987). La maladie apparaît chaque année dans le Sud et à l'Est du pays sous forme de foyers saisonniers montrant un pic de fréquence en hiver et un silence relatif en été. La reconnaissance de la maladie par les éleveurs et agents de terrain est souvent difficile à cause de la similarité de symptômes avec d'autres affections plus connues. Une enquête sérologique réalisée en 2010 a révélé une prévalence nationale de la maladie de 36,71% (Mint Cheikh et al., 2012).

La diffusion et l'entretien du virus de la PPR en Mauritanie sont favorisés par plusieurs facteurs : le système d'élevage et la densité animale, les mouvements de transhumance, et les échanges commerciaux (Ahmed, 2012).

### **3.7. Mesures de contrôle**

La vaccination contre la PPR en Mauritanie n'est pas obligatoire mais elle est souvent recommandée par les services vétérinaires, compte tenu de la fréquence des foyers. Cependant, le taux de couverture reste encore très faible : 40 000 animaux vaccinés en 2009 avant d'atteindre 500 000 têtes par an avec l'appui du projet VACNADA, ce qui est négligeable par rapport à la taille du cheptel (plus de 14 millions) (Mint Cheikh et al., 2012).

En raison de la forte mortalité et de la morbidité, ainsi que de la rapidité de propagation de la maladie par contagion, la PPR est une maladie à déclaration obligatoire. Du fait des mortalités d'animaux, de la baisse de production et du coût de la lutte contre la maladie, la PPR cause des pertes économiques allant de 1,5 à 2 milliards de dollars chaque année. Ainsi, en 2013, l'OIE et la FAO (Food and Agriculture Organization) ont décidé de s'engager dans la lutte contre cette maladie à l'échelle mondiale et de mettre au point une stratégie mondiale de contrôle et d'éradication de la PPR d'ici à 2030 (OIE and FAO, 2015).

La réussite des campagnes de vaccination, qui reste le moyen le plus sûr de lutter contre la PPR, nécessite une bonne compréhension des mouvements d'animaux. Il devient alors important de comprendre les déterminants des différents flux de petits ruminants et d'utiliser cette information pour optimiser les différentes campagnes.

## IV. MODELE GRAVITAIRE

Afin de comprendre les facteurs de la mobilité animale, un modèle gravitaire a été utilisé pour modéliser les mouvements de petits ruminants.

### 4.1. Définition

Le modèle gravitaire est un type de modèle statistique inspiré par la loi de la gravitation universelle de Newton. Cette loi, où l'intensité de la force d'attraction entre 2 corps ( $F_{ij}$ ) est directement proportionnelle aux masses des corps ( $M_i, M_j$ ) et inversement proportionnelle à la distance entre eux ( $D_{ij}$ ), s'écrit selon l'équation suivante :

$$F_{ij} = k \frac{M_i M_j}{D_{ij}^2} \quad (1)$$

où  $k$  est une constante déterminée lors de l'ajustement du modèle (Pumain, 2004).

Le modèle gravitaire est destiné à formaliser, à étudier et à prévoir la géographie des flux ou des interactions (Lhomme, 2010). D'un point de vue mathématique, le modèle gravitaire en statistique généralise la loi de Newton de la manière suivante :

$$F_{ij} = k \frac{M_i^a M_j^b}{D_{ij}^c} \quad (2)$$

- le terme  $F_{ij}$  correspond à un échange entre 2 localités (villes, départements, régions) ;
- les variables  $M_i$  et  $M_j$  représentent des caractéristiques socio-économiques quantifiables des deux localités telles que le nombre d'habitants (Simini et al., 2012), de productions animales (Koo et al., 1994), ou encore d'articles scientifiques publiés (Apolloni et al., 2013) ;
- la variable  $D_{ij}$  représente la distance entre les localités, cela peut être la distance du grand cercle et/ou le temps de trajet entre les deux localités ;
- les exposants  $a, b, c$  et la constante  $k$  sont estimés par la calibration du modèle aux données.

Dans la théorie du modèle gravitaire, l'interaction entre 2 lieux est proportionnelle à l'attractivité de ces lieux (variables de masses) et inversement proportionnelle à la distance qui les sépare.

### 4.2. Applications

L'utilisation des modèles gravitaires s'est généralisée à partir des années 1950 par leur emploi dans le processus de planification du système de transport urbain (Amérique du Nord, Europe). Depuis, leurs applications se sont diversifiées. Ils sont très employés pour analyser les flux de migration humaine (Greenwood, 2005 ; Garcia et al., 2015) et pour délimiter les aires de chalandise en marketing (Ellinger and Lindquist, 1984).

Ils rendent bien compte, en général, de l'essentiel des mouvements qui se produisent dans un milieu où la mobilité et l'accessibilité sont relativement homogènes : ampleur des flux de

déplacements domicile-travail dans un bassin d'emploi urbain, à partir de la répartition des zones de résidence et des zones d'emploi (Schéou, 1998) ; simulation des migrations interrégionales ou interurbaines de population dans un pays donné (Piras, 2016) ; prévision des besoins en infrastructures de transport (Ülengin et al., 2013).

Le modèle gravitaire, en plus de modéliser la mobilité des populations, est devenu au cours des deux dernières décennies un outil standard de modélisation des échanges en commerce international (Josselin and Nicot, 2003).

Les modèles gravitaires ont également été adaptés pour décrire la propagation des agents biologiques, tels que les espèces envahissantes (Schneider et al., 1998) et les agents pathogènes des plantes (Ferrari et al., 2006).

Au niveau épidémiologique, Xia et al. (2004) ont modélisé la dynamique de la rougeole en considérant les mouvements des personnes infectées dans les grands milieux urbains. Le modèle a permis de décrire la majorité des propriétés spatio-temporelles de cette épidémie.

Un modèle similaire a été appliqué à des données sur la grippe saisonnière aux Etats-Unis. Le modèle a permis de mettre en relation l'occurrence des différentes épidémies en fonction de la distance entre populations, la taille des populations et le mode de transmission de la maladie (Viboud et al., 2006). De même, un modèle a été construit pour prédire la diffusion du virus de la grippe A (H1N1) aux Etats-Unis en prenant en compte des indicateurs socio-économiques ainsi que le lieu où le premier cas avait été diagnostiqué (Li et al., 2011).

Ce type de modèle est maintenant de plus en plus utilisé dans la simulation et la compréhension des épidémies à la fois au niveau des métapopulations et au niveau individuel (Ferguson et al., 2006 ; Ciofi Degli Atti et al., 2008 ; Balcan et al., 2009 ; Merler and Ajelli, 2010).

Récemment, le modèle gravitaire a été utilisé pour simuler la transmission d'une maladie infectieuse en fonction des mouvements de personnes et des lieux les plus fréquentés par la population des Etats-Unis et de l'Angleterre (Truscott and Ferguson, 2012).

Un modèle a également été développé pour comprendre et prédire la propagation du virus Ebola en Afrique de l'Ouest lors de l'épidémie qui a touché cette région entre 2013 et 2015. Ce modèle a également permis de comparer l'efficacité des différentes mesures de contrôle de l'épidémie (D'Silva and Eisenberg, 2015).

Enfin, les modèles gravitaires ont été utilisés pour prédire la diffusion de la tuberculose bovine aux Etats-Unis en étudiant les mouvements commerciaux d'animaux (Xie et al., 2009).

## **PARTIE II : TRAVAIL PERSONNEL**

### **I. INTRODUCTION**

Bien qu'elle ait été décrite depuis plus de sept décennies, qu'il n'y ait pas de réservoir sauvage et qu'il existe des vaccins efficaces, la Peste des petits ruminants (PPR) continue à freiner le développement de l'élevage des moutons et des chèvres dans les pays où elle est installée. De plus, cette maladie a des conséquences dévastatrices sur une source de revenu vitale pour les paysans. La majorité des pays touchés ne peuvent pas appliquer les mesures conventionnelles de gestion des foyers (séquestration, quarantaine, contrôle du mouvement des animaux). Une vaccination avec des taux de couverture conséquents ou une surveillance à large échelle ne sont pas envisageables dans certains pays où le mouvement et le renouvellement des animaux sont importants (Ben Romdhane, 2014).

La PPR est l'exemple type de maladie qui illustre la dissémination du virus par le biais de la transhumance et du commerce transfrontalier des petits ruminants (Bouslikhane, 2015). Afin d'en limiter les risques de propagation il est important de collecter des données sur la mobilité animale et de connaître les facteurs expliquant cette mobilité.

Les connaissances existantes sur la PPR ne sont pas suffisantes pour bien comprendre, décrire et prédire sa dynamique de transmission. De plus, la collecte de données n'est pas toujours réalisable dans certains pays. Il est donc nécessaire d'utiliser des outils tels que la modélisation pour connaître les différents facteurs impliqués dans la diffusion de la maladie et optimiser la surveillance. Un modèle de gravité, mettant en évidence les variables expliquant la mobilité animale et permettant de modéliser les flux d'animaux, pourrait être un outil pour mieux comprendre l'épidémiologie de la PPR.

Ainsi, cette étude a pour objectif de décrire les mouvements des petits ruminants en Mauritanie et d'émettre des hypothèses sur les facteurs explicatifs de la mobilité animale. Puis, différents modèles gravitaires ont été construits et testés afin de tester ces hypothèses.

### **II. MATERIEL ET METHODES**

#### **2.1. Site de travail**

L'étude s'est déroulée au sein de l'UMR CMAEE, unité mixte de recherche « Contrôle des maladies animales, exotiques et émergentes », rattachée au département Bios du Cirad et au département Santé Animale de l'Inra, basée au Cirad de Montpellier, sur le campus de Baillarguet. Cette unité concentre ses recherches sur les maladies infectieuses animales et zoonotiques d'importance économique et sanitaire pour les pays du Sud, dont certaines menacent les pays du Nord. Les recherches visent à décrire et à caractériser les déterminants de l'émergence des agents pathogènes, de leur transmission et de leur diffusion, les processus infectieux mis en œuvre, et la dynamique des populations de vecteurs dans le cas des maladies vectorisées.

L'unité est laboratoire de référence de l'Organisation mondiale de la santé animale (OIE) pour différentes maladies animales dont la pleuropneumonie contagieuse caprine et la peste des petits ruminants, et également centre collaborateur de l'OIE pour l'épidémiologie, le diagnostic et le contrôle des maladies animales. A ce titre, son rôle ne se limite pas à la confirmation du diagnostic des maladies infectieuses, mais comporte aussi l'analyse des situations épidémiologiques, ainsi que des conseils, transferts de technologies et de compétences pour la prévention et le contrôle des émergences.

## 2.2. Données disponibles

En Mauritanie, les informations détenues par la Direction des Services Vétérinaires (DSV) concernant le mouvement des ruminants ne sont pas nombreuses. En revanche, la connaissance des mouvements collectifs de bétail peut être acquise par des enquêtes de type synthétique. De telles enquêtes donnent une représentativité spatiale correcte en termes de déplacements. La personne interrogée donne la provenance et la destination des animaux sous forme d'estimations pour chaque espèce. Ceci permet d'obtenir une cartographie des différents mouvements avec une qualification de l'intensité du flux sans avoir de dénombrement précis.

Des données sur la mobilité animale en Mauritanie pour l'année 2014 ont été collectées par le Centre National d'Elevage et des Recherches Vétérinaires (CNERV) entre le 30 mai et le 14 juin 2015.

Une enquête synthétique de type Origine/Destination sur la base d'un questionnaire (Annexe 2) a été réalisée auprès d'inspecteurs et chefs de poste vétérinaires. Ces derniers ont une connaissance synthétique des mouvements et disposent de supports tels que les certificats zoo-sanitaires ou les certificats de transhumance. L'enquête a été effectuée sous forme d'entretiens, en face à face. Les vétérinaires ont décrit les mouvements de bétail pour leur région, d'où les animaux sont partis et où ils sont arrivés, donnant ainsi sous forme synthétique leur connaissance des flux des animaux.

La collecte des données avait pour objectif principal d'établir une cartographie des déplacements des bovins, ovins, caprins et camelins à l'échelle de la Mauritanie. Les sous-objectifs de ce travail étaient :

- de cartographier les mouvements par espèce et par mois ;
- de dresser la liste des zones de rassemblement (marchés, zones de repos, abattoirs et élevages) ;
- d'estimer les zones à risque (la maladie étudiée était la FVR).

Deux équipes du CNERV ont effectués la collecte des données. La première équipe s'est intéressée aux *wilayas* du Trarza, du Brakna, du Gorgol, de Guidimakha et du Tagant. La seconde équipe s'est déplacée dans les *wilayas* du Hodh Ech Chargui, du Hodh El Gharbi et de l'Assaba. Pour les *wilayas* de l'Adrar, de l'Inchiri, de Tiris Zemmour et de Nouadhibou, les données ont été collectées grâce à des interviews ou des conférences téléphoniques avec les responsables des services vétérinaires.

Les coordonnées géographiques des localités visitées ont été enregistrées lors des missions de terrain. Certaines coordonnées ont été géoréférencées via Google Map ou à l'aide d'informations transmises par les services vétérinaires.

Des informations telles que les localités d'origine et de destination des animaux, le type d'activité des localités (élevage, marché, abattoir, zone de repos), l'espèce des animaux déplacés, la date du mouvement, et le mode de convoyage ont été collectées. Les flux (nombre de bêtes) ont été quantifiés de manière synthétique. Les données ont été enregistrées sous un tableur Excel. Par exemple (2ème ligne du tableau II), un mouvement de 1200 moutons a été effectué en camion d'un élevage de Mbout vers la zone de repos de Boutilimit lors de la période de la Tabaski de 2014.

**Tableau II : Extrait du tableau des données de l'enquête mobilité animale**

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Mode	Origine	Type	Destination	Type	Transit	Espèces	Nombre	Mode	periode	Annee	Fréquence	DureeJours	DureeHeures	Débarquement
Extensif	Kiffa	Elevage	Bababe	Marchés		Ovins	7400	Camion	Octobre-Novembre	2014 H		1		Non
Extensif	Mbout	Elevage	Boulimit	Zone de repos		Ovins	1200	Camion	tabaski	2014 H		1		Non
Extensif	Djgueni	Elevage	Bassiknou	Marchés	Boustale-Adel/Bagrou-Bassiknou	Ovins	10400	Camion	année	2014 H		1		Non
Extensif	Oum Lahbal	Marchés	Koberi	Elevage	Kankossa-El Ghatta-Koberi	Bovins	6000	ciéd	Avril-juin	2014 A		2		Non

Source : CNERV, 2015

Ces données ont été ramenées à un pas de temps mensuel, nettoyées, géoréférencées et cartographiées afin de décrire les flux des petits ruminants.

### 2.3. Nettoyage des données

Les données d'enquêtes brutes utilisées pour cette analyse présentaient des irrégularités et des erreurs de saisie. En effet, plusieurs localités ont été enregistrées avec les mêmes coordonnées géographiques. De plus le nom d'une même localité n'a pas toujours été orthographié de la même manière, créant ainsi des doublons dans les localités à analyser.

Pour pallier ce problème de doublons, les noms des localités étudiées ont été vérifiés en utilisant des moteurs de recherches et des sites internet spécialisés (<http://fr.getamap.net>), puis ces noms ont été homogénéisés sur l'ensemble du jeu de données. Une fois le nom des localités vérifié, l'interface programmable de Google Map (<https://www.google.fr/maps>) a été utilisée pour géolocaliser les localités dont les coordonnées n'étaient pas disponibles avec la bonne précision. Pour les coordonnées de certaines localités, d'autres sources provenant de l'Office Nationale de la Statistique mauritanien ont été utilisées (<http://www.ons.mr>).

La collecte des données ayant porté sur plusieurs espèces animales (ovins, caprins, bovins et camelins), les données concernant uniquement les petits ruminants ont été triées et regroupées. Dans certains cas, un même mouvement concernait plusieurs espèces animales sans distinction (la rubrique « espèce » comportait la mention « toutes » par exemple). Pour pouvoir prendre en compte ce mouvement en ne considérant que les petits ruminants, la proportion moyenne des petits ruminants a été estimée (d'après d'autres données de mouvements entre ces mêmes localités) et multipliée par le nombre total d'animaux donné pour ce mouvement.

### 2.4. Modèles de gravité

L'analyse des flux d'animaux entre deux localités dépend des caractéristiques de ces localités et de la distance qui les sépare. Le modèle gravitaire classique permet de formaliser ce concept sous forme d'équation et peut être ajusté à l'aide de données disponibles sur les flux. Le principe de base de ce modèle est que le flux de petit ruminants entre deux localités  $i$  et  $j$  est proportionnel à la masse respective de ces localités et inversement proportionnel à la distance qui les sépare. Chacun de ces paramètres a un exposant qui permet de représenter la force des interactions.

L'équation générale du modèle est :

$$F_{ij} = C \cdot \frac{M_i^\alpha \cdot M_j^\beta}{D_{ij}^\gamma} \quad (3)$$

avec :

$F_{ij}$  : flux d'animaux entre la localité d'origine (i) et la localité de destination (j)

$C$  : constante

$M_i$  : masse de la localité i

$M_j$  : masse de la localité j

$D_{ij}$  : distance entre les localités i et j

Pour estimer les paramètres de ce modèle (les coefficients  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) il est transformé en modèle linéaire additif :

$$\log(F_{ij}) = \log(C) + \alpha \log(M_i) + \beta \log(M_j) + \gamma \log(D_{ij}) \quad (4)$$

Afin de mieux évaluer le rôle respectif des différentes variables explicatives de la mobilité animale, plusieurs modèles gravitaires ont été construits sur la base de cette équation.

#### 2.4.1. Construction des modèles et stratégie de comparaison

Afin de comprendre les déterminants des flux, le modèle gravitaire classique stipule que les flux de petits ruminants sont expliqués par la population de petits ruminants à l'origine et à la destination et sont inversement proportionnels à la distance entre localités. Cependant, les travaux récents (Henry et al., 2003) ont montré qu'il est possible d'incorporer des variables socio-économiques et climatiques afin d'améliorer les modèles gravitaires et tester des hypothèses supplémentaires sur la nature des flux. De plus, le choix du type de distance a une influence importante sur les résultats. Ainsi, une distance de coût (temps de trajet) prenant en compte le réseau routier, les limites de vitesse sur ce réseau ainsi que le relief a été comparée à la distance du grand cercle entre localités.

L'estimation des modèles a été faite en utilisant une régression de Poisson, car elle corrige certains biais d'une estimation de modèle log-linéaire effectuée par la méthode des moindres carrés ordinaires (Flowerdew and Aitkin, 1982).

Les modèles ont été comparés d'après leur critère d'information d'Akaike corrigé (AICc), leur déviance, ainsi que leur résultat au test du Khi-carré de Pearson.

**Le critère d'information d'Akaike (AIC)** est une mesure de la qualité d'un modèle statistique. Ce critère propose une estimation de la perte d'information lorsque le modèle considéré est utilisé pour représenter le processus qui génère les données. L'AIC représente un compromis entre le biais, diminuant avec le nombre de paramètres utilisés dans le modèle, et la parcimonie, volonté de décrire les données avec le plus petit nombre de paramètres possible (Sugiura, 1978). Lorsque le nombre de paramètres est important, il est recommandé d'utiliser l'AICc afin de pénaliser les modèles sur-paramétrés (Bedrick and Tsai, 1994). Le meilleur modèle est celui ayant l'AICc le plus bas.

**La déviance** est une mesure de la qualité de l'ajustement d'un modèle. Cet indicateur est utilisé dans le cas particulier où le modèle a été estimé par maximum de vraisemblance. Plus cette mesure est petite plus l'ajustement est jugé bon.

**Le test du Khi-carré de Pearson** est un test d'ajustement ou d'adéquation, qui compare globalement la distribution observée dans un échantillon statistique à une distribution théorique, celle du khi-carré.

## **2.4.2. Choix des variables explicatives**

Pour construire les modèles et expliquer les flux de petits ruminants, 9 variables explicatives de la mobilité animale ont été retenues : le nombre d'habitants et le nombre d'animaux des localités d'origine et de destination, la distance entre les localités d'origine et de destination, le temps de trajet, le type d'activité des localités d'origine et de destination (pour les localités ayant plusieurs types d'activité, l'activité retenue a été celle engendrant le plus de flux, soit élevage ou marché), et une dernière variable indiquant si les types d'activité des localités d'origine et de destination étaient les mêmes ou non. Ces variables ont été choisies en combinant les résultats de l'analyse descriptive des flux et en considérant les variables classiques qui rentrent dans la construction théorique d'un modèle gravitaire. En effet, un modèle gravitaire doit contenir des masses avec un effet positif ou négatif sur les flux. Les masses à effet positif sur les flux peuvent être liées à la production animale (à l'origine et à la destination) ou à la consommation d'animaux (nombre d'habitants de la destination par exemple). Les masses à effet négatif sur les flux peuvent être représentées par la distance à parcourir.

## **2.4.3. Recherche de données pour les variables explicatives**

### **Population humaine**

Pour connaître le nombre d'habitants des localités étudiées, les données ont été extraites sous R à partir de données à haute résolution spatiale téléchargées sur le site du projet WorldPop (<http://www.worldpop.org.uk>). Ces données utilisent les données de recensement et les combinent à des données satellitaires en utilisant des modèles statistiques (Stevens et al., 2015). La couche finale est disponible sous forme de raster au format geotiff avec une résolution spatiale de 100 m (agrégée ensuite à 1 Km sous R). Pour notre analyse, la couche utilisée correspond à une projection du recensement des différents pays de la zone d'étude (Mauritanie, Sénégal, Mali, et Guinée Bissau) pour l'année 2015.

### **Population animale**

Afin d'obtenir le nombre d'animaux des localités étudiées, les données ont été extraites sous R à partir de rasters téléchargés sur le site GriddedLivestock of the World (<http://www.livestock.geo-wiki.org>). Des données de recensements agricoles nationaux par zones administratives recueillies par la FAO ont été utilisées afin de créer des polygones de densité de bétail à l'échelle mondiale. Ces données de recensements ont été ensuite transformées à l'aide de méthode d'apprentissage statistique afin d'obtenir des données à plus haute résolution spatiale (Robinson et al., 2014). La couche finale est disponible sous forme de raster avec une résolution spatiale de 1 Km et correspond aux données de recensements de l'année 2006.

### **Distance du grand cercle**

Les distances entre localités ont été calculées sous R à partir des coordonnées géographiques des localités étudiées. La distance du grand cercle, encore appelée distance orthodromique, a été utilisée car elle permet de prendre en compte le fait que la Terre soit approximativement sphérique et calcule donc la distance le long de l'arc qui joint deux localités.

### **Distance à moindre coût : temps de trajet**

Une variable représentant une estimation du temps de voyage le moins long entre deux lieux et exprimé en minutes a été calculée. Ces données ont été générées sous R (fonction

costDistance) à partir d'une carte d'accessibilité (2008) téléchargée sur le site Joint Research Centre (<http://forobs.jrc.ec.europa.eu/products/gam/sources.php>).

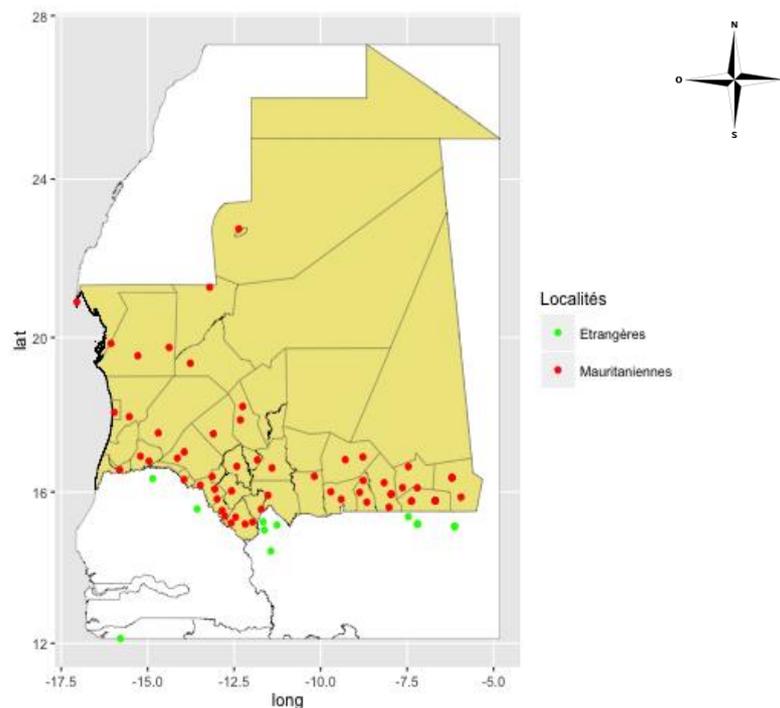
Pour utiliser plusieurs variables dans un même modèle il faut s'assurer que ces variables ne sont pas corrélées pour éviter des problèmes d'instabilité numérique au moment des estimations. Des tests de corrélation ont donc été effectués sous R (fonction rcorr).

### III. RESULTATS

#### 3.1. Analyse descriptive des flux de petits ruminants

Les flux de petits ruminants étudiés ont été observés entre 80 localités différentes. La figure 4 montre leur position (en rouge les localités de la Mauritanie, en vert les localités des pays voisins). La plupart des localités sont situées en Mauritanie (66 sur 80) et une grande partie se trouvent dans la partie sud du pays. Aucune localité n'a été reportée dans la partie Nord-Est du pays (zone désertique), à la frontière avec le Mali. Les localités internationales se situent au Sénégal (2 localités), au Mali (11 localités), et en Guinée Bissau (1 localité). La liste des localités mauritaniennes est donnée en Annexe 3, celle des localités des autres pays se trouve en Annexe 4.

**Figure 4 : Distribution géographique des localités étudiées**



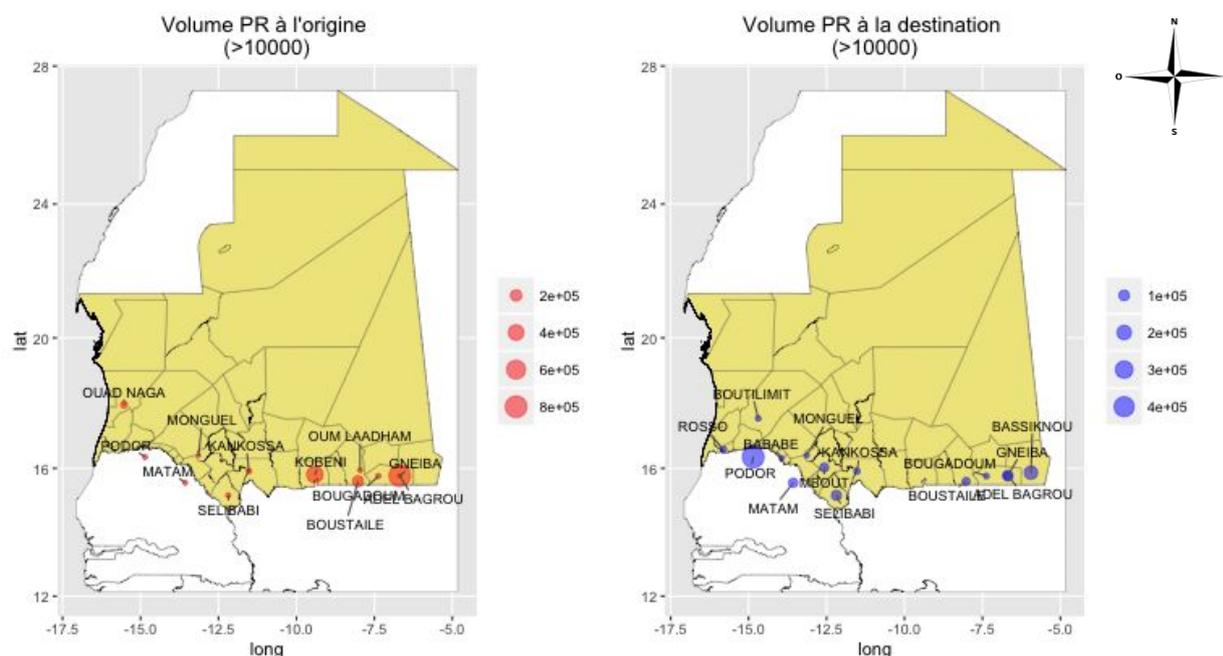
Les données collectées ont donné des informations sur 1252 mouvements concernant 4.7 millions de petits ruminants pour l'année 2014.

La figure 5 indique les localités d'origine d'où partent le plus grand nombre d'animaux (volume de petits ruminants) ainsi que les localités de destination recevant le plus de bêtes. Les flux considérés sont ceux déplaçant plus de 10 000 petits ruminants.

Les localités émettant le plus d'animaux sont Adel Bagrou (800 000 d'animaux), Kobeni (400 000) et Boustaille (200 000), situées au Sud-Est de la Mauritanie.

Les localités recevant le plus d'animaux sont Podor, au Sénégal (400 000 animaux), et Bassiknou (200 000), en Mauritanie.

**Figure 5 : Volume des petits ruminants à l'origine et à la destination**



Pour les localités, 64 localités d'origine et 37 localités de destination ont été dénombrées (21 localités sont à la fois des origines et des destinations).

Sur les 64 localités d'origine, la plupart ont pour activité l'élevage, à l'exception de 3 localités qui sont des marchés. Pour les 37 localités de destination, celles ayant pour activité l'élevage (28 au total) peuvent également être un marché (10 d'entre elles), un abattoir (2), ou une zone de repos (1). Parmi les destinations, on dénombre 9 marchés et un abattoir supplémentaires.

Les mouvements entre élevages sont réalisés à des fins d'engraissement ou de reproduction, alors que les mouvements vers les marchés ou de marché à élevage sont effectués pour des raisons commerciales. Enfin, les mouvements vers les abattoirs indiquent une production de viande.

Le tableau III indique le nombre de mouvements effectués entre les localités d'origine et de destination selon leur type d'activité. La plupart des mouvements ont été réalisés entre un élevage et un marché dans un but commercial (53 %), ou entre élevages pour l'engraissement (40 %). Les déplacements d'animaux entre un élevage et un abattoir ou une zone de repos ne représentent que moins de 3 % des mouvements. Le reste des mouvements (4 %) ont été effectués d'un marché à un élevage ou entre marchés.

Le pourcentage d'animaux impliqués dans chaque type de mouvement est représenté dans le tableau IV. La majorité des animaux ont été déplacés pour l'élevage et l'engraissement (66 %) ou pour raisons commerciales (33 %).

**Tableau III : Nombre de mouvements selon l'activité des localités d'origine et de destination**

		Destination			
		Abattoir	Elevage	Marché	Zone de repos
Origine	Elevage	27	506	660	4
	Marché	0	3	52	0

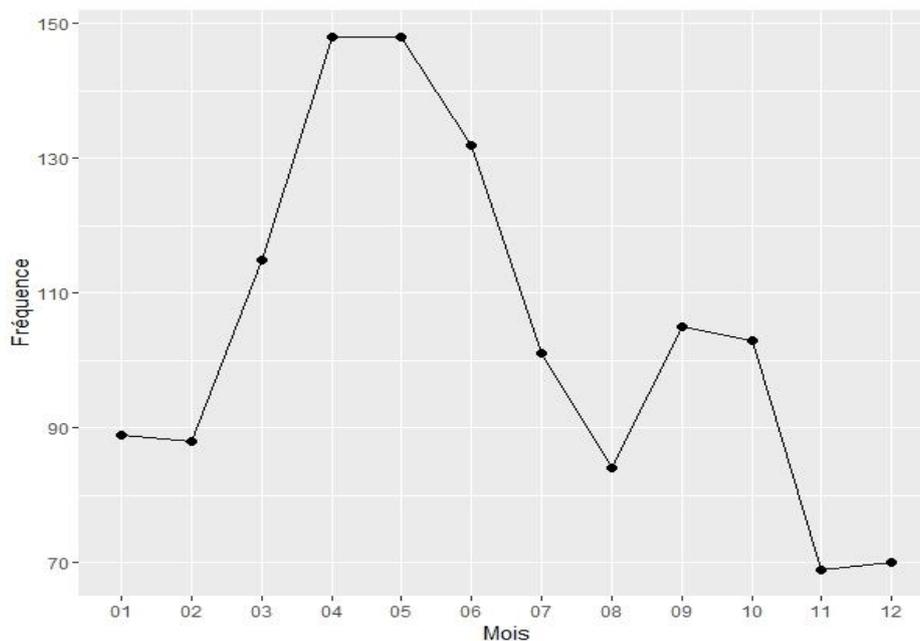
**Tableau IV : Pourcentage d'animaux impliqués dans chaque type de mouvement**

		Destination			
		Abattoir	Elevage	Marché	Zone de repos
Origine	Elevage	0,15	65,61	32,52	0,05
	Marché	0	0,17	1,5	0

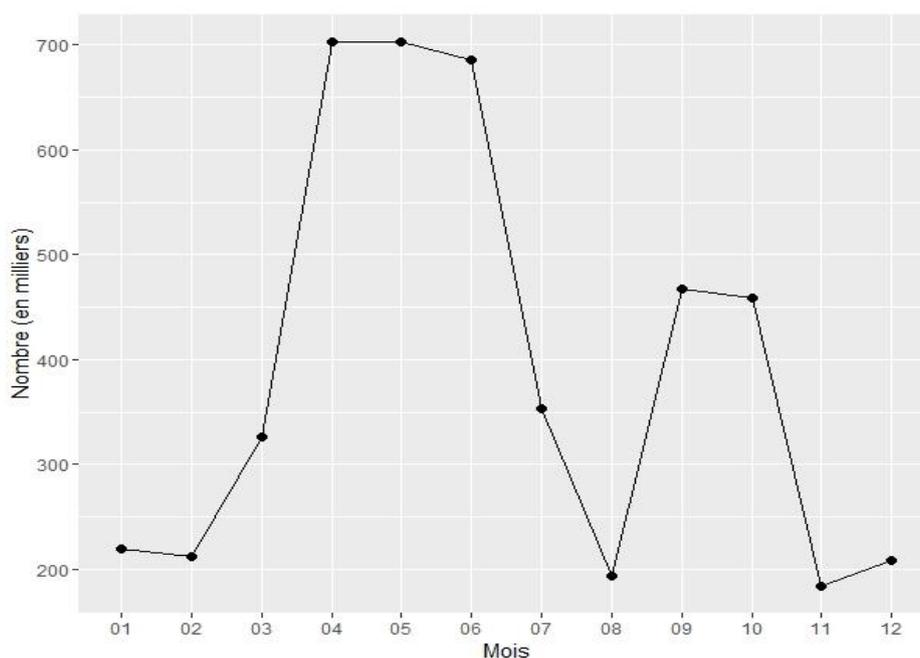
Il y a donc eu plus de mouvements d'un élevage à un marché qu'entre deux élevages, mais plus d'animaux ont été déplacés entre élevages que d'un élevage à un marché.

Selon le nombre de mouvements et d'animaux déplacés (figures 6 et 7), l'année peut être divisée en deux périodes : de janvier à juillet (inclus), et d'août à décembre. Dans la première période, de janvier à juillet, les animaux ont été envoyés dans des élevages pour engraissement ou reproduction. Le nombre de mouvements et d'animaux déplacés a augmenté dans le temps jusqu'à atteindre un maximum d'avril à juin. Après juin, le nombre de mouvements et d'animaux déplacés a diminué. Pour la seconde période, d'août à décembre, un pic d'activité est observé pour les mois de septembre et d'octobre. Cette augmentation du nombre de mouvements et d'animaux déplacés correspond à la période de la Tabaski, fête religieuse au cours de laquelle des petits ruminants et en particulier des moutons sont sacrifiés (en 2014 cette fête a eu lieu début octobre).

**Figure 6 : Fréquence des mouvements des petits ruminants par mois**



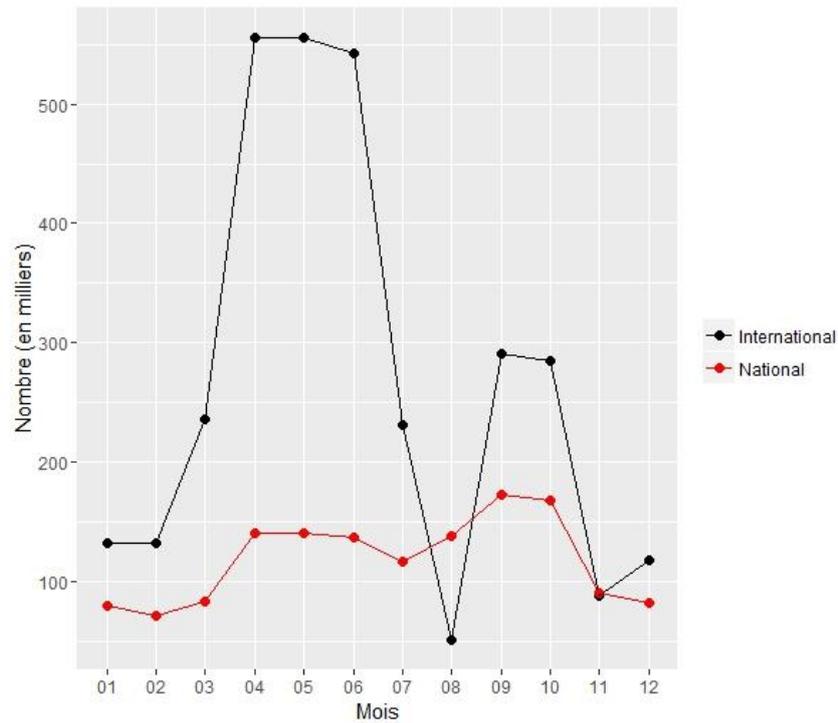
**Figure 7 : Nombre de petits ruminants déplacés par mois**



Les mouvements sont également répartis au niveau national (49 % des mouvements ont été réalisés entre deux localités mauritaniennes) et international (51 % des mouvements ont été effectués entre une localité mauritanienne et une localité d'un pays voisin).

Sur la figure 8, la courbe noire représente le nombre d'animaux déplacés à l'international et la courbe rouge montre le nombre d'animaux déplacés au niveau national. La majorité des animaux ont été envoyés à l'international. En effet, 70 % des animaux déplacés ont quitté le territoire mauritanien. En comparaison au niveau international, le nombre d'animaux déplacés au niveau national a été du même ordre toute l'année et fluctue autour de la moyenne (en moyenne 118 283 animaux par mois ont été déplacés sur le sol mauritanien). Par contre, le nombre d'animaux déplacés à l'international présente un pic pour les mois d'avril à juin, où le nombre d'animaux déplacés a triplé par rapport aux mois précédents, et un second pic autour de la période de la Tabaski.

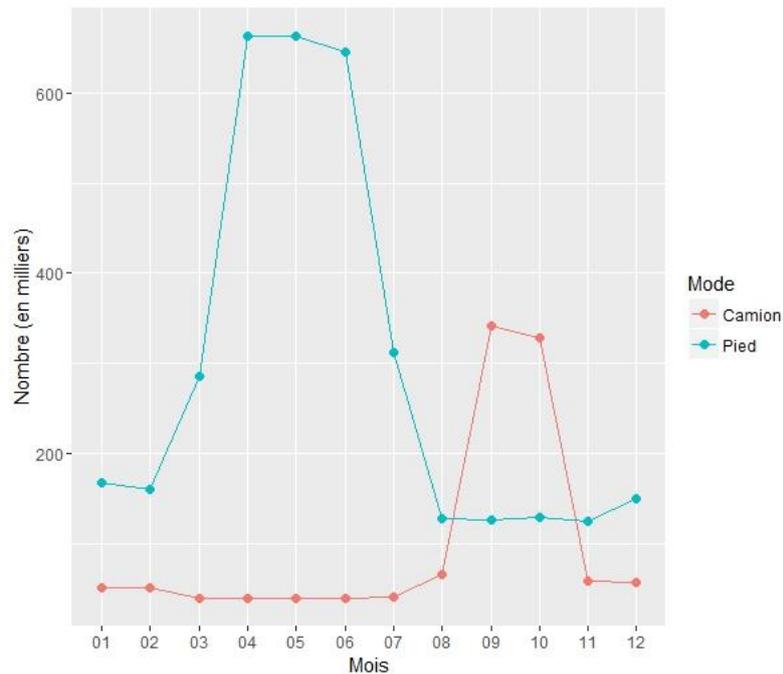
**Figure 8 : Nombre de petits ruminants déplacés au niveau national et international par mois**



La plupart des mouvements ont été faits à pied tout au long de l'année. En effet, dans le cas des mouvements internationaux, les déplacements effectués en camion n'ont représenté que 6 % des mouvements et 12 % du volume des exportations. Au niveau national, les deux moyens de transport ont été utilisés de manière équivalente en termes de fréquence des mouvements et de volume d'animaux déplacés.

La figure 9 illustre le nombre d'animaux déplacés à pied et en camion par mois. De janvier à août, un plus grand nombre de petits ruminants ont été déplacés à pied. Par contre, pour la période de la Tabaski, les animaux doivent être déplacés plus rapidement et sur de plus longues distances. Ainsi, pour les mois de septembre et octobre, c'est en camion que la plupart des animaux ont été transportés.

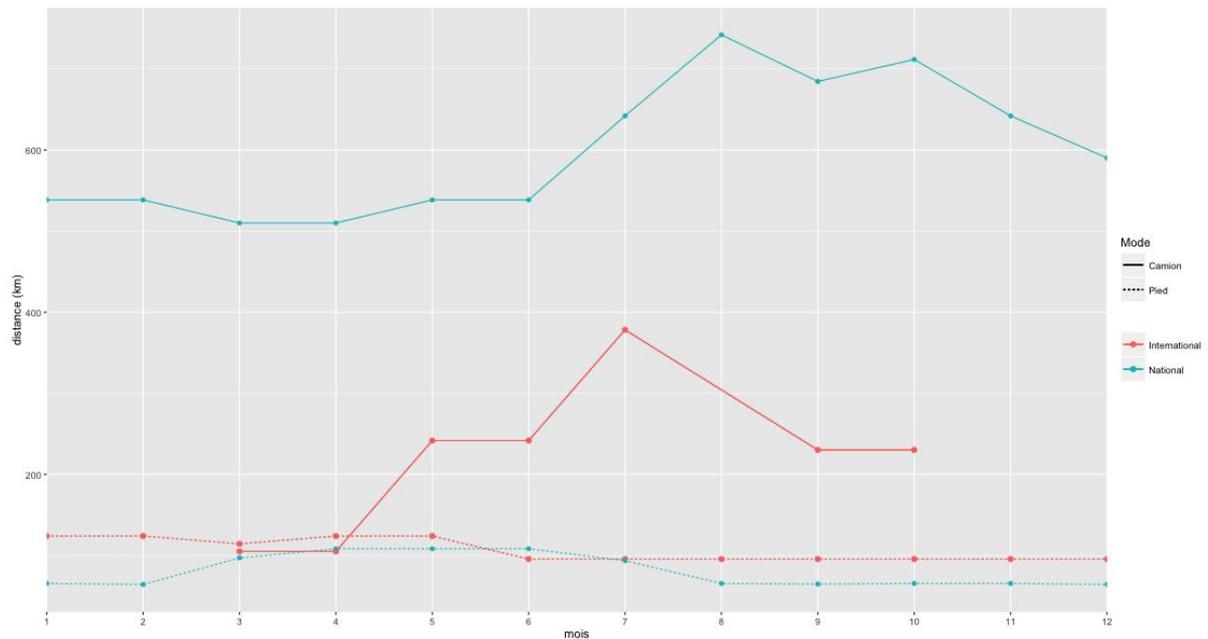
**Figure 9 : Nombre de petits ruminants déplacés par type de convoyage par mois**



La figure 10 montre la distance médiane parcourue par les animaux chaque mois selon le type de mouvement et le moyen de transport (la couleur indique s'il s'agit d'un mouvement national ou international et le type de ligne représente le mode de transport).

Les distances (médianes) parcourues à pied ont été constantes et équivalentes au niveau national et international. Les distances parcourues en camion ont été plus grandes que celles faites à pied. Il est également observé que les distances parcourues au niveau national ont été plus grandes que celles effectuées au niveau international. Ceci s'explique par le fait que les mouvements internationaux ont principalement concerné la traversée des frontières. Les mouvements internationaux réalisés en camions ont été effectués entre les mois de mars et d'octobre.

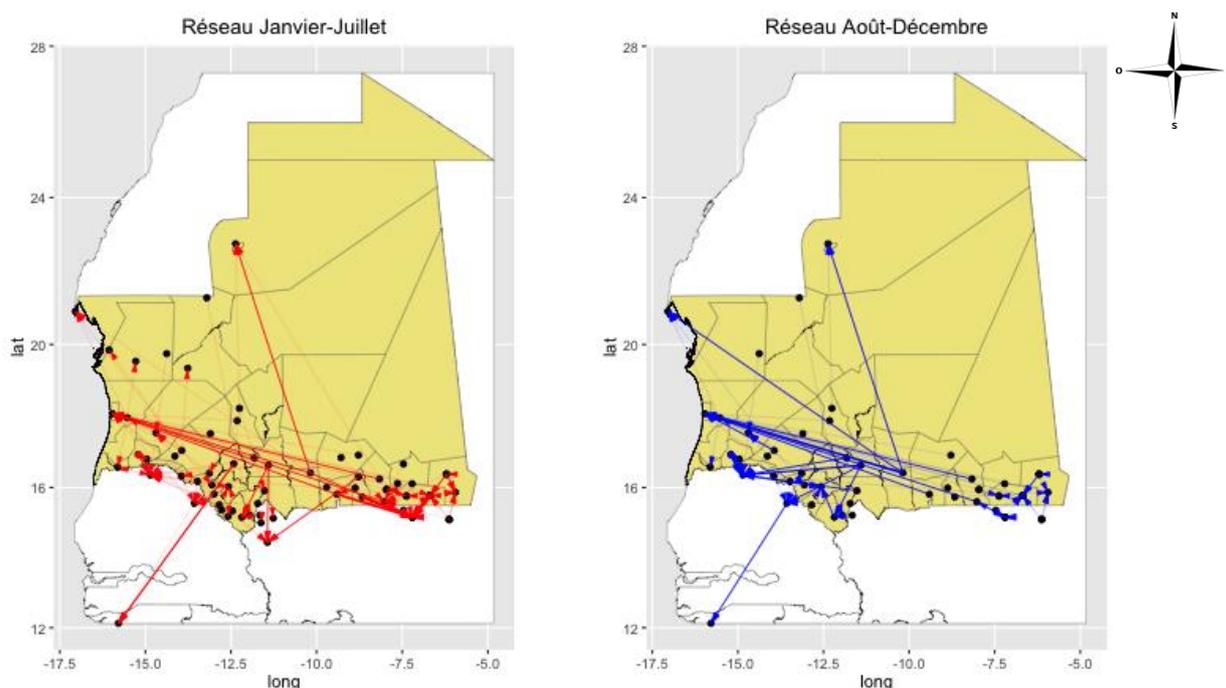
**Figure 10 : Distance médiane parcourue par type de convoiage et de mouvements par mois**



La figure 11 illustre les réseaux des mouvements entre janvier et juillet et entre août et décembre (l'intensité des lignes est liée au nombre d'animaux transportés, plus la ligne est marquée plus le nombre d'animaux déplacés est grand). Le réseau des mouvements entre août et décembre a été plus petit que celui entre janvier et juillet en termes de nombre des liens (66 contre 109) et de localités concernées (57 contre 78). La distribution des mouvements entre localités a également été différente dans ces deux périodes (Jaccard index 0.75<sup>1</sup>). Cependant, la plupart des mouvements ont été réalisés au Sud de la Mauritanie, sur l'axe Est-Ouest, pour les deux périodes. De janvier à juillet, les mouvements les plus importants en termes de volume d'animaux déplacés ont été réalisés entre le Sud-Est de la Mauritanie et le Mali. D'août à décembre, c'est en direction de Nouakchott, capitale de la Mauritanie, que les mouvements les plus importants ont été effectués.

<sup>1</sup> Mesure de similarité entre 2 réseaux. L'indice de Jaccard consiste à diviser le nombre de nœuds ou de liens en commun par le nombre de nœuds ou de liens distincts dans les deux réseaux. Plus cette mesure est proche de 1, plus les réseaux sont similaires.

**Figure 11 : Réseaux des mouvements entre janvier et juillet et entre août et décembre**

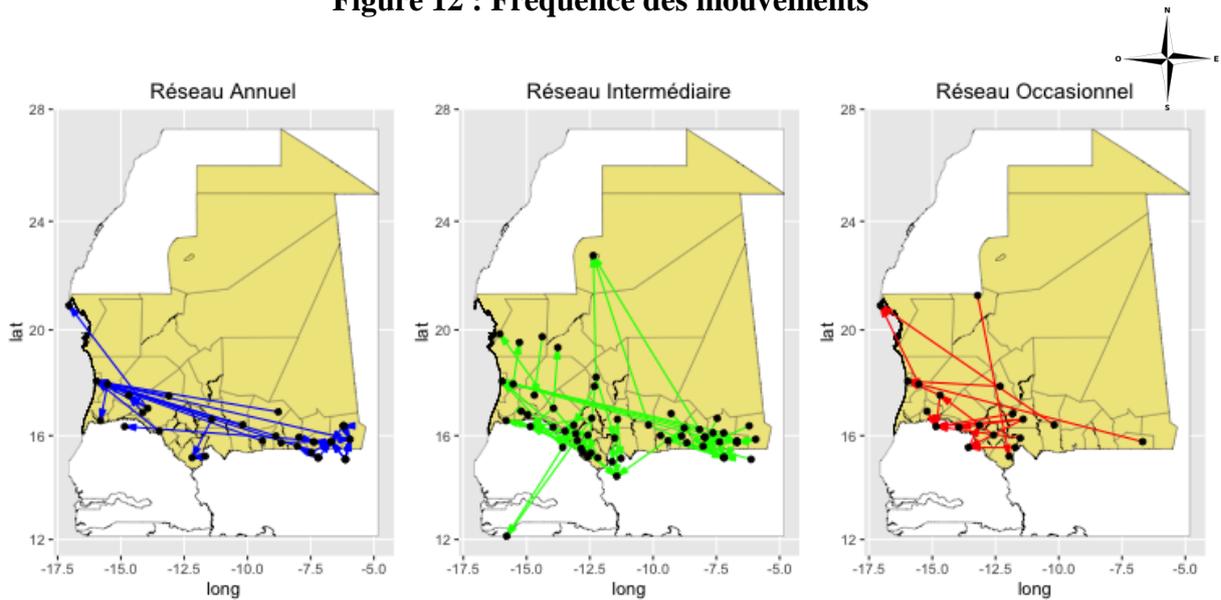


La figure 12 illustre la fréquence des mouvements. Le réseau des mouvements présente des variations temporelles significatives. En effet, certains mouvements ont été réalisés tout au long de l'année 2014 tandis que certains axes de mouvements n'ont été empruntés que durant 1 mois ou 2. Les mouvements ont été classifiés en 3 réseaux selon leur présence dans le temps : le réseau annuel illustre les mouvements réalisés les 12 mois de l'année, le réseau intermédiaire représente les mouvements qui ont été effectués entre 3 mois et 12 mois, et le réseau occasionnel indique les mouvements réalisés pendant 1 et 2 mois. La plus grande partie des mouvements ont été effectués dans le réseau intermédiaire. Ce dernier est également le seul réseau incluant les mouvements réalisés vers Atf, en Guinée Bissau, ainsi que les mouvements dirigés vers le Nord de la Mauritanie. Dans le réseau intermédiaire, la majorité des mouvements ont été effectués sur de courtes distances. Il est à noter que les localités peuvent être regroupées en 2 clusters : celles situées autour de la frontière avec le Mali, et celles proches de la frontière avec le Sénégal. De nombreux mouvements ont été réalisés entre les localités de chaque cluster.

Dans le réseau annuel, la quasi-totalité des mouvements ont été effectués en direction de Nouakchott. Il est remarqué que les mouvements entre les localités situées autour de la frontière avec le Mali et Nouakchott ont été réalisés tout au long de l'année.

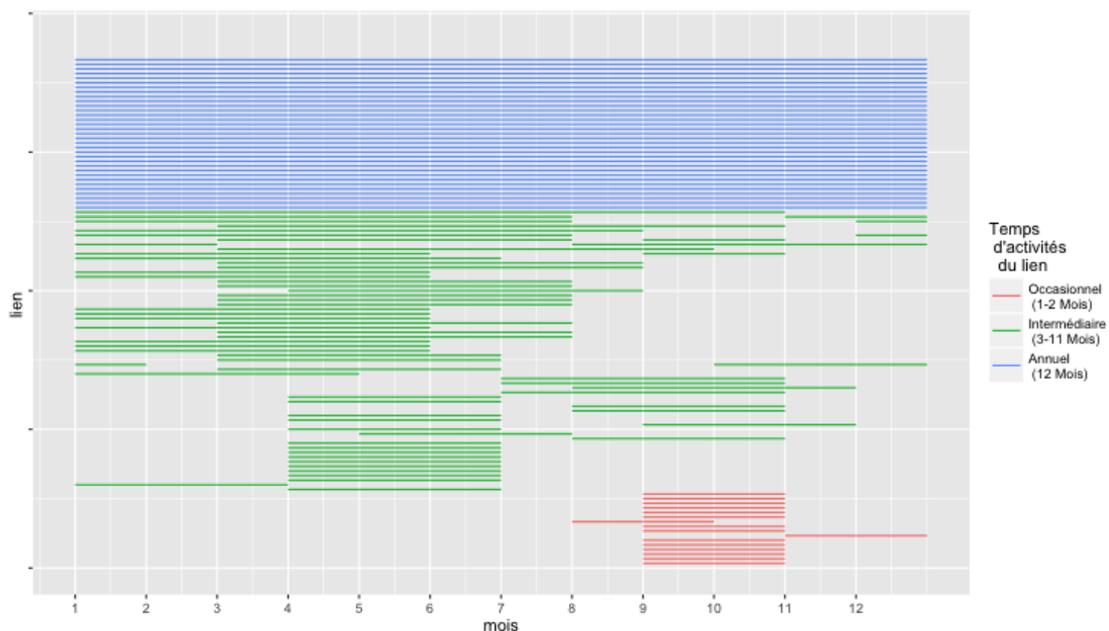
Le réseau occasionnel est constitué des mouvements de courte distance vers le Sénégal et des mouvements de longue distance vers la côte mauritanienne. Les mouvements allant de la frontière avec le Sahara occidental vers le Sud de la Mauritanie ont été réalisés occasionnellement.

**Figure 12 : Fréquence des mouvements**



Une analyse de la distribution des mois pendant lesquels les mouvements sont actifs peut nous aider à comprendre la raison du mouvement. En figure 13, chaque ligne correspond à un axe de déplacement (le lien entre deux localités). La longueur indique le mois durant lequel le lien est actif (il y a déplacements d'animaux sur ce lien) et la couleur indique si le lien appartient au réseau annuel, intermédiaire ou occasionnel. A part pour le réseau annuel, où les liens sont actifs toute l'année, les liens des autres réseaux ont des périodes d'activité précises. La majorité des liens du réseau occasionnel sont uniquement actifs lors de la période de la Tabaski. Pour le réseau intermédiaire, la plupart des mouvements sont concentrés dans la première période, de janvier à juillet, et correspondent aux mouvements vers les élevages pour l'engraissement.

**Figure 13 : Distribution temporelle des mouvements**



### 3.2. Modélisation des flux de petits ruminants

Le flux entre 2 localités ( $F_{ij}$ ) considéré dans les modèles gravitaires est la somme des animaux déplacés entre ces 2 localités durant toute l'année 2014.

En première analyse, les résultats obtenus en utilisant la distance du grand cercle en Km ou en temps de trajet ont été comparés. Lorsque les mêmes variables ont été considérées, les modèles utilisant la distance exprimée en temps de trajet ont donné de meilleurs résultats en termes d'ajustement des données.

Dans une seconde étape, plusieurs modèles gravitaires ont été testés pour décrire les flux des petits ruminants en Mauritanie (11 modèles). Les résultats générés par R sont reportés en Annexe 5.

Pour comparer les modèles, l'AICc, la déviance et le test du Khi-carré de Pearson ont été utilisés. Le tableau V donne les valeurs des coefficients des variables et des indicateurs de la qualité d'ajustement des modèles. Les coefficients sont tous significatifs ( $p < 2e^{-16}$ ) comme reportés en Annexe 5. Néanmoins, les fortes valeurs des AICc indiquent que les modèles n'ajustent pas correctement les données. De plus, le fait que les tests du Khi-carré soient significatifs ( $p < 2e^{-16}$ ) confirme que les modèles n'ajustent pas correctement les données.

Dans le meilleur cas (modèle D), les variables prises en compte sont : les populations humaines et animales à l'origine ( $hpop_i$  et  $PR_i$ ) et à la destination ( $hpop_j$  et  $PR_j$ ), le temps de trajet ( $costdist$ ), et le type d'activité à l'origine ( $type_i$ ) et à la destination ( $type_j$ ). Ainsi, la relation du modèle D s'écrit de la manière suivante :

$$\text{Log}(F_{ij}) \sim \log(hpop_i) + \log(hpop_j) + \log(PR_i) + \log(PR_j) + \log(costdist) + type_i + type_j \quad (4)$$

Lorsque les coefficients des variables sont positifs cela indique que la variable a un effet positif sur les flux (plus la valeur de la variable augmente plus le nombre de flux augmente). Lorsque la variable a un effet négatif sur les flux (coefficient négatif), le nombre de flux diminue quand la valeur de la variable augmente.

Selon la théorie des modèles gravitaires, certains coefficients sont interprétables et d'autres moins. Les coefficients qui peuvent être interprétés concernent les variables à la destination, les types d'activité et le temps de trajet.

La population humaine à la destination a un effet positif sur les flux, c'est-à-dire que plus la population a été grande plus la demande en petits ruminants a été importante.

La population animale à la destination a également un effet positif sur les flux, mais moins fort que la population humaine. Les déplacements ont été plus nombreux vers les zones où ont été dénombrés plus d'animaux, qui sont des lieux favorables à l'élevage et où la population humaine a été plus élevée.

Le fait que le type de l'origine et de la destination soit des marchés a un effet négatif sur les flux. Cela signifie que la plupart des animaux ont été déplacés entre élevages. Ce qui corrobore les résultats de l'analyse descriptive des flux.

Contrairement aux résultats classiques des modèles théoriques, la variable liée à la distance a un effet positif sur les flux. Cela veut dire qu'il y a eu plus de flux sur des trajets prenant plus de temps. Ce résultat peut être expliqué par le fait que la plus grande partie des animaux ont été déplacés sur de longues distances (plus de 50 % des animaux ont été déplacés sur plus de 150 Km).

La population humaine à l'origine a un effet négligeable en comparaison à la population animale à l'origine. Cette dernière variable a un coefficient négatif, signifiant que plus il y avait d'animaux à l'origine moins il y avait de flux. L'interprétation de ce résultat s'avère difficile au vue des résultats des modèles gravitaires classiques et des connaissances sur l'élevage en Mauritanie. De plus, ce résultat est le même pour tous les modèles testés.

Au vu de ce dernier résultat et des mauvaises valeurs des indicateurs de la qualité d'ajustement des données, les modèles gravitaires ne semblent pas être de bons candidats pour expliquer les facteurs de la mobilité animale en Mauritanie.

**Tableau V : Valeurs des coefficients et des indicateurs de qualité des modèles gravitaires**

	modèle A	modèle B	modèle C	<b>modèle D</b>	modèle E	modèle F	modèle G	modèle H	modèle I	modèle J	modèle K
(Intercept)	9,71	10,49	9,72	<b>9,39</b>	8,68	9,95	9,43	8,67	10,23	9,78	9,04
log(PR <sub>i</sub> )	-0,12	-0,12	-0,12	<b>-0,12</b>	-0,12				-0,12	-0,12	-0,12
log(PR <sub>j</sub> )	0,04	0,04	0,03	<b>0,04</b>	0,03						
log(costdist)	0,26	0,19	0,20	<b>0,19</b>	0,20	0,27	0,20	0,22	0,25	0,18	0,20
typeiMarches		-0,18		<b>-0,15</b>			-0,18			-0,15	
typejMarches		-0,73		<b>-0,88</b>			-0,87			-0,87	
REP <sub>ij</sub> TRUE			0,75		0,85			0,85			0,85
log(hpop <sub>j</sub> )				<b>0,10</b>	0,09	-0,02	0,10	0,08	-0,02	0,10	0,08
log(hpop <sub>i</sub> )				<b>0,00</b>	0,00	-0,09	-0,09	-0,09			
AICc	1,09e+07	1,03e+07	1,03e+07	<b>1,03e+07</b>	1,03e+07	1,11e+07	1,04e+07	1,04e+07	1,09e+07	1,03e+07	1,03e+07
ΔAICc	6,55e+05	8,03e+04	6,18e+04	<b>0</b>	3,85e+03	8,32e+05	1,79e+05	1,83e+05	6,74e+05	2,28e+04	2,25e+04
Nvar	4	6	5	<b>8</b>	7	4	6	5	4	6	5
GOF	2,76e+07	2,23e+07	2,25e+07	<b>2,19e+07</b>	2,22e+07	2,75e+07	2,25e+07	2,27e+07	2,81e+07	2,25e+07	2,27e+07
p-value GOF	<2e-16	<2e-16	<2e-16	<b>&lt;2e-16</b>	<2e-16						
Df	106	104	105	<b>102</b>	103	106	104	105	106	104	105
Déviante	1,09e+07	1,03e+07	1,03e+07	<b>1,03e+07</b>	1,03e+07	1,11e+07	1,04e+07	1,04e+07	1,09e+07	1,03e+07	1,03e+07

PR<sub>i</sub> : nombre de petits ruminants de la localité d'origine

PR<sub>j</sub> : nombre de petits ruminants de la localité de destination

Costdist : distance entre les localités d'origine et de destination exprimée en temps de trajet

Type<sub>i</sub> : activité de la localité d'origine (élevage ou marché)

Type<sub>j</sub> : activité de la localité de destination (élevage ou marché)

REP<sub>ij</sub>TRUE : l'activité de la localité d'origine est la même que celle de la localité de destination

Hpop<sub>j</sub> : nombre d'habitants de la localité de destination

Hpop<sub>i</sub> : nombre d'habitants de la localité d'origine

AICc : critère d'information d'Akaike corrigé

ΔAICc : différence entre l'AICc du modèle et l'AICc du modèle D (le plus bas)

Nvar : nombre de variables du modèle

GOF : goodness of fit (qualité de l'ajustement du modèle aux données observées, test du Khi-carré de Pearson)

Df : degree of freedom (degré de liberté)

#### IV. DISCUSSION

Cette étude a montré le nombre important des mouvements de petits ruminants effectués en Mauritanie en 2014. En effet, 1252 mouvements ont été recensés dans l'année et près de 5 millions d'animaux ont été déplacés.

Les mouvements ont été faits principalement entre un élevage et un marché (53 %) ou entre deux élevages (40 %). Cependant 65 % des animaux ont été déplacés entre deux élevages. Le nombre des mouvements et le nombre d'animaux déplacés ont été plus importants pour les mois d'avril à juin et septembre-octobre. En 2014, la fête de la Tabaski a eu lieu début octobre et explique le nombre d'animaux déplacés à cette période.

Les résultats ont montré que 70 % des animaux déplacés ont été envoyés dans d'autres pays (Sénégal, Mali, et Guinée Bissau).

La Mauritanie est un pays plus grand que le Sénégal, mais les zones pour faire de l'élevage y sont plus restreintes (Soule, 2003). Ainsi, les éleveurs déstockent les jeunes animaux vers le Sénégal de manière systématique pour faire de l'embouche ovine. Ce déstockage est encore plus important pendant la période de soudure (période précédant les premières récoltes agricoles et où le grain de la récolte précédente peut venir à manquer) qui a lieu d'avril à juin-juillet (dire d'expert). Ceci est en adéquation avec les résultats obtenus lors de cette étude.

L'étude a montré que la plupart des mouvements ont été faits à pied. Plus de 600 000 petits ruminants ont été déplacés à pied durant les mois d'avril à juin, soit 4 à 5 mois avant la Tabaski, ce qui est en accord avec la littérature (Geert et al., 2006).

Les distances parcourues au sein de la Mauritanie ont été plus grandes que celles faites au niveau international. En effet, les mouvements internationaux ont principalement été effectués entre localités proches des frontières.

Les différents mouvements ont été cartographiés. De nombreux mouvements ont été enregistrés sur l'axe Est-Ouest du Sud de la Mauritanie. Le Sud-Est et le Sud-Ouest sont les deux grandes zones d'élevage du pays où sont également situés les marchés de collecte et de regroupement des animaux (Geert et al., 2006). Un grand nombre de mouvements impliquant des volumes importants d'animaux ont également été réalisés entre localités proches au niveau des frontières avec le Mali et avec le Sénégal.

L'analyse des périodes durant lesquelles les liens sont actifs (il existe un mouvement de petits ruminants entre 2 localités) est importante en termes de risque de transmission de la PPR. Les déplacements d'animaux entre les localités proches de la frontière avec le Mali et Nouakchott ont été réalisés tout au long de l'année 2014 (réseau annuel). Nouakchott étant un lieu de consommation des animaux, si des animaux atteints de PPR atteignent cette destination ils y seront abattus et consommés par des particuliers, limitant ainsi les risques de transmission de la maladie. Cependant, si les déplacements sont effectués à pied sur cette longue distance, les animaux sont susceptibles de s'arrêter dans des zones de repos, rencontrant d'autres animaux qu'ils pourraient infecter. De plus, il a été vu dans la littérature (Geert et al., 2006) que beaucoup d'acheteurs sénégalais étaient présents sur le marché de Nouakchott, ce qui pourrait étendre la maladie jusqu'au Sénégal.

Si la PPR apparaît pendant la période de la Tabaski, les animaux étant tués pour être consommés lors de cette fête, le nombre de nouveaux cas serait limité. De plus, l'étude a montré que la majorité des animaux étaient déplacés en camion pendant cette période, limitant les rencontres entre différents troupeaux.

En revanche, la situation serait plus grave si le virus de la PPR était introduit entre janvier et juillet. En effet, durant cette période les mouvements se faisant entre élevages pour l'engraissement, la contamination d'un grand nombre d'animaux pourrait avoir lieu. Or les résultats ont montré que les localités impliquées dans les mouvements des réseaux intermédiaire et annuel avaient de nombreux échanges durant cette période. De plus, le réseau intermédiaire a indiqué que de nombreux mouvements ont été effectués entre des localités voisines, à la fois à la frontière avec le Mali et avec le Sénégal. Ainsi, la maladie pourrait se diffuser rapidement entre localités proches, et être présente en Mauritanie, au Mali et au Sénégal. Les réseaux annuel et intermédiaire incluant également des mouvements faits sur de longues distances, toute la partie Sud de la Mauritanie pourrait être infectée, ainsi que le Nord-Ouest du pays. La maladie pourrait également s'étendre jusqu'en Guinée Bissau. De plus, les localités de destination situées au Mali et au Sénégal ne sont pas des destinations finales. En effet, les petits ruminants restent en transit dans ces localités avant d'être dispersés dans d'autres zones du pays. Ainsi, si des animaux atteints de PPR en provenance de la Mauritanie arrivent dans ces localités, de nombreux foyers de PPR seraient alors présents dans différentes zones de ces pays.

Compte-tenu des zones arides du Nord de la Mauritanie, beaucoup d'animaux âgés de 3 mois à 1 an sont commercialisés du Nord vers le Sud du pays, ainsi qu'aux pays voisins (dire d'expert). Or, c'est à cet âge que les petits ruminants sont le plus sensibles à la PPR. Ainsi, un grand nombre d'animaux sensibles à la maladie se déplacent entre élevages de différents pays. Le vaccin contre la PPR doit être administré aux animaux mauritaniens avant leur départ vers le Sud en début d'année. Du fait des échanges entre pays, les programmes de vaccination doivent avoir lieu dans tous les pays exportateurs de petits ruminants.

Après avoir décrit la mobilité des petits ruminants, un travail sur les modèles gravitaires a été réalisé pour savoir s'ils pouvaient expliquer les facteurs de la mobilité animale en Mauritanie et ainsi l'épidémiologie de la PPR. En effet, un modèle gravitaire de bonne qualité pourrait être un substitut aux enquêtes de terrain lorsque celle-ci sont difficiles à mettre en place, et aider à la mise en place des systèmes de surveillance et de contrôle de la maladie.

Plusieurs modèles ont été testés pour savoir si des variables socio-économiques pouvaient expliquer les flux d'animaux.

Les modèles gravitaires utilisés dans cette étude ont obtenu de mauvais résultats en termes d'indicateurs de la qualité d'ajustement des données. De plus, les coefficients de certaines variables ont révélé des résultats difficilement interprétables. En effet, plus il y avait d'animaux dans la localité d'origine moins il y avait de flux.

Ainsi, les modèles gravitaires ne sont pas de bons candidats pour expliquer les facteurs de la mobilité animale en Mauritanie. Ils sont peut-être inadaptés à l'échelle d'un seul pays ou pour décrire les flux d'animaux. Une autre hypothèse peut être faite concernant l'homogénéité des données. En effet, ces modèles marchent bien dans les cas où les flux sont relativement homogènes. Dans notre jeu de données, certains flux n'impliquaient qu'un petit nombre d'animaux tandis que d'autres portaient sur un grand nombre. Ceci a pu rendre les estimations difficiles.

Néanmoins, il serait intéressant de tester ces modèles sur différentes périodes. Ce travail a été initié mais n'a pu être terminé faute de temps. Les études sont en cours.

Il pourrait être également intéressant de tester ce type de modèles en considérant d'autres variables liées à la mobilité animale ou sur d'autres données.

La base de données utilisée lors de cette étude peut également être remise en cause. Le nettoyage des données ayant été très long et fastidieux, la collecte et la saisie des données des enquêtes synthétiques doivent être améliorées. Dans ce jeu de données, très peu d'informations concernant les mouvements d'animaux vers les abattoirs ont été collectées. Une enquête auprès des abattoirs afin de déterminer le nombre d'animaux abattus chaque jour pourrait être intéressante.

Pour mieux évaluer le risque de transmission de la PPR, d'autres informations peuvent être collectées tels que la date précise des mouvements et l'âge des animaux. Une enquête auprès des éleveurs pour connaître la durée de l'engraissement avant la vente des animaux et le taux de renouvellement du cheptel permettrait d'estimer la probabilité de transmission de la maladie dans le temps.

Les données de terrain doivent aussi être vérifiées avec d'autres types d'enquêtes telles que celles utilisant les laissez-passer sanitaires par exemple.

## **V. CONCLUSION**

Peu de données et d'analyses sur la mobilité animale existent en Mauritanie. Cette étude a permis de décrire les flux d'animaux dans le pays et de tester un outil pour expliquer ces flux.

Des hypothèses en termes de risque de transmission de la PPR ont été émises. La situation la plus grave serait que le virus de la PPR soit introduit en Mauritanie entre janvier et juillet, où les mouvements se font entre élevages pour l'engraissement. Ainsi, un animal infecté pourrait entrer en contact avec un grand nombre d'animaux. Les mouvements ont été réalisés entre localités proches au niveau des frontières avec le Mali et le Sénégal, mais également sur de longues distances au Sud et entre le Sud et le Nord de la Mauritanie, ainsi qu'en direction de la Guinée Bissau. Ainsi, de nombreux foyers pourraient apparaître rapidement dans différentes zones de ces pays.

Les modèles gravitaires n'ont pas permis d'affiner l'analyse descriptive. En conséquence, il n'a pas été possible d'expliquer les facteurs de la mobilité animale. Cependant, des études incluant de nouvelles variables sont en cours. Des études récentes (Simini et al., 2012) ont montré que les modèles de radiation donnaient de meilleurs résultats que les modèles gravitaires en termes de prédiction des mouvements de populations. Ce type de modèle pourrait être étudié à l'avenir pour expliquer les facteurs de la mobilité animale et prévoir les risques de diffusion des maladies. Ainsi, des données supplémentaires et l'utilisation de modèles d'interaction spatiale plus performants pourraient permettre une analyse plus fine que celle proposée dans cette étude.

La collecte et la saisie des données sont des éléments importants pour l'analyse épidémiologique des situations et doivent être améliorées.

Cependant, la richesse de l'analyse descriptive a mis en évidence un bon nombre d'informations sur la nature des flux de petits ruminants en Mauritanie et ces informations pourront servir à optimiser le contrôle de la PPR dans cette région.

## BIBLIOGRAPHIE

- Ahmed, S.S.M.E., 2012. Contribution à l'étude épidémiologique de la peste des petits ruminants en Mauritanie. Mémoire de Master SEMHA, Ecole nationale vétérinaire d'Alfort.
- Apolloni, A., Rouquier, J.-B., Jensen, P., 2013. Collaboration range: Effects of geographical proximity on article impact. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 222, 1467–1478.
- Balcan, D., Colizza, V., Gonçalves, B., Hu, H., Ramasco, J.J., Vespignani, A., 2009. Multiscale mobility networks and the spatial spreading of infectious diseases. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 106, 21484–21489.
- Banyard, A.C., Parida, S., Batten, C., Oura, C., Kwiatek, O., Libeau, G., 2010. Global distribution of peste des petits ruminants virus and prospects for improved diagnosis and control. *J. Gen. Virol.* 91, 2885–2897. doi:10.1099/vir.0.025841-0
- Bedrick, E.J., Tsai, C.-L., 1994. Model Selection for Multivariate Regression in Small Samples. *Biometrics* 50, 226. doi:10.2307/2533213
- Ben Romdhane, R., 2014. Modélisation de la transmission de la PPR chez les caprins au Sénégal dans un contexte de mobilité animale : application à la surveillance. Mémoire de Master SEMHA, Ecole nationale vétérinaire d'Alfort.
- Bouslikhane, M., 2015. Les mouvements transfrontaliers d'animaux et de produits d'origine animale et leur rôle dans l'épidémiologie des maladies animales en Afrique [WWW Document]. URL <http://docplayer.fr/9911105-Les-mouvements-transfrontaliers-d-animaux-et-de-produits-d-origine-animale-et-leur-role-dans-l-epidemiologie-des-maladies-animales-en-afrique.html> (accessed 5.4.16).
- Ciofi Degli Atti, M.L., Merler, S., Rizzo, C., Ajelli, M., Massari, M., Manfredi, P., Furlanello, C., Tomba, G.S., Iannelli, M., 2008. Mitigation Measures for Pandemic Influenza in Italy: An Individual Based Model Considering Different Scenarios. *PLOS ONE* 3 (3), e1790. doi:10.1371/journal.pone.0001790
- Diagana, M.Y., 1998. Contribution à l'étude de la dégradation du milieu naturel en Mauritanie et l'opportunité de reboisement à base d'espèces exotiques (*Prosopis* sp.) par rapport à une espèce locale (*Acacia* sp.). Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Postgrado, Université de Nouakchott/Université de Barcelone.
- Diallo, A., 2008. La Peste des petits ruminants : une maladie longtemps ignorée. *Bull. Académique Vét. Fr.* Tome 161 (3), 273–277.
- D'Silva, J.P., Eisenberg, M.C., 2015. Modeling spatial transmission of Ebola in West Africa. *ArXiv Prepr. ArXiv150708367*.
- Ellinger, R., Lindquist, J., 1984. The Gravity Model: a Study of Retail Goods Classification and Multiple Goods Shopping Effect, Thomas C. Kinnear, Provo, UT : Association for Consumer Research. ed, *Advances in Consumer Research*.

- Ferguson, N.M., Cummings, D.A.T., Fraser, C., Cajka, J.C., Cooley, P.C., Burke, D.S., 2006. Strategies for mitigating an influenza pandemic. *Nature* 442 (7101), 448–452. doi:10.1038/nature04795
- Ferrari, M.J., Bjørnstad, O.N., Partain, J.L., Antonovics, J., 2006. A Gravity Model for the Spread of a Pollinator-Borne Plant Pathogen. *Am. Nat.* 168 (3), 294–303. doi:10.1086/506917
- Flowerdew, R., Aitkin, M., 1982. A method of fitting the gravity model based on the Poisson distribution\*. *J. Reg. Sci.* 22, 191–202.
- Garcia, A.J., Pindolia, D.K., Lopiano, K.K., Tatem, A.J., 2015. Modeling internal migration flows in sub-Saharan Africa using census microdata. *Migr. Stud.* 3, 89–110. doi:10.1093/migration/mnu036
- Gargadennec, L., Lalanne, A., 1942. La peste des petits ruminants. *Bull. Serv. Zootech. Epizoot. Afr. Occident. Francaise* 5, 16–21.
- Geert, B., Ndiaye, Y., Mamadou, A., 2006. Mauritanie : Profil des marchés céréaliers et de bétail : Implications pour la Sécurité Alimentaire. [WWW Document]. URL <http://documents.wfp.org/stellent/groups/public/documents/ena/wfp109467.pdf> (accessed 3.20.16).
- Gibbs, E.P., Taylor, W.P., Lawman, M.J.P., Bryant, J., 1979. Classification of Peste des petits ruminants Virus as the Fourth Member of the Genus Morbillivirus. *Intervirology* 11, 268–274. doi:10.1159/000149044
- Grech-Angelini, S., 2012. Etude de l'effet de la Peste des petits ruminants sur la productivité des caprins au Sénégal. Thèse de Mastère spécialisé de Santé Publique, CIRAD-Montpellier-France.
- Greenwood, M.J., 2005. Modeling Migration, Elsevier Inc. ed, *Encyclopedia of Social Measurement*.
- Henry, S., Boyle, P., Lambin, E.F., 2003. Modelling inter-provincial migration in Burkina Faso, West Africa: the role of socio-demographic and environmental factors. *Appl. Geogr.* 23, 115–136. doi:10.1016/j.apgeog.2002.08.001
- Josselin, D., Nicot, B., 2003. Un modèle gravitaire géoéconomique des échanges commerciaux entre les pays de l'U.E., les PECO et les PTM. *Cybergeo Eur. J. Geogr.* doi:10.4000/cybergeo.4219
- Kane, M., 1995. Les races d'animaux élevés en Mauritanie. *Bull. D'information Sur Ressour. Génétiques Anim.* 15, 3–25.
- Khalafalla, A.I., Saeed, I.K., Ali, Y.H., Abdurrahman, M.B., Kwiatek, O., Libeau, G., Obeida, A.A., Abbas, Z., 2010. An outbreak of peste des petits ruminants (PPR) in camels in the Sudan. *Acta Trop.* 116, 161–165. doi:10.1016/j.actatropica.2010.08.002
- Koo, W.W., Karemera, D., Taylor, R., Koo, W.W., Karemera, D., Taylor, R., 1994. A gravity model analysis of meat trade policies. *Agric. Econ.* 10, 81–88.

- Le Jan, C., Sow, A.D., Thiemoko, C., François, J.L., Diouara, A., 1987. Pneumopathies enzootiques des petits ruminants en Mauritanie : Situation d'ensemble et approche expérimentale. *Rev. Elev. Médecine Vét. Pays Trop.* 40 (2), 103–112.
- Lhomme, S., 2010. Introduction à l'analyse spatiale [WWW Document]. URL [http://serge.lhomme.pagesperso-orange.fr/doc/analyse\\_spatiale.pdf](http://serge.lhomme.pagesperso-orange.fr/doc/analyse_spatiale.pdf) (accessed 4.7.16).
- Li, X., Tian, H., Lai, D., Zhang, Z., 2011. Validation of the Gravity Model in Predicting the Global Spread of Influenza. *Int. J. Environ. Res. Public. Health* 8, 3134–3143. doi:10.3390/ijerph8083134
- Ly, I., 1976. Contribution à l'étude de l'élevage caprin en Mauritanie. Thèse Méd. Vét., Dakar, n°12.
- Minet, C., Kwiatek, O., Keita, D., Diallo, A., Libeau, G., Albina, E., 2009. Infections à Morbillivirus chez les ruminants : la peste bovine en voie d'éradication et la peste des petits ruminants en extension vers le nord. *Virologie* 13 (2), 103–113.
- Ministère de l'Elevage de Mauritanie [WWW Document], 2016. URL <http://www.elevagerim.com/fr/2016/03/effectifs/> (accessed 5.23.16).
- Mint Cheikh, T., Ould Salek, O., Ould Mohameden, E.Y., 2012. Peste des petits ruminants en Mauritanie [WWW Document]. URL [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/remesa/docs/RESEPSA/Atelier\\_2012-July\\_REPIVET\\_RESPSA/PPR\\_\\_MAURITANIE.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/remesa/docs/RESEPSA/Atelier_2012-July_REPIVET_RESPSA/PPR__MAURITANIE.pdf)
- OCHA, 2012. Mauritanie: carte administrative (14 juin 2012) [WWW Document]. ReliefWeb. URL <http://reliefweb.int/map/mauritania/mauritania-carte-administrative-14-juin-2012> (accessed 5.21.16).
- OIE, 2015. Carte de distribution de la peste des petits ruminants. Système Mondial d'Information Zoosanitaire. [WWW Document]. URL [http://www.oie.int/wahis\\_2/public/wahid.php/Diseaseinformation/Diseasedistributionmap/index/newlang/fr?disease](http://www.oie.int/wahis_2/public/wahid.php/Diseaseinformation/Diseasedistributionmap/index/newlang/fr?disease) (accessed 5.22.16).
- OIE, 2008. Manuel terrestre de l'OIE. Peste des petits ruminants. pp. 1133-1144.
- OIE and FAO, 2015. Stratégie mondiale pour le contrôle et l'éradication de la peste des petits ruminants [WWW Document]. URL <http://www.oie.int/fr/PPR2015/doc/PPR-Global-Strategy-FR-V3.pdf> (accessed 6.7.16).
- Ould Souei, A., 2006. Etude sur la compétitivité et l'intégration en Mauritanie [WWW Document]. URL [http://www.inter-reseaux.org/IMG/pdf\\_Mauritania\\_competitivite\\_fr.pdf](http://www.inter-reseaux.org/IMG/pdf_Mauritania_competitivite_fr.pdf) (accessed 5.8.16).
- Özkul, A., Akca, Y., Alkan, F., Barrett, T., Karaoglu, T., Dagalp, S.B., Anderson, J., Yesilbag, K., Cokcaliskan, C., Gencay, A., others, 2002. Prevalence, distribution, and host range of Peste des petits ruminants virus, Turkey. *Emerg. Infect. Dis.* 8.
- Piras, R., 2016. A long-run analysis of push and pull factors of internal migration in Italy. Estimation of a gravity model with human capital using homogeneous and heterogeneous approaches. *Pap. Reg. Sci.* doi:10.1111/pirs.12211

- Pumain, D., 2004. Modèle gravitaire [WWW Document]. URL <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article76> (accessed 5.3.16).
- Robinson, T.P., Wint, G.R.W., Conchedda, G., Boeckel, T.P.V., Ercoli, V., Palamara, E., Cinardi, G., D'Aiotti, L., Hay, S.I., Gilbert, M., 2014. Mapping the Global Distribution of Livestock. *PLOS ONE* 9, e96084. doi:10.1371/journal.pone.0096084
- Roeder, P.L., Obi, T.U., Taylor, W., Diallo, A., 2000. Reconnaître la peste des petits ruminants. Manuel de terrain. Numéro 5 de Manuel FAO de santé animale. Food & Agriculture Org., 2000.
- Sanz-Alvarez, J., Diallo, A., De La Rocque, S., Pinto, J., Thevenet, S., Lubroth, J., 2008. Peste des petits ruminants (PPR) au Maroc. EMPRES Watch.
- Schéou, B., 1998. Modélisation des déplacements domicile-travail en milieu péri-urbain : le cas de la région lyonnaise. *Cybergeo Eur. J. Geogr.* doi:10.4000/cybergeo.5626
- Schneider, D.W., Ellis, C.D., Cummings, K.S., 1998. A Transportation Model Assessment of the Risk to Native Mussel Communities from Zebra Mussel Spread. *Conserv. Biol.* 12 (4), 788–800. doi:10.1111/j.1523-1739.1998.97042.x
- Simini, F., González, M.C., Maritan, A., Barabási, A.-L., 2012. A universal model for mobility and migration patterns. *Nature* 484, 96–100. doi:10.1038/nature10856
- Soule, A.O., 2003. Profil fourrager en Mauritanie. [WWW Document]. URL <http://www.fao.org/WAICENT/faoinfo/agricult/agp/agpc/doc/Counprof/PDF%20files/Mauritania-French.pdf> (accessed 5.21.16).
- Statistiques mondiales [WWW Document], 2015. URL <http://www.statistiques-mondiales.com/mauritanie.htm> (accessed 5.22.16).
- Stevens, F.R., Gaughan, A.E., Linard, C., Tatem, A.J., 2015. Disaggregating Census Data for Population Mapping Using Random Forests with Remotely-Sensed and Ancillary Data. *PLOS ONE* 10 (2), e0107042. doi:10.1371/journal.pone.0107042
- Sugiura, N., 1978. Further analysts of the data by akaike' s information criterion and the finite corrections: Further analysts of the data by akaike' s. *Commun. Stat. - Theory Methods* 7, 13–26. doi:10.1080/03610927808827599
- Taylor, W.P., Diallo, A., Gopalakrishna, S., Sreeramalu, P., Wilsmore, A.J., Nanda, Y.P., Libeau, G., Rajasekhar, M., Mukhopadhyay, A.K., 2002. Peste des petits ruminants has been widely present in southern India since, if not before, the late 1980s. *Prev. Vet. Med.* 52, 305–312.
- Truscott, J., Ferguson, N.M., 2012. Evaluating the Adequacy of Gravity Models as a Description of Human Mobility for Epidemic Modelling. *PLoS Comput. Biol.* 8. doi:10.1371/journal.pcbi.1002699
- Ülengin, F., Özyaydn, Ö., Ülengin, B., Kopp, A., Önsel, Ş., Kabak, Ö., Aktaş, E., 2013. Are road transportation investments in line with demand projections? A gravity-based analysis for Turkey. *Transp. Policy* 29, 227–235. doi:10.1016/j.tranpol.2013.07.002

- Viboud, C., Bjørnstad, O.N., Smith, D.L., Simonsen, L., Miller, M.A., Grenfell, B.T., 2006. Synchrony, Waves, and Spatial Hierarchies in the Spread of Influenza. *Science* 312, 447–451. doi:10.1126/science.1125237
- Wang, Z., Bao, J., Wu, X., Liu, Y., Li, L., Liu, C., Suo, L., Xie, Z., Zhao, W., Zhang, W., Yang, N., Li, J., Wang, S., Wang, J., 2009. Peste des petits ruminants Virus in Tibet, China. *Emerg. Infect. Dis.* 15, 299. doi:10.3201/eid1502.080817
- Xia, Y., Bjørnstad, O.N., Grenfell, B.T., 2004. Measles Metapopulation Dynamics: A Gravity Model for Epidemiological Coupling and Dynamics. *Am. Nat.* 164 (2), 267–81. doi:10.1086/422341
- Xie, F., Horan, R.D., Wolf, C.A., others, 2009. A gravity model approach to forecasting tuberculosis transmission in cattle, in: 2009 Annual Meeting, July 26-28, 2009, Milwaukee, Wisconsin. Agricultural and Applied Economics Association.
- Zahur, A.B., Ullah, A., Hussain, M., Irshad, H., Hameed, A., Jahangir, M., Farooq, M.S., 2011. Sero-epidemiology of peste des petits ruminants (PPR) in Pakistan. *Prev. Vet. Med.* 102, 87–92. doi:10.1016/j.prevetmed.2011.06.011

## ANNEXES

### Annexe 1 : Signes cliniques de la PPR (Ahmed, 2012)

Jetage nasale (ovin)



Congestion des muqueuses oculaires (caprin)



Diarrhée et congestion vulvaire (ovin)





### Annexe 3 : Liste des localités mauritaniennes étudiées

ADEL BAGROU	EL GHOUDS	MONGUEL
AIN BAHAH	GNEIBA	MOUDJERIA
AKJOUJT	GUEROU	NBEIKA
ALEG	HASSI AHMED BECHNA	NEZAHA
AMOURJ	HASSI HAMADY	NOUADHIBOU
AOUINAT ZBEL	KAEDI	NOUAKCHOTT
AOUJEFT	KANDELEK	OUAD NAGA
ARR	KANKOSSA	OULD YENGE
BABABE	KATAWAN	OUM LAADHAM
BARKEOL	KIFFA	OUM LAHBAL
BASSIKNOU	KOBENI	OUM LAHIADH
BENICHAB	LEANEIGRE	RKIZ
BOGUE	LEGATT	ROSSO
BOUGADOUM	LEXEIBA1	SELIBABI
BOUSTAILE	MAGHAM TEISSIR	SOULEYMANIYA
BOUTILIMIT	MAGHAMA	TIMBEDRA
CHAMI	MAGHTAA LAHJAR	TINTANE
CHAMIA	MBOUT	TOUFUNDE CIVE
CHOUM	MDEIVINA	TOULEL
DIAMA	MEBDOUA	WERKEN3
DJIGUENI	MEDERDRA	WOMPOU
EL GHASSIMIYA	MMAT LAAKARICH II	ZOUERATE

### Annexe 4 : Liste des localités des autres pays étudiées

LOCALITE	PAYS
BOULI	MALI
ECHAYIF	MALI
EL MASGOUL	MALI
LEGAIDE	MALI
LEWHIYYAT	MALI
MOUNDERNAYA	MALI
TICHELLATEN OUL BOUKERCH	MALI
NARA	MALI
KAYES	MALI
AOUROU	MALI
KOUSSANE	MALI
MATAM	SENEGAL
PODOR	SENEGAL
ATF	GUINEE BISSAU

## Annexe 5 : Résultats des modèles gravitaires

**Modèle A : glm(formula = Fij ~ log(PRi) + log(PRj) + log(costdist), family = poisson(), data = tab)**

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-356.07	-229.59	-128.73	-26.98	1808.29

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z )
(Intercept)	9.7091568	0.0054970	1766.3	<2e-16 ***
log(PRi)	-0.1164821	0.0002494	-467.1	<2e-16 ***
log(PRj)	0.0359579	0.0002478	145.1	<2e-16 ***
log(costdist)	0.2556287	0.0006129	417.1	<2e-16 ***

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for poisson family taken to be 1)

Null deviance: 11430954 on 109 degrees of freedom  
Residual deviance: 10913784 on 106 degrees of freedom  
AIC: 10915021

Number of Fisher Scoring iterations: 7

**Modèle B : glm(formula = Fij ~ log(PRi) + log(PRj) + log(costdist) + typei + typej, family = poisson(), data = tab)**

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-407.93	-219.01	-149.70	-13.81	1701.75

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z )
(Intercept)	10.4948438	0.0053183	1973.34	<2e-16 ***
log(PRi)	-0.1222131	0.0002532	-482.69	<2e-16 ***
log(PRj)	0.0363283	0.0002397	151.55	<2e-16 ***
log(costdist)	0.1896558	0.0005572	340.39	<2e-16 ***
typeiMarches	-0.1835936	0.0039785	-46.15	<2e-16 ***
typejMarches	-0.7328300	0.0010048	-729.35	<2e-16 ***

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for poisson family taken to be 1)

Null deviance: 11430954 on 109 degrees of freedom  
Residual deviance: 10338745 on 104 degrees of freedom  
AIC: 10339986

Number of Fisher Scoring iterations: 7

**Modèle C : glm(formula = Fij ~ log(PRI) + log(PRj) + log(costdist) + REPij, family = poisson(), data = tab)**

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-411.27	-216.32	-138.16	-17.34	1703.38

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z )
(Intercept)	9.7238014	0.0052585	1849.2	<2e-16 ***
log(PRI)	-0.1236662	0.0002541	-486.6	<2e-16 ***
log(PRj)	0.0331346	0.0002397	138.2	<2e-16 ***
log(costdist)	0.1984481	0.0005527	359.1	<2e-16 ***
REPijTRUE	0.7519339	0.0010137	741.8	<2e-16 ***

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for poisson family taken to be 1)

Null deviance: 11430954 on 109 degrees of freedom  
Residual deviance: 10320186 on 105 degrees of freedom  
AIC: 10321425

Number of Fisher Scoring iterations: 7

**Modèle D : glm(formula = Fij ~ log(PRI) + log(PRj) + log(costdist) + log(hpopj) + log(hpopi) + typei + typej, family = poisson(), data = tab)**

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-425.43	-223.77	-139.95	-3.72	1689.51

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z )
(Intercept)	9.3928263	0.0076544	1227.109	<2e-16 ***
log(PRI)	-0.1211919	0.0003008	-402.841	<2e-16 ***
log(PRj)	0.0360513	0.0002427	148.513	<2e-16 ***
log(costdist)	0.1862866	0.0005580	333.837	<2e-16 ***
log(hpopj)	0.1041336	0.0003716	280.216	<2e-16 ***
log(hpopi)	0.0048253	0.0004988	9.674	<2e-16 ***
typeiMarches	-0.1454508	0.0039765	-36.577	<2e-16 ***
typejMarches	-0.8757642	0.0011458	-764.309	<2e-16 ***

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for poisson family taken to be 1)

Null deviance: 11430954 on 109 degrees of freedom  
Residual deviance: 10258414 on 102 degrees of freedom  
AIC: 10259659

Number of Fisher Scoring iterations: 7

**Modèle E : glm(formula = Fij ~ log(PRi) + log(PRj) + log(costdist) + log(hpopj) + log(hpopi) + REPij, family = poisson(), data = tab)**

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-425.1	-220.7	-139.6	-11.6	1694.9

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z )
(Intercept)	8.6778163	0.0078717	1102.407	<2e-16 ***
log(PRi)	-0.1232014	0.0003012	-409.062	<2e-16 ***
log(PRj)	0.0325617	0.0002425	134.267	<2e-16 ***
log(costdist)	0.2001022	0.0005579	358.699	<2e-16 ***
log(hpopj)	0.0855175	0.0003577	239.073	<2e-16 ***
log(hpopi)	0.0049661	0.0005007	9.918	<2e-16 ***
REPIjTRUE	0.8541092	0.0011108	768.893	<2e-16 ***

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for poisson family taken to be 1)

Null deviance: 11430954 on 109 degrees of freedom  
Residual deviance: 10262267 on 103 degrees of freedom  
AIC: 10263510

Number of Fisher Scoring iterations: 7

**Modèle F : glm(formula = Fij ~ log(hpopi) + log(hpopj) + log(costdist), family = poisson(), data = tab)**

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-331.10	-236.50	-148.30	-21.92	1772.89

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z )
(Intercept)	9.9491636	0.0071756	1386.53	<2e-16 ***
log(hpopi)	-0.0917983	0.0004066	-225.79	<2e-16 ***
log(hpopj)	-0.0178224	0.0003006	-59.29	<2e-16 ***
log(costdist)	0.2666956	0.0006031	442.19	<2e-16 ***

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for poisson family taken to be 1)

Null deviance: 11430954 on 109 degrees of freedom  
Residual deviance: 11090725 on 106 degrees of freedom  
AIC: 11091962

Number of Fisher Scoring iterations: 6

**Modèle G : glm(formula = Fij ~ log(hpopi) + log(hpopj) + log(costdist) + typei + typej, family = poisson(), data = tab)**

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-403.72	-218.53	-145.24	-15.62	1651.21

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z )	
(Intercept)	9.4292759	0.0070877	1330.37	<2e-16	***
log(hpopi)	-0.0891308	0.0004067	-219.18	<2e-16	***
log(hpopj)	0.1010032	0.0003618	279.13	<2e-16	***
log(costdist)	0.2005522	0.0005463	367.11	<2e-16	***
typeiMarches	-0.1816165	0.0039729	-45.71	<2e-16	***
typejMarches	-0.8694020	0.0011352	-765.87	<2e-16	***

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for poisson family taken to be 1)

Null deviance: 11430954 on 109 degrees of freedom  
Residual deviance: 10437250 on 104 degrees of freedom  
AIC: 10438491

Number of Fisher Scoring iterations: 6

**Modèle H : glm(formula = Fij ~ log(hpopi) + log(hpopj) + log(costdist) + REPij, family = poisson(), data = tab)**

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-397.98	-218.30	-142.41	-23.63	1654.97

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z )	
(Intercept)	8.6738701	0.0073076	1187.0	<2e-16	***
log(hpopi)	-0.0911976	0.0004085	-223.2	<2e-16	***
log(hpopj)	0.0826967	0.0003486	237.2	<2e-16	***
log(costdist)	0.2160678	0.0005455	396.1	<2e-16	***
REPijTRUE	0.8496217	0.0011035	769.9	<2e-16	***

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for poisson family taken to be 1)

Null deviance: 11430954 on 109 degrees of freedom  
Residual deviance: 10441919 on 105 degrees of freedom  
AIC: 10443158

Number of Fisher Scoring iterations: 6

**Modèle I : glm(formula = Fij ~ log(PRI) + log(hpopj) + log(costdist), family = poisson(), data = tab)**

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-368.9	-240.2	-140.4	-24.8	1816.0

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z )	
(Intercept)	10.2327309	0.0060953	1678.78	<2e-16	***
log(PRI)	-0.1157608	0.0002494	-464.23	<2e-16	***

```

log(hpopj)      -0.0160383  0.0003020  -53.11  <2e-16 ***
log(costdist)  0.2522300  0.0006126  411.71  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

(Dispersion parameter for poisson family taken to be 1)

```

Null deviance: 11430954 on 109 degrees of freedom
Residual deviance: 10932258 on 106 degrees of freedom
AIC: 10933495

```

Number of Fisher Scoring iterations: 6

**Modèle J : glm(formula = Fij ~ log(Pri) + log(hpopj) + log(costdist) + typei + typej, family = poisson(), data = tab)**

Deviance Residuals:

```

      Min       1Q   Median       3Q      Max
-448.50 -219.35 -142.80   -3.51  1701.86

```

Coefficients:

```

              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)   9.7835861  0.0060686 1612.17  <2e-16 ***
log(Pri)      -0.1176144  0.0002563  -458.90  <2e-16 ***
log(hpopj)     0.1028674  0.0003639   282.68  <2e-16 ***
log(costdist)  0.1814916  0.0005554   326.76  <2e-16 ***
typeiMarches -0.1542666  0.0039745   -38.81  <2e-16 ***
typejMarches -0.8683760  0.0011341  -765.68  <2e-16 ***
---

```

```

Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

(Dispersion parameter for poisson family taken to be 1)

```

Null deviance: 11430954 on 109 degrees of freedom
Residual deviance: 10281230 on 104 degrees of freedom
AIC: 10282471

```

Number of Fisher Scoring iterations: 6

**Modèle K : glm(formula = Fij ~ log(Pri) + log(hpopj) + log(costdist) + REPij, family = poisson(), data = tab)**

Deviance Residuals:

```

      Min       1Q   Median       3Q      Max
-446.08 -217.59 -143.08   -18.62  1706.03

```

Coefficients:

```

              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)   9.0397851  0.0063237 1429.5  <2e-16 ***
log(Pri)      -0.1198805  0.0002569  -466.7  <2e-16 ***
log(hpopj)     0.0848536  0.0003510   241.7  <2e-16 ***
log(costdist)  0.1950139  0.0005545   351.7  <2e-16 ***
REPijTRUE     0.8511360  0.0011030   771.6  <2e-16 ***
---

```

```

Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

(Dispersion parameter for poisson family taken to be 1)

Null deviance: 11430954 on 109 degrees of freedom  
Residual deviance: 10280939 on 105 degrees of freedom  
AIC: 10282178

Number of Fisher Scoring iterations: 6