





Surveillance de l'Influenza A au Bénin

Rapport de stage Master 2 Biologie – Santé

Spécialité « Gestion Intégrée des Maladies Animales Tropicales »

Présenté et soutenu le 10 juin 2020 par

Sophie JOUFFROY

UMR Interactions Hôtes-Pathogènes (IHAP)
INRAE/ENVT - Equipe de virologie
Laboratoire d'Analyse et de Sérosurveillance Vétérinaire (LADISERO), Parakou, Bénin

Sous la direction de Mariette Ducatez

Stage réalisé du 6 janvier au 10 Juin 2020

Année Universitaire 2019 - 2020

Table des matières

Remerciements	3
Table des Figures	4
Table des annexes	5
Sigles et abréviations	6
Avant-propos Covid-19	7
Introduction	8
Synthèse Bibliographique	9
A. Influenza A	9
I. Biologie des virus Influenza	9
1. Structure du virus	9
2. Modalités de transmission et persistance du virus dans différents milieux	9
II. Influenza A Faiblement Pathogène	10
1. Réservoir et espèces sensibles	10
2. Signes cliniques et symptômes	10
3. Circulation du virus H9N2	11
III. Influenza A Hautement Pathogène	11
1. Réservoir et espèces sensibles	11
2. Signes cliniques et symptômes	12
3. Circulation des virus HP	12
IV. Circulation des virus Influenza A et niches agro-écologiques	13
B. L'élevage avicole au Bénin	14
I. Situation géographique et démographique du Bénin	14
II. Importance de l'aviculture au Bénin	14
1. Place de l'agriculture dans l'économie béninoise	14
2. Modalités d'élevage des volailles	14
III. Consommation de viande de volaille	16
3. Importance de la viande de volaille	16
4. Modalités de vente des volailles	17
C. Surveillance de l'Influenza A au Bénin	17
I. Historique de l'Influenza A au Bénin	17
II. Surveillance basée sur le risque et modélisation spatiale	18
1. La notion de surveillance basée sur le risque	18
2. La méthode de Multi-Criteria Decision Modelling	18
3. Social Network Analysis	18
Fravail personnel	19
A. Matériel et méthode	19
I. Contexte du stage : laboratoire d'accueil, LADISERO (Parakou, Bénin)	19

II.	Réalisation d'un modèle géographique du risque de propagation d'Influenza A au 19	u Bénin
1.	Identification des facteurs de risque	19
2.	Identification des experts	21
3.	Caractérisation et pondération des facteurs de risque	21
4.	Collecte de données et traitement informatisé	22
5. risc	Standardisation des valeurs des rasters en fonction de la relation avec le facteu que 22	ır de
6.	Addition linéaire des différentes couches pondérées	22
7.	Analyse d'incertitude de la carte	23
8.	Validation de la carte	23
III.	Prélèvements	23
1.	Description de l'échantillonnage	23
2.	Analyses réalisées	24
IV. Parako	Etude des réseaux de commercialisation de volailles vivantes dans la commune ou à l'aide d'une approche SNA	
1.	Zone d'étude et population cible	24
2.	Collecte et traitement des données	24
B. Rés	sultats	25
I. S	creening virologique et sérologique des prélèvements	25
II.	Modèle géographique	26
1.	Analyse des questionnaires et réponses des experts	26
2.	Modèle final et validation	28
III.	Etude SNA	31
C. Dis	scussion	32
Conclusion	n	37
Bibliograp	hie	38
Résumé :		66

Remerciements

Je remercie Mariette Ducatez pour l'opportunité de faire ce stage ainsi que pour son soutien et sa disponibilité tout au long de sa réalisation. Merci mille fois !

Pour la partie Bénin :

Je remercie Dr Fidelia Djegui du LADISERO pour son accueil chaleureux, pour la mise à disposition des moyens du laboratoire ainsi que sa disponibilité et son écoute, et enfin pour la découverte de nombreux aspects de la vie béninoise.

Je remercie le personnel technique du LADISERO de Parakou, Rogatien, Rachidatou, Raoul, Nihad, et Ghislaine, ainsi que les agents de soutien Salomond, Adimi, Hervé et tous leurs collègues pour leur accueil chaleureux. Je remercie Souradjou pour son aide à la manipulation d'ArcGis. Je remercie en particulier Rachidatou et Rogatien pour leur soutien et leur écoute dans les projets de cette étude.

Je remercie le Directeur de l'Elevage Dr Yao Akpo de m'avoir permis de faire ce stage au sein du LADISERO de Parakou, ainsi que les différents experts que j'ai pu rencontrer au sein de la Direction de l'Elevage qui ont pu aider à la réalisation de ce projet.

Je remercie tous les experts locaux qui ont accepté de participer à l'étude et qui ont contribué à son bon déroulement en consacrant de leur temps et des réflexions toujours pertinentes.

Je remercie tous les Directeurs Départementaux de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche pour leur contribution précieuse à cette étude. Je remercie ici en particulier le chef division réglementation et contrôle de la Direction Départementale de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche du Borgou, Monsieur Alassane.

Je remercie les experts internationaux qui ont consacré de leur temps et de leur attention à cette étude.

Je remercie toutes celles et ceux que j'ai pu rencontrer au Bénin et qui ont contribué à faire de ce séjour la découverte d'un beau pays.

Pour la partie France :

Je remercie Maxime Fusade-Boyer pour son aide toujours pertinente et sa disponibilité, tant pour la mise en route de l'étude que pour l'aide sur R ou encore les diverses manipulations en laboratoire.

Je remercie les professeurs Agnès Waret-Szkuta et Mathilde Paul, qui m'ont apporté leur aide et leurs conseils précieux.

Je remercie ceux qui ont pu m'aider dans la manipulation d'ArcGIS et de R, notamment Christophe G. et Christophe L.

Je remercie enfin la promotion GIMAT 2019-2020 pour sa bonne humeur tout au long de ce master quelque peu chamboulé, ainsi que tous les encadrants qui ont contribué à l'organisation de ce master.

Table des Figures

Figure 1 : Représentation schématique du virus à Influenza A	9
Figure 2 : Critères de différenciation entre VIA faiblement et hautement pathogène	.10
Figure 3 : Date de la première description à Influenza A H9N2 selon les pays africains	. 11
Figure 4 : Carte des foyers d'IAHP en Afrique de l'Ouest déclarés à l'OIE entre le 1 ^{er} janvier 2014	4
et le 1 ^{er} avril 2020	.13
Figure 5 : Chronologie des évènements liés à l'apparition de l'influenza A au Bénin depuis 2006	.17
Figure 6 : Analyse d'incertitude	.28
Figure 7 : Modèle final de cette étude et les prélèvements relatifs à l'influenza A depuis les cas de	j
grippe aviaire H5N1 en 2007	.29
Figure 8 : Modèles obtenus d'après le tableau ci-dessus	.30
Tableau 1: Classement PADAM-UNAP des élevages selon les effectifs d'oiseaux	.15
Tableau 2 : Chiffres des importations et exportations de viande de volaille au Bénin de 2006 à 201	17,
en tonnes	.16
Tableau 3 : Facteurs de risque de propagation de l'influenza A.	.20
Tableau 4: Table des Random Index	.22
Tableau 5: Origine des cartes représentant les différents facteurs de risque	.22
Гableau 6 : Prélèvements réalisés en mars 2020.	.26
Гableau 7 : Valeurs des poids moyens selon les experts	.27
Tableau 8 : Poids et seuils utilisés pour différents modèles	30

Table des annexes

Annexe 1 : Classification des systèmes d'aviculture selon la FAO45
Annexe 2 : Questionnaire MCDA46
Annexe 3 : Exemple d'analyse des résultats des questionnaires MCDA48
Annexe 4 : Script permettant la standardisation des valeurs entre 0 et 149
Annexe 5 : Questionnaire utilisé pour la l'analyse SNA50
53 Annexe 6 : Résultats de surveillance de la grippe aviaire du LADISERO depuis janvier
Annexe 7 : Poids moyens des facteurs de risque et Ratio de Cohérence (CR) selon les experts 54 -
Annexe 8 : Modèle final avec les villes du Bénin 55 -
Annexe 9 : Détails des couches obtenues selon différentes méthodes57
Annexe 10 : Modèle final avec les principaux marchés de volailles vivantes du Bénin60
Annexe 11 : Capacité prédictive des différents modèles MCDA et des facteurs de risque pris
individuellement61
Annexe 12 : Caractéristiques des points de vente de volaille de la commune de Parakou62
Annexe 13 : Réseau du flux commercial de volailles analysé par une méthode de SNA63
Annexe 14 : Complémentarité des méthodes MCDA et SNA65

Sigles et abréviations

ARN : Acide Ribonucléique AUC : Area Under the Curve

BAD : Banque Africaine de Développement

CEIRS: Center of Excellence for Influenza Research and Surveillance

CENAGREF : Centre National de Gestion des Réserves de Faune

CR : Ratio de Cohérence DE : Direction de l'Elevage

FAO: Food and Agriculture Organisation

FCFA: Francs de la Communauté Financière Africaine

HA: Hémagglutinine

IAB : Interprofession de l'Aviculture du BeninIAFP : Influenza Aviaire Faiblement PathogèneIAHP : Influenza Aviaire Hautement Pathogène

IDH : Indice de Dévéloppement Humain IHA : Inhibition à l'Hémagglutination

IHAP-ENVT : Interaction Hôte-Agent Pathogène – Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

LADISERO: Laboratoire Vétérinaire de Diagnostic et de Sérosurveillance

MAEP: Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche

MCDA: Multi Criteria Decision Analysis MCDM: Multi Criteria Decision Modelling

NA: Neuraminidase

NIH: National Institute of Health

OIE: World Organisation for Animal Health

PADAM-UNAP: Projet D'Appui au Développement de l'Aviculture Moderne – Union Nationale des

Aviculteurs Professionels

PAFILAV : Projet d'Appui aux Filières Lait et Viande

PCR: Polymerase Chain Reaction

PIB: Produit Intérieur Brut

PSRSA: Plan Stratégique de Relance du Secteur Agricole

ROC: Receiver Operating Characteristic

RT-PCR: Reverse Transcriptase Polymerase Chain Reaction

SIG: Système d'Information Géographique

SNA: Social Network Analysis

VIA: Virus à Influenza A

Avant-propos Covid-19

L'étude présentée dans ce projet porte sur la surveillance de l'Influenza A au Bénin en partenariat avec un laboratoire local, le Laboratoire de Diagnostic Vétérinaire et de Sérosurveillance de Parakou (LADISERO). C'est une étude miroir de celle réalisée l'année dernière par Clara Laurent dans le même cadre, à savoir un stage de M2 GIMAT en partenariat entre l'IHAP-ENVT et un laboratoire vétérinaire togolais. De la même façon, la présente étude devait se composer en 3 mois de terrain au Bénin et d'une partie analyse de résultat au sein de l'IHAP-ENVT en France. La partie terrain a été écourtée d'un mois, mais les résultats étaient suffisants pour faire une étude correcte du contexte local, réaliser une carte du risque de propagation de l'Influenza A, débuter une analyse de réseau du flux de volailles dans la commune de Parakou et obtenir quelques prélèvements. La réalisation rapide cette étude a été permise par (i) un travail conséquent réalisé et documenté par Clara Laurent, aisément réutilisable (ii) un partenariat fonctionnel et un excellent accueil au sein du LADISERO et (iii) la capacité de ce laboratoire à continuer les analyses de prélèvements seuls. Quelques travaux ont tout de même été écourtés.

Il aurait notamment été intéressant de discuter de la carte obtenue selon la méthode MCDA avec les experts en personne. J'ai eu le temps de discuter avec un expert avant de devoir rentrer de façon anticipée. Certains experts ont été contactés par mail afin qu'ils puissent tout de même donner leur avis.

La formation des techniciens du laboratoire à la réalisation de tests d'Inhibition de l'Hémagglutination (IHA) pour les sérums d'influenza A et D a été écourtée. Les échantillons collectés sur le terrain ont pu être identifiés et stockés correctement, mais sont encore en cours d'analyse. Il revenait en effet au laboratoire d'assurer l'analyse des échantillons et d'essayer de continuer à réaliser les IHA par eux-mêmes, dans un souci de développement de leur autonomie.

L'étude de réseau du commerce de volaille conçue pour être analysée selon les méthodes propres aux analyses de réseau social (Social Network Analysis, SNA) a été réalisée en parallèle de l'étude MCDA. 30 questionnaires ont pu être réalisés avant mon départ, et les principaux marchés de Parakou ont pu être visités. Dans la suite de l'étude, des entretiens supplémentaires auraient pu être réalisés, notamment en ciblant les intermédiaires qui sont difficiles à contacter : ils partent dans la brousse et reviennent aux marchés dans l'après-midi à heures variables. Les élevages de volailles n'ont pas non plus être visités. Les questionnaires ont été transmis aux paravétérinaires du laboratoire afin qu'ils continuent si possible à les remplir.

Introduction

Du choléra à la fièvre aphteuse, de la peste porcine africaine au Covid-19, les épidémies ont chamboulé les systèmes politiques et économiques en place, et remettent en cause notre relation aux animaux, aux autres hommes et à notre environnement. Les comparaisons entre la pandémie actuelle et celle du siècle dernier fleurissent aujourd'hui dans les médias. La Grippe Espagnole, probablement issue de la recombinaison de virus influenza aviaires et humains, aurait causé la mort de 25 à 50 millions d'humains selon les sources, et aurait accéléré la mise en place des systèmes occidentaux de santé. Les virus à influenza A aviaire (VIA) sous leur version hautement pathogène sont apparus à la fin du XIXème siècle et circulent encore actuellement, occasionnant des milliers ou des millions de perte, que ce soit en tête de volailles ou en dollars. Les sous types H5Nx et H7Nx préoccupent notamment par leur potentielle forte pathogénicité et contagiosité chez les volailles, ainsi que par leur aspect zoonotique entrainant des symptômes respiratoires avec un taux de mortalité important. Certains de ces virus hautement pathogènes possèdent des cassettes de gènes issus de virus A(H9N2), et la circulation de cette souche, même faiblement pathogène, préoccupe aussi. Ces virus circulent principalement avec les oiseaux sauvages et domestiques, et circulent donc intensément, par les voies commerciales plus ou moins légales tant que par les migrations de l'avifaune. Le sous type H5N1, apparu en Chine en 2003, s'est ensuite propagé dans le monde entier et a atteint le continent africain en 2006, provoquant une vague d'épizooties de grippe aviaire en Afrique de l'Ouest et Centrale. De plus, les dérives génétiques de chaque génération virale et la capacité de réassortiment font du VIA un virus très labile, incitant à une surveillance constante. Depuis 2006, 3 sous types de H5Nx ainsi que le virus faiblement pathogène H9N2 ont graduellement fait leur apparition et circulent encore en Afrique. La circulation virale connait peu de frontières, et semble plutôt être influencée par les conditions environnementales, climatiques et commerciales. Comment, dès lors, à l'échelle d'un Etat, évaluer et surveiller efficacement la circulation et la survenue de différents virus influenza aviaires ? Afin d'obtenir un système de surveillance autonome et durable dans le temps, il est intéressant pour chaque pays à risque d'organiser son propre système de surveillance. Certains organismes internationaux, tels que la FAO, l'OIE ou le CEIRS pour la grippe aviaire, apportent des soutiens techniques et financiers afin d'optimiser et d'harmoniser les mesures de surveillance et de gestion de la maladie. Dans le cas du Bénin, ayant des ressources humaines et financières limitées à allouer à cette surveillance et peu de données, identifier les facteurs de risque d'introduction et de propagation de l'Influenza A devient important pour mettre en place une surveillance basée sur le risque, et donc optimisée financièrement. Dans cette étude, les facteurs de risque ont été ciblés en valorisant les connaissances d'experts locaux et internationaux, à l'aide d'une méthode d'analyse multicritères, pour ensuite être cartographiés. L'analyse de réseaux de commercialisation de volailles à l'échelle locale est une approche complémentaire qui a permis de mettre en évidence les lieux ou individus entre lesquels la volaille circulent particulièrement.

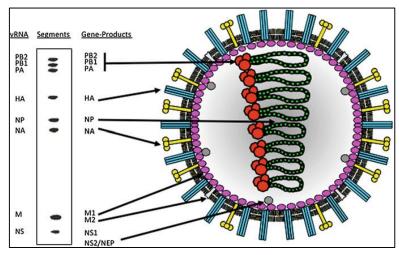
Synthèse Bibliographique

A. Influenza A

I. Biologie des virus Influenza

1. Structure du virus

Les virus de l'Influenza Aviaire (VIA) sont des virus Influenza du groupe A de la famille des *Orthomyxoviridae*, famille de virus enveloppés à ARN simple brin. Actuellement, 3 autres groupes de virus influenza sont répertoriés, les groupes B, C et D. Les VIA sont classés en sous-types selon les propriétés antigéniques de leurs protéines de surface, les hémagglutinines (HA) et les neuraminidases (NA) (Figure 1). Dix Huit hémagglutinines (H1 – H18) et 11 neuraminidases (N1 – N9) ont pu être identifiés jusqu'à présent pour les VIA, et 16 HA et 9 NA sont présents chez les oiseaux.



<u>Figure 1 : Représentation schématique du virus à Influenza A.</u>
Diamètre d'environ 100nm (Pleschka 2012)

2. Modalités de transmission et persistance du virus dans différents milieux

L'excrétion du virus chez les oiseaux est principalement oro-fécale (Webster et Govorkova 2014). La transmission peut se faire directement par contact étroit avec les oiseaux infectés ou indirectement, via le milieu ou des fomites contaminés (Spickler 2016). Les différentes études cherchant à mesurer sa résistance dans le milieu concordent pour dire que celle-ci varie selon la souche, mais est inversement proportionnelle à la température, et accrue en milieu humide (Shahid et al. 2009; Wanaratana et al. 2010). Le virus pourrait ainsi être encore infectieux après 4 jours à 22°C dans un lac et plus de 30 jours à 0°C (Alexander 2007). En conditions expérimentales, le virus peut persister entre <1j et une semaine dans les fèces selon la température et le taux d'humidité (Spickler 2016), et peut aussi persister dans les plumes 15j à 20°C (Yamamoto et al. 2010). Une exposition de plusieurs jours aux UV réduit le pouvoir infectieux du virus (Shahid et al. 2009; Wood et al. 2010).

Le virus est par ailleurs sensibles à tous les désinfectants classiques utilisés à la concentration préconisée par le fabricant (Shahid et al. 2009; Wanaratana et al. 2010).

Les VIA sont classés en 2 catégories selon leur pouvoir pathogène chez les volailles domestiques, les virus faiblement pathogènes (IAFP) et les virus hautement pathogènes (IAHP) (<u>Figure 2</u>).

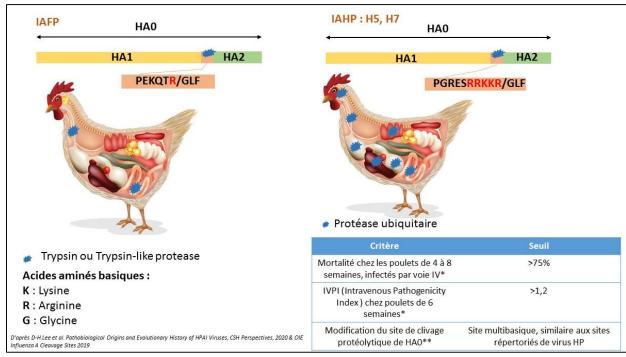


Figure 2 : Critères de différenciation entre VIA faiblement et hautement pathogène.

* : un des 2 critères suffit pour classer un VIA en HP. ** : le séquençage du site de clivage peut être réalisé seul, et peut permettre de classer un virus entrainant peu de signe cliniques en tant que HP (OIE 2019; Lee, Criado, et Swayne 2020)

II. Influenza A Faiblement Pathogène

Parmi les virus FP, le sous-groupe des virus H9, et en particulier H9N2, est important en terme de santé publique.

1. Réservoir et espèces sensibles

Les virus faiblement pathogènes sont ubiquitaires et circulent majoritairement chez les oiseaux sauvages. Ils ont été identifiés chez une variété d'ordres et d'espèces différentes, et les études montrent leur présence principalement chez les oiseaux aquatiques (Anseriformes et Charadriiformes), mais d'autres ordres tels que les Passeriformes ou Colombiformes peuvent présenter des prévalences similaires (Caron, Cappelle, et Gaidet 2017).

Des analyses sérologiques montrent le passage du virus H9N2 chez le furet, le porc et l'homme (Peiris et al. 2001; Peng et al. 2015). Des cas humaines ont en effet été signalés en Asie (Chine, Hong Kong, Bangladesh), au Moyen Orient (Oman) et en Afrique (Egypte) (Heidari et al. 2016; Potdar et al. 2019; Carnaccini et Perez 2019; Almayahi et al. 2020).

2. Signes cliniques et symptômes

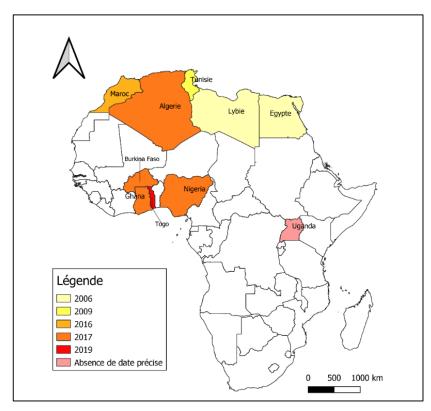
Chez le réservoir sauvage, les virus FP circulent principalement de façon asymptomatique. Le passage de virus faiblement pathogène à la volaille domestique peut, selon les souches, être asymptomatique, ou provoquer des signes cliniques respiratoires bénins. Cependant, certaines souches d'IAFP, lors de co-infections avec d'autres pathogènes, peuvent entrainer une morbidité et mortalité plus importante. Une infection par le virus H9N2 provoque une chute de production, mais est susceptible de causer des co-infections, avec le virus de la bronchite infectieuse, la maladie de Newcastle ou des souches d'IAHP par exemple, comme ce fut le cas au Ghana, en Iran, Irak, ou

Egypte (Nagy, Mettenleiter, et Abdelwhab 2017; Awuni et al. 2019), entrainant alors des morbidités et mortalités plus importantes.

Chez l'homme, l'infection provoque dans la plupart des cas une atteinte respiratoire d'intensité faible à modérée, et un portage sain est possible (Nagy, Mettenleiter, et Abdelwhab 2017). Un décès a cependant été reporté en Chine en 2016, une patiente de 57 ans avec des problèmes médicaux sous-jacents (WHO 2016).

3. Circulation du virus H9N2

Le virus H9N2 a été identifié pour la première fois en Chine en 1975. Dans les années 90 on estime que H9N2 circule dans presque toutes les provinces chinoises, et il est fréquemment isolé dans les marchés de volailles vivantes. Les virus H9N2 du groupe G1.h9.4.2 ont été déclarés sur le continent



africain pour la première fois en 2006, en Egypte et en Lybie. Ils ont depuis été identifiés chez des volailles en Tunisie, au Maroc, en Algérie, au Ghana, Burkina Faso et en Uganda (

Figure 3), et des analyses sérologiques suggèrent la présence de H9N2 au Nigeria (Oluwayelu et al. 2016). L'analyse phylogénétique des virus circulant en Afrique indiquerait pour l'instant une introduction unique de virus A(H9N2) au Bénin, d'une souche proche d'une souche ghanéenne, elle-même proche d'une souche nord-africaine (Ducatez et al. données non publiées).

Les foyers d'influenza faiblement pathogène ne font pas l'objet d'une déclaration

obligatoire à l'OIE.

<u>Figure 3 : Date de la première description à Influenza A H9N2 selon les pays africains.</u>
D'après Jeevan et al. 2019; Nagy, Mettenleiter, et Abdelwhab 2017; Zecchin et al. 2017; Awuni et al. 2019; Laurent 2019.

III. Influenza A Hautement Pathogène

1. Réservoir et espèces sensibles

Les IAHP appartiennent uniquement aux sous-types H5 et H7, mais pas tous les virus de ces sous types sont hautement pathogènes (Alexander 2007). Ils n'ont pas de réservoir sauvage connu, mais seraient issus du mutations au niveau du site de clivage du précurseur HA0 lors du passage de virus faiblement pathogènes chez les volailles (Alexander 2007; Gaidet et Caron 2016). Les virus à IAHP ont été identifiés chez une diversité d'espèces aviaires importante.

Les VIA HP peuvent infecter l'homme, ainsi que d'autres hôtes mammifères, le plus souvent de manière sporadique.

2. Signes cliniques et symptômes

Les virus HP circulent souvent de façon asymptomatique dans la faune sauvage, mais certaines souches virales, notamment la souche de H5N8 circulant, entre autres, en Afrique du Centre, de l'Est et du Sud depuis 2016 provoque des mortalités aussi chez la faune sauvage (FAO-EMPRES 2018, Gaidet et Caron 2016; Walsh et al. 2017; Mine et al. 2019). Chez les volailles domestiques, ces virus peuvent provoquer des mortalités importantes pouvant atteindre 100% du cheptel.

Les virus du groupe H5 et H7 provoquent chez l'homme un syndrome respiratoire aigüe d'intensité variable avec une létalité élevée (455/861 soit 52,8% (WHO 2020)), en se transmettant d'homme à homme dans de très rares cas (Webster et Govorkova 2014; Spickler 2016; Mostafa et al. 2018). Le virus H5N1 a été suspecté de provoquer des mortalités chez certains félins (Thanawongnuwech et al. 2005; Yingst, Magdi, et Felt 2008) ou encore chez le chien (Songserm et al. 2006) et ont été détectés chez le porc (H. Wu et al. 2018).

3. Circulation des virus HP

Depuis sa première déclaration en Asie en 2003, l'influenza aviaire hautement pathogène H5N1 s'est rapidement propagé et a été déclarée pour le première fois en Afrique de l'Ouest au Nigeria, en février 2006. Depuis cette introduction, 3 clades d'IAHP H5Nx circulent ou co-circulent sur le continent (Fusaro et al. 2019). L'analyse génomique suggère des introductions multiples à l'origine des 3 foyers du Nigeria en 2006 (Ducatez et al. 2006). L'épidémie s'est ensuite propagée vers d'autres pays africains, notamment d'Afrique de l'Ouest avec le Niger, le Burkina Faso, le Togo et le Bénin touchés en décembre 2007. En 2014, deux foyers de H5N1 sont déclarés au Nigeria, et de nouveau le virus se répand au Burkina Faso, en Côte d'Ivoire, au Ghana, au Niger et au Togo. Le Bénin, malgré la présence du virus dans tous les pays limitrophes, n'observe pas de foyer (Figure 4, Tassoni et al. 2016; Ekong, Fountain-Jones, et Alkhamis 2018). Fin 2016, le virus H5N8 fait son apparition en Afrique et se répand pour la première fois vers le sud et l'est (Fusaro et al. 2019). Les différentes introductions du virus dans le pays seraient dues au commerce de volailles aussi bien qu'à la circulation d'avifaune infectée, en provenance d'Asie centrale et septentrionale, via l'Europe de l'est, le Moyen Orient ou l'Asie centrale méridionale, selon les clades. Une fois le virus introduit, sa dissémination au nord et à l'ouest du continent africain serait due principalement aux échanges commerciaux de volailles dans des pays où certaines formes d'élevage de volailles sont peu en phase avec les normes de biosécurité, ce qui expliquerait les ré-émergences fréquentes (en Afrique de l'ouest et au Nigeria) et l'endémicité (Egypte) du virus dans certaines zones. En Afrique de l'Ouest, il n'a pas été mis en évidence de forte circulation d'IAHP chez l'avifaune sauvage entre 2010 et 2014 (T. L. Fuller et al. 2015). Le dernier clade circulant de H5N8 semble en revanche se propager vers l'est et le sud du continent via l'avifaune sauvage, dont les mouvements même sont conditionnés par les conditions climatiques (T. Wu et Perrings 2018; Fusaro et al. 2019).

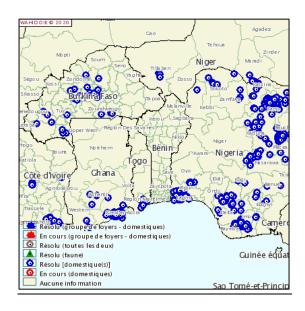


Figure 4 : Carte des foyers d'IAHP en Afrique de l'Ouest déclarés à l'OIE entre le 1^{er} janvier 2014 et le 1^{er} avril 2020 (www.oie.int/wahis)

IV. Circulation des virus Influenza A et niches agro-écologiques

La co-circulation de souches hautement et faiblement pathogènes fait craindre des événements de réassortiment et l'émergence d'un virus hautement pathogène pour l'homme et/ou les volailles (Trevon L. Fuller et al. 2013), et explique notamment l'attention portée sur l'influenza A en Afrique. En effet, les virus zoonotiques hautement pathogènes H7N9, H5N1, H10N8 et H5N6 ayant circulé ces 20 dernières années auraient obtenu leur cassette de gènes internes du virus faiblement pathogène H9N2 (Carnaccini et Perez 2019).

La plupart des études publiées sur l'épidémiologie de la grippe aviaire ont été réalisées en Asie. Si quelques éléments de contexte font de l'Asie du Sud Est une zone particulièrement à risque d'émergence et de propagation de la grippe aviaire, la comparaison avec l'Afrique est pertinente, en considérant les niches écologiques et leur position sur les couloirs de migration plus que les distances géographiques (Tian et al. 2015; T. Wu et Perrings 2018). En Chine, l'intégration des canards dans les rizières et l'élevage intensif de poulets à proximité, rendent ce contexte agricole particulier. La province de Guangdong, notamment, serait la source de multiples souches de VIA H5N1 et la prévalence d'IA dans l'avifaune sauvage d'Asie du Sud Est est la plus élevée au monde (Wallace et al. 2007; Hogerwerf et al. 2010; Caron, Cappelle, et Gaidet 2017). Cependant, au-delà de la distance géographique, le niveau de précipitation, l'isothermalité et la présence de VIA dans la faune sauvage sont corrélés à l'apparition de foyers d'IA chez les volailles domestiques (Walsh et al. 2017). Certains paramètres environnementaux pourraient concourir localement à la formation de niches agro-socioécologiques (Williams, Fasina, et Peterson 2008). Ainsi, la densité de canards et de poulets, la densité de population agricole et le revenu des ménage placent le Nigeria, le Laos et la Cambodge, entre autres, dans un groupe de pays ayant des risques similaires de maintien de l'influenza aviaire (Hogerwerf et al. 2010).

B. L'élevage avicole au Bénin

I. Situation géographique et démographique du Bénin

Le Bénin est un pays côtier d'Afrique de l'Ouest couvrant une superficie de 115 762 km² pour une population de 9 983 884 habitants, soit une densité de population de 87,7 habitants au km² (Onibon et al. 2016) au recensement national de 2012. Les 2/3 de la population habitent dans les départements du centre et du sud. La capitale économique est Cotonou, et la capitale politique est Porto Novo. Le pays est frontalier avec, d'ouest en est, le Togo, le Burkina Faso, le Niger et le Nigeria. La langue officielle est le français, mais selon les localités et les ethnies, plus de 50 langues sont parlées couramment à travers le pays. Le Bénin est classé en 163ème position sur 189 pays selon l'indice de développement humain (IDH) (PNUD 2019). Le Bénin bénéficie d'un climat équatorial humide au sud, avec deux saisons sèches de novembre à mars et de mi-juillet à mi-septembre entrecoupées de saisons de pluie, et au centre et au Nord un climat soudanien, découpé en une seule saison sèche de novembre à avril et une saison des pluies de juin à septembre.

II. Importance de l'aviculture au Bénin

1. Place de l'agriculture dans l'économie béninoise

L'économie béninoise compte fortement sur l'agriculture. Ce secteur compte pour 22,6% du produit intérieur brut (PIB) en 2018 et fournit près de 80% des recettes d'exportation (www.worldbank.org). L'agriculture béninoise est une agriculture vivrière pratiquée par des petites exploitations agricoles de type polyculture, souvent associée à l'élevage. La taille moyenne d'une exploitation est de 1,7ha, permettant de faire vivre en moyenne 7 personnes (Onibon et al. 2016). L'élevage contribue pour 13,44% du PIB agricole en 2016 (Dognon et al. 2018).

2. Modalités d'élevage des volailles

Au Bénin se distinguent 2 types d'élevage, l'élevage traditionnel ou villageois et l'élevage moderne ou commercial.

L'élevage traditionnel

L'aviculture traditionnelle ou villageoise est pratiquée majoritairement par les ménages ruraux et sans investissement. Il est estimé que 84% des ménages agricoles du Bénin possèdent des volailles, à hauteur de 35 têtes par ménage en moyenne (Sodjinou et al. 2012; Onibon et al. 2016). Cette forme d'aviculture a un rôle alimentaire (œufs, viande), social (la vente est une activité génératrice de revenus pour les femmes et elle est source de prestige social) et culturel important (utilisation de races locales et des œufs à coquille blanche lors des cérémonies traditionnelles et pour l'ethnopharmacologie). L'élevage villageois correspond au secteur 4 tel que défini par la FAO (Annexe 1), et il est caractérisé par une divagation des animaux et un effectif faible. La propriété des animaux au sein des villages n'est pas toujours définie (Sodjinou et al. 2012). L'habitat des animaux, dans les rares cas où il existe, est constitué d'éléments précaires. Les éleveurs traditionnels sont peu organisés en filière, mais quelques initiatives locales, telle que le Groupe Volaille Inter Communal, dans les départements de l'Ouémé Plateau, existent (FAO 2015; Onibon et al. 2016). L'aviculture traditionnelle est constamment confrontée à des problèmes sanitaires, la mortalité est fréquente et parfois élevée. Certaines maladies infectieuses telles que la Maladie de Newcastle sont endémiques, et les parasitoses ne sont pas ou peu gérées (Chrysostome et al. 1995; FAO 2015).

L'élevage moderne

L'élevage dit moderne ou semi-commercial est un système d'élevage défini par les secteurs 3 à 1 du classement de la FAO. C'est un élevage visant à générer des revenus. La distinction entre les secteurs se fait principalement sur le niveau de biosécurité de l'élevage, de l'effectif ainsi que du niveau d'intégration au sein d'une filière. Au Bénin, le PADAM-UNAP a proposé une typologie des élevages en 8 classes en fonction des tailles de cheptel, résumée dans le <u>Tableau 1</u>. Les éleveurs classés comme appartenant à la classe 8 correspondraient au secteur 1 du classement FAO. Les autres classes sont partagées entre les secteurs 2 et 3, selon leur niveau de biosécurité.

Les aviculteurs modernes au Bénin se sont structurés et les différentes associations de la filière se sont regroupées sous l'Interprofession de l'Aviculture de Bénin (IAB) (Onibon et al. 2016).

Catégorie	Effectifs des élevages (Nbre de têtes)	Répartition des éleveurs par catégorie	Nombre d'éleveurs
1	101 - 500	36%	259
2	501 - 1000	18%	129
3	1001 - 1999		
4	2000 - 2999	26%	187
5	3000 - 5000		
6	5001 - 10000	3%	22
7	$10001 - 20\ 000$	2%	14
8	> 20 000	1%	7

Tableau 1: Classement PADAM-UNAP des élevages selon les effectifs d'oiseaux (Onibon et al. 2016)

Les élevages modernes et semi-modernes sont principalement tournés vers la production d'œufs de consommation, les pondeuses comptent pour 65% des effectifs de volaille moderne en 2015. La production d'œufs de consommation est en développement mais ne suffit pas à couvrir la consommation nationale. La filière doit de plus faire face à des importations d'œufs produits à prix plus compétitifs, notamment des importations illégales en provenance du Nigeria (les frontières avec ce pays voisin étant actuellement fermées). Un commerce effectué « par les chinois » est aussi cité, sans identification précise de la source de ces œufs (Onibon et al. 2016).

La capacité nationale en fourniture de poussins d'un jour est faible. En 2014 le pays compte 4 couvoirs, dont un appartenant à une société chinoise. Le pays compte par ailleurs un seul élevage de reproducteurs. Le reste des poussins d'un jour, principalement destinés à la ponte, est importé d'Europe principalement. Parallèlement à ces chiffres officiels, il existe également une importation illégale de poussins d'un jour et de coquelets en provenance du Nigeria : les produits importés sont à bas prix au détriment de la qualité sanitaire, et la production qui en suit est souvent de qualité médiocre. Ces importations sont difficiles à quantifier, mais sont assez importantes pour être citées à mainte reprises par les acteurs locaux (Onibon et al. 2016, sources locales).

La production de viande de volaille dans les élevages modernes est surtout réalisée en vue de vendre lors des grandes fêtes religieuses, et cette production repose sur l'élevage de poulets de chairs (21% du cheptel avicole moderne en 2015) et de coquelets (mâles issus de la sélection des poules pondeuses ; 6,7% du cheptel avicole moderne en 2015) (Onibon et al. 2016).

Espèces et races élevées

Dans le système traditionnel, les espèces élevées sont de race locale principalement. Le poulet bicyclette est l'espèce la plus représentée et compte pour 60% des effectifs. Les 40% des effectifs restant sont des pintades, canards, pigeons et dindons.

Dans les élevages modernes, les races de pondeuses principalement utilisées sont Harco, Isa Brown et HyLine (Onibon et al. 2016).

III. Consommation de viande de volaille

3. Importance de la viande de volaille

La viande de volaille est la deuxième viande la plus consommée au Bénin (21% de la consommation), après la viande bovine (58% de la consommation) (FAO 2015; Onibon et al. 2016).

La viande de volaille représente 19,3% de la production nationale de viande, soit plus de 13 000 T pour les années 2016 et 2017 (www.fao.org/faostat/fr). Ces mêmes années, le Bénin importe prêt de 80 000 T de viande de volaille, soit une importation 6 fois supérieure à la production locale (Tableau 2). Une partie de ces importations est réexportées vers les pays voisins, notamment le Nigeria, le Togo et le Burkina Faso (FAO 2015, Dognon et al. 2018). Ainsi, depuis 2016 et la fermeture de la frontière nigériane avec les difficultés commerciales qui en découlent, les importations baissent (Tableau 2**Erreur! Source du renvoi introuvable.**, Dognon et al. 2018). Les importations de viande sont en provenance majoritairement de l'Union Européenne (France, Italie, Espagne) mais aussi d'Amérique (Canada, Etats Unis et Brésil), pour une valeur estimée en 2018 à 133 millions \$US (https://resourcetrade.earth).

Année	Exportations (T)	Importations (T)	Production (T)
2006	26	28 875	NA
2007	2 850	35 270	NA
2008	4	60 602	NA
2009	30 340	75 791	NA
2010	41 807	78 070	NA
2011	0	104 164	NA
2012	0	116 031	NA
2013	0	114 725	NA
2014	63	134 745	NA
2015	56	125 294	NA
2016	2	81 123	13 257
2017	5	79 466	13 573

<u>Tableau 2 : Chiffres des importations et exportations de viande de volaille au Bénin de 2006 à 2017, en tonnes (www.fao.org/faostat/fr)</u>

Depuis quelques années, les gouvernements successifs ont lancé plusieurs plans de relance et de soutien au développement de la filière avicole, afin d'améliorer l'autonomie alimentaire du pays. Récemment, peuvent être cités le Projet D'appui Aux Filières Lait et Viande (PAFILAV) mis en place par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (MAEP) avec les financements de la Banque Africaine du Développement (BAD) ou le Projet D'Appui au Développement de l'Aviculture Moderne (PADAM). En 2011, le gouvernement a aussi lancé un Plan Stratégique de Relance du Secteur Agricole (PSRSA) visant notamment à augmenter le volume de viande produite. Dans ce plan, la filière avicole figure parmi les 13 filières agricoles prioritaires. Les mesures s'appuient notamment sur un recensement et une organisation des acteurs de la filière avicole, une amélioration des infrastructures, ainsi que la formation et l'accès à l'information de différents acteurs afin de développer le marché intérieur (MAEP 2011). Une des difficultés majeures rencontrées sont les importations. Les importations légales de viande produite à des prix inférieurs aux couts de productions locales ne favorisent pas le développement du marché intérieur, et les importations illégales en provenance du Nigeria voisin sont nombreuses et difficilement contrôlables, entre autres dans le secteur de l'aviculture.

4. Modalités de vente des volailles

Les marchés de volailles vivantes constituent le moyen de commercialisation de volailles le plus important au Bénin. On distingue les marchés primaires de collecte, souvent situés dans les villages, les marchés secondaires de collecte et les marchés de consommation, souvent situés dans les localités plus importantes (Onibon et al. 2016). En termes de vente, la préférence des consommateurs pour les volailles locales est marquée. Ils sont prêts à payer 42% plus cher pour un poulet local que pour un poulet moderne (soit environ 517 FCFA/kg en plus). (Sodjinou et al. 2012).

Les volailles peuvent parfois être abattues sur les marchés de volailles vivantes à la demande de l'acheteur, mais sont généralement vendues vivantes et abattues par le consommateur. L'abattage ne se pratique pas dans tous les marchés. Par ailleurs, la viande de volaille peut être vendue sous forme congelée dans les poissonneries et supermarchés. L'importation de viande de volaille a lieu sous forme de produits congelés. Un seul abattoir de volailles était fonctionnel en 2015, appartenant à l'entreprise Agrisatch (FAO 2015).

C. Surveillance de l'Influenza A au Bénin

I. Historique de l'Influenza A au Bénin

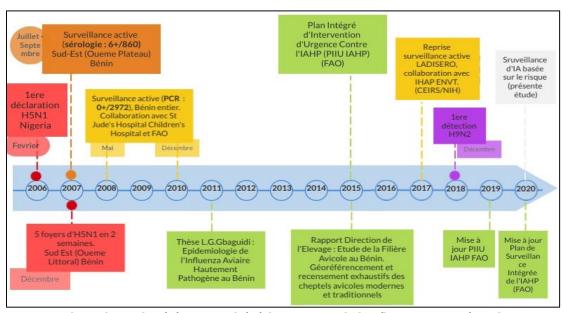


Figure 5 : Chronologie des évènements liés à l'apparition de l'influenza A au Bénin depuis 2006

La grippe aviaire survient au Bénin en 2007 (<u>Figure 5</u>), rapidement après la mise en place d'un plan de soutien au secteur avicole et a provoqué une baisse importante de la consommation de viande de poulet pendant quelques années, due à la crainte d'une transmission zoonotique. Les différentes mesures sanitaires mises en place ont cependant permis une meilleure connaissance de la filière avicole dans le pays, filière jusque-là peu organisée. Une étude permettant le recensement et le géoréférencement des élevages avicoles au Bénin a été lancée par la Direction de l'Elevage, dans le but notamment de mieux connaitre la filière afin de mieux gérer les risques sanitaires. Le rapport a été publié en 2015 (Onibon et al. 2016). Depuis 2005, le Bénin, en concertation avec la FAO, met en place et réactualise un Plan Intégré d'Intervention d'Urgence Contre l'Influenza Aviaire Hautement Pathogène et un Plan de Surveillance Intégrée de l'Influenza Aviaire Hautement Pathogène. Ces plans ont été révisés respectivement en 2019 et 2020. Dans la cadre du plan de surveillance, la FAO recommande notamment le renforcement de la surveillance basée sur le risque.

La surveillance organisée par le CEIRS et financée par le NIH, permet une surveillance active de la grippe aviaire depuis 2008. Elle est réalisée par le Laboratoire de Diagnostic Vétérinaire et de Serosurveillance Vétérinaire (LADISERO) de Parakou, en collaboration avec l'ENVT.

II. Surveillance basée sur le risque et modélisation spatiale

1. La notion de surveillance basée sur le risque

Depuis les années 2000 s'est mise en place la notion de « surveillance basée sur le risque », née dans un souci d'optimisation financière des moyens alloués à la surveillance des maladies animales. Le risque dans ce contexte prend en compte la probabilité d'un évènement non désiré (dans le cas présent la propagation d'IA au Bénin), ainsi que le coût de ses conséquences (78 000 volailles abattues pour un coût de 80 millions de francs CFA, soit 174 000 \$US en 2007-2008), afin d'investir dans la surveillance en fonction du risque financier, environnemental ou sociétal encouru. Les facteurs de risque d'un évènement doivent alors être identifiés, afin de cibler les individus ou zones à surveiller (Stärk et al. 2006).

En santé animale, la modélisation spatiale est utilisée pour essayer de décrire, comprendre et prédire la survenue d'une maladie dans une population et dans un espace donné. Les modèles peuvent être obtenus à partir de l'analyse statistique de données de présence-absence ou simplement de présence d'une maladie. Si ces données sont insuffisantes ou inexistantes, des modèles peuvent être générés à partir de la connaissance de facteurs de risque pouvant favoriser la survenue d'une maladie (Kim B. Stevens et Pfeiffer 2011).

2. La méthode de Multi-Criteria Decision Modelling

« Spatial Multi-Criteria Decision Analysis » ou « Multi-Criteria Decision Modelling » sont des termes désignant l'association de l'analyse multi-critères de décision, MCDA pour Multi-Criteria Decision Analysis, à des Systèmes d'Information Géographique (SIG) afin de générer des cartes du risque dans un contexte où peu de données sont disponibles. Cette méthode de modélisation a été utilisée notamment pour modéliser pour modéliser les risques d'introduction et de propagation de l'influenza D au Togo (Fusade-Boyer et al. 2020), l'émergence de la grippe aviaire en Thaïlande et au Cambodge (M. C. Paul et al. 2016) et plus largement en Asie (Kim B. Stevens, Gilbert, et Pfeiffer 2013) et a montré sa pertinence quand comparée aux modèles issus d'analyses statistiques (M. C. Paul et al. 2016). C'est une approche permettant de valoriser les connaissances et l'intuition humaines, et se base sur le recueil de données disponibles dans la littérature, sur l'avis d'experts et sur l'observation directe pour générer une représentation géographique de facteurs de risque liés à l'introduction et à la propagation d'une maladie donnée (Pfeiffer et al. 2009). Utilisé depuis les années 2000, le MCDM suit des étapes bien définies et décrites pour obtenir une première carte. La carte générée n'a pas vocation à être définitive, la méthode se voulant plutôt itérative. La carte peut évoluer en fonction de l'avis d'experts, de superposition avec des résultats de laboratoires, ou de toute donnée remettant en cause sa validité. C'est un support et un outil de prise de décision plutôt qu'une fin en soi (Kim B. Stevens et Pfeiffer 2011).

3. Social Network Analysis

L'analyse de réseaux sociaux et la théorie des graphes sont des cadres conceptuels permettant d'identifier les contacts et relation entre individus, et d'identifier les entités fréquemment ou fortement en contact au sein d'un réseau. L'analyse de réseaux sociaux a notamment été utilisée en médecine vétérinaire pour étudier les mouvements de bovins suite à l'épidémie de Fièvre Aphteuse en 2001 (Ortiz-Pelaez et al. 2006), et a permis à plusieurs reprises de caractériser les flux de volailles,

notamment à Bali (Kurscheid et al. 2017), en Thaïlande (Poolkhet et al. 2013), en Chine (Martin, Zhou, et al. 2011) et en Ethiopie (Vallée et al. 2013).

Travail personnel

A. Matériel et méthode

I. Contexte du stage : laboratoire d'accueil, LADISERO (Parakou, Bénin)

Le LADISERO est un des 2 laboratoires d'analyse vétérinaire public encore en activité du Bénin. Il est composé d'unités de parasitologie, de bactériologie, de sérologie, et est en capacité de réaliser des PCR. Il a pour mission de surveiller la circulation de différentes maladies infectieuses présentes dans le pays ainsi que de réaliser des analyses de routines demandées par les vétérinaires et les éleveurs. Il accueille régulièrement des stagiaires ou des doctorants de différentes universités béninoises, et bénéficie donc de certaines activités de recherche. Le laboratoire est couplé à une clinique ouverte aux consultations pour les animaux de compagnie.

II. Réalisation d'un modèle géographique du risque de propagation d'Influenza A au Bénin

1. Identification des facteurs de risque

Les facteurs de risque de propagation de l'influenza A au Bénin ont été identifiés à partir d'articles scientifiques et de l'étude similaire sur la surveillance de l'influenza A au Togo réalisée en 2019 par Clara Laurent (Laurent 2019). La lecture des articles de Gilbert et Pfeiffer 2012 et Stevens, Gilbert, et Pfeiffer 2013, répertoriant les facteurs de risque de propagation de la grippe aviaire identifiés jusqu'en 2013, a été complétée d'une recherche axée sur le contexte africain et sur les travaux réalisés depuis 2013 (Tableau 3 : Facteurs de risque de propagation de l'influenza A.Erreur! Source du renvoi introuvable.). Les moteurs de recherche PubMed (NCBI), Google Scholar et Web of Science ont été utilisés avec différentes combinaisons des mots clés suivants : « Bird influenza, Bird flu, Avian influenza, H9N2 » / « Spatial, Risk factor, Live bird markets, H9N2 » / « Benin, Africa » / « Participatory GIS mapping, MCDA». Les articles retenus sont des articles décrivant la répartition spatiale et/ou temporelle de cas d'IAHP ou décrivant des analyses statistiques permettant de dégager les facteurs de risque significatif dans la propagation de l'influenza aviaire à différentes échelles. Enfin, les facteurs de risque ont été discutés avec les experts locaux sur place. Il leur a été demandé de lister les facteurs de risque de propagation de l'influenza A au Bénin, et si l'utilisation de facteurs de risque identiques pour le Togo et le Bénin était pertinente.

Facteur de risque de cette étude	Détails tels que cités dans les études	Localisation des études	Significativité*	Référence de l'étude ou source
	Présence de poulets locaux	Thaïlande, Nigeria	+++;+;+/-;+++	(M. Gilbert et al. 2008; Cecchi et al. 2008; M. Paul et al. 2010; 2011)
Densité de volailles traditionnelles			+/-;;+	(Hogerwerf et al. 2010; Martin, Pfeiffer, et al. 2011; Ahmed et al. 2012)
	Densité de canards plein air	Asie du Sud ; Thaïlande; Asie; Chine;	+++;+;++;++	(M. Gilbert et al. 2008; Hogerwerf et al. 2010; M. Paul et al. 2010; Martin, Pfeiffer, et al. 2011)

	Grillage en commun avec autre exploitation	Nigeria	+	(Métras et al. 2013)	
	Densité d'élevages/sous-district	Thaïlande	+/-	(M. Paul et al. 2010)	
	Densité de poulets commerciaux	Chine		(Marius Gilbert et al. 2014)	
Proximité d'un élevage moderne	Proximité d'un élevage infecté	Pakistan	+++	(Chaudhry et al. 2015)	
elevage moderne	Densité de viande/km²	Monde	Faible valeur explicative	(Hogerwerf et al. 2010)	
	Nombre de volailles commerciales/sous district	Bangladesh	+++	(Loth et al. 2010)	
				Experts locaux, FAO 2019	
Proximité de routes	Proximité aux routes	Nigeria	+ (description spatio- temporelle des épidémies)	(Rivas et al. 2010)	
		Chine, Thaïlande Pakistan	;+;+	(Fang et al. 2008; M. Paul et al. 2010; 2011; Chaudhry et al. 2015)	
	Densité de routes	Roumanie, Vietnam, Bangladesh	++;+++;++;++	(Ward et al. 2008; Trevennec et al. 2011; Loth et al. 2010; Ahmed et al. 2012)	
	Defisite de routes	Benin	Description spatio- temporelle	(Gbaguidi,A.L.M. 2011)	
	Densité de marchés de volailles	Asie	++	(Marius Gilbert et al. 2014)	
Proximité de marchés de volailles vivantes	Nombre de marché/sous district	Bangladesh	+++	(Ahmed et al. 2012)	
				Experts locaux	
	Proximité cours d'eau/marre	Nigeria, Chine, Roumanie, Thaïlande	+;;++;+;+	(Cecchi et al. 2008; Fang et al. 2008; Ward et al. 2008; M. Paul et al. 2010; 2011)	
Proximité d'un point d'eau	Présence d'eau dans sous district	Bangladesh	+	(Ahmed et al. 2012)	
	Proportion de surfaces	Thaïlande	++;+	(Martin, Pfeiffer, et al. 2011; Thanapongtharm et al. 2013)	
	en eau (sous district)	Asie	+	(Marius Gilbert et al. 2014)	

<u>Tableau 3 : Facteurs de risque de propagation de l'influenza A.</u>

Les détails précisent le facteur de risque mesuré dans les différentes études. Les facteurs de risque sont référencés en fonction de la signification de la valeur p associée au risque de survenue de cas d'influenza A : p<0,05 (+), p<0,01 (++); p<0,001 (+++). Les signes – sont utilisés lorsque le facteur est négativement associé à la survenue d'influenza A. Dans le cas d'analyse uni et multivariée, seuls les facteurs de risque figurant dans l'analyse multivariée ont été gardés. * valeurs des différentes études citées dans l'ordre de citation et séparées par « ; ».

Les facteurs de risque ont été regroupés et simplifiés par rapport aux facteurs de risque précis utilisés pour les analyses statistiques, de façon à pouvoir obtenir les données cartographiables correspondantes. La densité de volailles traditionnelles a été choisie car de nombreux ménages possèdent des volailles de races locales en divagation. Ce facteur permet de rendre compte de la probabilité de contact entre volailles en divagation. Les routes principales sont le vecteur du commerce de volailles et de la dispersion de fomites, et représentent un facteur de risque potentiel. Les élevages commerciaux sont au centre de flux commerciaux, les poussins importés sont d'origines diverses. Les élevages jouent de plus un rôle dans la dissémination via les fomites et les aérosols. Les marchés, principal moyen de commercialiser les volailles, regroupent des volailles d'espèces et

d'origines différentes et mettent en relation les différents acteurs de la filière, disséminateurs potentiels du virus en cas d'infection. Enfin, les étendues d'eau et les grandes rivières sont des points de rassemblements potentiels de l'avifaune sauvage. De plus, le virus persiste plus longtemps en milieu humide (cf. §Modalités de transmission et persistance du virus dans différents milieux).

2. Identification des experts

Les experts locaux ont été identifiés comme étant des vétérinaires, agronomes, épidémiologistes ou paravétérinaires ayant des connaissances sur le contexte avicole au Bénin et sur la grippe aviaire. Les experts ciblés ont pu être des personnes ayant eu à gérer la crise de la grippe aviaire de 2007. Ils ont été contactés par téléphone, directement ou par l'intermédiaire de Dr Fidelia Djegui.

Les experts internationaux ont été identifiés comme ayant des connaissances sur l'épidémiologie de la grippe aviaire et sur le secteur avicole africain. Les experts internationaux ayant participé à l'étude de l'influenza A au Togo en 2019 ont été contactés afin d'obtenir l'autorisation d'utiliser leurs réponses dans la cadre de cette seconde étude.

3. Caractérisation et pondération des facteurs de risque

Le questionnaire élaboré sur Excel® pour le Togo a été envoyé par email aux experts internationaux, accompagné d'un court texte explicatif sur l'étude et la méthode utilisées. Selon les experts, le texte a pu être envoyé en anglais ou en français. Le questionnaire a été rempli sous forme d'entretien avec les experts nationaux. Les entretiens ont été réalisés en personne à Parakou ou à Cotonou. Tous les entretiens ont pu avoir lieu en français.

Le fichier Excel® du questionnaire (Annexe 2), est composé de deux onglets. Le premier onglet comporte une liste des facteurs de risque afin que l'expert puisse choisir ceux qu'il juge pertinents et 5 tableaux de comparaison des facteurs de risque. Les tableaux sont une décomposition de l'échelle de Saaty permettant une comparaison deux à deux de facteurs de risque selon 5 points allant de « extrêmement plus important que » (valeur 5), « plus important que » (valeur 3), « équivalent à » (valeur 1), « moins important que » (valeur 1/3) à « extrêmement moins important que » (valeur 1/5). Le deuxième onglet du fichier permet de choisir une relation entre chaque facteur et le risque de propagation. Les personnes enquêtées ont le choix entre 4 relations : linéaire, sigmoïde, en « U inversé » ou « en trapèze ». Pour aider les experts dans leur choix, un texte expliquait la nature de chaque relation à partir d'un exemple illustré.

A partir des tableaux, une matrice de comparaison a été établie. Les valeurs du tableau ont été normalisées, et les moyennes de chaque ligne normalisée correspondent au poids d'un facteur de risque pour un expert (un exemple de traitement des données est en Annexe 3). Enfin, un ratio de cohérence (CR, pour « consistency ratio ») a été calculé pour chaque expert selon la formule cidessous. Il est estimé que la réponse est cohérente si CR<0,1 ; si les CR>0,1, les jugements sont à revoir (Saaty 1987).

CR = CI/RI

Avec : CI (Indice de Cohérence) = $(\lambda_{max} - n)/(n - 1)$ Où $\lambda_{max} = \sum$ (somme des colonnes non normalisées x Poids) n = nombre de facteurs de risque

RI (Random Index) est déterminé à partir d'une table (Tableau 4)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Random Consistency Index (R.I.)	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Tableau 4: Table des Random Index (Saaty 1987)

4. Collecte de données et traitement informatisé

Les couches géographiques nécessaires à la réalisation de la carte finale ont été obtenues de sources variées résumées dans le Tableau 5.

Carte	Source		
Densité de volailles traditionnelles	DE		
Elevages modernes (commerciaux et semi	DE		
commerciaux)			
Routes principales	DIVA-GIS		
Marchés de volailles	Directions Départementales de la Santé Animale		
Points d'eau	DIVA-GIS/ filtre après discussion experts		
	ornithologues et CENAGREF		

Tableau 5: Origine des cartes représentant les différents facteurs de risque

La carte des densités de volaille traditionnelle a été élaborée à l'échelle de la commune, à partir des données du recensement agricole de 2015. La commune est la 3ème entité administrative du Bénin, avec une superficie moyenne de 1511km². La carte des élevages modernes a été réalisée à partir des données du même recensement agricole, listant les coordonnées GPS des élevages. La carte du réseau routier du Bénin a été obtenue sur DIVA-GIS. La carte des principaux marchés de volailles a été réalisée en contactant les responsables santé animale de chacun des 12 départements du pays afin qu'ils listent les marchés importants dans leur secteur. La carte des points d'eau a été obtenue sur DIVA GIS et les points d'eau constituant une zone de regroupement important d'oiseaux sauvages à proximité d'habitations humaines ont été identifiés en concertation avec le Centre National de Gestion des Réserves de Faune (CENAGREF) et un ornithologue chercheur à l'Université Polytechnique d'Abomey Calavi, collaborateur du CENAGREF.

Le traitement des données géographiques a été réalisé sur Rstudio (version 1.2.5033, RStudio, Inc., Boston, MA). Les couches sous forme de vecteurs ont été rasterisées à partir d'un raster de dimension 742*349 pixels. La résolution d'un pixel est d'environ 1km² et le système de coordonnées de référence utilisé est WGS84. Le rendu final des cartes a été travaillé à l'aide des logiciels QGIS (Desktop version 3.10.1., Open Source Geospatial Foundation Project) et ArcGIS (version 10.3, ESRI, Redlands, CA).

5. Standardisation des valeurs des rasters en fonction de la relation avec le facteur de risque

La distance euclidienne aux facteurs de risque a été calculée et représentée pour chaque facteur de risque. Ces rasters de distance ont été standardisés pour chaque facteur de risque en ramenant la valeur de chaque pixel entre 0 et 1 selon une relation linéaire ou sigmoïde, en combinant les choix des experts et les données disponibles dans la littérature. Les seuils a et b sont la moyenne des seuils donnés par les experts, complétées et corrigées selon les données disponibles dans certaines études (Kim B. Stevens, Gilbert, et Pfeiffer 2013; M. C. Paul et al. 2016). La standardisation des valeurs a été réalisée avec le logiciel Rstudio[®] (script en Annexe 4).

6. Addition linéaire des différentes couches pondérées

Une carte moyenne par facteur de risque a été réalisée. La carte finale a été obtenue en appliquant la formule suivante :

$$\sum_{i} ai * ji$$

Avec i: le facteur de risque i; a: le poids moyen du facteur de risque associé et j: la valeur du pixel associé.

La manipulation des cartes raster a été réalisée sur le logiciel Rstudio[®].

7. Analyse d'incertitude de la carte

Afin d'étudier la robustesse du modèle obtenu, une analyse d'incertitude a été réalisée à l'aide du logiciel Rstudio[®]. Pour alléger les manipulations, les rasters de chaque facteur de risque ont été convertis en vecteur. Une jointure spatiale des 5 vecteurs a permis d'obtenir un vecteur final incluant les valeurs pour chaque facteur de risque à un point donné de la carte. Le data frame correspondant a été utilisé pour l'analyse d'incertitude. 100 cartes ont été générées en faisant varier les poids de chaque facteur de risque individuellement de plus ou moins 0,25 points et en mesurant l'écart type de chaque point de la carte. Les écarts-types obtenus ont ensuite été représentés sur une carte.

8. Validation de la carte

Dans un premier temps, différents experts ont de nouveau été sollicités afin de donner leur avis sur la carte obtenue. Une évaluation de la capacité du modèle final à prédire les foyers d'influenza A de la carte a ensuite été réalisée à partir des résultats de prélèvements réalisés par le LADISERO depuis 2017, des résultats des prélèvements réalisés lors de la survenue des foyers d'influenza A(H5N1) en 2007 ainsi que ceux réalisés avant cette crise dans un contexte de surveillance active de l'IAHP. La capacité prédictive du modèle a été évaluée en calculant l'Aire Sous la Courbe (AUC) à partir d'une analyse ROC comme décrit par M. Paul et al (M. C. Paul et al. 2016). Les données prédictives sont la valeur moyenne du risque, extraite du raster final au niveau des points de récolte des échantillons. Les valeurs observées sont l'absence ou la présence d'influenza A. Enfin, cette démarche a été répétée sur différents modèles obtenus à partir des données analysées pour le Togo (Laurent 2019), le Nigeria et le Ghana (K B Stevens et al. 2009) et appliquées au Bénin. La capacité prédictive des différents modèles a été comparée, ainsi que la valeur prédictive de chaque facteur de risque. De plus, une régression logistique, afin de mesurer l'adaptation du modèle final aux données précitées, a été réalisée.

III. Prélèvements

1. Description de l'échantillonnage

Dans la cadre du contrat de surveillance financé par le NIH et dirigé par le CEIRS, les prélèvements entre 2017 et 2020 ont été réalisés par les techniciens du laboratoire à un rythme moyen de 50 écouvillons et 25 prises de sang par mois.

Une première carte a été obtenue au mois de mars 2020, et a permis de cibler les lieux de prélèvements à privilégier. Plusieurs zones à risque dans tout le pays sont ciblées pour réaliser les prélèvements. Afin d'optimiser la réalisation des prélèvements, le réseau de vétérinaires et de paravétérinaires ainsi que le laboratoire de Bohicon ont été sollicités. L'autorisation écrite de la Direction de l'Elevage pour pouvoir intervenir en dehors du champ d'action habituel du LADISERO a été obtenue. Des kits d'échantillonnages, constitués du nécessaire à prélèvement et des consignes de conservation et d'envoi des échantillons, ont été envoyés ou amenés en personne. Il a été conseillé aux personnes effectuant les prélèvements de réaliser les écouvillons dans les marchés de volailles vivantes et les prises de sang dans un élevage de leur commune. Les marchés et élevages visités étaient laissés au choix du préleveur.

Les prélèvements réalisés étaient des écouvillons oro-pharyngés et des prises de sang à la veine allaire. Les écouvillons ont été prélevés et placés dans un milieu de transport viral puis gardés

au frais (+4°C) jusqu'à leur acheminement vers le laboratoire. Les échantillons de sang sont gardés au frais pendant 24 à 48h maximum avant leur acheminement au laboratoire pour la séparation du sérum. Au laboratoire les sérums sont conservés à -20°C et les écouvillons à -80°C.

2. Analyses réalisées

Au LADISERO, les écouvillons ont été regroupés par pools de 5 échantillons. L'ARN a été extrait à l'aide du kit QIAGEN Viral Mini Kit. L'ARN a été analysé par RT-PCR avec un thermocycleur Applied Biosystems[®] en utilisant les amorces M52c et M253r ciblant le gène M.

Les pools positifs sont envoyés à l'ENVT pour la suite des analyses. Les pools sont éclatés et l'extraction d'ARN est réalisée pour chaque prélèvement individuellement. Une analyse RT-PCR est réalisée avec les mêmes amorces ciblant le gène M, et une RT-PCR spécifique au sous-type H9 est réalisée sur les échantillons positifs. Les échantillons positifs sont aussi séquencés après une amplification sur œufs embryonnés.

Jusque-là le personnel du LADISERO manquait de formation pour pouvoir assurer l'analyse des sérums et ils étaient regroupés et envoyés une fois par an à l'ENVT. A Toulouse, un test ELISA était réalisé sur les sérums et la densité optique calculée. Un test d'Inhibition à l'Hémagglutination avec le virus ayant le plus de probabilité de circuler est ensuite réalisé sur les échantillons positifs. Au cours du stage, la formation de deux techniciennes de laboratoires aux IHA a été entreprise et a permis de vérifier la possibilité de mettre en place ces analyses dans les locaux.

IV. Etude des réseaux de commercialisation de volailles vivantes dans la commune de Parakou à l'aide d'une approche SNA

1. Zone d'étude et population cible

Cette étude a été entreprise dans le but de comprendre le réseau de circulation de volailles dans la commune de Parakou, de quantifier les flux de volailles et d'identifier des marchés pouvant être ciblés en priorité pour la surveillance, et ainsi de compléter la surveillance basée sur le risque à l'échelle locale.

La zone géographique choisie est la commune de Parakou, principal rayon d'action du LADISERO. Le laboratoire effectue en effet régulièrement des prélèvements sur les marchés de Parakou. La population cible est définie comme étant toute personne impliquée dans le commerce de volaille dans la commune de Parakou. Un marchand est défini comme une personne achetant et vendant des volailles mais n'étant pas éleveur. Les marchands peuvent être intermédiaires ou vendeurs. Un vendeur a été défini comme une personne vendant des volailles sur un étal, ou à minima à une localisation précise et constante dans le temps. Un intermédiaire a été défini comme une personne achetant et vendant des volailles sans étal ou sans localisation précise. La liste des principaux lieux de vente de volailles et des principaux élevages commerciaux dans la commune a été élaborée en collaboration avec le chef division réglementation et contrôle du département du Borgou et le personnel du laboratoire. Tous les vendeurs présents le jour de la visite au marché étaient interviewés.

2. Collecte et traitement des données

Les données ont été collectées sur un questionnaire papier. Les entretiens ont été réalisés avec l'aide du personnel du laboratoire, connus des vendeurs et pouvant traduire au besoin certaines questions. Avant de réaliser les questionnaires et dans la mesure du possible, une visite préalable du marché était réalisée et les autorités sanitaires présentes, ou le cas échéant, les personnes responsables

au niveau de la vente de volailles étaient contactées, afin de demander leur accord et éventuellement leur aide. Avant chaque entretien, l'autorisation orale des personnes interviewées était obtenue.

Le questionnaire (Annexe 5) a été élaboré à partir de ressources bibliographiques (Vallée, Emilie 2010; Molia et al. 2016; Kurscheid et al. 2017; Moyen et al. 2018a) et de discussion avec les acteurs locaux afin de cerner les types de marché et leurs particularités. La visite préliminaire des marchés pour prendre contact avec les autorités sanitaires et les vendeurs a permis d'observer la variété de volailles ainsi que le nombre approximatif de vendeurs et de volailles par marché. Le questionnaire a été conçu pour être bref (5-10 minutes), et les questions étaient axées sur le nombre et l'origine d'achat des volailles, les lieux de vente, le nombre d'animaux vendus, le tout sur les 4 semaines précédant l'entretien. Des questions étaient aussi posées sur le mode de transport des volailles, le devenir des invendus, les mortalités et morbidités éventuelles, et enfin sur les principales difficultés rencontrées dans le cadre de leur activité. Les questionnaires ont été préalablement testés sur 2 marchands et ajustés en conséquence.

L'informatisation et la gestion des données a été réalisée à l'aide des logiciels Microsoft Excel® et RStudio, avec les packages « igraph » (Csardi et Nepusz T. 2006) et « sna » (Butts 2019). Un graphe orienté a été construit, où un nœud est défini comme étant un marchand de volailles, et les contacts représentent une transaction de volailles. Le poids des contacts est défini comme étant le nombre moyen de volailles vendues par semaine. Les degrés de centralité des nœuds ont été calculés, à savoir *in-degree* (nombre de contacts entrant pour un nœud) et le *out-degree* (nombre de contacts sortant). Le nombre moyen de volailles entrant et sortant pour un marchand (*strength*) a aussi été calculé. Des mesures de cohésion du réseau ont aussi été calculées, notamment la taille (le nombre de nœuds), la densité (proportion de contacts observés parmi tous les contacts possibles) et le *clustering coefficient* (la proportion de nœuds qui sont directement reliés à un autre nœud). Enfin, le réseau obtenu a été placé sur une carte du Bénin (Annexe 13) à l'aide du logiciel QGis®. Seuls les localisations pour laquelle des coordonnées GPS étaient disponibles ont été disposées dans le réseau. Ainsi, les intermédiaires et par conséquent les flux leur étant liés, n'ont pu être placés sur la carte.

B. Résultats

I. Screening virologique et sérologique des prélèvements

Les données de surveillance (Annexe 6) obtenues depuis décembre 2018 montrent une circulation virale d'influenza A (H9N2) dans les poulets de race locale de différents marchés. La prévalence virale varie de 0 (0/50) à 36% (18/50) et la seroprévalence varie de 0 (0/25) à 12% (11/25). Les échantillons positifs ont été prélevés entre octobre et février. Les sites sur lesquels les prélèvements sont réalisés par le laboratoire depuis 2 ans sont au chiffre de quatre (4), dont trois (Abattoir Central, Camp Adagbé, Marché de Tourou) dans la commune de Parakou, et un (marché de Djougou) dans la commune de Djougou. A ce jour, une partie des pools d'écouvillons positifs ainsi que certaines sérologies n'ont pas encore pu être analysés individuellement.

Le Tableau 6 récapitule les lieux de prélèvements et les résultats des analyses en mars 2020. 180 prélèvements, dont 120 écouvillons et 60 prises de sang ont été réalisés.

Commune de prélèvement	Lieu de prélèvement	Type de prélèvement	Nombre de prélèvements	Espèce prélevée	Signes cliniques	Résultats
Porto Novo	Elevage moderne	Ecouvillons	30	Poules pondeuses	Mauvais taux de ponte	N
Allada	Elevage moderne	Ecouvillons	30	Poules pondeuses	Sain	N
Bohicon	Elevage traditionnel	Prise de sang	20	Dindes, canards, poulets locaux, pintades	Sain	Non analysés
		Prise de sang	20	Canards, poulets locaux	Sain	Non analysés
	Marché 1 Ecouvillons		15	Canards, poulets	Sain	N
	Marché 2	Ecouvillons	15	locaux		P
Glazoue	Elevage traditionnel	Prises de sang	20	Poulets locaux	Sain	Non analysés
	Marché	Ecouvillons	30	Poulets locaux	Sain	N
Natitingou		Prises de sang	20	NR	Sain	Non analysés
		Ecouvillons	30	NR	Sain	Non analysés
Total		Ecouvillons	150			
		Prises de sang	80			

Tableau 6 : Prélèvements réalisés en mars 2020.

N : Négatif ; P : Positif ; NR : Non Renseigné ; Fond jaune : résultats positifs en pools de 5 mais pas encore analysés individuellement.

II. Modèle géographique

Un premier modèle géographique obtenu au mois de mars permet de cibler les zones de prélèvements intéressantes. Ce modèle a été élaboré à partir de données partielles, notamment la liste des marchés de volailles était incomplète. Les analyses d'incertitudes et la validation par les experts a eu lieu dans un second temps. Cette carte a été générée rapidement afin de pouvoir mettre en place la surveillance basée sur le risque pour les prélèvements à venir. A posteriori cette carte présente des zones de risque similaires au modèle final.

1. Analyse des questionnaires et réponses des experts

Les 11 experts locaux sollicités ont accepté de participer à l'étude. Parmi les réponses, 9 étaient complètes et 2 étaient semi-complètes mais utilisables : les tableaux de comparaisons étaient remplis et permettaient l'attribution de poids, mais les relations n'étaient pas renseignées. Parmi les experts internationaux ayant participé à l'étude togolaise en 2019, 3 experts sur les 4 sollicités ont accepté que leurs résultats soient utilisés de nouveau. Ces 4 réponses étaient semi complètes mais utilisables (pour les mêmes raisons que citées précédemment). Cette année, 7 autres experts internationaux ont été contactés et 4 ont répondu. Parmi ces 4 réponses, 1 étaient complète, 2 étaient

semi-complètes (pour les mêmes raisons que citées précédemment) mais utilisables et 1 était incomplète et inutilisable.

A partir des réponses, les poids par facteur de risque et par expert ont été calculés, ainsi que les ratios de cohérence. Les résultats figurent en Annexe 7. Les réponses des experts ont été classées en 2 catégories selon les ratios de cohérence : les ratios de cohérence inférieurs ou égaux à 0,16 ont été considérés comme cohérents. Les poids pour les experts ayant un CR supérieur à ce seuil n'ont pas été intégrés dans le modèle final. Parmi les experts dont le $CR \le 0,16$ figurent 7 experts locaux (7/11) et 5 experts internationaux (5/6) (Tableau 7).

	Densité de volailles traditionnelles	Proximité des élevages commerciaux	Proximité des routes principales	Proximité des marchés de volailles	Proximité des points d'eau	CR moyen	Nombre de réponses
Experts locaux (tous)	0,17	0,15	0,16	0,33	0,08	0,27	11
Experts locaux dont CR≤0,16	0,19	0,12	0,16	0,29	0,06	0,12	7
Experts Internatio naux	0,24	0,24	0,13	0,28	0,08	0,07	6
Experts internation aux dont CR≤0,16	0,28	0,21	0,13	0,29	0,09	0,03	5
Poids retenus	0,23 [0,05 – 0,45]	0,16 [0,05 – 0,28]	0,15 [0,06 – 0,32]	0,29 [0,09 – 0,46]	0,07 [0,03 – 0,13]	0,08	12
Seuils	Relation sigmoïde A = 100 V/km ² B = 500 V/km ²	Relation linéaire A = 0km B = 5km	Relation sigmoïde A = 5km B = 10km	Relation linéaire A = 0km B = 10km	Relation sigmoïde A = 5km B = 15km		

<u>Tableau 7 : Valeurs des poids moyens selon les experts</u>

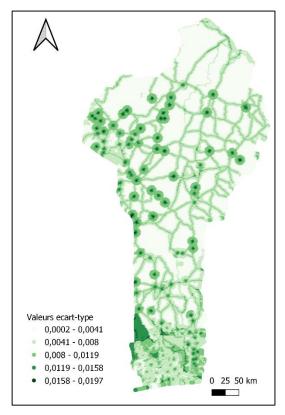
Les poids des experts nationaux et internationaux (Tableau 7Erreur! Source du renvoi introuvable.) font ressortir la proximité des marchés de volailles comme facteur de risque principal pour la propagation de la grippe aviaire, et la proximité des points d'eau comme le facteur de risque le moins important. Les poids des 3 autres facteurs de risque sont plus contrastés : la densité de volailles est un facteur de risque plus importants (0,19 et 0,28 en considérant respectivement les experts locaux et internationaux les plus « cohérents »), mais quand les experts internationaux accordent plus d'importance à la proximité aux élevages commerciaux (0,21 pour les experts internationaux et 0,12 pour les locaux), les experts locaux attribuent un poids plus important (0,16 contre 0,13 pour les internationaux) à la proximité avec les routes principales. Notons que le facteur de risque « proximité aux marchés de volaille » est significativement plus important (p=0,01384) que les autres facteurs de risque.

Le type de relations entre le facteur de risque et le risque de propagation, ainsi que les seuils A et B, ont été décidés en concertation avec les experts nationaux et à partir de données publiées (Kim B. Stevens, Gilbert, et Pfeiffer 2013; M. C. Paul et al. 2016).

2. Modèle final et validation

La carte finale figure en Annexe 8 avec les principales villes du Bénin. Cette carte a été montrée à des vétérinaires épidémiologistes de la direction de l'élevage, figurant par ailleurs parmi les experts interrogés, ou travaillant pour la FAO. La carte est validée dans son ensemble : les principaux marchés à surveiller apparaissent bien comme étant à risque, de même pour les zones d'élevage intensif et les principales villes du pays. Les principaux marchés à surveiller selon les experts sont, du sud au nord : Dantokpa (Cotonou), Ouando (Porto Novo), Ketou/Pobe, Aplahoue, Bohicon, Save, Parakou et Natitingou.

Analyse d'incertitude

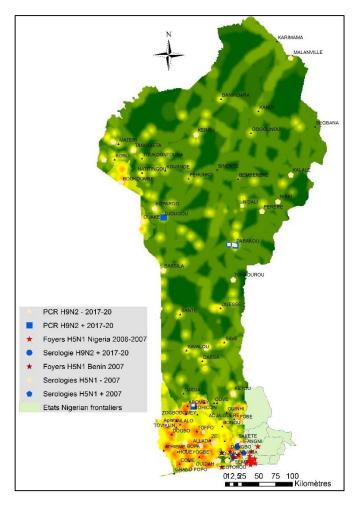


L'analyse d'incertitude montre que les valeurs de la carte sont modifiées d'au plus 0,0197 lorsque la valeur individuelle des poids varie de 25%, soulignant la robustesse du modèle (<u>Figure 6 : Analyse d'incertitude.</u>). L'écart type maximal de 0,0197, donc bien inférieur au seuil toléré de 0,1.

Figure 6 : Analyse d'incertitude.

Placement des résultats de prélèvements sur la carte de risque

Sur la carte (<u>Figure 7</u>) figurent les résultats de 2 vagues de prélèvements. Les foyers de grippe aviaire H5N1 ont eu lieu dans des zones qui apparaissent comme moyennement ou fortement à risque. Les sérologies positives pour H5N1, réalisées avant la survenue de cas (frise chronologique en <u>Figure 5</u>), sont localisées dans des zones faiblement, moyennement et fortement à risque. Les sérologies négatives sont également situées dans des zones avec des classements hétérogènes en terme de risque.



Les prélèvements réalisés entre 2018 et 2020 mettent en évidence la circulation de virus à Influenza A(H9N2) dans la commune de Parakou dans 2 marchés différents (Tourou et Abattoir Central) ainsi que dans un des marchés des communes de Bohicon et de Djougou. Ces zones apparaissent comme moyennement (Abattoir Central et Djougou) ou fortement (Bohicon) à risque sur la carte. Le marché de Tourou, seul marché positif en sérologie, figure dans une zone faiblement à risque. Certaines campagnes n'ont pas mis en évidence de circulation virale sur ce même marché.

Les prélèvements négatifs sont localisés dans des zones moyennement (Marché de N'Dali, PCR; Braiseur Bira et marché Abattoir Central à Parakou, sérologie; élevage de poules pondeuses à Porto Novo, PCR) ou fortement (Marché Zongo à Bohicon, PCR; élevage de poules pondeuses à Allada, PCR) à risque.

<u>Figure 7 : Modèle final de cette étude et les</u> <u>prélèvements relatifs à l'influenza A depuis les cas</u> de grippe aviaire H5N1 en 2007

Comparaison de différents modèles

Les modèles obtenus à partir de différentes combinaisons de poids et de seuils sont présentés dans le tableau suivant (Tableau 8 : Poids et seuils utilisés pour différents modèles. Figure 8)

Modèle	Sources des poids	Détermination des seuils	Densité de volailles traditionnelles	Proximité d'un élevage moderne	Proximité des routes	Proximité de marchés de volailles vivantes	Proximité d'un point d'eau
F1	Cette étude	Cette étude	0,23	0,16	0,15	0,29	0,07
C1	Laurent 2019	Cette étude	0,23	0,29	0,25	0,28	0,06
CS1	Laurent 2019	Laurent 2019	0,23	0,29	0,25	0,28	0,06
P1	Stevens 2009	Cette étude	0,1525		0,1527	0,1527*	0,0413**
FS1	Cette étude	Laurent 2019	0,23	0,16	0,15	0,29	0,07

Cette étude	Relation sigmoïde A = 100 V/km²B = 500 V/km²	Relation linéaire A=0km B=5km	Relation sigmoïde A=5km B=10km	Relation linéaire A=0km B=10km	Relation sigmoïde A=5km B=15km
Laurent 2019	Relation sigmoïde A=100V/km² B=500 V/km²	Relation sigmoïde A=0,5km B=5km	Relation sigmoïde A=0,5km B=5km	Relation linéaire A=0km B=2,5km	Relation sigmoïde A=0,5km B=15km

Tableau 8 : Poids et seuils utilisés pour différents modèles.

Dans l'étude de Stevens et al. 2009, la proximité aux élevages modernes n'était pas considérée comme un facteur de risque de propagation de la grippe aviaire. La densité de volailles de distinguait pas volailles traditionnelles et volailles en élevage moderne. *Les villes sont utilisées comme proxy pour la localisation de marchés de volailles vivantes. ** Le poids de la proximité est ici la moyenne entre 2 facteurs considérés différemment dans l'étude : la proximité de l'eau et la proximité des zones inondées.

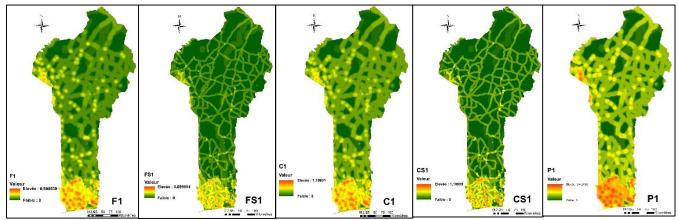


Figure 8 : Modèles obtenus d'après le tableau ci-dessus.

Sur ces 5 modèles, la zone méridionale du pays, au sud d'Aplahoue – Bohicon - Ifangni ainsi que la zone de Pobe apparaissent comme les zones de plus haut risque de propagation de l'influenza A (une vue agrandie de la zone méridionale à plus fort risque est disponible en Annexe 9. Au Nord du Bénin, les zones apparaissant comme plus à risque sont certaines localités, dont la commune de Parakou, ainsi que la zone de Natitingou – Boukoumbe, ainsi que la zone autour de Boukambe. Les zones de risque prennent surtout la forme de points focaux centrés sur les marchés de volaille (Annexe 10 : Modèle final avec les principaux marchés de volailles vivantes du Bénin) Pour les cartes F1, C1 et P1, les seuils utilisés sont les mêmes mais les poids utilisés pour combiner les couches de risque sont différents. Si F1 et C1 sont similaires, les zones à risque sur P1 semblent plus étalées et diffuses. Le seuil utilisé comme limite de zone à risque autour des routes pour cette étude (10km) est assez large, tandis que le seuil utilisé dans l'étude de C. Laurent et al est plus restreint (2,5km). L'aspect visuel des cartes varie notablement entre les modèles pour lesquels les poids sont les mêmes mais les seuils varient, à savoir F1/FS1 et C1/CS1. Les zones à risque sont alors plus limitées, notamment la zone autour de Natitingou et Ouake.

Capacités prédictive et explicative des modèles

58 observations sont disponibles pour mesurer la capacité prédictive des modèles, parmi lesquelles 14 sont des prélèvements positifs pour A(H5N1) (10/14) et A(H9N2) (4/14). Les intervalles de confiance très larges (Annexe 11), dus en partie à un échantillonnage faible et non aléatoire, et une faible proportion d'échantillons positifs (14/58), ne permettent pas une analyse fiable des résultats. Notons tout de même la tendance du modèle final de cette étude (F1) à une faible valeur prédictive (0,59), qui augmente légèrement (0,62) lorsque seules les données de surveillance relatives à la

circulation de H5N1 en 2007 sont considérées. Le modèle issu des données de Stevens et al. (K B Stevens et al. 2009) est le modèle ayant la meilleure capacité prédictive (AUC=0,64). Pour les mêmes raisons évoquées ci-dessus, les données issues de la régression logistique ne sont pas significatives et difficilement interprétables.

III. Etude SNA

La commune de Parakou compte 6 principaux marchés permanents ouverts tous les jours, toute l'année, ainsi que 2 marchés hebdomadaires. Les principaux marchés et leurs caractéristiques sont en Annexe 12 : Caractéristiques des points de vente de volaille de la commune de Parakou. 3 élevages commerciaux sur la commune sur la commune, mais n'ont pu être visités faute de temps. Les visites sur les différents marchés ont permis de d'aborder 36 marchands, dont 26 vendeurs, 6 intermédiaires et 4 éleveurs, certains (4) ayant 2 casquettes. Seuls 2 marchands ont refusé de répondre à nos questions.

Tous les marchands vendent au moins une espèce de volailles, 97% (33/34) des marchands achètent et vendent des poulets locaux, 1 seul déclare acheter des poulets de race exotique (« poulet moderne ») et 74% (25/34) déclare acheter et vendre des canards. Environ un tiers (32%, 11/34) vendent leur volaille sur un autre marché que celui où nous les avons rencontrés. 91% (31/34) des marchands déclarent avoir des invendus, qui sont principalement laissés sur place (19/31) ou ramenés à la maison (10/31), selon la configuration du marché et des cages, et selon la confiance et les historiques de vol. La grande majorité des marchands (91%, 31/34) déclare avoir des mortalités, et les volailles mortes sont surtout jetées à la poubelle ou dans la brousse (68%, 23/34), ou égorgées et vendues/consommées quand les oiseaux sont visiblement malades et agonisants (18%,6/34). Parmi les marchands qui transportent leurs volailles, plusieurs modes de transport sont possibles, mais la moto reste majoritaire (61%, 24/39). Enfin, une question ouverte sur les principales difficultés du commerce de volailles permet de mettre en évidence un manque de capital et un problème de mortalités de volailles (13/37 pour les 2 critères, certains marchands évoquant plusieurs problèmes) et de prendre connaissance de problèmes respiratoires contractés par 3 marchandes d'un même marché en 2019.

La structure globale du réseau montre un approvisionnement des vendeurs chez les particuliers/éleveurs villageois et/ou marchés des villages environnants, directement par les vendeurs (61%, 16/26) ou par les intermédiaires. 42% (11/26) des vendeurs achètent leurs volailles à des intermédiaires, et ne connaissent pas l'origine précise des volailles, et il est possible qu'un vendeur s'approvisionne alternativement dans un marché et chez un intermédiaire. Les questions sur les flux de volailles portaient sur les 4 semaines précédant l'entretien, mais les marchands avaient du mal à donner des chiffres exacts, et les chiffres obtenus reflètent plutôt une estimation globale et approximative de leurs transactions. Les intermédiaires sont nombreux, et ce ne sont pas constamment les mêmes qui viennent vendre dans les marchés. Ils passent de plus à des heures variables dans les marchés, et il est difficile de les intercepter afin de discuter avec eux. Certains marchands étaient absents le jour de l'entretien, et il était décidé de revenir afin de discuter avec au moins 75% des vendeurs d'un marché.

Le réseau analysé est constitué de 69 nœuds. Il est de faible densité (0,03) et a un *clustering coefficient* de 0,11. Le nombre de contacts entrant (*in-degree*) est important pour les marchés de Tourou, Depot et Abattoir central, et le nombre de contacts sortants est important pour les marchés de Tourou, Boko et Bakperou. Le nombre moyen de volailles entrant dans les marchés d'Abattoir central et Depot pour être vendues par semaine est de 1591 et de 819 respectivement, et le nombre moyen de volailles sortant de Tourou par semaine pour être vendu est de 600 (Annexe 13). La superposition du réseau à la carte du Bénin montre un approvisionnement en volailles tourné vers les communes de l'ouest et du nord est. Ces résultats sont à interpréter avec précaution, l'échantillonnage n'étant pas forcément représentatif de la totalité du réseau existant.

C. Discussion

Définition du risque

Le choix a été fait dans notre étude de travailler sur le risque de propagation de l'influenza A au Bénin. Les données de surveillance issues du LADISERO montrent en effet une circulation de l'influenza A(H9N2) depuis 2018, une introduction a donc déjà eu lieu. De plus, l'étude de Clara Laurent et al. (Laurent 2019) au Togo montre que les cartes du risque d'introduction et de propagation sont similaires, les facteurs de risque étant difficile à distinguer. Les discussions avec les experts locaux se sont axées sur le risque de propagation de l'influenza A en général. Si la circulation d'IAFP H9N2 est d'actualité au Bénin, l'IA HP circule en Afrique de l'ouest depuis 2007 et tous les pays voisins ont déclaré des foyers dans les 5 dernières années (Figure 4). De plus, la Direction de l'Elevage travaille actuellement à réactualiser son plan de surveillance de la Grippe Aviaire Hautement Pathogène en concertation avec la FAO, plan pour lequel cet organisme recommande une surveillance basée sur le risque.

Choix des facteurs de risque et pondération

La **sélection des facteurs de risque** est une étape déterminante pour la qualité de la carte obtenue. Le choix a été fait d'utiliser les facteurs de risque issus de l'étude togolaise de Clara Laurent et al., afin de pouvoir comparer les résultats obtenus dans deux pays voisins. Les experts locaux ont trouvé l'utilisation de facteurs de risque similaires entre le Togo et le Bénin pertinente. De plus (i) les facteurs de risque listés dans l'étude togolaise étaient basés sur une lecture approfondie de la littérature et une discussion avec les experts locaux, (ii) le nombre de cas d'influenza aviaire au Bénin étant actuellement trop faible, une analyse suffisamment puissante des facteurs de risque propre au pays n'est pas possible, (iii) les experts béninois citaient spontanément lors des entretiens les facteurs de risque présélectionnés. Pour l'établissement d'une carte du risque, les facteurs de risque doivent être cartographiables, et les données correspondantes doivent être disponibles. Ainsi, certains facteurs de risque pertinents évoqués par les experts locaux, tels que l'application de mesures de biosécurité dans les élevages avicoles ou le manque national de vétérinaires, de programmes de surveillance et de décentralisation des services, n'ont pas pu être représentés sur la carte et ne peuvent qu'être cités ici. Certains experts ont notamment souligné le manque de vétérinaires au Bénin à tous les niveaux, y compris au niveau central (DE). La communication entre les acteurs en place n'est pas efficace ou inexistante, il manque d'encadrements pour les paravétérinaires sur le terrain, ainsi que de moyens alloués notamment aux laboratoires de diagnostic vétérinaire (OIE 2013, experts locaux).

La **pondération des facteurs de risque** influe sur le rendu final, et donc sur les zones à risque relevées. Dans la présente étude, les avis des experts soulignent l'importance des marchés de volaille en tant que facteur de risque de propagation de l'influenza A, le facteur de risque « proximité à un marché de volailles vivantes » étant significativement plus important que les autres poids. Ce résultat contraste avec l'étude au Togo où les poids accordés à 4 des 5 facteurs de risque sont compris entre 0,23 et 0,29. L'attribution de poids différents pour l'addition linéaire de cartes établies avec des seuils de risque identiques (F1, C1 et P1) conduit à une différence visuelle entre les modèles. Notons que si les intervalles de confiance des valeurs des AUC des différents modèles sont trop larges pour pouvoir interpréter les valeurs avec confiance, les valeurs varient tout de même d'un modèle à l'autre, le modèle final de cette étude et celui issu des données de la littérature présentant potentiellement une capacité prédictive supérieure aux autres.

Certaines études se basent sur des facteurs de risque identifiés dans la littérature et les pondèrent en se basant sur leur fréquence et leur niveau de significativité. Si l'on essaye cette

approche pour notre étude (Tableau 3), les poids des différents facteurs de risque divergeraient de façon considérable avec ceux des experts locaux. En effets, les analyses de facteurs de risque se déroulent majoritairement en Asie, où notamment la densité de canards, un des facteurs les plus significatifs et les plus fréquemment cités, est importante. Au Bénin, la densité de canards est considérée comme faible et représente donc un facteur de risque négligeable selon les experts locaux. En Asie, la proximité avec les cours d'eau ou la densité en cours d'eau sur une surface donnée est aussi un facteur de risque significatif et fréquemment cité. Il a de l'importance en tant que tel car le virus persiste plus longtemps en milieu humide, mais les étendues d'eau sont aussi un point de contact potentiel entre avifaune sauvage et domestique. En Afrique, ce facteur de risque est cité comme étant potentiellement important au Nigéria, le risque n'est toutefois pas formellement mesuré. Au Bénin et au Togo, les experts ont apporté peu de poids (0,07 et 0,06 respectivement) à ce facteur de risque. Certains experts ont d'ailleurs souligné, à raison, que les rares études en Afrique de l'Ouest n'ont pas mis en évidence la présence de VIA chez l'avifaune sauvage. Notons tout de même que les données issues d'un sondage de la Direction de l'Elevage en 2015 montre une densité de canards de 18 canards/km² à l'échelle du pays, et une densité moyenne à l'échelle du département (superficie moyenne de 9600km²) de 56 canards/km² [4 – 298]. Ces chiffres soulignent une sous-estimation de la densité de canards au Bénin (Hogerwerf et al. 2010), et donc potentiellement une sous-estimation du risque que cette densité représente. En considérant la valeur prédictive (AUC) des facteurs de risque pris individuellement, il est intéressant de noter que l'importance relative des facteurs de risque pour expliquer les valeurs observées est différente de celle à dire d'experts. Ainsi, la capacité prédictive de la proximité aux routes, de l'eau et de la densité de volailles traditionnelles serait supérieure à la capacité prédictive des marchés de volailles et de la proximité aux élevages dits modernes.

La **détermination des relations et des seuils** influe aussi sur le rendu final des modèles en modifiant la taille des zones où plusieurs facteurs de risque se superposent (Annexe 9). En effet, l'étude togolaise modélise une zone de risque plus restreinte autour des routes (5km) et des marchés de volailles (2,5km) quand les experts béninois ont considéré une aire d'influence plus large (10km) pour les deux facteurs de risque. Les zones à risque sur le modèle final de la présente étude (F1) sont en conséquence plus larges et diffuses que les zones à risque soulignées par les données togolaises. La différence entre les modèles est notable visuellement par exemple dans les zones au nord-ouest, autour de Boukoumbe et de Ouake.

La **comparaison visuelle** du modèle de la présente étude avec celui obtenu à partir de l'étude de Clara Laurent et al. montre des similitudes, et aurait permis d'envisager la création d'une première carte *à priori* pouvant servir de base de discussion avec les experts locaux.

Validation de la carte

L'analyse d'incertitude montre un modèle robuste, et la discussion avec certains experts montre qu'il souligne les principales zones qu'ils estiment comme étant à risque. Les foyers de grippe aviaire hautement pathogène de 2007 sont situés dans les zones à risque du modèle, ainsi que les prélèvements positifs en virologie et certains prélèvements positifs en sérologie pour A(H9N2). Seul le marché de Tourou, dans la commune de Parakou, est l'origine d'un prélèvement sérologique positif alors qu'il est situé en zone de faible risque. L'analyse SNA permet de souligner l'importance de ce marché hebdomadaire en tant que point d'approvisionnement des différents marchés de la ville, pointant là peut être une limite du modèle MCDA utilisé seul. S'il peut capter les principales zones à risque à une échelle globale, il ne permet pas de souligner les flux et les subtilités des échanges localement.

Les prélèvements sérologiques négatifs réalisés en 2007 avant l'apparition des foyers de virus A(H5N1), ainsi que certains prélèvements sérologiques et écouvillons pour A(H9N2) sont situés dans zones faiblement comme fortement à risque. La présence de prélèvements négatifs en zone fortement à risque ne signifie pas obligatoirement une absence de circulation virale, et doit être analysée en fonction de la représentativité de l'échantillon. Ainsi, dans la zone d'Allada, seul un élevage a pu être

écouvillonné, et si le nombre d'échantillons (30) était correct, il faudrait pouvoir le compléter dans le temps et dans l'espace. La présence d'échantillons sérologiques positifs en zone faiblement à risque, comme c'est le cas pour les sérologies A(H5N1) de 2007, est plus problématique. Ce peut être interprété comme un manque de sensibilité du modèle, qui, comme discuté plus haut, permet de souligner les grandes zones à risque mais ne se nourrit pas de données locales suffisamment précises. Les données de surveillance utilisées pour estimer la capacité prédictive des modèles sont issues de campagnes de prélèvement variées, conduites de différentes façons (surveillance active ou passive), dans des buts différents (identification H5N1 ou IA de façon générale) et à des années (13 ans au maximum) d'écart, ce qui nuit à la puissance et à la pertinence des analyses statistiques. Les AUC augmentent notamment lorsqu'on utilise les données issues de la surveillance active de H5N1 en 2007. Ces données sont utilisées parce que ce sont actuellement les seules disponibles, et permettent une évaluation statistique des modèles visant à être améliorée avec la disponibilité des données. La nature même de la surveillance basée sur le risque empêche la randomisation des prélèvements, qui resterait le meilleur moyen de tester les modèles.

Saisonnalité

La présente étude a été réalisée sans considérer une possible fluctuation des cas d'influenza A dans le temps. Cependant, le risque d'introduction de la grippe aviaire pourrait être saisonnier, et la circulation virale pourrait être périodiquement plus marquée. Les foyers de grippe aviaire de 2007 ont eu lieu aux mois de novembre et décembre, mois secs avec une humidité relative faible au sud du Bénin. Les échantillons positifs, tant par recherche virale que sérologique, ont été prélevés entre les mois d'octobre 2018 et Mars 2019 (Annexe 6). Cette période est aussi caractérisée par des vents d'harmattan, vents du Nord Est secs et chauds, correspondant à une période d'augmentation des cas de maladie de Newcastle dans le pays (Gbaguidi, A.L.M. 2011, experts locaux). Au Nigéria, lors de la même vague d'IAHP, 90% des cas ont eu lieu lors de la saison sèche (Cecchi et al. 2008). De la même manière, une étude de la saisonnalité des cas d'IAHP dans le monde décrit une augmentation du nombre de foyers en saison sèche lorsque la pluviométrie est faible, l'isothermalité importante et l'avifaune sauvage présente. La saison sèche correspond aussi à la saison des fêtes de fin d'année, période à laquelle le commerce et le flux de volailles sont plus importants (Gbaguidi, A.L.M. 2011; Vallée et al. 2013; Moyen et al. 2018b). L'analyse phylogénétique des virus A(H9N2) semble indiquer une circulation des virus A(H9N2) au grès des échanges commerciaux en Afrique, et une saisonnalité des cas pourrait être alors plutôt liée à l'augmentation des échanges commerciaux en période de fête de fin d'année notamment (Maxime Fusade-Boyer, données non publiées). La poursuite de la surveillance active permettrait d'analyser plus précisément l'hypothèse de la saisonnalité des cas. Si celle-ci est avérée, une surveillance accrue en saison sèche pourrait être intéressante. L'hypothèse d'une circulation accrue en saison sèche pose tout de même la question de la persistance du virus d'une année sur l'autre. Au Nigeria voisin, après les premiers foyers en 2006, les cas d'IAHP, ont été déclarés en toute saison (Walsh et al. 2017).

Ratio de cohérence

Dans notre étude seules les matrices de deux experts locaux présentaient un ratio de cohérence inférieur au seuil de 0,1 recommandé par Saaty (Saaty 1987), et cinq experts locaux avaient un ratio de cohérence compris entre 0,11 et 0,16. Il a été décidé de les inclure dans le calcul des poids utilisés pour l'addition linéaire de la carte finale, considérant (i) un RC faiblement supérieur au seuil de 0,1 (ii) une cohérence globale de leur matrice, et (iii) la pertinence de prendre en compte l'avis d'experts locaux. Il aurait été optimal de calculer les RC en direct au cours des entretiens et de reprendre les réponses jusqu'à obtenir un RC<0,1, comme conseillé par Saaty et al. (Saaty 1987), et ce serait un point à améliorer dans le cadre d'une étude similaire ultérieure.

Une première carte a été obtenue sur place avec des données partiellement complètes, et a servi de support pour cibler les zones de prélèvements. Pour des contraintes temporelles et logistiques, cette carte a été validée ultérieurement par les experts et par l'analyse d'incertitude. Ces différentes étapes de validation soulignent cependant les mêmes zones à risque et viennent plutôt confirmer la première carte obtenue.

Réalisation des prélèvements

Les prélèvements du mois de mars 2020 ont pu avoir lieu à différentes localisations grâce à la bonne mobilisation du réseau de vétérinaires et de paravétérinaires, et ont donné lieu à des échanges intéressants avec éleveurs et vétérinaires. Certains souhaitent notamment une surveillance renforcée de la grippe aviaire, surtout ceux ayant connu l'épidémie de 2007. Lors de la réalisation de prélèvements par le LADISERO pour la surveillance active de la grippe aviaire, les principales difficultés rencontrées sont les contraintes financières, ne permettant pas notamment d'aller prélever dans des sites éloignés de la commune de Parakou, et la réticence des vendeurs aux prélèvements, particulièrement aux prises de sang. Ces prélèvements provoquent souvent des hématomes pouvant faire baisser la valeur des volailles ou faire perdre des ventes. Pour pallier à cette difficulté, il est nécessaire de créer un lien de confiance avec les vendeurs. Ce sont donc souvent les mêmes marchés qui sont visités, et ce sont souvent les animaux en cours d'abattage dont le sang est prélevé. Ces difficultés mènent à des biais d'échantillonnage évidents.

Complémentarité des études MCDA et SNA

L'étude SNA réalisée dans la commune de Parakou a permis de se rendre sur le terrain et de discuter avec les vendeurs de différents marchés de volailles, facteur de risque important souligné par les experts locaux et internationaux. Cette étude pouvait de plus permettre d'estimer la distance et la relation à mettre en place autour du facteur de risque « marchés de volailles vivantes » pour le modèle MCDA. Il était notamment difficile pour les experts locaux de se prononcer sur cette question en l'absence d'analyse spatiale des facteurs de risques de propagation de l'influenza A. Cette étude permettait enfin au laboratoire d'avoir une meilleure compréhension des flux de volailles dans la commune dans laquelle ils sont amenés à prélever régulièrement.

Les questions subsidiaires ont permis de mettre en lumière la mortalité élevée des volailles, particulièrement lorsque les volailles restent plusieurs jours sur le marché, lors de méventes par exemple. Les cadavres sont jetés à la poubelle ou dans la brousse, et moins souvent enterrés. Certains vendeurs, lorsque les animaux sont agonisant, égorgent et vendent ou gardent ces volailles pour la consommation. De plus, certains vendeurs reconnaissent vendre toutes leurs volailles lorsqu'ils constatent une morbidité ou mortalité accrue. Ces pratiques constituent des risques sanitaires non négligeables. Si le poulet bicyclette domine les ventes, les volailles d'espèces différentes sont mélangées lors du transport et de la vente, et les canards occupent notamment une place non négligeable dans les échanges. La moto est le mode de transport de volailles le plus fréquemment employé, conduisant à une forte contiguïté de différentes espèces et des conditions de stress des oiseaux. Enfin, les questions ouvertes ont permis à trois vendeuses de parler de problèmes respiratoires récents, pouvant souligner des conditions de travail insalubres et de potentielles zoonoses non diagnostiquées.

L'analyse de réseaux a permis de souligner un nombre de transactions entrantes et sortantes importants pour le marché de Tourou, ainsi qu'un nombre important de volailles venant de ce marché fournissant d'autres marchés. Les marchés Dépôt et Abattoir central ont aussi un influx important de transactions par semaine. En plus de Tourou, les marchés de Boko, Bakperou et Bio Amadou semblent être des sources fréquentes d'approvisionnement. Le réseau des flux de volailles dans la commune de Parakou est un réseau où un faible nombre de marchés concentre une part importante de transactions, constituant des hubs de commerce intéressant à cibler pour la surveillance de différentes maladies

comme l'influenza A. Ces marchés représentent des cibles prioritaires en cas de problèmes sanitaires, mais les interventions doivent être réfléchies. Une fermeture de ces hubs pourrait entrainer la création de marchés parallèles non connus et peu contrôlés et contrôlables.

La superposition du réseau de flux de volailles à la carte du Bénin permet de souligner la portée géographique de l'approvisionnement des marchés de Parakou, et une importance des communes à l'ouest et au nord-est. Les marchés et communes d'approvisionnement, s'ils n'apparaissent pas tous comme étant à risque dans le modèle MCDA, sont localisés autour d'axes routiers. Ainsi, la carte présentée en Annexe 14 permet de souligner l'importance des axes routiers dans le commerce de volailles, et par extension dans la propagation potentielle de l'influenza A.

Les résultats obtenus au cours de cette étude sont à considérer en regard des difficultés rencontrées. Lors de la récolte de données, la langue a été une barrière. Beaucoup de vendeurs ne parlaient pas ou pas aisément français et maitrisaient surtout le Bariba ou le Dendi. La traduction par les paravétérinaires du laboratoire était essentielle, et il a parfois fallu avoir recours à une langue moins maitrisée par les 2 partis. Une autre difficulté fut l'accès aux intermédiaires, qui étaient difficiles à intercepter. Pour des contraintes de temps notamment, peu d'intermédiaires ont pu être inclus dans l'étude, et l'échantillon obtenu n'est donc pas forcément représentatif des marchands de la commune de Parakou. De plus, comme souligné dans le paragraphe Matériel et Méthodes, les vendeurs ne donnaient pas le nombre de volailles vendues par semaine, mais plutôt une approximation de ce qu'ils vendent en moyenne, et citaient les marchés dans lesquels ils avaient l'habitude de se fournir. Le nombre de volailles achetées par semaine a donc été approximé en divisant le nombre moyen de volailles achetées par le nombre de marchés cités.

Proposition de plan de surveillance

Au regard de ces résultats, certaines mesures de contrôles efficaces selon d'autres études pourraient être tentées au Bénin (Molia et al. 2016), notamment (i) séparer les espèces au cours du transport et dans les marchés, (ii) prévoir l'élimination appropriée des cadavres de volailles, (iii) améliorer l'inspection sanitaire des animaux achetés et vendus, et enfin (iv) éviter la divagation de volailles dans les marchés. Ces mesures peuvent cependant se heurter à la faible offre en oiseaux disponibles à la vente, surtout pendant la saison sèche. L'information et l'accompagnement participatif des vendeurs et intermédiaires pourraient permettre tout du moins de favoriser la séparation des espèces vendues. D'autres mesures mises en place dans d'autres pays ne seraient que difficilement envisageables, voire contre productives, comme la fermeture de marchés pendant une journée par semaine, ou le nettoyage et la désinfection du matériel utilisé. Les marchés identifiés comme étant les plus connectés pourraient être la cible d'actions prioritaires en cas d'épizootie, à savoir la mise en place de mesures de biosécurité. La fermeture de marchés hubs devrait se faire avec précautions, au risque de voir le réseau se fragmenter et un commerce parallèle et mal connu se mettre en place.

Les zones dans lesquelles il serait intéressant de réaliser des prélèvements sont les zones figurant en rouge sur le modèle final F1. Parmi ces zones, il serait notamment intéressant d'inclure les marchés importants cités par les experts, afin de confirmer ou d'infirmer cette liste. Le recueil des avis d'experts fait ressortir l'importance des marchés de volailles vivantes et de la densité de volailles traditionnelles dans la potentielle circulation de virus à influenza A. La surveillance pourrait donc être basée sur les marchés figurant en zone rouge, tout du moins en première intention. Dans ce cadre, nous pourrions estimer le nombre de prélèvements à réaliser. En considérant un nombre moyen de 200 têtes de volailles par marché, et une prévalence apparente d'A(H9N2) de 25% (par RT-PCR, Annexe 6) il faudrait écouvillonner au minimum 13 animaux afin de déterminer l'absence ou la présence du virus sur le marché. Si l'on désire calculer la prévalence d'A(H9N2) au niveau de ce même marché, il faut prélever 119 animaux pour un obtenir des résultats avec un niveau de confiance de 95%. Les animaux écouvillonnés devraient l'être de façon aléatoire. La visite des marchés montre la présence quasi constante de quelques canards, dont quelques individus pourraient être prélevés en priorité. Les données indiqueraient une circulation virale plus importante dans la saison sèche

(d'octobre à février), mais cette observation reste à vérifier avec les données futures. Afin de vérifier cette hypothèse, une surveillance constante durant l'année, et ce sur plusieurs années, devrait être mise en place dans un premier temps.

Conclusion

En s'appuyant sur un partenariat fonctionnel et des acteurs locaux volontaires, cette étude a permis d'élaborer une carte du risque de propagation de l'influenza A à l'échelle du Bénin, malgré les contraintes de temps imposées par la propagation mondiale de la Covid-19. Le recueil de l'avis de différents experts locaux et internationaux a permis d'élaborer un modèle robuste, soulignant des zones à risque dans lequel de l'influenza A faiblement pathogène et hautement pathogène, a pu être identifiée. Il apparait notamment que le sud du pays concentre le plus de zones à risque, et l'vis des experts souligne l'importance potentielle des marchés de volailles vivantes dans la propagation de l'influenza A. L'élaboration et la comparaison de modèles avec les données de la littérature et de l'étude miroir réalisée au Togo ont permis de faire varier les poids et les seuils des différents facteurs de risque, soulignant ainsi des zones de risque constantes mais à étendues variables. Les premières données de surveillance basée sur le risque montrent que le virus A(H9N2) circule en dehors de la commune de Parakou, et les experts soulignent l'importance du commerce de volailles et de la présence des volailles en divagation dans la propagation de l'influenza A au Bénin. Si la méthode MCDA permet de souligner efficacement les grandes zones à risque au niveau d'un pays, les subtilités du commerce au niveau local peuvent échapper à cette modélisation. Une analyse de flux, en suivant la méthode SNA par exemple, permet de montrer certains marchés clés et de compléter les données nationales. Les deux marchés concentrant une part importante des flux commerciaux au sein de Parakou sont aussi ceux desquels sont issu des prélèvements positifs pour H9N2. La méthode MCDA se veut toutefois itérative, et l'analyse de la capacité prédictive du modèle et la comparaison visuelle avec les résultats des prélèvements montre qu'il peut être affiné, et doit dans tous les cas être revu en regard des futurs résultats de prélèvements. La comparaison visuelle entre les modèles issus des données béninoises et togolaises montre qu'une comparaison entre pays aux filières avicoles similaires est pertinente, et il serait intéressant d'utiliser les données obtenues afin de construire des premiers modèles à priori dans d'autres pays.

Bibliographie

- Ahmed, Syed S. U., Annette K. Ersbøll, Paritosh K. Biswas, Jens P. Christensen, Abu S. M. A. Hannan, et Nils Toft. 2012. « Ecological Determinants of Highly Pathogenic Avian Influenza (H5N1) Outbreaks in Bangladesh ». Édité par Joel Mark Montgomery. *PLoS ONE* 7 (3): e33938. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0033938.
- Alexander, Dennis J. 2007. « An Overview of the Epidemiology of Avian Influenza ». *Vaccine* 25 (30): 5637-44. https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2006.10.051.
- Almayahi, Zayid K., Hanan Al Kindi, C. Todd Davies, Bader Al-Rawahi, Amina Al-Jardani, Fatma Al-Yaqoubi, Yunho Jang, et al. 2020. « First Report of Human Infection with Avian Influenza A(H9N2) Virus in Oman: The Need for a One Health Approach ». *International Journal of Infectious Diseases* 91 (février): 169-73. https://doi.org/10.1016/j.ijid.2019.11.020.
- Awuni, Joseph A., Alice Bianco, Otilia J. Dogbey, Alice Fusaro, Daniel T. Yingar, Annalisa Salviato, Patrick T. Ababio, Adelaide Milani, Francesco Bonfante, et Isabella Monne. 2019. « Avian Influenza H9N2 Subtype in Ghana: Virus Characterization and Evidence of Co-Infection ». *Avian Pathology* 48 (5): 470-76.
- Butts, Carter T. 2019. *sna: Tools for Social Network Analysis. R package version.* (version 2.5). Https://CRAN.R-project.org/package=sna.
- Carnaccini, Silvia, et Daniel R. Perez. 2019. « H9 Influenza Viruses: An Emerging Challenge ». *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, décembre, a038588. https://doi.org/10.1101/cshperspect.a038588.
- Caron, Alexandre, Julien Cappelle, et Nicolas Gaidet. 2017. « Challenging the Conceptual Framework of Maintenance Hosts for Influenza A Viruses in Wild Birds ». Édité par Silke Bauer. *Journal of Applied Ecology* 54 (3): 681-90.
- Cecchi, Giuliano, Albert Ilemobade, Yvon Le Brun, Lenny Hogerwerf, et Jan Slingenbergh. 2008. « Agro-Ecological Features of the Introduction and Spread of the Highly Pathogenic Avian Influenza (HPAI) H5N1 in Northern Nigeria ». *Geospatial Health* 3 (1): 7. https://doi.org/10.4081/gh.2008.227.
- Chaudhry, Mamoona, Hamad B. Rashid, Michael Thrusfield, Sue Welburn, et Barend MdeC. Bronsvoort. 2015. « A Case-Control Study to Identify Risk Factors Associated with Avian Influenza Subtype H9N2 on Commercial Poultry Farms in Pakistan ». Édité par Siba K Samal. *PLOS ONE* 10 (3): e0119019. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119019.
- Chrysostome, C.A.A.M., J.G. Bell, F. Demey, et A. Verhulst. 1995. « Sero Prevalences to Three Diseases in Village Chickens in Benin ». *Preventive Veterinary Medicine* 22 (4): 257-61. https://doi.org/10.1016/0167-5877(94)00418-I.
- Csardi, G., et Nepusz T. 2006. *The igraph software package for complex network research*. Http://igraph.org. InterJournal, Complex Systems 1695.
- Dognon, S R, C F A Salifou, J Dougnon, M Dahouda, M-L Scippo, et A K I Youssao. 2018. « Production, importation et qualité des viandes consommées au Bénin », 13.
- Ducatez, M. F., C. M. Olinger, A. A. Owoade, S. De Landtsheer, W. Ammerlaan, H. G. M. Niesters, A. D. M. E. Osterhaus, R. A. M. Fouchier, et C. P. Muller. 2006. « Multiple Introductions of H5N1 in Nigeria ». *Nature* 442 (7098): 37-37. https://doi.org/10.1038/442037a.
- Ekong, P. S., N. M. Fountain-Jones, et M. A. Alkhamis. 2018. « Spatiotemporal Evolutionary Epidemiology of H5N1 Highly Pathogenic Avian Influenza in West Africa and Nigeria, 2006-2015 ». *Transboundary and Emerging Diseases* 65 (1): e70-82. https://doi.org/10.1111/tbed.12680.
- Fang, Li-Qun, Sake J. de Vlas, Song Liang, Caspar W. N. Looman, Peng Gong, Bing Xu, Lei Yan, Hong Yang, Jan Hendrik Richardus, et Wu-Chun Cao. 2008. « Environmental Factors

- Contributing to the Spread of H5N1 Avian Influenza in Mainland China ». Édité par Joel Mark Montgomery. *PLoS ONE* 3 (5): e2268. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002268.
- FAO. 2015. « Secteur Avicole Bénin. Revues nationales de l'élevage de la division de la production et de la santé animale de la FAO. » 10. Rome.
- FAO-EMPRES. 2018. « 2016-2018 Spread of H5N8 highly pathogenic avian influenza (HPAI) in sub-saharan Africa: epidemiological and ecological observations ». 12.
- Fuller, T. L., M. F. Ducatez, K. Y. Njabo, E. Couacy-Hymann, A. Chasar, G. L. Aplogan, S. Lao, et al. 2015. « Avian Influenza Surveillance in Central and West Africa, 2010–2014 ». *Epidemiology and Infection* 143 (10): 2205-12.
- Fuller, Trevon L., Marius Gilbert, Vincent Martin, Julien Cappelle, Parviez Hosseini, Kevin Y. Njabo, Soad Abdel Aziz, Xiangming Xiao, Peter Daszak, et Thomas B. Smith. 2013. « Predicting Hotspots for Influenza Virus Reassortment ». *Emerging Infectious Diseases* 19 (4): 581-88. https://doi.org/10.3201/eid1904.120903.
- Fusade-Boyer, Maxime, Pidemnéwé S. Pato, Mathias Komlan, Koffi Dogno, Komla Batawui, Emilie Go-Maro, Pamela McKenzie, et al. 2020. « Risk Mapping of Influenza D Virus Occurrence in Ruminants and Swine in Togo Using a Spatial Multicriteria Decision Analysis Approach ». *Viruses* 12 (2): 128. https://doi.org/10.3390/v12020128.
- Fusaro, Alice, Bianca Zecchin, Bram Vrancken, Celia Abolnik, Rose Ademun, Abdou Alassane, Abdelsatar Arafa, et al. 2019. « Disentangling the Role of Africa in the Global Spread of H5 Highly Pathogenic Avian Influenza ». *Nature Communications* 10 (1): 5310. https://doi.org/10.1038/s41467-019-13287-y.
- Gaidet, Nicolas, et Alexandre Caron. 2016. « Rôle des oiseaux sauvages dans la transmission et la dispersion des virus de l'influenza aviaire : apport de l'éco-épidémiologie dans les écosystèmes afro-tropicaux ». *Cahiers Agricultures* 25 (5): 54001. https://doi.org/10.1051/cagri/2016037.
- Gbaguidi, A.L.M., L. 2011. « Epidémiologie de l'Influenza Aviaire Hautement Pathogène au Bénin en 2007 ». Thèse MSc, Antwerpen, Belgique: Institut de Médecine Tropicale Prince Leopold.
- Gilbert, M., X. Xiao, D. U. Pfeiffer, M. Epprecht, S. Boles, C. Czarnecki, P. Chaitaweesub, et al. 2008. « Mapping H5N1 Highly Pathogenic Avian Influenza Risk in Southeast Asia ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105 (12): 4769-74. https://doi.org/10.1073/pnas.0710581105.
- Gilbert, Marius, Nick Golding, Hang Zhou, G. R. William Wint, Timothy P. Robinson, Andrew J. Tatem, Shengjie Lai, et al. 2014. « Predicting the Risk of Avian Influenza A H7N9 Infection in Live-Poultry Markets across Asia ». *Nature Communications* 5 (1): 4116. https://doi.org/10.1038/ncomms5116.
- Gilbert, Marius, et Dirk U. Pfeiffer. 2012. « Risk Factor Modelling of the Spatio-Temporal Patterns of Highly Pathogenic Avian Influenza (HPAIV) H5N1: A Review ». *Spatial and Spatio-Temporal Epidemiology* 3 (3): 173-83. https://doi.org/10.1016/j.sste.2012.01.002.
- Heidari, A., M. Mancin, H. Nili, G. H. Pourghanbari, K. B. Lankarani, S. Leardini, G. Cattoli, I. Monne, et A. Piccirillo. 2016. « Serological Evidence of H9N2 Avian Influenza Virus Exposure among Poultry Workers from Fars Province of Iran ». *Virology Journal* 13 (1): 16. https://doi.org/10.1186/s12985-016-0472-z.
- Hogerwerf, Lenny, Rob G. Wallace, Daniela Ottaviani, Jan Slingenbergh, Diann Prosser, Luc Bergmann, et Marius Gilbert. 2010. « Persistence of Highly Pathogenic Avian Influenza H5N1 Virus Defined by Agro-Ecological Niche ». *EcoHealth* 7 (2): 213-25. https://doi.org/10.1007/s10393-010-0324-z.
- Jeevan, Trushar, Daniel Darnell, El Alia Gradi, Yasmine Benali, Redhouane Kara, Djamel Guetarni, Adam Rubrum, et al. 2019. « A(H9N2) Influenza Viruses Associated with Chicken Mortality in Outbreaks in Algeria 2017 ». *Influenza and Other Respiratory Viruses* 13 (6): 622-26. https://doi.org/10.1111/irv.12675.

- Kurscheid, J., M. Stevenson, P. A. Durr, J.-A. L. M. L Toribio, S. Kurscheid, I. G. A. A. Ambarawati, M. Abdurrahman, et S. Fenwick. 2017. « Social Network Analysis of the Movement of Poultry to and from Live Bird Markets in Bali and Lombok, Indonesia ». *Transboundary and Emerging Diseases* 64 (6): 2023-33. https://doi.org/10.1111/tbed.12613.
- Laurent, Clara. 2019. « Surveillance de l'influenza A au Togo ». Toulouse: Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse.
- Lee, Dong-Hun, Miria Ferreira Criado, et David E. Swayne. 2020. « Pathobiological Origins and Evolutionary History of Highly Pathogenic Avian Influenza Viruses ». *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine*, janvier, a038679. https://doi.org/10.1101/cshperspect.a038679.
- Loth, Leo, Marius Gilbert, Mozaffar G. Osmani, Abul M. Kalam, et Xiangming Xiao. 2010. « Risk Factors and Clusters of Highly Pathogenic Avian Influenza H5N1 Outbreaks in Bangladesh ». *Preventive Veterinary Medicine* 96 (1-2): 104-13. https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2010.05.013.
- MAEP. 2011. « Plan Stratégique de Relance du Secteur Agricole (PSRSA) ».
- Martin, Vincent, Dirk U. Pfeiffer, Xiaoyan Zhou, Xiangming Xiao, Diann J. Prosser, Fusheng Guo, et Marius Gilbert. 2011. « Spatial Distribution and Risk Factors of Highly Pathogenic Avian Influenza (HPAI) H5N1 in China ». Édité par Neil M. Ferguson. *PLoS Pathogens* 7 (3): e1001308. https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1001308.
- Martin, Vincent, Xiaoyan Zhou, Edith Marshall, Beibei Jia, Guo Fusheng, Mary Ann FrancoDixon, Nicoline DeHaan, Dirk U. Pfeiffer, Ricardo J. Soares Magalhães, et Marius Gilbert. 2011. « Risk-Based Surveillance for Avian Influenza Control along Poultry Market Chains in South China: The Value of Social Network Analysis ». *Preventive Veterinary Medicine* 102 (3): 196-205. https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2011.07.007.
- Métras, R., K. B. Stevens, P. Abdu, I. Okike, T. Randolph, D. Grace, D. U. Pfeiffer, et S. Costard. 2013. « Identification of Potential Risk Factors Associated with Highly Pathogenic Avian Influenza Subtype H5N1 Outbreak Occurrence in Lagos and Kano States, Nigeria, During the 2006-2007 Epidemics: Avian Influenza in Nigeria ». *Transboundary and Emerging Diseases* 60 (1): 87-96. https://doi.org/10.1111/j.1865-1682.2012.01322.x.
- Mine, Junki, Yuko Uchida, Kirill Sharshov, Ivan Sobolev, Alexander Shestopalov, et Takehiko Saito. 2019. « Phylogeographic Evidence for the Inter- and Intracontinental Dissemination of Avian Influenza Viruses via Migration Flyways ». Édité par Charles J. Russell. *PLOS ONE* 14 (6): e0218506. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218506.
- Molia, Sophie, Ismaël Ardho Boly, Raphaël Duboz, Boubacar Coulibaly, Javier Guitian, Vladimir Grosbois, Guillaume Fournié, et Dirk Udo Pfeiffer. 2016. « Live Bird Markets Characterization and Trading Network Analysis in Mali: Implications for the Surveillance and Control of Avian Influenza and Newcastle Disease ». *Acta Tropica* 155 (mars): 77-88. https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2015.12.003.
- Mostafa, Ahmed, Elsayed Abdelwhab, Thomas Mettenleiter, et Stephan Pleschka. 2018. « Zoonotic Potential of Influenza A Viruses: A Comprehensive Overview ». *Viruses* 10 (9): 497. https://doi.org/10.3390/v10090497.
- Moyen, N., G. Ahmed, S. Gupta, T. Tenzin, R. Khan, T. Khan, N. Debnath, M. Yamage, D.U. Pfeiffer, et G. Fournie. 2018a. « A Large-Scale Study of a Poultry Trading Network in Bangladesh: Implications for Control and Surveillance of Avian Influenza Viruses ». *BMC Veterinary Research* 14 (1): 12. https://doi.org/10.1186/s12917-018-1331-5.
- ———. 2018b. « A Large-Scale Study of a Poultry Trading Network in Bangladesh: Implications for Control and Surveillance of Avian Influenza Viruses ». *BMC Veterinary Research* 14 (1): 12. https://doi.org/10.1186/s12917-018-1331-5.
- Nagy, A., T. C. Mettenleiter, et E. M. Abdelwhab. 2017. « A Brief Summary of the Epidemiology and Genetic Relatedness of Avian Influenza H9N2 Virus in Birds and Mammals in the Middle East and North Africa ». *Epidemiology and Infection* 145 (16): 3320-33.
- OIE. 2013. « Outil de l'OIE pour l'évaluation des performances des Services Vétérinaires, Bénin. »

- ———. 2019. « OIE. 2019b. Influenza A cleavage site. OFFLU-OIE/FAO. http://www.offlu.net/fileadmin/home/en/resource-centre/pdf/Influenza_A_Cleavage_Sites.pdf ». 2019.
- Oluwayelu, Daniel Oladimeji, Ayoyimika Omolanwa, Adebowale Idris Adebiyi, et Confort Oluladun Aiki-Raji. 2016. « FLOCK-BASED SURVEILLANCE FOR LOW PATHOGENIC AVIAN INFLUENZA VIRUS IN COMMERCIAL BREEDERS AND LAYERS, SOUTHWEST NIGERIA ». *African Journal of Infectious Diseases* 11 (1): 44-49. https://doi.org/10.21010/ajid.v11i1.5.
- Onibon, Paul, Lionel Gbaguidi, Aurélien Tossa, Erick D. Dagbénonbakin, Mathidle Togbé, Feudore Dagba, Valentin Faaki, et al. 2016. « Etude de la filière avicole au Bénin, géoréférencement et recensement exhaustif des cheptels avicoles moderne et traditionnel ».
- Ortiz-Pelaez, A., D.U. Pfeiffer, R.J. Soares-Magalhães, et F.J. Guitian. 2006. « Use of Social Network Analysis to Characterize the Pattern of Animal Movements in the Initial Phases of the 2001 Foot and Mouth Disease (FMD) Epidemic in the UK ». *Preventive Veterinary Medicine* 76 (1-2): 40-55. https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2006.04.007.
- Paul, Mathilde C., Flavie L. Goutard, Floriane Roulleau, Davun Holl, Weerapong Thanapongtharm, François L. Roger, et Annelise Tran. 2016. « Quantitative Assessment of a Spatial Multicriteria Model for Highly Pathogenic Avian Influenza H5N1 in Thailand, and Application in Cambodia ». *Scientific Reports* 6 (1): 31096. https://doi.org/10.1038/srep31096.
- Paul, Mathilde, Saraya Tavornpanich, David Abrial, Patrick Gasqui, Myriam Charras-Garrido, Weerapong Thanapongtharm, Xiangming Xiao, Marius Gilbert, Francois Roger, et Christian Ducrot. 2010. « Anthropogenic Factors and the Risk of Highly Pathogenic Avian Influenza H5N1: Prospects from a Spatial-Based Model ». *Veterinary Research* 41 (3): 28. https://doi.org/10.1051/vetres/2009076.
- Paul, Mathilde, Sirichai Wongnarkpet, Patrick Gasqui, Chaithep Poolkhet, Sukanya Thongratsakul, Christian Ducrot, et François Roger. 2011. « Risk Factors for Highly Pathogenic Avian Influenza (HPAI) H5N1 Infection in Backyard Chicken Farms, Thailand ». *Acta Tropica* 118 (3): 209-16. https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2011.03.009.
- Peiris, J. S. M., Y. Guan, D. Markwell, P. Ghose, R. G. Webster, et K. F. Shortridge. 2001. « Cocirculation of Avian H9N2 and Contemporary "Human" H3N2 Influenza A Viruses in Pigs in Southeastern China: Potential for Genetic Reassortment? » *Journal of Virology* 75 (20): 9679-86. https://doi.org/10.1128/JVI.75.20.9679-9686.2001.
- Peng, Li, Chen Chen, Han Kai-yi, Zhang Feng-xia, Zhu Yan-li, Ling Zong-shuai, Zhang Xing-xiao, Jiang Shi-jin, et Xie Zhi-jing. 2015. « Molecular Characterization of H9N2 Influenza Virus Isolated from Mink and Its Pathogenesis in Mink ». *Veterinary Microbiology* 176 (1): 88-96. https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2015.01.009.
- Pfeiffer, D. U., S. Costard, K. B. Stevens, R. Métras, W. Theuri, R. Kruska, T. Randolph, D. Grace, et S. Hendrickx. 2009. « Risk Mapping for HPAI H5N1 in Africa Improving Surveillance for Bird Flu//Initial Bird Flu Risk Map Report », mars, 64.
- Pleschka, Stephan. 2012. « Overview of Influenza Viruses ». In *Swine Influenza*, édité par Jürgen A. Richt et Richard J. Webby, 370:1-20. Current Topics in Microbiology and Immunology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/82 2012 272.
- PNUD. 2019. « Rapport sur le Développement humain 2019. Au-delà des revenus, des moyennes et du temps présent : les indégalités de développement humain au 21ème siècle. »
- Poolkhet, Chaithep, Pornsri Chairatanayuth, Sukanya Thongratsakul, Suwicha Kasemsuwan, et Theera Rukkwamsuk. 2013. « Social Network Analysis Used to Assess the Relationship between the Spread of Avian Influenza and Movement Patterns of Backyard Chickens in Ratchaburi, Thailand ». *Research in Veterinary Science* 95 (1): 82-86. https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2013.02.016.

- Potdar, Varsha, Dilip Hinge, Ashish Satav, Eric A.F. Simões, Pragya D. Yadav, et Mandeep S. Chadha. 2019. « Laboratory-Confirmed Avian Influenza A(H9N2) Virus Infection, India, 2019 ». *Emerging Infectious Diseases* 25 (12): 2328-30. https://doi.org/10.3201/eid2512.190636.
- Rivas, A. L., G. Chowell, S. J. Schwager, F. O. Fasina, A. L. Hoogesteijn, S. D. Smith, S. P. R. Bisschop, K. L. Anderson, et J. M. Hyman. 2010. « Lessons from Nigeria: The Role of Roads in the Geo-Temporal Progression of Avian Influenza (H5N1) Virus ». *Epidemiology and Infection* 138 (2): 192-98. https://doi.org/10.1017/S0950268809990495.
- Saaty, R.W. 1987. « The analytic hierarchy process what it is and how it is used ». *Mathl Modelling* 9 (3-5): 161-76.
- Shahid, Muhammad Abubakar, Sajid Hameed, et Shamsul Hassan. 2009. « Avian Influenza Virus (H5N1); Effects of Physico-Chemical Factors on Its Survival ». *Virology Journal* 6 (1): 38. https://doi.org/10.1186/1743-422X-6-38.
- Sodjinou, Epiphane, Arne Henningsen, Delphin Olorounto KoudandÉ, Gauthier Biaou, et Guy Apollinaire Mensah. 2012. « Consumers' Preferences for "Bicycle Poultry" in Benin: Implications for the Design of Breeding Schemes ». *Revue d'Études En Agriculture et Environnement* 96 (03): 389-409. https://doi.org/10.4074/S196696071500301X.
- Songserm, Thaweesak, Alongkorn Amonsin, Rungroj Jam-on, Namdee Sae-Heng, Nuananong Pariyothorn, Sunchai Payungporn, Apiradee Theamboonlers, Salin Chutinimitkul, Roongroje Thanawongnuwech, et Yong Poovorawan. 2006. « Fatal Avian Influenza A H5N1 in a Dog ». *Emerging Infectious Diseases* 12 (11): 1744-47. https://doi.org/10.3201/eid1211.060542.
- Spickler, Anna Rovid. 2016. « Highly Pathogenic Avian Influenza », cfsph, , 38.
- Stärk, Katharina DC, Gertraud Regula, Jorge Hernandez, Lea Knopf, Klemens Fuchs, Roger S Morris, et Peter Davies. 2006. « Concepts for Risk-Based Surveillance in the Field of Veterinary Medicine and Veterinary Public Health: Review of Current Approaches ». *BMC Health Services Research* 6 (1): 20. https://doi.org/10.1186/1472-6963-6-20.
- Stevens, K B, S Costard, R Métras, et D U Pfeiffer. 2009. « Mapping the Likelihood of Introduction and Spread of Highly Pathogenic Avian Influenza Virus H5N1 in Africa, Ghana, Ethiopia, Kenya and Nigeria Using Multicriteria Decision Modelling », avril, 33.
- Stevens, Kim B., Marius Gilbert, et Dirk U. Pfeiffer. 2013. « Modeling Habitat Suitability for Occurrence of Highly Pathogenic Avian Influenza Virus H5N1 in Domestic Poultry in Asia: A Spatial Multicriteria Decision Analysis Approach ». *Spatial and Spatio-Temporal Epidemiology* 4 (mars): 1-14. https://doi.org/10.1016/j.sste.2012.11.002.
- Stevens, Kim B., et Dirk U. Pfeiffer. 2011. « Spatial Modelling of Disease Using Data- and Knowledge-Driven Approaches ». *Spatial and Spatio-Temporal Epidemiology* 2 (3): 125-33. https://doi.org/10.1016/j.sste.2011.07.007.
- Tassoni, Luca, Alice Fusaro, Adelaide Milani, Philippe Lemey, Joseph Adongo Awuni, Victoria Bernice Sedor, Otilia Dogbey, et al. 2016. « Genetically Different Highly Pathogenic Avian Influenza A(H5N1) Viruses in West Africa, 2015 ». *Emerging Infectious Diseases* 22 (12): 2132-36. https://doi.org/10.3201/eid2212.160578.
- Thanapongtharm, Weerapong, Thomas P. Van Boeckel, Chandrashekhar Biradar, Xiangming Xiao, et Marius Gilbert. 2013. « Rivers and Flooded Areas Identified by Medium-Resolution Remote Sensing Improve Risk Prediction of the Highly Pathogenic Avian Influenza H5N1 in Thailand ». *Geospatial Health* 8 (1): 193. https://doi.org/10.4081/gh.2013.66.
- Thanawongnuwech, Roongroje, Alongkorn Amonsin, Rachod Tantilertcharoen, Sudarat Damrongwatanapokin, Apiradee Theamboonlers, Sunchai Payungporn, Kamonchart Nanthapornphiphat, et al. 2005. « Probable Tiger-to-Tiger Transmission of Avian Influenza H5N1 ». *Emerging Infectious Diseases* 11 (5): 699-701. https://doi.org/10.3201/eid1105.050007.

- Tian, Huaiyu, Sen Zhou, Lu Dong, Thomas P. Van Boeckel, Yujun Cui, Scott H. Newman, John Y. Takekawa, et al. 2015. « Avian Influenza H5N1 Viral and Bird Migration Networks in Asia ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112 (1): 172-77. https://doi.org/10.1073/pnas.1405216112.
- Trevennec, K., V. Chevalier, V. Grosbois, J.M. Garcia, H. Ho Thu, C. Berthouly–Salazar, J.S.M. Peiris, et F. Roger. 2011. « Looking for Avian Influenza in Remote Areas. A Case Study in Northern Vietnam ». *Acta Tropica* 120 (3): 160-66. https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2011.07.010.
- Vallée, Emilie. 2010. « Mouvements et flux de volailles dans la région d'Oromia, Ethiopie, pour déterminer le rôle des marchés dans la dissémination des pestes aviaires.pdf ». Thèse pour le Doctorat Vétérinaire. Faculté de Médecine de Créteil.
- Vallée, Emilie, Agnès Waret-Szkuta, Hassen Chaka, Raphaël Duboz, Melesse Balcha, et Flavie Goutard. 2013. « Analysis of Traditional Poultry Trader Networks to Improve Risk-Based Surveillance ». *The Veterinary Journal* 195 (1): 59-65. https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2012.05.017.
- Wallace, R. G., H. HoDac, R. H. Lathrop, et W. M. Fitch. 2007. « A Statistical Phylogeography of Influenza A H5N1 ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104 (11): 4473-78. https://doi.org/10.1073/pnas.0700435104.
- Walsh, M. G., P. Amstislavski, A. Greene, et M. A. Haseeb. 2017. « The Landscape Epidemiology of Seasonal Clustering of Highly Pathogenic Avian Influenza (H5N1) in Domestic Poultry in Africa, Europe and Asia ». *Transboundary and Emerging Diseases* 64 (5): 1465-78. https://doi.org/10.1111/tbed.12537.
- Wanaratana, Suwarak, Rachod Tantilertcharoen, Jiroj Sasipreeyajan, et Somsak Pakpinyo. 2010. « The Inactivation of Avian Influenza Virus Subtype H5N1 Isolated from Chickens in Thailand by Chemical and Physical Treatments ». *Veterinary Microbiology* 140 (1-2): 43-48. https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2009.07.008.
- Ward, Michael P., Daniel Maftei, Cristian Apostu, et Adrian Suru. 2008. « Environmental and Anthropogenic Risk Factors for Highly Pathogenic Avian Influenza Subtype H5N1 Outbreaks in Romania, 2005–2006 ». *Veterinary Research Communications* 32 (8): 627-34. https://doi.org/10.1007/s11259-008-9064-8.
- Webster, Robert G., et Elena A. Govorkova. 2014. « Continuing Challenges in Influenza: Continuing Challenges in Influenza ». *Annals of the New York Academy of Sciences* 1323 (1): 115-39. https://doi.org/10.1111/nyas.12462.
- WHO. 2016. « Influenza at the human-animal interface ». WHO.
- ———. 2020. « Cumulative number of confirmed human cases for avian influenza A(H5N1) reported to WHO, 2003-2020 ». https://www.who.int/influenza/human_animal_interface/H5N1_cumulative_table_archives/e n/. 2020.
- Williams, Richard A.J., Folorunso O. Fasina, et A. Townsend Peterson. 2008. « Predictable Ecology and Geography of Avian Influenza (H5N1) Transmission in Nigeria and West Africa ». *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 102 (5): 471-79. https://doi.org/10.1016/j.trstmh.2008.01.016.
- Wood, Joseph P., Young W. Choi, Daniel J. Chappie, James V. Rogers, et Jonathan Z. Kaye. 2010. « Environmental Persistence of a Highly Pathogenic Avian Influenza (H5N1) Virus ». Environmental Science & Technology 44 (19): 7515-20. https://doi.org/10.1021/es1016153.
- Wu, Haibo, Fan Yang, Rufeng Lu, Lihua Xu, Fumin Liu, Xiuming Peng, et Nanping Wu. 2018. « Isolation and Molecular Characterization of an H5N1 Swine Influenza Virus in China in 2015 ». *Archives of Virology* 163 (3): 701-5. https://doi.org/10.1007/s00705-017-3638-0.
- Wu, Tong, et Charles Perrings. 2018. « The Live Poultry Trade and the Spread of Highly Pathogenic Avian Influenza: Regional Differences between Europe, West Africa, and Southeast Asia ».

- Édité par Shuo Su. *PLOS ONE* 13 (12): e0208197. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208197.
- Yamamoto, Y., K. Nakamura, M. Yamada, et M. Mase. 2010. « Persistence of Avian Influenza Virus (H5N1) in Feathers Detached from Bodies of Infected Domestic Ducks ». *Applied and Environmental Microbiology* 76 (16): 5496-99. https://doi.org/10.1128/AEM.00563-10.
- Yingst, S.L., D.S. Magdi, et S.A. Felt. 2008. « Qinghai-like H5N1 from Domestic Cats, Northern Iraq ». *Emerging Infectious Diseases* 12 (8): 1296-97.
- Zecchin, Bianca, Germaine Minoungou, Alice Fusaro, Sidi Moctar, Anne Ouedraogo Kaboré, Alessia Schivo, Annalisa Salviato, Sabrina Marciano, et I. Monne. 2017. « Influenza A(H9N2) Virus, Burkina Faso ». *Emerging Infectious Diseases* 23 (12): 2118 2119.

Annexe 1 : Classification des systèmes d'aviculture selon la FAO

Secteurs		Systè	me d'aviculture	
(FAO/définition)	Industriel et	Villageois et de basse-		
	intégré Bioséc		écurité	cour
		Élevée	Basse	
	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4
Niveau de biosécurité	Élevé	Moyen à élevé	Bas	Bas
Débouchés commerciaux	Exportation et urbains	Urbains/ruraux	Urbains/ruraux	Urbains/ruraux
Dépendance des intrants au marché	Élevée	Élevée	Élevée	Faible
Dépendance aux bonnes routes	Élevée	Élevée	Élevée	Faible
Implantation	Dans la périphérie des capitales et des grandes villes	Dans la périphérie des capitales et des grandes villes	Villes plus petites et zones rurales	Partout, essentiellement dans des zones éloignées ou enclavées
Volailles élevées	Confinement	Confinement	Claustration au sol/semi-confinement	Essentiellement en plein air
Bâtiment/abri	Fermé	Fermé	Fermé/ouvert	Ouvert
Contact avec d'autres poulets	Aucun	Aucun	Oui	Oui
Contact avec d'autres canards	Aucun	Aucun	Oui	Oui
Contact avec d'autres volailles domestiques	Aucun	Aucun	Oui	Oui
Contact avec la faune sauvage	Aucun	Aucun	Oui	Oui
Soins et conseils vétérinaires	Possède son propre vétérinaire	Paie pour le service	Paie pour le service	Irréguliers, dépendent des services vétérinaires publics
Approvisionnement en médicaments et vaccins	Marché	Marché	Marché	Gouvernement et Marché
Sources d'informations techniques	Multinationales et ses succursales	Vendeurs d'intrants	Vendeurs d'intrants	Services publics de vulgarisation
Sources de financement	Banques et fonds propres	Banques et fonds propres	Banques et canaux privés ²	Fonds propres, programmes d'assistance et banques
Races de volailles	Améliorées	Améliorées	Améliorées	Locales ou indigènes
Niveau de sécurité alimentaire des éleveurs	Élevé	Bon	Bon	Bon à faible

Secteur 1: Industriel et intégré système avec un haut niveau de biosécurité et des oiseaux/produits vendus d'une manière commerciale (p.ex. des fermes qui sont une partie d'une exploitation intégrée de poulets de chair avec des manuels de procédures standards de biosécurité clairement définis et exécutés).

Secteur 2: Système commercial d'aviculture avec un niveau modéré à élevé de biosécurité et des oiseaux/produits habituellement vendus d'une manière commerciale (p.ex. des fermes avec des oiseaux en permanence élevés en confinement; empêchant rigoureusement tout contact avec d'autres volailles ou faune sauvage).

Secteur 3: Système commercial d'aviculture avec un niveau faible à minimal de biosécurité et des oiseaux/produits vendus au niveau des marchés de volailles vivantes (p.ex. une exploitation de pondeuses en cage avec des oiseaux dans des logements ouverts; une ferme avec des oiseaux ayant accès au plein air; une ferme où sont élevés des poulets et des palmipèdes).

Secteur 4: Élevage villageois et de basse-cour avec un niveau minimal de biosécurité et des oiseaux/produits consommés localement.

45

² Usuriers, parents, amis, etc.

Annexe 2: Questionnaire MCDA

On s'intéresse au risque de propagation de l'influenza aviaire à l'échelle du pays. Veuillez sélectionner les facteurs de risques de propagation parmi la liste suivante (en mettant "x" dans les cases) les facteurs ayant, selon vous, une influence sur le risque de propagation :

Densité de volaille	
Proximité d'un élevage moderne	
Proximité des routes principales	
Proximité d'un marché de volaille	
Proximité des points d'eau	

Il s'agit ici de comparer les facteurs cochés ci-dessus 2 à 2.

Veuillez mettre un "x" dans la case choisie pour chacune des relations (il doit donc y avoir un "x" sur chaque ligne pour chaque tableau).

Si vous n'avez pas sélectionné le facteur de risque, ne pas remplir la ligne correspondante, ni le tableau correspondant.

La densité des volailles est:					
	5: beaucoup plus importante que	3: Plus importante que	1: équivalent à	1/3: moins important	1/5: Beaucoup moins important
Proximité d'un élevage moderne					
Proximité des routes principales					
Proximité d'un marché de volaille					
Proximité des points d'eau					

La Proximité d'un élevage moderne est:					
	5: beaucoup plus importante que	3: Plus importante que	1: équivalent à	1/3: moins important	1/5: Beaucoup moins important
Densité des volailles					
Proximité des routes principales					
Proximité d'un marché de volaille					
Proximité des points d'eau					

La Proximité des routes principales est:					
	5: beaucoup plus importante que	3: Plus importante que	1: équivalent à	1/3: moins important	1/5: Beaucoup moins important
Densité des volailles					
Proximité d'un élevage moderne					
Proximité d'un marché de volaille					
Proximité des points d'eau					

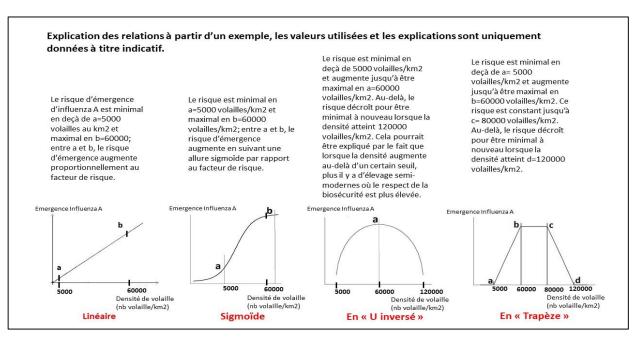
La Proximité d'un marché de volaille est:					
	5: beaucoup plus importante que	3: Plus importante que	1: équivalent à	1/3: moins important	1/5: Beaucoup moins important
Densité des volailles					
Proximité d'un élevage moderne					
Proximité des routes principales					
Proximité des points d'eau					

Veuillez sélectionner l'une des quatre relations proposées ci-dessous. Si vous choisissez "sigmoïde", "en U" ou "en trapèze", estimer une valeur pour "a", "b", "c" ou "d" où a,b, c et d sont définis par la figure ci-dessous.

Ne choisir que l'une des quatres relations proposées pour chaque facteur. Si vous ne savez pas, laisser la ligne sans réponse.

Pour les facteurs "Proximité de", la valeur chiffrée a pour unité le kilomètre ; pour le facteur "Densité de", la valeur chiffrée a pour unité le nb/km2.

Type de relation :	Linéa	aire	Sigm	oïde	En "U" inversé	En "trapèze"
Densité de volaille	a=	b=	a=	b=	a=	a= b= c= d=
Proximité d'un élevage	a=	b=				
commercial			a=	b=	a=	a= b= c= d=
Proximité des routes	a=	b=				
principales			a=	b=	a=	a= b= c= d=
Proximité d'un marché	a=	b=				
de volaille			a=	b=	a=	a= b= c= d=
Proximité des points	a=	b=				
d'eau			a=	b=	a=	a= b= c= d=



Annexe 3 : Exemple d'analyse des résultats des questionnaires MCDA

	Densité de volailles	Proximité d'un élevage moderne	Proximité d'une route principale	Proximité d'un marché de volailles	Proximité d'un point d'eau	Poids
Densité de volailles	1	3	3	0,3	5	0,27
Proximité d'un élevage moderne	0,30	1,00	3	0,3	3	0,16
Proximité d'une route principale	0,30	0,30	1	0,3	3	0,11
Proximité d'un marché de volailles	3,00	3,00	3	1	3	0,39
Proximité d'un point d'eau	0,20	0,30	0,3	0,3	1	0,06
Somme	4,80	7,60	10,30	2,20	15,00	λ _{max} (∑somme *poids) :
Somme*poids	1,31	1,25	1,10	0,86	0,94	5,47
						CR:
						0,10405454

Exemple de remplissage d'une matrice de comparaison. La lecture se fait par ligne : par exemple pour les cellules grisées, la densité de volailles est « plus importante que » (3) que la proximité d'un élevage moderne.

	Densité de volailles	Proximité d'un élevage moderne	Proximité d'une route principale	Proximité d'un marché de volailles	Proximité d'un point d'eau	Poids (moyenne)
Densité de volailles	0,21	0,39	0,29	0,14	0,33	0,27
Proximité d'un élevage moderne	0,06	0,13	0,29	0,14	0,20	0,16
Proximité d'une route principale	0,06	0,04	0,10	0,14	0,20	0,11
Proximité d'un marché de volailles	0,63	0,39	0,29	0,45	0,20	0,39
Proximité d'un point d'eau	0,04	0,04	0,03	0,14	0,07	0,06
Somme	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Matrice normalisée permettant d'obtenir les poids par facteur de risque.

Annexe 4 : Script permettant la standardisation des valeurs entre 0 et 1

library(raster)

setwd("C:/Users/sjouffroy/Documents/R MCDA/MCDA") #repertoire de travail

r =raster("r_vol.tif")

normalisation des valeurs selon une fonction linéaire inverse

Set values for a and b

a <- 0

b <- 1000

$$f1[f1 \le a] \le 0$$

$$f1[f1 > a \& f1 \le b] \le (f1[f1 > a \& f1 \le b]-a)/(b-a)$$

f1[f1 > b] < -1

plot(f1) # vérification graphique

writeRaster(f4,"risque_dens_vol.tif") #exportation du raster

##normalisation des valeurs selon une fonction sigmoïde inversée

Set values for a and b

a <- 0

b <- 20000

$$f2[f2 \le a] \le 1$$

$$f2[f2 > a \& f2 \le b] \le 1/(1 + \exp(5/a*(f2[f2 > a \& f2 \le b] - (b+a)/2)))$$

f2[f2 > b] < 0

plot(f2) # vérification graphique

writeRaster(f2, 'sigm_EM.tif') #exportation du raster

Annexe 5 : Questionnaire utilisé pour la l'analyse SNA

QUESTIONNAIRE
1. Nom du lieu de vente :
2. Nom de la personne qui interview :
3. Numéro de questionnaire (2 premières lettres marché + n° entretien du jour) :
4. Date du jour :/
5. Type de marchand : □ vendeur □ intermédiaire □ braiseur □éleveur
6. Fréquence de vente par semaine sur ce marché sur les 4 dernières semaines :
□ 1 fois par semaine □ 2 à 4 fois par semaine □ Tous les jours
7. Type de volaille vendu sur les 4 dernières semaines :
□ poulet local □ poulet moderne □ pintade □ canard □ pigeon □ autres :
Légende du tableau page suivante :
C : Consommateur ; E : éleveur, Em : Eleveur moderne; Ev Eleveur villageois; I : intermédiaire ; M : Marchand = personne qui vend volailles mais n'élève pas.
p. 1 Numéro de questionnaire : Etude des flux de volailles dans la Commune de Parakou. S. Jouffroy 66.49.65.72

ieu d'achat des volailles village te commune)	Chez qui ? (M, I, Em ou Ev ?) Par intermédiaire ?	Type de volailles	Nombre de volailles achetées	Nombre de volailles vendues, données ou échangées	Destination des volailles (C, E ou M) ?	Lieu de vente (village et commune)
Numéro de questionnai	re : Etuc	de des flux de volailles dan	ns la Commune de Parakou. S. Jo	ouffroy 66.49.65.72		I

7. Avez-vous vendu à un autre marché dans les 4 dernières semaines ?
□Non □Oui : Lequel ?
A quelle fréquence vendez-vous à cet autre marché ?
8. Par quel mode de transport transportez-vous principalement vos volailles pour venir sur ce marché ?
□ Moto □ Taxi-brousse □ Voiture personnelle □ Pied □ Vélo □ Autre :
9. Qu'avez-vous fait des invendus sur les 4 dernières semaines ?
□ Laissés sur place □ Vendus à un autre marché □ Ramenés à la maison □ Autre :
Si les volailles sont déplacées, où ?
10. Est-ce qu'il vous est arrivé d'avoir des volailles mortes les 4 dernières semaines ? :
□ Non □ Oui : □ en venant au marché □ au marché □ sur le retour
Que faites-vous des volailles mortes ?
11. Quelles sont les principales difficultés dans votre commerce :
12. Nom du marchand :
13. Village et commune de résidence :
Commentaires :
p. 3 Numéro de questionnaire : Etude des flux de volailles dans la Commune de Parakou. S. Jouffroy 66.49.65.72

Annexe 6 : Résultats de surveillance de la grippe aviaire du LADISERO depuis janvier 2018

	Lieu de prélèvements	Nombre de privts PCR	Nombre de PCR (+)	Prévalence virologique	Nombre de prlvts serologie	Nombre de sero (+)	seroprévalence
janv-18							
févr-18							
mars-18							
avr-18	Ndali	40	0	0			
mai-18	Tourou	40	0	0			
juin-18	Parakou	40	0	0			
juil-18							
août-18							
sept-18							
oct-18							
nov-18							
déc-18	Parakou	50	11	0,22	25	3	0,12
janv-19	Parakou	50	0	0	25	0	0
févr-19	Parakou	50	0	0	25	0	0
	Parakou	50	18	0,36			
mars-19	Tourou	0			25	1	0,01
avr-19	Parakou	50	0	0	25	0	0
mai-19	Parakou						
juin-19	Parakou						
juil-19	Parakou	35	0	0	25	NA	
août-19	Parakou	35	0	0	25	NA	
sept-19	Parakou	35	0	0	25	NA	
oct-19	Djougou	25	1	NC			
001-19	Parakou	24	24	NC	25	NA	NA
	Parakou	27	16	NC	25	NA	NA
nov-19	Djougou	23	3	NC			
déc-19	Parakou	50	0	0	25	NA	NA
janv-19	Parakou	50	0	0	25	NA	NA

Les cellules sont grisées lorsque les prélèvements n'ont pas été réalisés. Les cellules sur fond jaune sont les prélèvements figurant dans un pool de 5 positifs non encore analysés individuellement. NA : Non Analysé. NC : Non Calculé.

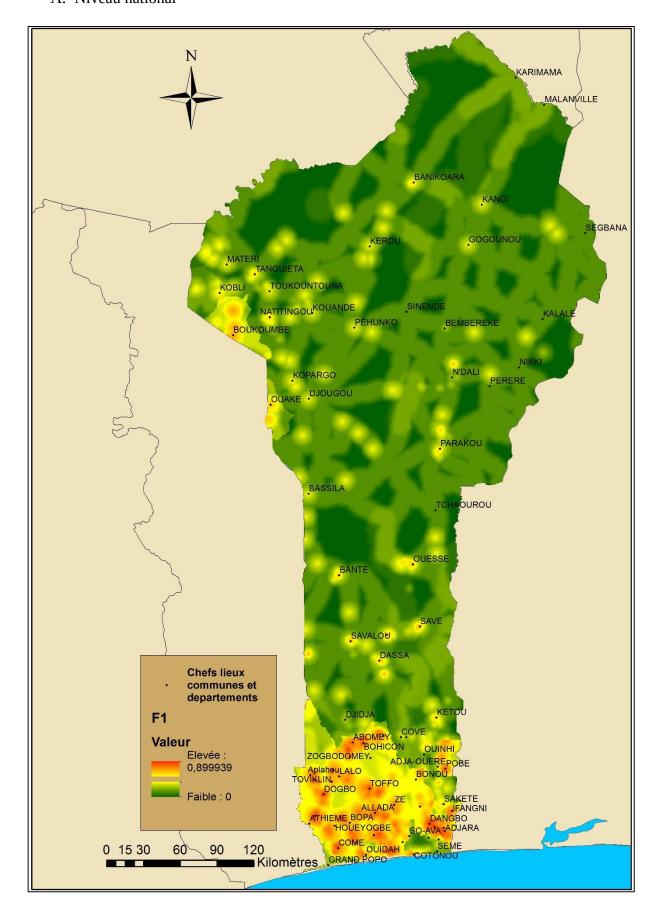
Annexe 7 : Poids moyens des facteurs de risque et Ratio de Cohérence (CR) selon les experts

Expert	Densité de volailles	Proximité des élevages commerciaux	Proximité des routes principales	proximité des marchés de volailles	Proximité des points d'eau	CR
Expert local 1	0,05	0,15	0,24	0,46	0,11	0,16
Expert local 2	0,27	0,05	0,19	0,45	0,05	0,14
Expert local 3	0,15	0,06	0,10	0,24	0,04	0,12
Expert local 4	0,23	0,15	0,07	0,10	0,04	0,14
Expert local 5	0,20	0,20	0,06	0,09	0,03	0,12
Expert local 6	0,27	0,16	0,11	0,39	0,06	0,10
Expert local 7	0,18	0,09	0,32	0,32	0,08	0,03
Expert local 8	0,11	0,11	0,19	0,49	0,11	0,31
Expert local 9	0,19	0,14	0,12	0,29	0,27	0,88
Expert local 10	0,04	0,37	0,10	0,45	0,04	0,52
Expert local 11	0,22	0,15	0,27	0,29	0,06	0,45
Expert international 1	0,45	0,16	0,16	0,16	0,06	0,03
Expert international 2	0,15	0,10	0,17	0,45	0,13	0,06
Expert international 3	0,28	0,28	0,09	0,28	0,09	0,00
Expert international 4	0.24	0.24	0.13	0.30	0.10	0.03
Expert international 5	0.28	0.28	0.12	0.28	0.05	0.04
Expert international 6	0.065	0.38	0.27	0.21	0.077	0,27

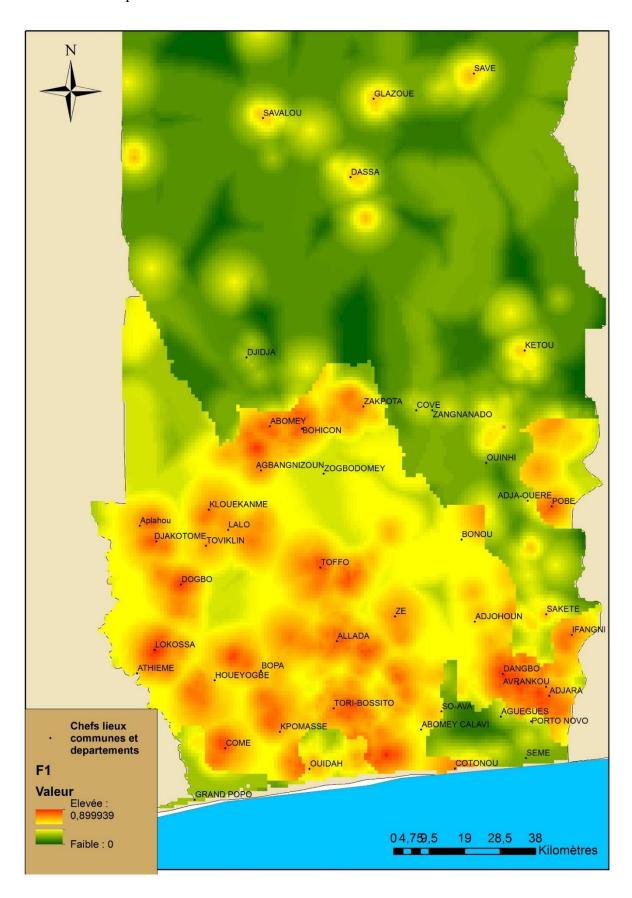
Les experts sur fond vert avaient un ratio de cohérence (CR) inférieur ou égal à 0,1. Les experts sur fond orange avaient un ratio de cohérence compris entre 0,11 et 0,26. Les experts sur fond gris avaient un ratio de cohérence supérieur à 0,26 et leurs poids n'ont pas été pris en compte dans le calcul moyen final des poids.

Annexe 8 : Modèle final avec les villes du Bénin

A. Niveau national



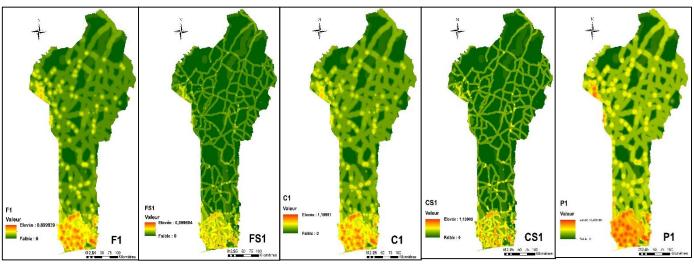
B. Zoom sur la partie méridionale



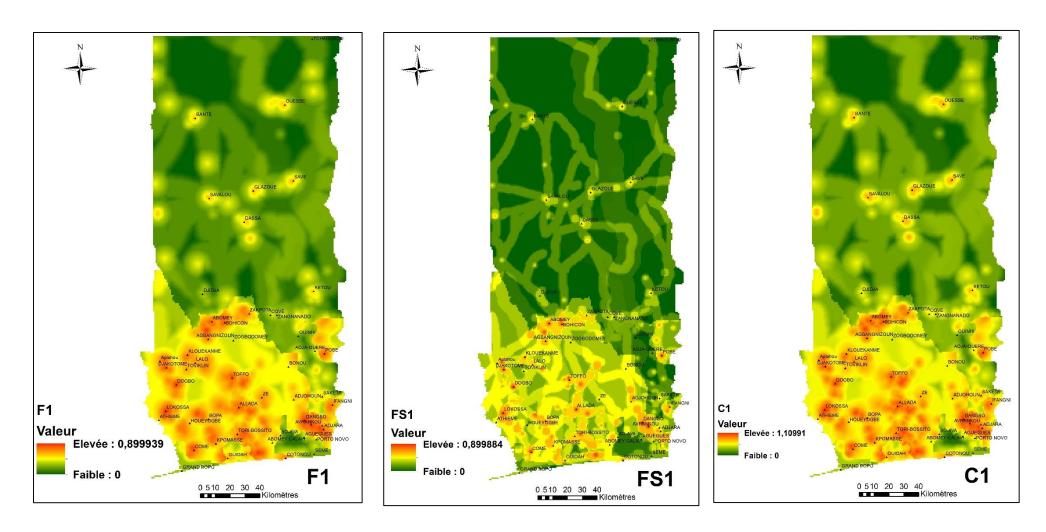
Annexe 9 : Détails des couches obtenues selon différentes méthodes

Modèle	Sources des poids	Détermination des seuils	Densité de volailles traditionnelles	Proximité d'un élevage moderne	Proximité des routes	Proximité de marchés de volailles vivantes	Proximité d'un point d'eau
F1	Cette étude	Cette étude	0,23	0,16	0,15	0,29	0,07
C1	Laurent 2019	Cette étude	0,23	0,29	0,25	0,28	0,06
CS1	Laurent 2019	Laurent 2019	0,23	0,29	0,25	0,28	0,06
P1	Stevens 2009	Cette étude	0,1525		0,1527	0,1527*	0,0413**
FS1	Cette étude	Laurent 2019	0,23	0,16	0,15	0,29	0,07
		Cette étude	Relation sigmoïde A = 100 V/km ² B = 500 V/km ²	Relation linéaire A=0km B=5km	Relation sigmoïde A=5km B=10km	Relation linéaire A=0km B=10km	Relation sigmoïde A=5km B=15km
		Laurent 2019	Relation sigmoïde A=100V/km² B=500 V/km²	Relation sigmoïde A=0,5km B=5km	Relation sigmoïde A=0,5km B=5km	Relation linéaire A=0km B=2,5km	Relation sigmoïde A=0,5km B=15km

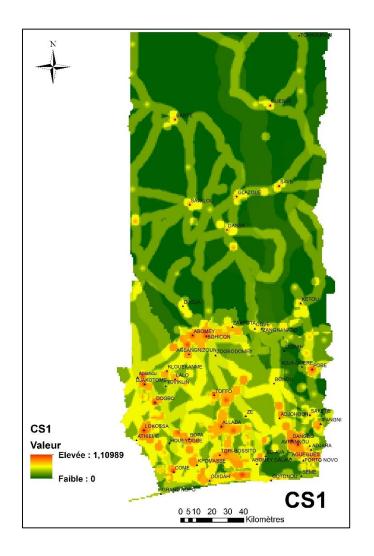
Poids et seuils utilisés pour différents modèles. Dans l'étude de Stevens et al. 2009, la proximité aux élevages modernes n'était pas considérée comme un facteur de risque de propagation de la grippe aviaire. La densité de volailles de distinguait pas volailles traditionnelles et volailles en élevage moderne. *Les villes sont utilisées comme proxy pour la localisation de marchés de volailles vivantes. ** Le poids de la proximité est ici la moyenne entre 2 facteurs considérés différemment dans l'étude : la proximité de l'eau et la proximité des zones inondées.

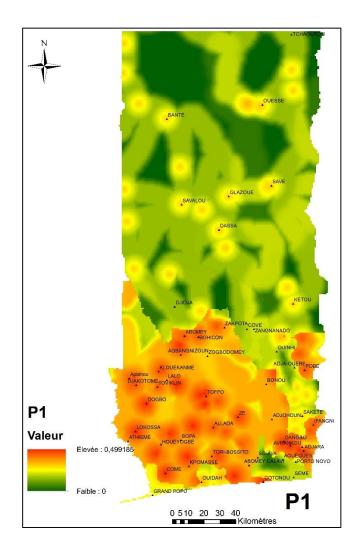


Modèles construits selon les indications dans le tableau. Le modèle final de cette étude est F1. La valeur estimée du risque représentée de façon continue, allant de risque minimal (vert foncé) à risque maximal (rouge).



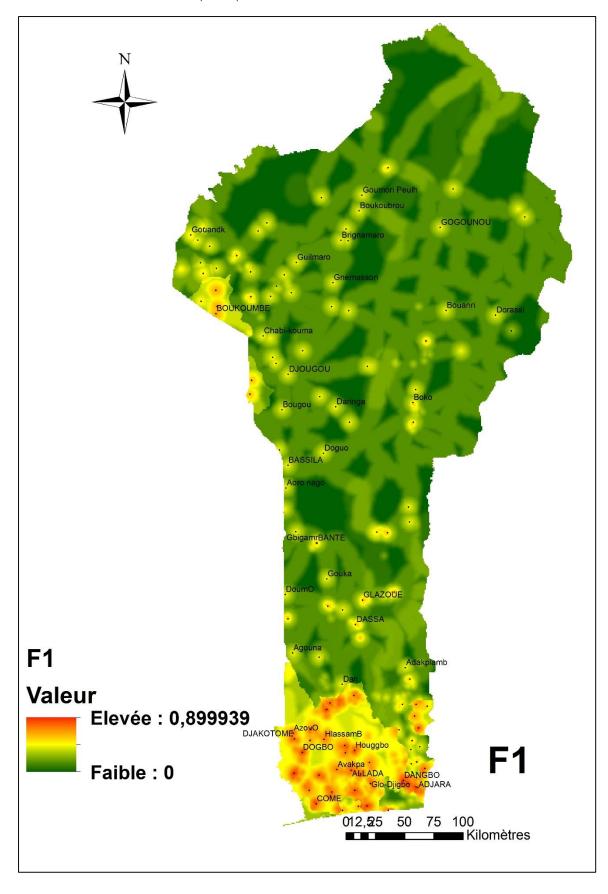
Zoom sur la zone méridionale des modèles précédents, zone concentrant le plus de localisations ressortant à un fort niveau de risque.





Zoom sur la zone méridionale des modèles précédents, zone concentrant le plus de localisations ressortant à un fort niveau de risque (suite et fin).

Annexe 10 : Modèle final avec les principaux marchés de volailles vivantes du Bénin



Annexe 11 : Capacité prédictive des différents modèles MCDA et des facteurs de risque pris individuellement

	AUC (toutes			
Modèle	valeurs)	IC 95%	AUC (H5N1)	IC (95%)
P1	0,6396104	[0,46 ; 0,81]	0,65	[0,44 ; 0,85]
F1	0,5941558	[0,42 ; 0,77]	0,6235294	[0,42 ; 0,83]
C1	0,5844156	[0,41 ; 0,76]	0,6235294	[0,42 ; 0,83]
FS1	0,5827922	[0,41;0,76]	0,5823529	[0,37 ; 0,79]
CS1	0,5422078	[0,36 ; 0,71]	0,5470588	[0,34 ; 0,75]

Valeur de l'AUC des différents modèles et Intervalles de Confiance correspondant.

La capacité prédictive du modèle est évaluée en calculant l'Aire Sous la Courbe (AUC) à partir d'une analyse ROC comme décrit par Paul et al (M. C. Paul et al. 2016). Les données prédictives sont la valeur moyenne du risque, extraite du raster final au niveau des points de récolte des échantillons. Les valeurs observées sont l'absence ou la présence d'influenza A.

FDR	AUC	IC 95%	
Proximité de routes	0,863636364	[0,74 ; 0,99]	
Proximité d'eau	0,761363636	[0,60 ; 0,92]	
Densité de volailles	0,737012987	[0,57 ; 0,90]	
Proximité d'élevage commerciaux	0,599025974	[0,42 ; 0,78]	
Proximité de marchés de volailles	0,579545455	[0,40 ; 0,76]	

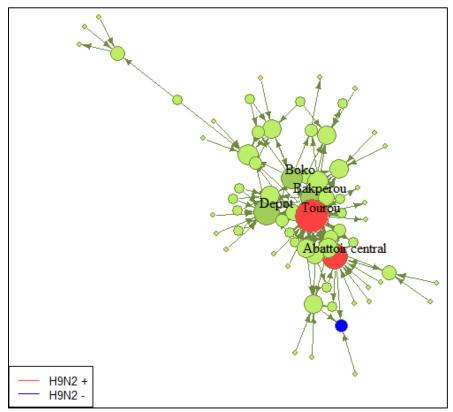
Valeur de l'AUC des différents facteurs de risque et Intervalles de Confiance correspondant.

La capacité prédictive du facteur de risque est évaluée en calculant l'Aire Sous la Courbe (AUC) à partir d'une analyse ROC comme décrit par Paul et al (M. C. Paul et al. 2016). Les données prédictives sont la valeur moyenne du risque, extraite du raster du facteur de risque correspondant, établi avec les seuils de risque utilisés pour cette étude, au niveau des points de récolte des échantillons. Les valeurs observées sont l'absence ou la présence d'influenza A.

Annexe 12 : Caractéristiques des points de vente de volaille de la commune de Parakou

Nom	Туре	Localisation (commune et GPS)	Jours ouverture	Animaux vendus	Condition de gardes animaux	Vendeurs : genre	Vendeurs : éleveurs ? Marchands ?	Résultats IA
Dépôt	Marché	Parakou	Tlj	Volailles, viande ruminants non abattus sur place	Cages en fer	Femmes	Marchands	Non testé
Zongo	Marché	Parakou	Tlj	Volailles, viande ruminants abattus sur place	Cages en fer et bois ou en liberté dans marché	Femme et hommes	Marchands, un « éleveur »= poules vaquent dans marché et ont des poussins	Non testé
Guéma	Marché	Parakou	Tlj	Volaille, viande de ruminants	Cages en fer et bois	Hommes	marchands	Non testé
Marché central	Marché	Parakou	Tlj	Volailles	Cages tissées	Femmes	marchands	Non testé
Abattoir central	Marché	Parakou	Tlj	Volailles (canards, pigeons, poulets, pintades); petits ruminants	Cages permanentes	Hommes	marchands	+
Rose Croix	Marché	Parakou	Tlj	Pas de volailles, vente d'animaux séchés pour médecine « traditionnelle »	NA	NA	NA	NA
Tourou	Marché	Parakou	Dim	Volaille, ruminants (séparés)	Pas de cage, bord de route	Hommes plus que femmes	Marchands intermédiaires	+
Bira	Braiseur	Parakou	Tlj	Poulets tués sur place	Pas de cage	Hommes	Marchands	Non testé
Camp Adagbé	Braiseur	Parakou	Tlj	Poulets tués sur place	Pas de cage	Hommes	Marchands	Non testé

Annexe 13 : Réseau du flux commercial de volailles analysé par une méthode de SNA

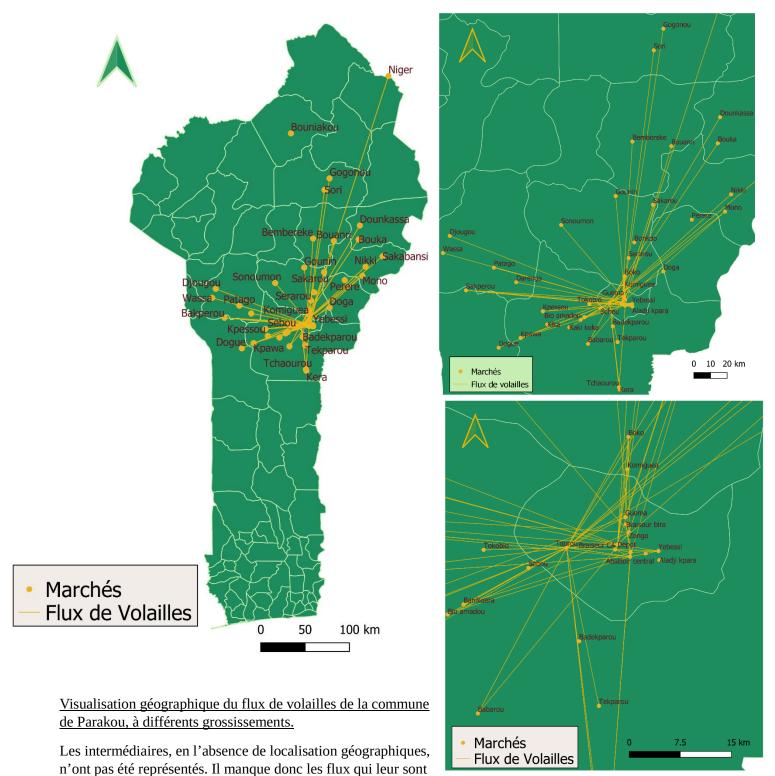


Réseau du flux de volailles de la commune de Parakou, représenté ici sans poids.

Les nœuds représentent un marchand de volailles, donc soit un intermédiaire soit un vendeur, possédant un lieu de vente fixe. La taille des nœuds est proportionnelle à leur degré de centralité. Les marchés en rouge sont les lieux dans lesquels des prélèvements H9N2 ont été positifs. Le marché en bleu a été la source de prélèvements négatifs.

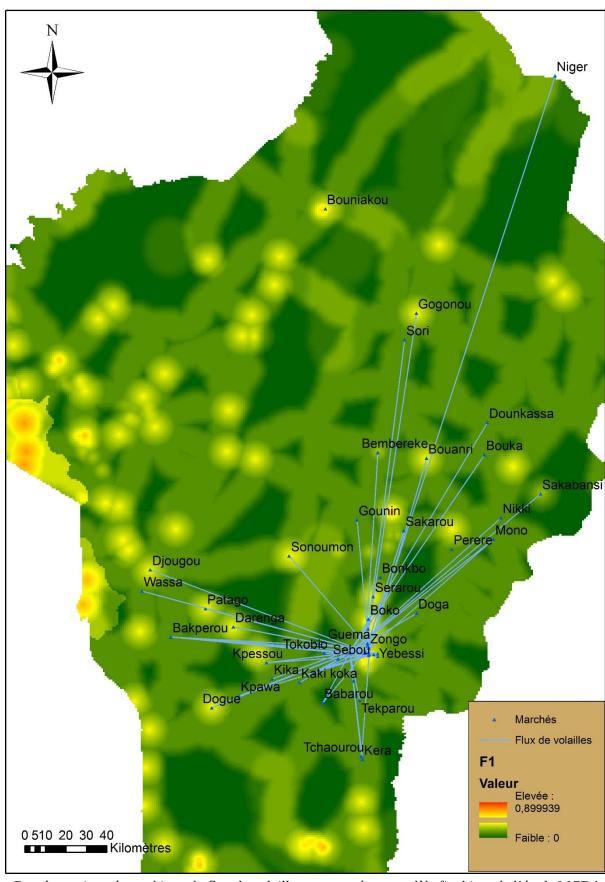
Elément de mesure	Lieu	Valeur
Taille		69
Densité		0,03108591
Clustering coefficient		0,1144219
In degree	Tourou	26
	Depot	20
	Abattoir central	18
	Guema	9
Out degree	Tourou	34
	Boko	9
	Bakperou	7
	Bio Amadou	7
Strength (in)	Abattoir central	1591
	Depot	819
	Braiseur Camp Adagbe	665
	Guema	400
Strength (out)	Tourou	606
	Intermédiaire 8	420
	Teou Kpara	386
	Abattoir central	350

Valeurs mesurées dans le réseau construit à partir des données du questionnaire. Strength mesure le nombre moyen de volailles entrant et sortant chez un marchand par semaine. Les flux sortant sont représentés sur le graphique seulement en cas de flux sortant pour la vente, et non pour la consommation.



liés, et les flux sont représentés sans direction. La présente carte permet principalement d'appréhender la portée géographique du réseau commercial de volailles de la commune.

Annexe 14 : Complémentarité des méthodes MCDA et SNA



Représentation géographique du flux de volailles superposée au modèle final issu de l'étude MCDA.

Nom: Jouffroy <u>Prénom:</u> Sophie

Titre : Surveillance de l'Influenza A au Bénin

Résumé: Certains virus à influenza A, à réservoir aviaire et potentiellement zoonotiques, sont fortement surveillés, de par les impacts socio-économiques et sanitaires majeurs pouvant survenir en cas d'introduction ou de propagation de souches hautement pathogènes ou de certaines souches faiblement pathogènes dans les élevages aviaires. La présente étude vise à cartographier les zones à risque de propagation de l'influenza A au Bénin, afin de proposer un outil de surveillance basée sur le risque. L'optimisation des frais liés à la surveillance d'une maladie avec un fort potentiel d'impact économique est particulièrement intéressante dans ce pays, visant notamment à augmenter sa production de volailles pour satisfaire la demande intérieure. Cette étude est réalisée en partenariat avec le Laboratoire de Diagnostic Vétérinaire et de Sérosurveillance Vétérinaire (LADISERO) de Parakou, et se veut le reflet et la continuité de l'étude similaire réalisée au Togo en 2019. Ces études permettent de comparer les données de 2 pays voisins, et ainsi d'avoir une vision plus globale du risque de propagation de l'influenza A en Afrique de l'Ouest. La carte du risque de propagation de l'influenza A obtenue est le reflet d'avis d'experts locaux et internationaux, recueillis selon la méthode de Multi-Criteria Decision Analysis. Elle propose un modèle robuste au niveau national, voué à être affiné selon la disponibilité des données de surveillance, et soulignant l'importance des marchés de volailles vivantes et de la densité de volailles traditionnelles à dire d'experts. Une analyse de réseau des flux de volailles dans la commune de Parakou a permis de souligner localement la prépondérance des marchés Abattoir central et Tourou dans le commerce de volailles au sein de la commune, ainsi que le rôle des marchés de Boko, Bakperou et Bio Amadou comme sources d'approvisonnement. Ces marchés concentrant une part importante du commerce constituent des cibles de surveillance et d'intervention importante. La comparaison des études béninoises et togolaises montre que les données sont transposables entre pays avec des filières avicoles similaires, permettant ainsi d'élaborer une carte de risque comme base de travail avec les experts locaux.

Mots clés: Influenza A – Bénin – MCDA – Modélisation spatiale – SNA – H9N2

<u>Title:</u> Influenza A Surveillance in Benin

Abstract: Influenza A viruses have an avian reservoir but a zoonotic potential, and are highly monitored, due to the socio-economic and health impacts imputable to introduction or dissemination of highly pathogenic or certain low pathogenic strains within domestic poultry. The present study aims to map the risk of dissemination of Influenza A in Benin, therefore proposing a tool to implement risk-based surveillance. Cost optimization of surveillance of a disease with a high economic impact potential is particularly interesting in this country aiming to increase its poultry production to meet domestic consumption levels. This study is carried out in collaboration with the Laboratoire d'Analyses et de Sérosurveillance Vétérinaire (LADISERO) of Parakou, and reflects as well as completes a similar analysis conducted in Togo in 2019. These studies enable the comparison of 2 neighboring countries, hence giving a more global vision of Influenza A dissemination risk in West Africa. Mapping of the propagation risk was done based on local and international expert opinion using Multi Criteria Decision Analysis. It offers a robust model at the country level that highlights the importance of Live Bird Markets as well as the density of traditional poultry in the circulation of the virus. The model is meant to evolve with new surveillance data. A network analysis of poultry commercialization in the city of Parakou underlined the importance of the Abattoir central and Tourou markets within the trading system, as well as the importance of the Boko, Bakperou and Bio Amadou markets as sources for poultry. These markets act as hubs, and are interesting surveillance and biosecurity measures implementation targets. Comparing the studies carried out in Togo and Benin shows that data is transposable from one country to another, given they have similar poultry raising and commercialization means. The data gathered and analyzed in these studies could therefore be used in other countries to produce a map, that would then be discussed and improved with local experts.

Key words: Influenza A – Benin – MCDA – Spatial modelling – SNA – H9N2