



École Nationale Vétérinaire d'Alfort

MASTER 2EME ANNEE

Santé publique Paris Sud-Saclay et Santé UPEC

Dominante

**SURVEILLANCE EPIDEMIOLOGIQUE DES MALADIES HUMAINES
ET ANIMALES**

RAPPORT DE STAGE

**Evaluation des caractéristiques du réseau de mouvements
de canards de la filière « foie gras » avant les épizooties
d'influenza aviaire hautement pathogène (IAHP) en France**

Présenté par

Thibault SEGONZAC

Réalisé sous la direction de : Axelle SCOIZEC et Mathieu ANDRAUD

Organisme et pays : Unité EBEAC, ANSES Laboratoire de Ploufragan-Plouzané (France)

Période du stage : 15 janvier- 29 juin 2018

Date de soutenance : 25 juin 2018

Année universitaire 2017-2018

Remerciements

À mes maîtres de stage Axelle Scoizec et Mathieu Andraud

Je tiens à les remercier très chaleureusement pour leur disponibilité, leur patience et leur pédagogie. Puissent ces quelques mots exprimer toute ma gratitude.

À l'ensemble de l'unité EBEAC du laboratoire de l'Anses Ploufragan

Je remercie tout particulièrement Sophie Le Bouquin, Morgane Salines, Virginie Allain et Virginie Lecaer pour leur aide dans mon travail.

Au comité pédagogique du Master SEMHA

Mes remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du master SEMHA pour leur pédagogie et leur encadrement.

À toutes les personnes ayant contribué à cette étude

Je tiens à remercier l'ensemble des groupements et la société de transport d'animaux ayant accepté de fournir des données et de répondre à mes questions.

À mes camarades de Master

Je remercie enfin tous mes camarades de Master pour cette expérience de vie incroyable.

Table des matières

Evaluation des caractéristiques du réseau de mouvements de canards de la filière « foie gras » avant les épizooties d'influenza aviaire hautement pathogène (IAHP) en France	1
Résumé court	6
Résumé long.....	7
Explication du travail réalisé en stage	11
Evaluation des caractéristiques du réseau de mouvements de canards de la filière « foie gras » avant les épizooties d'influenza aviaire hautement pathogène (IAHP) en France	12
I-Introduction.....	13
II-Matériel et méthodes.....	14
2.1. Données collectées	14
2.1.1. Description de la filière	14
2.1.2. Description de la base de données	14
2.1.3. Nettoyage des données.....	15
2.2. Réseaux sociaux et analyses statistiques.....	15
2.2.1. Conception.....	15
2.2.2. Indicateurs descriptifs du réseau.....	16
III-Résultats.....	16
3.1. Caractéristiques des groupements.....	16
3.2. Description du réseau.....	18
3.2.1. Cartographie du réseau entier.....	18
3.2.2. Indicateurs descriptifs du réseau.....	19
3.2.3. Communautés	21
3.2.4. Chaines de contact.....	22
IV-Discussion.....	23
V-Conclusion	25
Bibliographie.....	26

Liste des Figures

Figure 1. Schéma d'organisation de la filière « foie gras »	14
Figure 2. Modèles de réseaux de mouvements de canards utilisés	16
Figure 3. Caractéristiques de fonctionnement de la filière « foie gras » en France entre novembre 2014 et mai 2016 par groupements (Age de départ des canards PAG en gavage, taille de lot PAG, taille de lot gavage)	18
Figure 4. Cartographie du réseau de mouvement de canards PAG en gavage sur l'année 2015 selon le modèle utilisé : modèle Tournée (a) et modèle Déchargement (b). Taille d'un nœud proportionnelle à son degré total sur la période.	19
Figure 5. Distribution des degrés par type d'activité tous groupements confondus pour l'année 2015 (D). G : site d'activité de gavage exclusive (n=284) ; P : site d'activité d'élevage de PAG exclusive (n=287) ; GP : site d'activité mixte (n=68) ; In-degré : nombre de liens entrant ; out-degré : nombre de liens sortant ; Degré total : nombre de liens adjacents à un nœud.....	21
Figure 6. Cartographie des plus grandes communautés du réseau de mouvements de canards en France (Modèle Déchargement) selon la période étudiée. Taille d'un nœud proportionnelle à son degré total sur la période.	22
Figure 7. Distribution des chaînes de contacts des sites d'élevage de canards en France par groupement durant l'année 2015 (modèle Déchargement). ICC : ingoing contacts chain, OCC : outgoing contacts chain, Gp : Groupement.....	22
Figure 8. Longueur des chaînes de contacts entrants (ICC) durant l'année 2015 (modèle Tournée) par groupement et par type d'activité. ICC : ingoing contacts chain, G : gaveur, P : éleveur de canards PAG, GP: activité mixte. Points rouges : valeurs correspondantes aux sites foyers IAHP de 2015-2016.....	23

Liste des Tableaux

Tableau 1. Nombre et proportion d'établissements par type d'activité, de canards transportés et de mouvements par groupement en 2015	17
Tableau 2. Indicateurs descriptifs (taille, degré, distances, densité) du réseau de mouvements de canards selon le type de modèle utilisé par groupement de novembre 2014 à avril 2016 inclus. T : tournée ;D : Déchargement.	20
Tableau 3. Indicateurs de connexion du réseau de mouvement de canards en France selon le type de modèle utilisé (T : Tournée, D : Déchargement) par groupement (Gp1, Gp2, Gp3, Gp4) sur l'année 2015.....	21
Tableau 4. Composition du réseau de mouvements de canards par groupement par modèle utilisé pour l'année 2015. T : tournée ; D : Déchargement ;.....	23

Résumé court

La première épizootie d'influenza aviaire hautement pathogène (IAHP) de sous-type H5 a particulièrement sinistré la filière « foie gras » dans le sud-ouest de la France. Sur certaines zones, plus de 50% des élevages ont été touchés durant l'hiver 2015-2016. L'importance des mouvements dans ce secteur de production particulier et les conséquences dramatiques de cette épizootie ont soulevé la question de la contribution des mouvements d'animaux dans la diffusion de l'IAHP. Les données collectées s'étendent de novembre 2014 à mai 2016, c'est-à-dire avant la création d'une base de données nationale avicole par les professionnels. Les informations fournies proviennent de groupements de producteurs et de sociétés de transport d'animaux. L'objectif est ainsi de décrire le réseau de mouvements de canards de la filière « foie gras » avant et pendant la première épizootie d'IAHP en France par une analyse de réseaux sociaux. Deux modèles de réseau de mouvement adaptés à la transmission directe (modèle Déchargement) et également indirecte (modèle Tournée) d'agents pathogènes ont été conçus. Le réseau de mouvements de canards dans la filière « foie gras » en France entre novembre 2014 et mai 2016 est caractérisé par des communautés restreintes géographiquement mais perméables. Des échanges existent entre communautés et notamment au sein d'un même bassin de production. La prise en compte des contacts indirects dans le modèle Tournée est associée à une augmentation des indicateurs de centralité, de cohésion et de connexion du réseau de mouvements de canards. L'analyse de la distribution de degrés met en évidence l'importance des sites d'activité mixte (qui associent élevage et gavage). Ces sites mettent en lien les différents types de production. Par les tournées, certains peuvent être également considérés comme des établissements de haute centralité. La prise en compte des contacts indirects influence considérablement la longueur des chaînes de contacts. 75% des sites du réseau d'échange d'un groupement peuvent être en lien épidémiologique en un an. Ces résultats mettent en lumière une certaine vulnérabilité de cette filière quant au risque d'introduction et de dissémination de l'IAHP. La structure du réseau de mouvement de canards de la filière « foie gras » mériterait d'être davantage explorée. L'analyse de réseaux contribue par ailleurs à l'évolution de la surveillance épidémiologique de l'IAHP dans cette filière.

Mots-clés : mouvements d'animaux, analyse de réseaux sociaux, canard, filière « foie-gras », virus influenza aviaire hautement pathogène.

Résumé long

Introduction

Les maladies infectieuses telles que l'Influenza Aviaire (IA) ont des conséquences sanitaires et socio-économiques redoutables. Les épisodes successifs d'épizootie d'Influenza Aviaire Hautement Pathogène (IAHP) entre 2015 et 2017 en France en sont des exemples frappants. Elles peuvent également impacter la santé Humaine.

Des études ont montré le rôle joué par l'avifaune sauvage, et en particulier les palmipèdes sauvages, dans la circulation à longue distance des virus influenza aviaire. Ils se transmettent aussi d'exploitations en exploitations à travers l'échange d'animaux suite à l'introduction d'animaux infectés (voie la plus à risque), par une contamination indirecte (vecteurs mécaniques notamment) et potentiellement par voie aéroportée. Ainsi la diffusion d'une maladie est intimement liée au réseau de contacts entre les différents sites de production.

Les mouvements d'animaux sont de plus en plus étudiés via des méthodes d'analyse des réseaux sociaux (Social Network Analysis : SNA). L'analyse des réseaux sociaux est initialement une application à la sociologie de la théorie mathématique des graphes. Un réseau social est constitué d'entités appelées nœuds connectées entre elles par des liens qui représentent des relations. Dans le cadre de l'étude des mouvements commerciaux d'animaux, les nœuds correspondent aux exploitations et abattoirs. Un sens est souvent donné aux liens (par exemple en cas de mouvement de d'animaux de l'élevage A vers l'élevage B). Le réseau ainsi obtenu tient donc compte de l'orientation des liens (chargements, déchargement) ; il est alors qualifié de réseau dirigé ou orienté. Les liens peuvent être considérés comme des objets binaires (présence ou absence de lien) ou se voir attribuer une pondération (nombre d'animaux vendus à l'élevage B par l'élevage A par exemple). Les mouvements d'animaux ont déjà été étudiés dans plusieurs pays pour différentes espèces domestiques. Les analyses de réseaux de mouvements d'animaux peuvent également permettre de modéliser les contacts directs et indirects entre fermes. Ainsi plusieurs réseaux de mouvements des porcs en France ont été conçus à l'échelle nationale aboutissant à deux réseaux distincts en relation avec différentes voies de transmission de pathogènes (exclusivement directe ou également indirecte). L'analyse de réseaux de mouvements d'animaux peut également servir à cibler la surveillance de certaines maladies. Les nombreuses études menées en Asie sur le réseau des marchés d'animaux vivants ont permis d'explorer le rôle de ces marchés dans la diffusion d'IAHP à H5N1 permettant ainsi aux autorités de cibler la surveillance de l'IAHP aux endroits les plus sensibles.

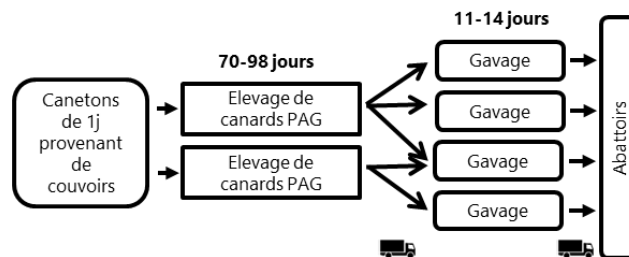
Le profil type de l'élevage foyer lors de l'épidémie d'IAHP 2015-2016 était celui d'un élevage comprenant au moins un atelier de palmipèdes gras. De plus, ces foyers étaient en lien épidémiologique avec de nombreux autres élevages de volailles principalement par des mouvements de palmipèdes. Les mouvements au sein de la filière canards gras semblent jouer un rôle primordial dans la diffusion de l'IAHP. Ce travail porte sur les mouvements au sein de la filière volaille d'élevage et en particulier sur les canards gras. En l'absence d'enregistrement de données à l'échelle nationale, les données ont dû être collectées rétrospectivement auprès de groupements de producteurs de la filière « foie gras ». Les données de cette étude concernent les régions Bretagne, Pays de Loire, Nouvelle Aquitaine et Occitanie, ces deux dernières ayant été particulièrement touchées par l'IAHP entre 2015 et 2017. La période d'étude s'étend de novembre 2014 à mai 2016 c'est-à-dire avant et pendant la première crise d'Influenza Aviaire Hautement Pathogène en France.

L'objectif de ce travail est de décrire le fonctionnement de la filière de production de canards gras et de décrire la topologie de son réseau avant et pendant le début de la première épizootie d'IAHP en associant l'épidémiologie à l'analyse des réseaux sociaux. Ceci en vue de participer à une meilleure compréhension des mécanismes de transmission et de diffusion de l'influenza aviaire.

Matériel et méthodes

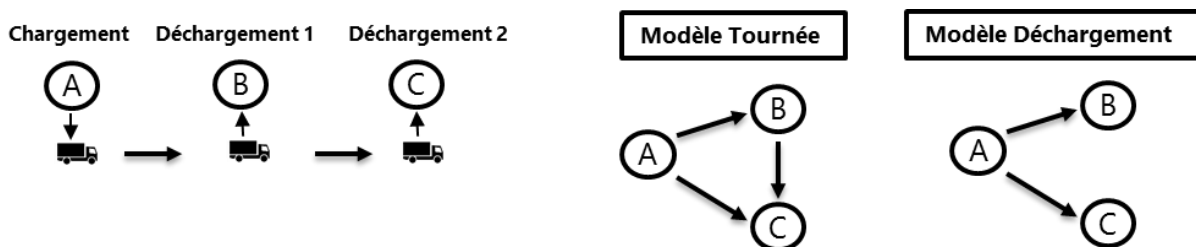
La compréhension du fonctionnement général de la filière « foie gras » intégrée est essentielle pour pouvoir ensuite décrire le réseau de mouvements au sein de celle-ci. Cette étude concerne les mouvements des établissements élevant des canards prêt-à-gaver dit canards « PAG » vers d'autres

établissements spécialisés dans le gavage de ces canards. L'élevage de canards PAG dure généralement 77 à 91 jours. Le gavage quant à lui dure 11 à 14 jours. En filière intégrée, la taille des lots de canards PAG dépassant la capacité des salles de gavage, un même lot est envoyé dans plusieurs salles de gavage différentes. Cette étude concerne essentiellement ce type de mouvements. Le schéma suivant résume le fonctionnement de cette filière.



Les données de cette étude ont été fournies par 4 groupements de producteurs de foie gras et par une société de transport d'animaux. Avant mai 2016 et la création d'une base de données nationale avicole par les professionnels (BD avicole), aucune centralisation des données n'existait. Une collecte de données a donc été réalisée directement auprès de la filière. Pour chaque groupement, une base de données a été créée reprenant le descriptif des différents établissements ainsi que l'historique des mouvements de la période d'intérêt. Face à l'hétérogénéité des données reçues, un travail important de nettoyage et de mise en forme des données spécifique à chaque groupement a été réalisé.

Sur ces bases de données harmonisées, un travail de modélisation des mouvements de canards a été réalisé à l'aide du logiciel R. Pour chaque groupement, des réseaux dirigés ont été conçus. Deux types de modèles ont été utilisés : Déchargement (D) et Tournée (T). En filière intégrée, un seul véhicule peut charger plusieurs lots d'animaux provenant de différents établissements éleveurs de canards PAG et décharger ces lots à plusieurs endroits différents (établissements spécialisés dans le gavage). Le modèle Déchargement ne tient compte que des liens directs entre les établissements c'est-à-dire le transfert d'un site d'origine vers un site destinataire. Le modèle Tournée permet de répertorier tous les liens possibles (directs et indirects) entre les différents sites liés aux mouvements de canards. Le schéma suivant résume l'approche de modélisation utilisée.



L'unité de travail choisie est le site d'élevage par commune. Un établissement peut en effet avoir plusieurs sites d'élevage répartis sur une ou plusieurs communes. Les nœuds représentent donc les sites d'élevage et les mouvements entre chaque site représentent les liens.

Résultats et discussion

Deux groupements sont localisés dans le bassin de production du grand-ouest de la France (Bretagne, Pays de Loire) ; les deux autres sont localisés dans le bassin de production du sud-ouest (Nouvelle Aquitaine, Occitanie). Les groupements diffèrent par leur volume de production, leur taille (nombre de sites et de liens), et leur taille de lot de canards PAG. 3 groupement sont composés d'environ 200 sites, un groupement est de taille inférieure avec un peu plus de 100 sites. En revanche, ils ont des caractéristiques comparables concernant l'âge de départ des canards PAG en gavage, la taille des lots de gavage (médianes proches de 1100 animaux en moyenne) et la distance séparant deux sites par mouvements (médiane proche de 50km).

Deux périodes d'études sont considérées : l'année et le quadrimestre. 4 mois est un intervalle de temps qui correspond à la durée entre l'entrée de deux lots de PAG successifs dans un atelier. Etudier le réseau de mouvements de canards par quadrimestre permet d'assurer au moins un envoi de lot de canards en gavage par site ayant une activité PAG sur cette période.

Le réseau global de mouvements est présenté sur une carte de France pour l'année 2015 par modèle utilisé, en sachant que tous les élevages n'ont pu être géo-localisés. Le réseau est orienté (les liens ont une direction). 3 groupements sont inclus dans le modèle T ; 4 dans le modèle D. Le réseau de mouvements de chaque groupement est restreint géographiquement. Toutefois, des connexions existent entre les bassins de production, entre les groupements et avec d'autres groupements non identifiés.

L'analyse de réseau a montré qu'en prenant en compte à la fois les liens directs et indirects, le nombre de liens entrants et sortants d'un site d'élevage était multiplié par 1,5 par rapport au modèle ne prenant en compte que les liens directs. La structure du réseau de mouvements n'est pas clairement établie. L'analyse de cette structure a permis de montrer la présence de nœuds (sites d'activité mixte : élevage de PAG et gavage) pouvant présenter un risque particulier de diffusions de l'IAHP.

Les **communautés** représentent des groupes de nœuds particulièrement connectés entre eux. Dans ce réseau, elles sont globalement restreintes géographiquement. Elles sont cependant perméables. Des liens existent entre les différents bassins de production. Au sein du bassin de production du grand-ouest, les liens entre groupements sont particulièrement importants.

Enfin, les **chaînes de contacts entrants** (Ingoing Contact Chains : ICC) et **sortants** (Outgoing Contact Chains : OCC) ont principalement été étudiées sur l'année 2015. Elles correspondent à la séquence de contacts directs et indirects en tenant compte de la chronologie des contacts sur une période donnée c'est-à-dire pour chaque site d'élevage donné, le nombre de sites en amont (ICC) et en aval (OCC) via les mouvements. La longueur des chaînes de contact diffère également d'un modèle à l'autre. Via le modèle Tournée quasiment tous les sites d'un groupement sont en lien épidémiologique au terme de l'année 2015 quel que soit le type d'activité exercée par le site. La longueur des chaînes de contact est toutefois supérieure pour les sites dont l'activité identifiée est le gavage. 10 sites ont été identifiés comme ayant atteints par la première crise sanitaire d'influenza aviaire. Au regard de leur longueur de chaînes de contact, ces sites ne semblent pas différer de l'ensemble du réseau.

En conclusion, cette étude présente deux modèles de réseaux de mouvements adaptés aux voies de transmission de l'agent pathogène d'intérêt et en particulier un modèle Tournée qui tient compte des liens indirects. Les liens des tournées peuvent pourtant augmenter le risque de diffusion d'un agent pathogène très contagieux comme l'IAHP.

Cette étude a également le mérite de participer à la compréhension du fonctionnement de la filière « foie gras » française avant la première épizootie d'IAHP. Ce secteur de production est assez peu représenté ailleurs dans le monde et peu de publications y sont consacrées. Cette étude souffre d'une source de données incomplète et mériterait d'être envisagée à l'échelle nationale sur une période d'étude plus longue. La mise en place d'une base de données nationale avicole (BD avicole) depuis mai 2016 pourrait le permettre. Toutefois la prise en compte des liens indirects par les tournées nécessite l'appui de sociétés de transports d'animaux.

Le fait d'avoir pu comparer quelques sites foyers d'IAHP 2015-2016 à l'ensemble du réseau est un point d'intérêt supplémentaire. Cet échantillon de sites infectés est mince mais l'impression que ces sites ne présentent pas de caractéristiques différentes de l'ensemble du réseau semble se dégager. Par ailleurs, l'étude des chaînes de contact en lien de sites infectés pourrait s'avérer utile dans le cadre d'enquêtes épidémiologiques en cas de foyer d'IAHP. Cela pourrait permettre d'identifier des chaînes d'infection et ainsi aider à déterminer les modalités d'introduction et de diffusion du pathogène.

Finalement, les canards sont capables de porter aussi bien un virus influenza faiblement pathogène (IAFP) qu'un IAHP sans présenter de signes cliniques. Ils peuvent porter des charges virales importantes sans signes précoces. Leur capacité à survivre à l'infection peut également augmenter le délai de détection et ainsi la quantité de sites infectés par l'IA. En outre, le profil type de l'élevage foyer d'influenza aviaire français de 2015-2016 était bien celui d'un élevage comprenant au moins un atelier de palmipèdes gras associé à un autre atelier de galliformes dans 20% des cas lors de

l'épizootie 2015-2016. Associé à cela le fait que l'élevage de palmipèdes gras nécessite le plus souvent un passage sur parcours et par conséquent un risque d'exposition à l'avifaune sauvage. Cela rend cette filière particulièrement vulnérable vis-à-vis du risque d'introduction et de dissémination de l'IAHP. Les liens épidémiologiques par les tournées, la densité de liens par groupement, l'interconnexion de ces derniers et la présence de sites ayant une activité mixte reliant ainsi différents acteurs, sont autant d'éléments qui accentuent la vulnérabilité de la filière « foie gras ».

Conclusion

Entre novembre 2014 et mai 2016, Le réseau français de mouvements de canards de la filière « foie gras » est caractérisé par des communautés restreintes géographiquement mais interconnectées et par de longues chaînes de contact notamment en tenant compte des contacts indirects par les tournées. La présence d'établissements de haute centralité engendre un risque accru de dissémination de virus IAHP. La structure du réseau, la capacité des canards à ne pas développer de signes cliniques, mais aussi les caractéristiques propres à cette filière (élevage sur parcours, importance des mouvements de lots en gavage) témoignent d'une vulnérabilité de ce secteur de production quant aux virus IAHP. L'influence de la structure de ce réseau sur le risque de dissémination de l'influenza aviaire hautement pathogène doit être davantage explorée en modélisation. Il serait également intéressant de réaliser le même type d'analyse sur les mouvements d'animaux en filière reproduction des canards, ou encore d'explorer les liens par tournées d'équarrissage entre les élevages de volaille. L'analyse de réseaux de mouvements de canards contribue à faire évoluer la surveillance basée sur le risque de l'IAHP dans la filière « foie gras ».

Explication du travail réalisé en stage

Le stage a été réalisé intégralement au sein de l'unité EBEAC (Epidémiologie et Bien Etre en Aviculture) du laboratoire de L'ANSES Ploufragan/Plouzané (22) dirigée par Sophie Le Bouquin Leneveu.

Le stage s'est déroulé en plusieurs étapes.

Période d'adaptation révolue et après avoir rencontré les membres de l'unité EBEAC, les premiers temps du stage ont été consacrés à une étude bibliographique concernant la filière « foie gras », l'influenza aviaire et l'analyse de réseaux sociaux. Une première version de synthèse bibliographique a été réalisée parallèlement. Un premier contact avec les données fournies par les groupements a été effectué.

La majeure partie du stage a consisté à nettoyer et mettre en forme les données fournies à l'aide des logiciels suivants : R, Excel et Adobe Pro. L'hétérogénéité des données fournies a conduit à effectuer un travail spécifique pour chaque source de données. Cette étape a été très majoritairement réalisée avec le logiciel R. Il a donc été question de se familiariser avec la programmation très majoritairement avec le logiciel afin d'obtenir des données exploitables. Dans le cas où aucune solution n'était trouvée, une assistance était demandée auprès de mes maîtres de stage prioritairement ou auprès de Virginie Allain de l'unité EBEAC. Des contacts par voie électronique ou par téléphone ont pu être effectués durant cette phase avec des groupements directement ou des transporteurs d'animaux pour obtenir des données ou des compléments d'information.

Des points réguliers ont été effectués avec mes deux maîtres de stage : Axelle Scoizec concernant la compréhension du fonctionnement de la filière « foie gras », l'épidémiologie et l'interprétation des résultats ; Mathieu Andraud concernant la programmation, la modélisation et la cartographie via le logiciel R. Des explications complémentaires concernant l'interprétation des indicateurs de réseau ont également pu provenir de Morgane Salines de l'ANSES qui a déjà consacré une partie de sa thèse universitaire à l'étude des réseaux de mouvements de porcs.

La conception des scripts de modélisation, de cartographie, et d'analyse d'indicateurs de réseau a été réalisée par Mathieu Andraud.

En collaboration avec Mathieu Andraud et Axelle Scoizec, un « abstract » de l'étude en anglais a été proposé au congrès Network Science (Net Sci) 2018 Satellite. Après acceptation de l'abstract par le congrès, un poster en anglais a été réalisé en vue de présenter cette étude en lien avec l'analyse de mouvements d'animaux via l'analyse de réseaux sociaux.

Les dernières semaines ont été consacré à la correction d'erreurs de scripts R, la sélection et l'étude des résultats présentés, la rédaction du mémoire sous forme d'article de publication scientifique.

Evaluation des caractéristiques du réseau de mouvements de canards de la filière « foie gras » avant les épizooties d'influenza aviaire hautement pathogène (IAHP) en France

T. Segonzac¹, A. Scoizec¹, S. Lebouquin-Leneveu¹, M. Andraud².

¹ ANSES, Laboratoire de Ploufragan/Plouzané, Unité Epidémiologie et Bien Etre en Aviculture, Ploufragan, France

² ANSES, Laboratoire de Ploufragan/Plouzané, Unité Epidémiologie et Bien Etre en Elevage Porcin, Ploufragan, France

RESUME

La première épizootie d'influenza aviaire hautement pathogène (IAHP) de sous-type H5 a particulièrement sinistré la filière « foie gras » dans le sud-ouest de la France. Sur certaines zones, plus de 50% des élevages ont été touchés durant l'hiver 2015-2016. L'importance des mouvements dans ce secteur de production particulier et les conséquences dramatiques de cette épizootie ont soulevé la question de la contribution des mouvements d'animaux dans la diffusion de l'IAHP. Les données collectées s'étendent de novembre 2014 à mai 2016, c'est-à-dire avant la création d'une base de données nationale avicole par les professionnels. Les informations fournies proviennent de groupements de producteurs et de sociétés de transport d'animaux. L'objectif est ainsi de décrire le réseau de mouvements de canards de la filière « foie gras » avant et pendant la première épizootie d'IAHP en France par une analyse de réseaux sociaux. Deux modèles de réseau de mouvement adaptés à la transmission directe (modèle Déchargement) et également indirecte (modèle Tournée) d'agents pathogènes ont été conçus. Le réseau de mouvements de canards dans la filière « foie gras » en France entre novembre 2014 et mai 2016 est caractérisé par des communautés restreintes géographiquement mais perméables. Des échanges existent entre communautés et notamment au sein d'un même bassin de production. La prise en compte des contacts indirects dans le modèle Tournée est associée à une augmentation des indicateurs de centralité, de cohésion et de connexion du réseau de mouvements de canards. L'analyse de la distribution de degrés met en évidence l'importance des sites d'activité mixte (qui associent élevage et gavage). Ces sites mettent en lien les différents types de production. Par les tournées, certains peuvent être également considérés comme des établissements de haute centralité. La prise en compte des contacts indirects influence considérablement la longueur des chaînes de contacts. 75% des sites du réseau d'échange d'un groupement peuvent être en lien épidémiologique en un an. Ces résultats mettent en lumière une certaine vulnérabilité de cette filière quant au risque d'introduction et de dissémination de l'IAHP. La structure du réseau de mouvement de canards de la filière « foie gras » mériterait d'être davantage explorée. L'analyse de réseaux contribue par ailleurs à l'évolution de la surveillance épidémiologique de l'IAHP dans cette filière.

Mots-clés : mouvements d'animaux, analyse de réseaux sociaux, canard, filière « foie-gras », virus influenza aviaire hautement pathogène.

ABSTRACT

The first Highly Pathogenic Avian Influenza (HPAI) epizootic crisis of 2015-2016 devastated the « foie gras » production sector in south west of France. In some areas, more than 50% of farms were infected. HPAI viruses can be transmitted through wild birds, animal movements, human movements, materials and potentially through air. The importance of animal movements in this peculiar production sector and the dramatic consequences of HPAI crisis raised the interest of studying animal movements' part in HPAI spread. Data extends from November 2014 to May 2016, before Poultry National Database creation. Four production groups and one animal transport company provided data. The aim of this study is to describe the « foie gras » duck movement's network before the first epizootic HPAI crisis in France using social network analysis. Thus, two network models matching with epidemiological features of pathogens were designed. « Unloading model » (UM) is focused on direct links between farms while « Transit Model » (T) also includes indirect links.

The « foie gras » duck movement network in France between November 2014 and May 2016 is characterised by connected localised communities. Links between communities are stronger if they are located in the same production area. Duck network movement descriptive indicators are higher in the Transit Model. Degree's distribution analysis shows the importance of mixed activity farm sites (breeding and force feeding units in the same site). Those are linked with breeders and force feeders. Some even become hubs when we take into account the indirect links. In the transit model, outgoing contact chains and ingoing contact chains are longer than in the Unloading model. 75% trading farms of a producer group can be linked in one year.

Those results express the vulnerability of the « foie gras » production sector towards HPAI virus introduction and spreading. The duck network movement structure should be studied more precisely. Duck network movement analysis contributes to HPAI epidemiological monitoring in the « foie gras » production sector.

Keywords : Animal movements, social network analysis, duck, « foie gras » production sector, highly pathogenic avian influenza.

I-Introduction

Les maladies infectieuses telles que l'Influenza Aviaire (IA) ont des conséquences sanitaires et socio-économiques redoutables. Les épisodes successifs d'épizootie d'Influenza Aviaire Hautement Pathogène (IAHP) entre 2015 et 2017 en France en sont des exemples frappants. Elles peuvent également impacter la santé Humaine.

Des études (The Global Consortium for H5N8 and Related Influenza Viruses, 2016; Tian et al., 2015) ont montré le rôle joué par l'avifaune sauvage, et en particulier les palmipèdes sauvages, dans la circulation à longue distance des virus influenza aviaire. Ils se transmettent aussi d'exploitations en exploitations à travers l'échange d'animaux suite à l'introduction d'animaux infectés, par une contamination indirecte (vecteurs mécaniques notamment) et potentiellement par voie aéroportée. Ainsi la diffusion d'une maladie est intimement liée à la topologie du réseau de contacts entre les différents sites de production.

Les mouvements d'animaux sont de plus en plus étudiés via des méthodes d'analyse des réseaux sociaux (Social Network Analysis : SNA) qui est initialement une application à la sociologie de la théorie mathématique des graphes. Un réseau social est constitué d'entités appelées nœuds connectées entre elles par des liens qui représentent des relations (Dommergues, 2011). Dans le cadre de l'étude des mouvements commerciaux d'animaux, les nœuds correspondent aux exploitations et abattoirs. Un sens est souvent donné aux liens (par exemple en cas de mouvement de d'animaux de l'élevage A vers l'élevage B). Le réseau ainsi obtenu tient donc compte de l'orientation des liens (chargements, déchargement) ; il est alors qualifié de réseau dirigé ou orienté. Les liens peuvent être considérés comme des objets binaires (présence ou absence de lien) ou se voir attribuer une pondération (nombre d'animaux vendus à l'élevage B par l'élevage A par exemple) (Dommergues, 2011).

Les réseaux de mouvements de moutons en Grande-Bretagne ont été analysés pour évaluer le risque d'une épizootie de fièvre aphteuse (Kao et al., 2006). Plusieurs études (Bigras-Poulin et al., 2006; Ortiz-Pelaez et al., 2006; Rautureau et al., 2011) portent sur les mouvements de bovins et le risque qu'ils représentent en cas d'épizootie de fièvre aphteuse.

Les analyses de réseaux de mouvements d'animaux peuvent permettre de modéliser les contacts directs et indirects entre fermes. Ainsi plusieurs réseaux de mouvements des porcs en France ont été conçus à l'échelle nationale La déclaration des mouvements de porcs domestiques, obligatoire depuis 2010, permet d'avoir une traçabilité fiable des mouvements porcins (BDPORC). Ces données sur la période 2013-2015 ont été analysées, aboutissant à deux réseaux distincts en relation avec différentes voies de transmission de pathogènes(exclusivement directe ou également indirecte) (Salines et al., 2017).

L'analyse de réseaux de mouvements d'animaux peut également servir pour cibler la surveillance de certaines maladies. Il a été montré que le réseau avait des propriétés qui pouvaient être exploitées pour cibler la surveillance sur des élevages à haut risque, en particulier ceux qui sont en lien avec plusieurs marchés différents. (Kao et al., 2006). Plusieurs études menées en Asie (Kurscheid et al., 2017; Martin et al., 2011a; Soares Magalhães et al., 2010; Van Kerkhove et al., 2009) ont permis d'explorer le rôle des marchés de volailles vivante dans la diffusion d'IAHP à H5N1 permettant ainsi aux autorités de cibler sa surveillance de l'IAHP aux endroits les plus sensibles (Kurscheid et al., 2017). Toutefois ces marchés de volailles vivantes n'existent ni en France ni en Grande Bretagne. Bien que la connaissance des liens qui unissent les fermes de Grande-Bretagne entre elles par les mouvements de personnes et d'équipements soit limitée, elle semble pourtant essentielle pour une prévention et un contrôle efficace de potentielles épizooties transmises via les mouvements de personnes et d'équipements au sein de la filière aviaire (Dent et al., 2008a).

Le profil de l'élevage foyer lors de l'épizootie d'IAHP de 2015-2016 était celui d'un élevage comprenant au moins un atelier de palmipèdes gras (Scoizec et al., 2017). De plus, ces foyers étaient en lien épidémiologique avec d'autres élevages par des mouvements de palmipèdes (Scoizec et al., 2017). Les mouvements au sein de la filière canards gras semblent jouer un rôle primordial dans la diffusion de l'IAHP. Ce travail porte sur les mouvements au sein de la filière volaille d'élevage et en particulier sur les canards gras. En l'absence d'enregistrement de données à l'échelle nationale, les données ont dû être collectées rétrospectivement auprès de groupements de producteurs de la filière « foie gras ». Les données de cette étude concernent les régions Bretagne, Pays de Loire, Nouvelle Aquitaine et Occitanie, ces deux dernières ayant été particulièrement touchées lors des épizooties

d'IAHP entre 2015 et 2017. La période d'étude s'étend de novembre 2014 à mai 2016 c'est-à-dire avant et pendant la première épidémie d'Influenza Aviaire Hautement Pathogène en France.

L'objectif de ce travail est de décrire le fonctionnement de la filière de production de canards gras et de décrire la topologie de son réseau avant et pendant le début de la première épidémie d'IAHP en associant l'épidémiologie à l'analyse des réseaux sociaux. Ceci en vue de participer à une meilleure compréhension des mécanismes de transmission et de diffusion de l'influenza aviaire.

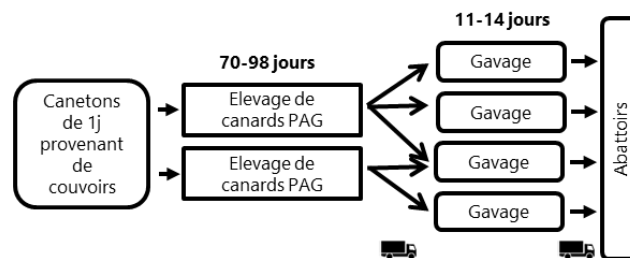
II-Matériel et méthodes

2.1. Données collectées

2.1.1. Description de la filière

Il est important de connaître les étapes d'élevage des canards gras afin de comprendre l'importance des mouvements au sein de cette filière. La durée d'élevage d'un canard gras est d'environ 3 mois et 1 semaine. Les canetons de 1 jour, issus de couvoirs, sont élevés en canetonnière durant 2 à 4 semaines (phase de démarrage). Puis les canards prêts à gaver (PAG) sont élevés durant 8 à 10 semaines (phase de finition) sur parcours avec abris ou bâtiment. Ils sont ensuite gavés en salle de gavage (cage collective) pendant 11 à 14 jours (phase de gavage). Les canards gras sont enfin envoyés à l'abattoir. Un éleveur peut réaliser toutes ces phases au sein de son exploitation s'il possède notamment les bâtiments nécessaires (démarrage, finition, salle de gavage, voire même salle d'abattage à la ferme). Mais chaque phase peut également avoir lieu dans une exploitation différente et donc occasionner des mouvements de lots de canards. La capacité des salles de gavage étant limitée, un même lot de canards PAG peut être envoyé dans plusieurs sites de gavage. Et parfois une salle de gavage peut être complétée par un lot provenant d'un autre élevage. Cela occasionne des tournées de chargement et de déchargement d'animaux parfois complexes. Au sein de la filière intégrée « industrielle », la majorité des mouvements consiste essentiellement en l'envoi de canards prêts à gaver en gavage. Cette étude s'intéresse à ce type de mouvement ainsi qu'aux mouvements des salles de gavage vers les abattoirs pour certaines tournées complexes. La Figure 1 résume ces différentes étapes.

Figure 1. Schéma d'organisation de la filière « foie gras »



2.1.2. Description de la base de données

Les données sont issues de groupements de producteurs de canards PAG. Les caractéristiques des exploitations concernées qui ont été intégrées dans la base de données sont les suivantes: nom et adresse éleveur, identifiant éleveur (Siret, EDE...), nom et identifiant groupement, type d'exploitation, et la localisation de l'élevage (code postal, code INSEE commune, géo référencement du site d'élevage ou de la commune si absent). Les différents types d'exploitations sont : démarrage, élevage de canards prêts à gaver (PAG), atelier de gavage (GAV), abattoir. Certaines exploitations cumulent plusieurs activités : démarrage, élevage de PAG et gavage par exemple. Ensuite pour chaque groupement les données des tournées disponibles ont été répertoriées. Il s'agit de la date du transport, du nombre d'animaux concernés, de la provenance (couver, élevage PAG...), destinataire, véhicule concerné, identifiant tournée, ordre de passage.

Les mouvements de volailles sont considérés à l'échelle du lot. Les animaux peuvent provenir d'un ou de plusieurs sites et sont envoyés à un ou plusieurs sites de production. La traçabilité individuelle à

l'échelle de l'animal est impossible.

Avant la mise en place d'une base de données avicole nationale en mai 2016 par les professionnels, les données de mouvements n'étaient pas centralisées. Elles ont fait l'objet d'une requête spécifique auprès des opérateurs, couvoirs et coopératives du secteur. Une collecte exhaustive n'étant pas envisageable, l'idée était de solliciter une sélection d'acteurs représentatifs de la filière palmipède gras intégrée provenant de deux principaux bassins de production. Des données de mouvements des palmipèdes pour la période novembre 2014 à mai 2016 ont été collectées auprès de 4 groupements et d'une société de transport d'animaux.

Pour chaque groupement ayant accepté de participer au projet, une base de données a été ainsi créée en regroupant les informations fournies (listings éleveurs, mouvements, données tournées...). Au cours du stage, la base de données a été complétée progressivement par les groupements rejoignant le projet d'étude. L'analyse de réseaux se concentre sur les données réunies avant le 01/05/2018.

2.1.3. Nettoyage des données

La phase de nettoyage et de mise en forme des données a été particulièrement importante. Avant la mise en place d'une base de données centralisée, aucune uniformité n'existait concernant les données de mouvements. Les données issues de chaque groupement ont donc nécessité un travail spécifique plus ou moins fastidieux. Les exploitations dont les informations n'étaient pas complètes ont été exclues de la base de données. Les mouvements étudiés ne concernent que la France métropolitaine. Les mouvements à l'international n'ont pas été considérés. Les mouvements directs vers les abattoirs n'ont pas été pris en compte dans l'analyse de réseau.

2.2. Réseaux sociaux et analyses statistiques

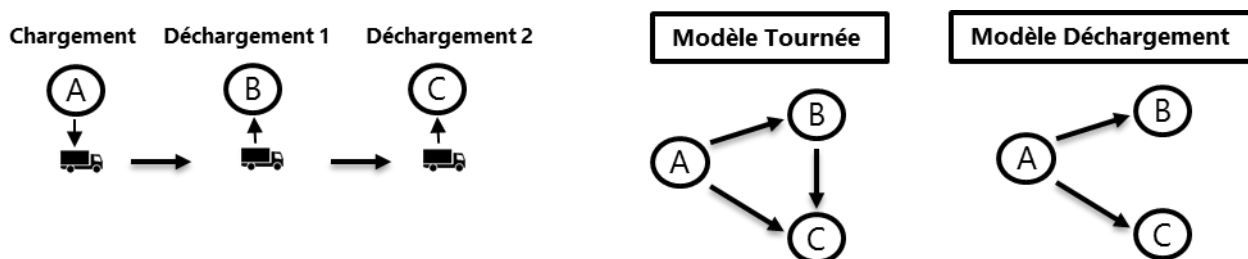
Les méthodes d'analyse des réseaux sociaux ont été utilisées pour caractériser le réseau de mouvements de palmipèdes. Les réseaux ont été modélisés en utilisant le package igraph du logiciel R.

2.2.1. Conception

Pour chaque groupement, des réseaux dirigés ont été conçus. L'unité épidémiologique choisie est le site d'élevage par commune. Une exploitation pouvant avoir plusieurs sites répartis sur une ou plusieurs communes. Les nœuds représentent donc les sites d'élevage et les mouvements entre chaque site représentent les liens.

Deux cas de figure ont été étudiés. Le modèle Déchargement (D) ne s'intéresse qu'aux liens directs. Tous les mouvements de transport intermédiaire reliant deux sites sans déchargement d'animaux sont ici exclus. Dans le modèle (D) tous les sites concernés par un déchargement d'animaux sont considérés en lien uniquement avec les sites de chargement précédents de la même tournée. Le modèle Tournée (T) représente tous les liens entre sites qu'ils soient directs (représentant le lien entre le site de chargement d'animaux et celui de déchargement) ou indirects (passage du camion de transport uniquement, potentiel vecteur mécanique). Dans le modèle (T), chaque site d'une tournée est considéré en lien avec tous les sites précédents et s'il existe avec le site suivant. Ce modèle est adapté aux maladies qui se transmettent directement et également par voie indirecte, le véhicule de transport jouant ici le rôle de vecteur mécanique, ce qui est le cas de l'IAHP. Le modèle (D) est adapté aux maladies qui se transmettent par contact direct entre animaux (via introduction d'animaux infectés).

Figure 2. Modèles de réseaux de mouvements de canards utilisés



2.2.2. Indicateurs descriptifs du réseau

Plusieurs indicateurs descriptifs de centralité, de cohésion, et de connexion du réseau ont été calculés pour chaque modèle : la taille (nombre de nœuds actifs et de liens), le degré moyen (moyenne du nombre de liens entrant et sortant pour chaque nœud), la distance moyenne (moyenne des distances géodésiques c'est-à-dire de la longueur du plus court chemin reliant deux nœuds), le diamètre (la distance géodésique la plus longue), la densité (ratio du nombre de liens existants sur le nombre de liens possibles pour les nœuds actifs). Ont également été calculés : la réciprocité (proportion de connexions réciproques dans un réseau dirigé), le coefficient de clustering ou transitivité (probabilité que les voisins d'un nœud soient connectés entre eux) et le degré d'assortativité (coefficient de corrélation de Pearson entre les degrés de nœuds connectés ; ce coefficient est positif quand des nœuds de degré similaire ont tendance à se connecter entre eux, négatif autrement). Ensuite, les **communautés** ont été étudiées dans chaque modèle. Il s'agit de groupes de nœuds particulièrement connectés ; des nœuds qui possèdent significativement plus de liens entre eux que par le fruit du hasard. La détection des communautés a été réalisée en utilisant l'algorithme Infomap (Rosvall et al., 2009). Il s'agit du seul algorithme qui fonctionne sur les réseaux dirigés et il est considéré comme le plus performant. L'algorithme a été exécuté 10 fois pour chaque simulation dans chaque modèle.

Enfin, les **chaînes de contacts entrants** (Ingoing Contact Chains : ICC) et **sortants** (Outgoing Contact Chains : OCC) ont principalement été étudiées sur l'année 2015. Elles correspondent à la séquence de contacts directs et indirects en tenant compte de la chronologie des contacts sur une période donnée.

III-Résultats

3.1. Caractéristiques des groupements

Les données de mouvement de 4 groupements ont pu être collectées et analysées. Dans un souci d'anonymisation des données, un code leur a été attribué. Deux d'entre eux (Gp2, Gp4) regroupent des élevages qui sont pour la plupart situés en région Pays de la Loire et en Bretagne, régions non concernées par les deux épizooties d'IAHP des hivers 2015-16 et 2016-17. Les deux autres groupements (Gp1, Gp3) sont localisés en Nouvelle Aquitaine et Occitanie, régions durement touchées par ces épizooties.

Plusieurs caractéristiques de ces groupements sont présentées dans le tableau 1. Il s'agit du nombre d'établissements par type d'activité, ainsi que du nombre de canards et de mouvements par destination. Les données présentées ici correspondent à l'année 2015 uniquement. Une segmentation plus précise de l'activité d'élevage de canards PAG (démarrage, finition notamment) pour les groupements 2, 3 et 4 est impossible du fait de l'absence de ce type d'information dans les données fournies.

La proportion d'établissements, tous groupements confondus, ayant au moins une activité d'élevage de canards PAG (49,6%) est comparable à celle ayant au moins une activité de gavage (50,4%).

Tableau 1. Nombre et proportion d'établissements par type d'activité, de canards transportés et de mouvements par groupement en 2015

	Groupement 1 (Gp1)		Groupement 2 (Gp2)		Groupement 3 (Gp3)		Groupement 4 (Gp4)		Total	
	Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%
Etablissements du groupement	181	31,4	109	18,9	110	19,1	176	30,6	576	100
Etablissements élevant du canard PAG	77	30,1	58	22,7	34	13,3	87	34,0	256	100
Etablissements faisant du gavage	79	30,7	41	16,0	57	22,2	80	31,1	257	100
Etablissements éleveur et gaveur	22	36,7	10	16,7	19	31,7	9	15,0	60	100
Abattoirs	3	42,9	1	14,3	2	28,6	1	14,3	7	100
Etablissements sans groupement identifié échangeant avec le groupement	40	28,0	11	7,7	92	64,3	0	0,0	143	100
Canards PAG envoyés en gavage	1 879 330	25,4	798 045	10,8	2 376 660	32,2	2 335 384	31,6	7 389 419	100
Canards gavés envoyés à l'abattoir	2 052 673	23,5	841 517	9,6	3 485 901	39,9	2 360 616	27,0	8 740 707	100
Envois en gavage	1 570	22,9	808	11,8	1 810	26,4	2 657	38,8	6 845	100
Envois à l'abattoir	2 381	24,8	790	8,2	3 738	39,0	2 682	28,0	9 591	100

Age de départ en gavage

L'âge de départ des canards prêt à gaver a été calculé pour chaque groupement sur la période d'étude complète lorsque l'information était disponible. Le groupement 2 n'est pas représenté car l'information concernant les dates d'éclosion des canards était absente. Les résultats suivants (figure 3) concernent donc les groupements 1,3 et 4.

Pour les groupement 1, l'âge de départ a été calculé en soustrayant la date de naissance à la date d'entrée en gavage. L'âge de départ était directement présenté dans les données du groupement 4. Pour le groupement 3 : l'âge de départ a été calculé en soustrayant la date de de mise en place en atelier PAG à la date d'entrée en gavage additionnée d'un jour. On émet l'hypothèse que les mises en place en atelier PAG se font dans les 24h suivant l'éclosion en couvoir.

On constate une différence entre le groupement 1 (médiane de 86 jours) et les groupements 3 (81 jours) et 4 (79 jours). On suppose l'existence d'une conduite d'élevage de canards prêt à gaver différente selon les groupements. Ceci est particulièrement visible pour le groupement 3, chez qui la durée d'élevage semble être fixée à 80 jours.

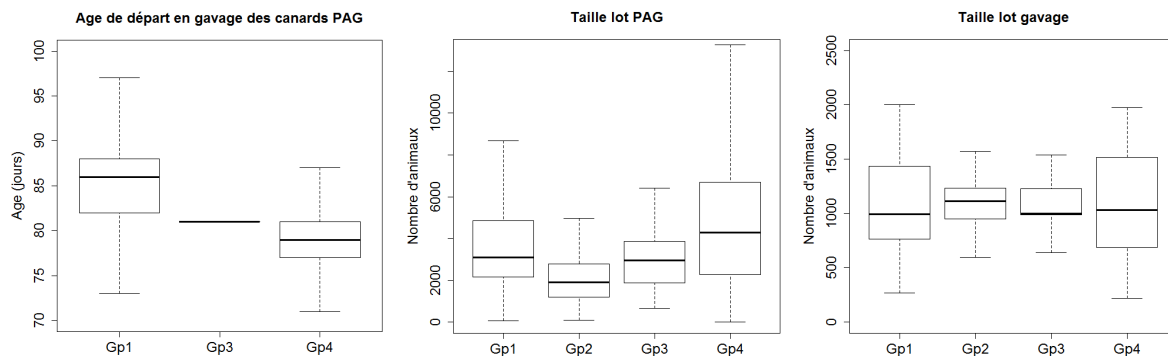
Taille de lot

Les tailles de lot de PAG sont présentées sur la figure 3. L'information concernant les numéros de lot était présente pour les groupements 1 et 4. Concernant les groupements 2 et 3, la taille de chaque lot a été estimée en additionnant pour chaque éleveur la quantité de canards envoyés en gavage durant la semaine suivant un mouvement détecté. En effet, la durée d'élevage de canards PAG s'étendant sur plusieurs semaines et la capacité des bâtiments de gavage étant moindre, le départ d'un lot vers un ou plusieurs gaveurs peut s'étendre sur plusieurs jours. L'hypothèse faite ici est qu'un lot complet de canards PAG part en gavage en 7 jours maximum. Il est possible que la taille de certains lots soit sous-estimée. La distribution des moyennes de tailles de lot de canards PAG de chaque éleveur est présentée dans la figure 3 par groupement. Les lots de canards PAG du groupement 4 ont une taille plus grande (médiane à 4296 oiseaux et un maximum à 17674) que celle des autres groupements. La médiane de la taille de lot du groupement 1 est de 3098 canards, 1830 pour le groupement 2, 2950 canards pour le groupement 3. Les groupements 1 et 3 semblent avoir des caractéristiques comparables à ce niveau. Ces données correspondent aux capacités courantes d'accueil de bâtiments d'élevage de canards PAG qui sont comprises entre 2000 et 4000 canards.

La taille des lots de gavage est présentée sur la figure 3. Les valeurs correspondent à la moyenne de la taille d'un lot de canard en gavage pour chaque établissement gaveur. Aucun identifiant de lot de gavage n'était disponible dans les données fournies par les groupements. La taille des lots en gavage a été calculée en additionnant les quantités d'animaux envoyés à l'abattoir par établissement et par jour. Compte tenu du fait que la durée de gavage est courte (de 11 à 14 jours généralement) et que les bâtiments de gavage ont une capacité d'accueil inférieure à celle des bâtiments PAG, l'hypothèse faite ici est qu'un lot complet de canards gavés est envoyé à l'abattoir en une seule journée. Il est

ainsi possible que la taille de ces lots soit sous-estimée, un lot de gavage pouvant partir en plusieurs jours. Cependant, cette sous-estimation est potentiellement présente pour chaque groupement.

Figure 3. Caractéristiques de fonctionnement de la filière « foie gras » en France entre novembre 2014 et mai 2016 par groupement (Age de départ des canards PAG en gavage, taille de lot PAG, taille de lot gavage)



Distance par mouvement

Les distances séparant deux élevages (dans le modèle Déchargement) sont comparables entre les groupements pour l'année 2015. La médiane de chaque groupement est proche de 50km. Les groupements sont tous comparables au regard de ce paramètre. La moyenne globale sur l'année 2015, tous groupements confondus, est de 56,8 [55,6 ;57,9] km.

3.2. Description du réseau

Sur l'ensemble de la période d'étude (novembre 2014 à mai 2016 inclus) 28029 liens sont considérés. Sans tenir compte des envois directs à l'abattoir, 15164 liens épidémiologiques sont rapportés. Le modèle Déchargement en compte 11461 (75,6% du total possible) ; le modèle Tournée (qui exclue le groupement 4): 11172 (73,6%).

Modèle D : le réseau dirigé est composé de sites de nœuds spécialisés qui sont soit exclusivement expéditeurs (site avec seulement une activité d'élevage de PAG), soit exclusivement receveurs (site avec seulement une activité de gavage), ou expéditeurs/receveurs (site d'activité mixte). Sur l'ensemble de la période, le réseau global comprenant tous les groupements est composé de 678 nœuds dont 90% ont une activité unique.

Modèle T : le réseau global sur la période complète est composé de 686 nœuds dont 90% ont une activité unique. Quelle que soit l'activité des sites, tous les nœuds peuvent ici potentiellement être expéditeurs et receveurs par les liens de tournée.

3.2.1. Cartographie du réseau entier

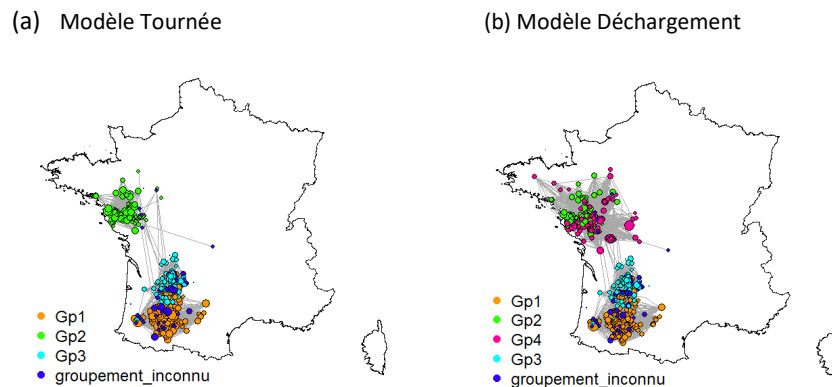
Sur les 719 nœuds du réseau, c'est-à-dire sites d'élevage, 215 sont géolocalisés au centroïde de leur commune, 396 le sont d'après les géoréférencement issu de la base de données SIGAL (celui-ci pouvant être à l'atelier, à l'établissement ou à la commune, mais cette information n'était pas accessible) et les 118 restants n'ont pas pu être géolocalisés (absence de géoréférencement et d'indication de la commune). Ces derniers n'ont pu être représentés sur les cartes.

Deux établissements différents peuvent parfois se situer sur un même site d'élevage. Un éleveur de canard prêt à gaver peut en effet partager un site d'élevage avec un gaveur qui possède la/les salle(s) de gavage d'où la volonté de travailler à l'unité épidémiologique du site d'élevage. Dans ce type de situation il est également intéressant de ne considérer qu'une seule entité au niveau cartographique. La difficulté de faire correspondre les informations fournies par les groupements aux données extraites de SIGAL n'a pas permis de le faire.

La densité des nœuds actifs et les mouvements varient selon les groupements et les périodes étudiées. Le dernier quadrimestre 2015 correspond au maximum d'envois de canards PAG en gavage sur la période d'étude. Le réseau complet durant l'année 2015 est présentée dans la Figure 4. Dans le modèle Tournée, seulement trois groupements apparaissent. Les données relatives au transport d'animaux du groupement 4 n'étant pas disponibles, il n'est pas représenté. En revanche, il apparaît dans le modèle Déchargement. Dans chaque modèle, certains sites d'élevages représentés

n'appartiennent pas aux groupements fournisseurs de données et pourtant ont des liens avec ces derniers. Ces établissements appartenant à des groupements non-identifiés sont représentés dans la catégorie « groupement_inconnu ». Certains pourraient malgré tout appartenir aux groupements concernés (et notamment le groupement 3) bien qu'aucune correspondance n'a pu être établie. La répartition géographique des nœuds actifs de chaque groupement est restreinte géographiquement. Les sites d'élevages des groupements 2 et 4 sont tous situés dans le bassin de production du grand ouest et ceux des groupements 1 et 3 dans celui du sud-ouest. Des liens sporadiques entre groupements existent en particulier entre les groupements appartenant au même bassin de production mais également entre bassins de production.

Figure 4. Cartographie du réseau de mouvement de canards PAG en gavage sur l'année 2015 selon le modèle utilisé : modèle Tournée (a) et modèle Déchargement (b). Taille d'un nœud proportionnelle à son degré total sur la période.



Le degré moyen des nœuds est systématiquement supérieur dans le modèle Tournée comparé au modèle Déchargement.

Les mouvements directs vers les abattoirs ne sont pas représentés. Le mois de mai 2015 correspond au minimum d'envois à l'abattoir pour chaque groupement (614613 canards cumulés envoyés en abattoir). Le maximum d'envois se situe durant le dernier trimestre 2015 avec 191667 canards pour le groupement 1 (novembre), 84246 pour le groupement 2 (novembre), 337475 pour le groupement 3 (octobre) et 226722 (décembre).

3.2.2. Indicateurs descriptifs du réseau

Les indicateurs descriptifs du réseau de mouvements de canards sont rapportés dans le Tableau 2. Ces indicateurs sont présentés par périodes de 4 mois (quadrimestres). Le dernier quadrimestre 2014 présenté dans le Tableau 2 est cependant incomplet. Il comprend uniquement les mois de novembre et de décembre.

La prise en compte des contacts indirects (T) affecte les indicateurs de l'ensemble des groupements. Les indicateurs de cohésion (degré moyen, densité) et de centralité (distance moyenne, diamètre) présentés dans le Tableau 2 sont plus forts dans le modèle Tournée. Degré moyen et densité sont environ 1,5 fois plus élevés dans le modèle Tournée par rapport au modèle Déchargement. Les valeurs correspondantes aux distances sont de l'ordre de 3 plus élevées.

Le degré correspond au nombre de liens adjacents par nœud, soit le nombre de mouvement d'entrée et de sortie du nœud. Le degré moyen est un indicateur comparable entre les groupements sur les périodes étudiées. Il varie entre 8 et 11 (D) et entre 11 et 16 (T) si l'on exclue le dernier quadrimestre incomplet de 2014. La figure 5 présente les distributions de degré par type d'activité. Dans le modèle Déchargement, l'analyse de la distribution de degrés par type d'activité ne permet pas de définir les sites d'activité mixte (GP) comme des établissements de haute centralité. Leur histogramme de distribution est comparable à celui du réseau toutes activités confondues. Ils font cependant le lien entre les différents sites de production. Des sites éleveurs de PAG exclusifs qui ont les degrés les plus élevés. La prise en compte des contacts indirects (T) modifie légèrement cette distribution. Certains sites « GP » ont les degrés totaux les plus élevés (maximum 71), tous sites confondus. Leur degré total est plus élevé que les autres types de production (moyenne degré total : GP=32,5 [27,7 ;37,3] ;

$P=22,2[20,1 ; 22,2]$; $G=22,9[20,9 ; 24,8]$). Certains peuvent donc être considérés comme des « hubs ». Les sites mixtes, font le lien entre les différents types de production et parmi eux certains peuvent être considérés comme des établissements de haute centralité. Par les tournées, ils peuvent donc faciliter la diffusion d'une maladie comme l'IAHP.

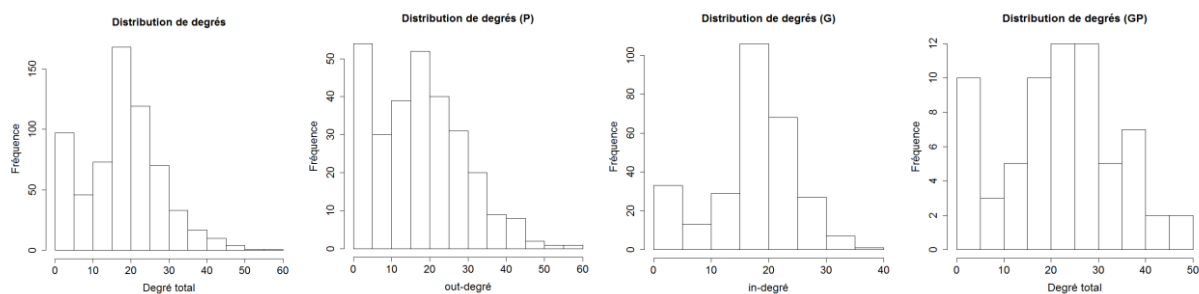
Les indicateurs de centralité que sont la distance moyenne et le diamètre informent sur la distance entre deux exploitations (Nombre d'exploitations intermédiaires reliant deux sites de production) et ainsi sur la vitesse de diffusion d'une maladie potentielle dans ce réseau. Le modèle utilisé influence ces indicateurs. La distance moyenne par quadrimestre varie entre 1 et 2 (D) et entre 2,9 et 5,1 (T). Le diamètre varie quant à lui entre 2 et 5 (D) et entre 8 et 20 (T). Les groupements 2 et 4 et les groupements 1 et 3 semblent avoir des caractéristiques comparables concernant les indicateurs de distance.

La densité correspond à la proportion entre les contacts existants et les contacts possibles d'un réseau. Le réseau global est plus dense en prenant en compte les contacts indirects. La densité des groupements 1 et 3 est comparable quel que soit le modèle utilisé. Le groupement 2 est de taille inférieure aux autres groupements (en nombre de nœuds et de liens) mais sa densité est plus élevée que celle des autres groupements.

Tableau 2. Indicateurs descriptifs (taille, degré, distances, densité) du réseau de mouvements de canards selon le type de modèle utilisé par groupement de novembre 2014 à avril 2016 inclus. T : tournée ; D : Déchargement.

Quadri- mestre	Nombre de nœuds actifs		Nombre de liens		Degré moyen		Moyenne des distances géodésiques		Diamètre		Densité	
	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D
Groupement 1: Tournée (5266 liens)/Déchargement (3415 liens)												
2014_3	152	151	544	371	7,2	4,9	5,0	1,4	13	3	0,024	0,016
2015_1	167	166	1066	707	12,8	8,5	3,4	1,9	10	5	0,038	0,026
2015_2	162	160	948	642	11,7	8,0	3,8	1,6	12	4	0,036	0,025
2015_3	170	168	1084	741	12,8	8,8	3,7	1,7	11	5	0,038	0,026
2016_1	147	144	690	498	9,4	6,9	4,4	1,7	12	4	0,032	0,024
Groupement 2 : Tournée (2486 liens)/Déchargement (1568 liens)												
2014_3	62	61	216	145	7,0	4,8	3,8	1,1	11	2	0,057	0,040
2015_1	58	58	359	221	12,4	7,6	2,9	1,2	8	3	0,109	0,067
2015_2	75	75	414	268	11,0	7,1	3,1	1,2	8	2	0,075	0,048
2015_3	85	85	452	304	10,6	7,2	3,0	1,1	9	2	0,063	0,043
2016_1	69	68	393	262	11,4	7,7	3,2	1,1	9	2	0,084	0,058
Groupement 3: Tournée (3420 liens)/Déchargement (2604 liens)												
2014_3	151	147	413	321	5,5	4,4	3,8	1,3	11	4	0,018	0,015
2015_1	157	152	725	580	9,2	7,6	5,1	1,4	20	3	0,030	0,025
2015_2	159	157	815	644	10,3	8,2	3,8	1,5	10	5	0,032	0,026
2015_3	159	159	841	668	10,6	8,4	4,4	1,3	11	3	0,033	0,027
Groupement 4: Déchargement (3874 liens)												
2014_3		157		409		5,2		1,0		2		0,017
2015_1		177		739		8,4		1,1		2		0,024
2015_2		178		718		8,1		1,1		2		0,023
2015_3		171		774		9,1		1,1		2		0,027
2016_1		145		634		8,7		1,1		2		0,030

Figure 5. Distribution des degrés par type d'activité tous groupements confondus pour l'année 2015 (D). G : site d'activité de gavage exclusive (n=284) ; P : site d'activité d'élevage de PAG exclusive (n=287) ; GP : site d'activité mixte (n=68) ; In-degré : nombre de liens entrant ; out-degré : nombre de liens sortant ; Degré total : nombre de liens adjacents à un nœud



Les indicateurs de connexion du réseau sont présentés dans le Tableau 3 pour l'ensemble de l'année 2015.

Le degré d'assortativité varie selon le groupement et surtout selon le modèle utilisé. Le réseau de mouvements est assortatif (valeurs positives) dans le modèle Déchargement. Cela signifie que les nœuds de degré similaire ont tendance à se connecter entre eux. Le réseau est en revanche disassortatif (valeurs négatives) dans le modèle Tournée.

Pour chaque groupement, le ratio de réciprocité est faible quel que soit le modèle utilisé. La prise en compte des contacts indirects (T) modifie très peu le type de liens entre les nœuds qui restent très majoritairement unidirectionnels.

Le coefficient de clustering est la probabilité que les voisins d'un nœud soient connectés entre eux. Il est plus faible dans le modèle Déchargement que dans le modèle Tournée. Ce coefficient, élevé pour les groupements 1 à 3 (T), indique une tendance à l'agrégation. Le prise en compte des contacts indirects (T) renforce la cohésion entre un site et les sites voisins. C'est particulièrement le cas du groupement 2.

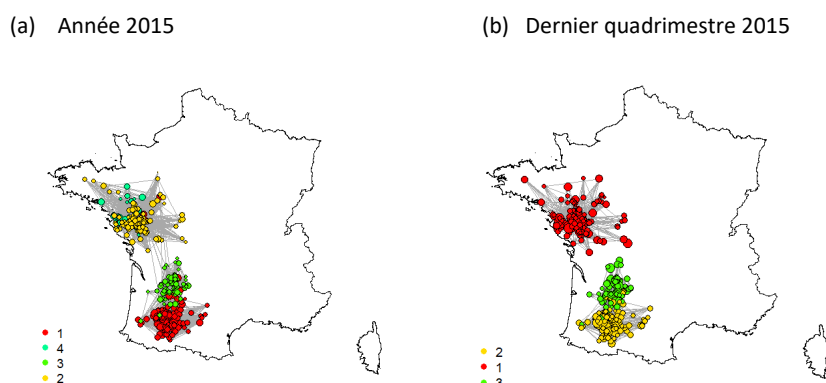
Tableau 3. Indicateurs de connexion du réseau de mouvement de canards en France selon le type de modèle utilisé (T : Tournée, D : Déchargement) par groupement (Gp1, Gp2, Gp3, Gp4) sur l'année 2015.

année 2015	Degré d'assortativité		Réciprocité		Coefficient de clustering	
	T	D	T	D	T	D
Gp1	-0,042	0,055	0,090	0,003	0,274	0,079
Gp2	-0,039	0,090	0,166	0,003	0,448	0,060
Gp3	-0,042	0,011	0,064	0,001	0,214	0,062
Gp4		0		0		0,011

3.2.3. Communautés

La topologie des communautés varie selon le modèle utilisé et la période étudiée. Sur l'année 2015, elles correspondent globalement au réseau de chaque groupement quel que soit le modèle étudié (Figure 6 (a)). Durant les derniers 4 mois de 2015, les groupements 2 et 4 ne constituent qu'une seule communauté (communauté 1 de la Figure 6 (b)) démontrant une perméabilité certaine entre les groupements. Dans le modèle Tournée, à l'échelle du quadrimestre, les communautés paraissent plus dispersées en particulier dans le sud-ouest (résultats non présentés). Les principales communautés du réseau de mouvement de canards en France sont numérotées et sont présentées dans la figure 6.

Figure 6. Cartographie des plus grandes communautés du réseau de mouvements de canards en France (Modèle Déchargement) selon la période étudiée. Taille d'un nœud proportionnelle à son degré total sur la période.



Les communautés sont globalement restreintes géographiquement. Elles sont cependant perméables. Des liens existent entre les différents bassins de production. Au sein du bassin de production du grand-ouest, les liens entre groupements sont particulièrement importants. Au sein des groupements 1 et 3, 10 sites ont pu être identifiés atteints par la première épidémie d'Influenza Aviaire Hautement Pathogène de 2015. Sur l'année 2015, 9 de ces 10 sites sont inclus dans les deux communautés principales du sud-ouest de la France.

3.2.4. Chaînes de contact

Les chaînes de contacts entrants (« ingoing contact chain » : ICC) et sortants (« outgoing contact chain » : OCC) étudiées sur l'année 2015 suivent des distributions différentes selon le modèle étudié. La Figure 7 illustre la taille de ces chaînes de contacts pour chaque groupement dans le modèle Déchargement. Les chaînes de contacts entrants ne concernent ici que les sites ayant une activité de gavage (gaveur ou activité mixte). Les chaînes de contacts sortants ne concernent que les sites élevant du canard PAG (éleveur ou éleveur-gaveur). Mis à part le groupement 1, la médiane de la longueur des chaînes de contacts entrant est comparable d'un groupement à l'autre avec une médiane légèrement supérieure à 20 en un an. Concernant les OCC, les groupements 2 et 4 ont une distribution comparable ainsi que les groupements 1 et 3. Le groupement 2 étant de taille inférieure aux 3 autres (en termes de nombre de nœuds actifs et de liens), la distribution des longueurs de ses chaînes de contacts est proportionnellement supérieure à celle des autres groupements. La composition du réseau de mouvements est présentée dans le tableau 4. Pour le groupement 1, la médiane de la longueur est de 40 sites (ICC et OCC) par an sur un total de 202 sites (tableau 4). Par les contacts directs, environ 20% des sites du réseau de mouvements de ce groupement sont en lien épidémiologique sur l'année 2015.

Figure 7. Distribution des chaînes de contacts des sites d'élevage de canards en France par groupement durant l'année 2015 (modèle Déchargement). ICC : ingoing contacts chain, OCC : outgoing contacts chain, Gp : Groupement.

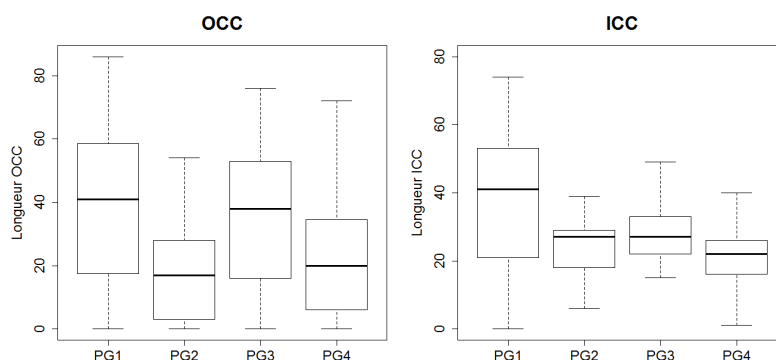


Tableau 4. Composition du réseau de mouvements de canards par groupement par modèle utilisé pour l'année 2015.

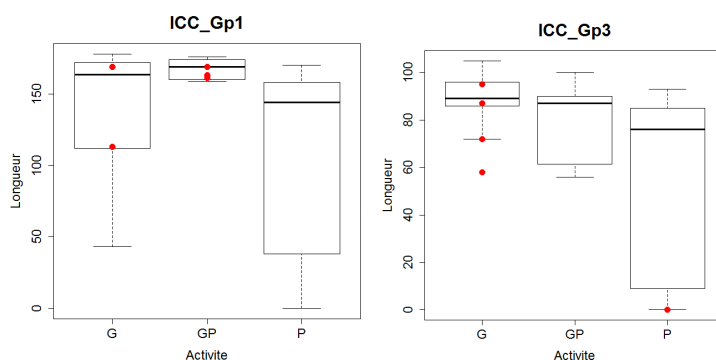
T : tournée ; D : Déchargement ;

	Réseau Gp1		Réseau Gp2		Réseau Gp3		Réseau Gp4	
	T	D	T	D	T	D	T	D
Nombre de sites Gp1	171	171			3	3		
Nombre de sites Gp2	2	2	97	97				23
Nombre de sites Gp3					88	84		
Nombre de sites Gp4								169
Nombre de sites Gp inconnu	30	29	6	6	84	82		
Total	203	202	103	103	175	169		192

Les chaînes de contacts ont également été étudiées par type d'activité dans le modèle Tournée en lien avec les foyers identifiés de la première épidémie d'IAHP de 2015-2016. Les longueurs d'ICC correspondantes à l'année 2015 sont présentées dans la Figure 8 pour les groupements concernés (Gp1 et Gp3). Premièrement, il est intéressant de noter qu'au cours d'une année, quasiment tous les sites composant le réseau de mouvements du groupement 1 sont en lien épidémiologique en prenant en compte les contacts indirects (T). La médiane de la longueur d'ICC du groupement 1, toutes activités confondues, est de 159 pour un total de 203 sites (tableau 4) soit 78% du nombre de sites total ; médiane de 87 pour le groupement 3 soit 50%).

Les valeurs des sites foyers ne semblent pas suivre une distribution différente de l'ensemble des autres sites du réseau. L'étude de ces chaînes de contacts peut permettre de retrouver l'intégralité des liens en amont (ICC) et en aval (OCC) entre sites d'élevages sur une période donnée. C'est tout particulièrement intéressant dans le cas de 3 sites atteints ayant une activité mixte et donc une densité de contacts plus importante.

Figure 8. Longueur des chaînes de contacts entrants (ICC) durant l'année 2015 (modèle Tournée) par groupement et par type d'activité. ICC : ingoing contacts chain, G : gaveur, P : éleveur de canards PAG, GP: activité mixte. Points rouges : valeurs correspondantes aux sites foyers IAHP de 2015-2016.



IV-Discussion

Aussi bien chez l'homme que chez l'animal, la nature des liens entre les individus contribue à l'introduction et à la diffusion de maladies (Kiss et al., 2006). Des simulations d'épidémies réalisées sur des réseaux théoriques ont montré combien l'issue d'une épidémie (en termes de taille, de rapidité et de modalités de diffusion) pouvait varier en fonction de la topologie d'un réseau (Kiss et al., 2006). Les résultats de cette étude mettent en lumière l'intérêt de l'analyse de réseaux sociaux. Cette méthodologie permet de mieux appréhender la vulnérabilité d'un réseau de mouvements d'animaux face à la diffusion potentielle de pathogènes.

Cette étude présente deux modèles de réseaux de mouvements adaptés aux voies de transmission d'agent pathogènes. Plusieurs études sont consacrées à des modèles de transmission par introduction directe d'animaux mais seulement quelques publications tiennent compte des liens par les tournées (Salines et al., 2017). Ces derniers peuvent pourtant augmenter le risque de diffusion d'un agent pathogène très contagieux comme l'IAHP. Une perspective intéressante serait d'utiliser un système GPS pour localiser géographiquement plus précisément les trajets de camion et notamment

pour suivre la diffusion d'une maladie en particulier en cas de suspicion de transmission aéroportée, comme le suggère Salines et al.(2017).

Cette étude a également le mérite de participer à la compréhension du fonctionnement de la filière « foie gras » française avant la première épizootie d'IAHP. Ce secteur de production est assez peu représenté ailleurs dans le monde et peu de publications y sont consacrées. Cette étude souffre d'une source de données incomplète et mériterait d'être envisagée à l'échelle nationale sur une période d'étude plus longue. La mise en place d'une base de données nationale avicole (BD avicole) depuis mai 2016 pourrait le permettre. Toutefois, les tournées n'existent pas dans la BD avicole et ne peuvent n'être prises en compte que par l'appui de sociétés de transport d'animaux

Le fait d'avoir pu comparer quelques sites identifiés comme ayant été touchés par la première épizootie d'IAHP à l'ensemble du réseau est un point d'intérêt supplémentaire. Il est évident que l'échantillon de sites infectés est trop mince pour pouvoir tirer des conclusions générales. Mais l'impression que ces sites ne présentent pas de caractéristiques différentes de l'ensemble du réseau semble se dégager. Par ailleurs, l'étude des chaînes de contacts en lien de sites infectés pourrait s'avérer utile dans le cadre d'enquêtes épidémiologiques en cas de foyer d'IAHP. Cela pourrait permettre d'identifier des chaînes d'infection et ainsi aider à déterminer les modalités d'introduction et de diffusion du pathogène.

Le réseau de la filière « foie gras » est très orienté. L'analyse de réseau réalisé ici ne tient pas compte des mouvements vers les abattoirs à l'exception de certains liens existants durant une tournée. Un même camion peut en effet compléter son chargement pour l'abattoir avec au moins un lot d'un autre site. Ces liens sont comptabilisés dans le modèle Tournée. Les analyses de réseau ont été réalisées à l'échelle de l'année ou du quadrimestre. Compte tenu du manque de données, l'analyse de certains indicateurs par périodes de 4 mois est délicate. Cependant, cette échelle temporelle est pertinente car elle est cohérente avec le fonctionnement de la filière. En effet, la durée d'élevage d'un lot de canards PAG jusqu'à son envoi à l'abattoir est d'environ 3 mois et est suivi d'un vide de 2 à 3 semaines. L'analyse des mouvements de canards par période de 4 mois assure qu'un éleveur de canards PAG réalise au moins un envoi en gavage. Un phénomène saisonnier est perceptible. Le nombre d'envois en gavage et en abattoir augmente durant le dernier quadrimestre.

Les résultats de ce travail doivent être interprétés en tenant compte des limites de l'étude. L'exactitude et la précision de cette analyse de réseaux sociaux sont discutables. Il n'existe pas d'échantillonnage proprement dit car les groupements sont volontaires et n'ont pas été tirés au sort. Compte tenu de la non-centralisation des données avant mai 2016 dans la BD volailles, les données ont dû être collectées directement auprès des acteurs de la filière et en particulier de groupements de producteurs de foie gras. Les données proviennent d'acteurs volontaires. Plusieurs groupements n'ont pas répondu aux sollicitations de l'ANSES. Toutefois ces groupements sont représentatifs de la filière « foie gras ». Les données proviennent de groupements d'éleveurs de palmipèdes gras de régions géographiques et de volumes de production différents. Enfin aucune sélection n'a été effectuée en rapport avec les épizooties d'influenza aviaire. Cette étude peut manquer de précision du fait d'un manque de données initial. Il y a peu de différences sur la robustesse des mesures de centralité de réseau même en présence de données incomplètes du fait d'erreurs aléatoires de mesure, de données manquantes, ou de sélection de nœuds. Il est ainsi possible de calculer des indicateurs de centralité en étant conscient de ces erreurs (Borgatti et al., 2006) et tant que les données ne comprennent pas plus de 10% d'erreurs.

Peu d'éléments de comparaison sont disponibles concernant le fonctionnement même de la filière « foie gras ». Les résultats de cette étude sont confrontés à ceux obtenus par l'Institut Technique de l'Aviculture (ITAVI) en 2014 et 2015 (Hurand et al., 2017).

La durée d'élevage peut varier simplement par le cahier des charges des filières labélisées qui imposent une durée d'élevage plus long et aussi peut être selon la durée de l'élevage des PAG ayant lieu en claustration. La croissance des canards étant plus rapide lorsqu'ils n'ont pas accès aux parcours extérieurs. Une grande diversité de taille de lot de PAG semble se dégager entre les différents groupements. Il est difficile de dégager une tendance globale de fonctionnement sur ce point. La taille de lot de gavage est comparable d'un groupement à l'autre. La moyenne globale de taille de lot de gavage (1107 [1060 ;1154]), tous groupements confondus, est légèrement supérieure aux moyennes de l'ITAVI (Hurand et al., 2017). Certains établissements peuvent avoir plusieurs salles

de gavage et gaver un même lot dans deux voire 3 salles de gavage en même temps. Cela pourrait expliquer une surestimation de ce paramètre dans cette étude.

Les groupements ont des caractéristiques similaires concernant la taille de lot de gavage et la distance séparant les sites. Ils diffèrent concernant leur taille, leur volume de production, et leur taille de lot de canards PAG.

Excepté, l'étude de réseaux de marchés de volaille vivante asiatiques, peu de publications existent au sujet de l'analyse de réseaux de mouvements de volailles en France et encore moins concernant le marché de canards gras. Il est donc difficile de comparer les résultats obtenus ici avec d'autres études traitant d'une thématique similaire. Cette étude peut servir de point de comparaison pour d'autres études à venir.

Les liens épidémiologiques associés aux tournées augmentent le risque d'introduction et de dissémination d'un agent pathogène contagieux comme l'IAHP. Premièrement, tous les indicateurs descriptifs du réseau de mouvement de canards sont augmentés dans le modèle T (degré moyen, diamètre, densité notamment). Ensuite, Le modèle Tournée permet de montrer que 75% des sites d'un réseau de mouvement d'un groupement peuvent être lien épidémiologique en un an de mouvements (longueur ICC et OCC).

Dans le réseau global, tous groupements confondus, les sites d'élevage de PAG exclusifs sont à même de diffuser largement un agent pathogène comme l'IAHP par les contacts directs (D). La prise en compte des contacts indirects influence la distribution des degrés des sites selon leur activité. Les sites d'activité mixte font le lien entre les différents types de production et certains peuvent être considérés comme des établissements de haute centralité (« hubs »). Ces sites sont vulnérables à l'introduction d'une maladie et faciliteront sa diffusion (Rautureau, 2012).

Les communautés sont des sous-groupes de nœuds fortement connectés. Les communautés principales correspondent globalement au réseau de chaque groupement. L'échelle temporelle utilisée influence la répartition des communautés. En effet, par période de 4 mois, deux groupements peuvent appartenir à la même communauté, en particulier dans le nord-ouest de la France (D). A l'inverse le réseau peut se révéler plus morcelé (plusieurs communautés de taille plus modeste) dans le sud-ouest de la France (T). Par ailleurs, ces communautés sont perméables et communiquent entre elles (liens croisés) ce qui renforce le risque de dissémination d'un agent pathogène comme IAHP au sein du réseau complet. Plusieurs échanges ont également lieu avec d'autres groupements qui ne sont pas répertoriés. L'intensité des échanges est forte au sein de chaque groupement et tous les groupements semblent interconnectés. Le réseau apparaît donc globalement dense et par conséquent vulnérable à la diffusion de certaines maladies (Rautureau, 2012).

Les canards sont de plus, capables de porter aussi bien un virus influenza faiblement pathogène (IAFP) qu'un IAHP sans présenter de signes cliniques (Dent et al., 2008b; Scoizec et al., 2017). Ils peuvent porter des charges virales importantes sans signes précoces (Dent et al., 2008). Leur capacité à survivre à l'infection peut également augmenter le délai de détection et ainsi la quantité de sites infectés par l'IA (Dent et al., 2008). Par ailleurs, le profil type de l'élevage foyer d'influenza aviaire français lors de l'épizootie 2015-2016 est bien celui d'un élevage comprenant au moins un atelier de palmipèdes gras associé à un autre atelier de galliformes dans 20% des cas. Associé à cela le fait que l'élevage de palmipèdes gras nécessite le plus souvent un passage sur parcours et par conséquent un risque d'exposition à la faune sauvage (Scoizec et al., 2017). Cela rend cette filière particulièrement vulnérable vis-à-vis du risque d'introduction et de dissémination de l'IAHP. Finalement, les liens épidémiologiques via les tournées, la densité de liens par groupement, l'interconnexion de ces derniers et la présence de sites ayant une activité mixte reliant ainsi différents acteurs, sont autant d'éléments qui accentuent la vulnérabilité de la filière « foie gras » vis-à-vis des virus influenza.

V-Conclusion

Entre novembre 2014 et mai 2016, Le réseau français de mouvements de canards de la filière « foie gras » est caractérisé par des communautés géographiquement restreintes mais interconnectées et par de longues chaînes de contacts notamment en tenant compte des contacts indirects via les tournées. La présence d'établissements de haute centralité (site mixte) engendre un risque accru de dissémination de virus IAHP. La structure du réseau, la capacité des canards à ne pas développer de signes cliniques, mais aussi les caractéristiques propres à cette filière (élevage sur parcours, importance des mouvements de lots en gavage) témoignent d'une vulnérabilité de ce secteur de production quant aux virus IAHP. L'influence de la structure de ce réseau sur le risque de

dissémination de l'influenza aviaire hautement pathogène doit être davantage explorée en utilisant des approches de modélisation. L'analyse de réseaux de mouvements de canards contribue à faire évoluer la surveillance basée sur le risque de l'IAHP dans la filière « foie gras ». Enfin, combiner une analyse de réseau de mouvements de canards et un modèle SIR intra site d'élevage permettrait d'évaluer l'influence des mouvements dans la dissémination des virus IA.

Bibliographie

- Bigras-Poulin, M., Thompson, R.A., Chriel, M., Mortensen, S., and Greiner, M. (2006). Network analysis of Danish cattle industry trade patterns as an evaluation of risk potential for disease spread. *Prev. Vet. Med.* 76, 11–39.
- Borgatti, S.P., Carley, K.M., and Krackhardt, D. (2006). On the robustness of centrality measures under conditions of imperfect data. *Soc. Netw.* 28, 124–136.
- Dent, J.E., Kao, R.R., Kiss, I.Z., Hyder, K., and Arnold, M. (2008a). Contact structures in the poultry industry in Great Britain: Exploring transmission routes for a potential avian influenza virus epidemic. *BMC Vet. Res.* 4, 27.
- Dent, J.E., Kao, R.R., Kiss, I.Z., Hyder, K., and Arnold, M. (2008b). Contact structures in the poultry industry in Great Britain: Exploring transmission routes for a potential avian influenza virus epidemic. *BMC Vet. Res.* 4, 27.
- Dommergues, L. (2011). Étude des contacts entre élevages bovins voisins dans une zone de Bourgogne infectée de Tuberculose par la méthode d'analyse des réseaux sociaux. Thèse de doctorat vétérinaire. Faculté de Médecine de Créteil.
- Hurand, J., Cadudal, F., and Litt, J. (2017). Production de palmipèdes gras Les réseaux de référence technico-économiques en France en 2015.
- Kao, R., Danon, L., Green, D., and Kiss, I. (2006). Demographic structure and pathogen dynamics on the network of livestock movements in Great Britain. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 273, 1999–2007.
- Kiss, I.Z., Green, D.M., and Kao, R.R. (2006). The network of sheep movements within Great Britain: network properties and their implications for infectious disease spread. *J. R. Soc. Interface* 3, 669–677.
- Kurscheid, J., Stevenson, M., Durr, P.A., Toribio, J.-A.L.M.L., Kurscheid, S., Ambarawati, I.G.A.A., Abdurrahman, M., and Fenwick, S. (2017). Social network analysis of the movement of poultry to and from live bird markets in Bali and Lombok, Indonesia. *Transbound. Emerg. Dis.* 64, 2023–2033.
- Lhomme, S. (2012). Les modèles de graphes théoriques.
- Martin, V., Zhou, X., Marshall, E., Jia, B., Fusheng, G., FrancoDixon, M.A., DeHaan, N., Pfeiffer, D.U., Soares Magalhães, R.J., and Gilbert, M. (2011a). Risk-based surveillance for avian influenza control along poultry market chains in South China: The value of social network analysis. *Prev. Vet. Med.* 102, 196–205.
- Martin, V., Zhou, X., Marshall, E., Jia, B., Fusheng, G., FrancoDixon, M.A., DeHaan, N., Pfeiffer, D.U., Soares Magalhães, R.J., and Gilbert, M. (2011b). Risk-based surveillance for avian influenza control along poultry market chains in South China: The value of social network analysis. *Prev. Vet. Med.* 102, 196–205.
- Ortiz-Pelaez, A., Pfeiffer, D.U., Soares-Magalhães, R.J., and Guitian, F.J. (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. *Prev. Vet. Med.* 76, 40–55.
- Rautureau, S. (2012). Simulations d'épizooties de fièvre aphteuse et aide à la décision : approches épidémiologique et économique.
- Rautureau, S., Dufour, B., and Durand, B. (2011). Vulnerability of animal trade networks to the spread of infectious diseases: a methodological approach applied to evaluation and emergency control strategies in cattle, France, 2005. *Transbound. Emerg. Dis.* 58, 110–120.
- Rosvall, M., Axelsson, D., and Bergstrom, C.T. (2009). The map equation. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 178, 13–23.
- Salines, M., Andraud, M., and Rose, N. (2017). Pig movements in France: Designing network models fitting the transmission route of pathogens. *PLOS ONE* 12, e0185858.
- Scoizec, A., Huneau_Salaün, A., Schmitz, A., Briand, F.X., Hamon, M., Bronner, A., Niqueux, E., and Le Bouquin, S. (2017). Caractéristiques des foyers français d'influenza aviaire hautement pathogènes de l'hiver 2015-2016 : analyse des données issues des enquêtes épidémiologiques.
- Soares Magalhães, R.J., Ortiz-Pelaez, A., Thi, K., Dinh, Q., Otte, J., and Pfeiffer, D.U. (2010). Associations between attributes of live poultry trade and HPAI H5N1 outbreaks: a descriptive and network analysis study in northern Vietnam. *BMC Vet. Res.* 6, 10.
- The Global Consortium for H5N8 and Related Influenza Viruses (2016). Role for migratory wild birds in the global spread of avian influenza H5N8. *Science* 354, 213–217.
- Tian, H., Zhou, S., Dong, L., Van Boeckel, T.P., Cui, Y., Newman, S.H., Takekawa, J.Y., Prosser, D.J., Xiao, X., Wu, Y., et al. (2015). Avian influenza H5N1 viral and bird migration networks in Asia. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 112, 172–177.
- Van Kerkhove, M.D., Vong, S., Guitian, J., Holl, D., Mangtani, P., San, S., and Ghani, A.C. (2009). Poultry movement networks in Cambodia: Implications for surveillance and control of highly pathogenic avian influenza (HPAI/H5N1). *Vaccine* 27, 6345–6352.

