

Contribution de la diffusion aéroportée à la dissémination du virus Influenza aviaire entre élevages



Cette synthèse a été rédigée avec le soutien du PNDAR de l'ITAVI (AE3)

Rousset N. ¹, Delpont M. ²

Contact : rousset@itavi.asso.fr

¹ ITAVI – PLOUFRAGAN

² École Nationale Vétérinaire de Toulouse - TOULOUSE

Résumé

Les crises d'Influenza aviaire (IA) successives ont dramatiquement affecté les filières avicoles ces dernières années, à la fois sur le plan économique mais aussi social. Dans ce contexte, comprendre la contribution potentielle de la diffusion aéroportée des particules virales est crucial pour améliorer les stratégies de prévention. Plusieurs éléments viennent étayer l'hypothèse de son implication dans la dissémination du virus. En effet, l'air des bâtiments d'élevage avicole est un mélange complexe composé d'une quantité non négligeable de particules, pouvant être émises à l'extérieur. Ces particules proviennent de fèces et urine, de débris d'aliments, de plumes, de peau, de litière, potentiellement contaminées et mises en suspension par de nombreux facteurs dont la ventilation, et l'activité des animaux. Plusieurs études ont permis de détecter du génome viral à l'extérieur de bâtiment d'élevage foyer ou non, à des distances relativement proches (10aine de m). Le caractère infectieux de ces dépôts dépend de plusieurs facteurs (souche de virus, charge virale, conditions climatiques...). Plusieurs études épidémiologiques ou s'appuyant sur de la modélisation des trajectoires des particules, ont montré que la voie aéroportée a pu très certainement jouer un rôle dans la propagation de proche en proche des virus d'IA sur certaines épidémies récentes en France ou à l'étranger. Parmi les différentes stratégies de maîtrise, la filtration de l'air est à ce jour la plus connue et utilisée en élevage. Néanmoins la gestion du risque de contamination aéroportée est encore peu souvent réfléchi dans les plans de biosécurité des élevages. Il est aujourd'hui difficile d'évaluer si les mesures de biosécurité en place sont nécessaires et suffisantes.

1. Introduction

Depuis 2016, l'Europe a fait face à 4 épisodes d'Influenza aviaire (IA) hautement pathogène (HP) de grande ampleur, qui ont touché à la fois les compartiments sauvages et domestiques. En 2020-2021, la France avait été particulièrement touchée, avec 492 foyers domestiques sur les 1 303 foyers recensés en Europe dans 29 pays différents. La saison 2021-2022, quant à elle, a connu une ampleur sans précédent avec 2 315 foyers domestiques dans 36 pays différents, dont 1 378 en France, touchant de nombreuses espèces (dindes et poulets de chair, poules pondeuses, palmipèdes) (Plateforme ESA, 2021, Anses, 2022).

Au cours de ces différents épisodes, la question de la contribution de la diffusion aéroportée à la dissémination du virus IA HP entre élevages a souvent été posée par les acteurs terrain. Cet article rassemble des éléments de réponses à cette question et propose quelques pistes de réflexion pour mieux comprendre ce risque et le maîtriser.

2. Densité des élevages sur un territoire : un facteur de risque important

Bien que Guinat et al. (2021) indiquent que les mouvements de palmipèdes semblent avoir constitué la cause majeure de transmission du virus IA au cours de l'épisode 2016-2017, ces auteurs soulignent que la proximité spatiale entre élevage

expliquerait tout de même un nombre important de foyers.

Le rôle de la densité des élevages avicoles et en particulier des élevages de canards dans la dynamique d'infection a été par ailleurs mis en évidence par des approches de modélisation (Guinat et al., 2019 ; Guinat et al., 2025). Ces résultats suggèrent que la proximité géographique des ateliers pourrait favoriser les modalités de diffusion par voie aéroportée (Lambert et al., 2022). La densité des élevages dans une zone donnée est un facteur de risque d'infection mis en évidence également à l'étranger pour différentes espèces de volailles (Garber et al., 2016 ; Kim et al., 2018 ; Nishiguchi, et al., 2007 ; Wells, 2017).

Lors de l'épizootie d'IAHP H5N8 de l'hiver 2020-2021 en France, à l'occasion d'une étude portant sur quatre foyers survenus en Vendée-Deux Sèvres, Scoizec et al., (2022) ont par ailleurs conclu au rôle très probable de la diffusion du virus vers le foyer secondaire via des aérosols/particules provenant des opérations de dépeuplement du foyer voisin, grâce à une analyse épidémiologique et phylogénétique réalisée sur les foyers (canards, poulets et pintades).

3. Composition de l'air des élevages avicole

Dans une revue de littérature, Cambra-Lopez et al. (2010) définissent les matières particulaires (PM) comme un mélange de plusieurs polluants comprenant à la fois des particules solides ou liquides en suspension dans un milieu gazeux.

Les PM provenant des bâtiments d'élevage sont issues de fèces et urine, de débris d'aliments, de plumes, de peau, de litière. Ces différentes sources de PM sont également porteuses de micro-organismes aéroportés (Zhao et al. 2014). Ainsi les PM, sont également composées de bactéries, virus viables ou non, d'endotoxines, de spores de champignons et moisissures, mais aussi d'autres polluants comme l'ammoniac (Zhao et al. 2014, Bist et al., 2022, Casey et al., 2006).

La composition des PM varie cependant en fonction du type de production (Zhao et al. 2014, Bist et al., 2022, Casey et al., 2006). En particulier, en ce qui concerne les micro-organismes aéroportés, la diversité des biocontaminants excrétés selon les différentes sources de PM et leur importance relative va varier d'une espèce animale à l'autre.

4. Quantités de particules présentes et émises par les élevages avicoles

La taille des particules peut être catégorisée selon différentes manières. Les études s'intéressant aux impacts environnementaux, considèrent généralement deux catégories de particules. Celles dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 10 μm (appelées les PM10) ou celles dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 2.5 μm (appelées les PM2.5). Le comportement des particules en termes de transport, sédimentation, ou remise en suspension est fortement dépendant de leur taille (Zhao et al. 2014).

A partir d'une synthèse des données disponibles dans différentes publications, Zhao et al. (2014) ont montré qu'en production de poulets de chair la concentration des particules < 5 μm serait de l'ordre de 0,42 à 1,14 mg/m^3 , et de 0,03 à 1,26 mg/m^3 en production de poules pondeuses. Quelques références obtenues en France peuvent également être citées sur cette fraction de particules : 2,6 mg/m^3 en fin de lot de poulet de chair (Rousset et al., 2017), 0,48 mg/m^3 en poules pondeuses système cages, et 0,130 mg/m^3 en système alternatifs (Hunneau et al., 2013). Peu de références existent en production de canards. Rousset et al. (2022) avaient cependant mesuré l'exposition de producteurs aux particules alvéolaires (c'est-à-dire la concentration en particules mesurées à hauteur des voies respiratoires via un capteur portable), et avaient obtenu des concentrations comprises entre 0.38 et 1,32 mg/m^3 . Il est toutefois important de souligner que la comparaison des études peu présenter certaines difficultés de part des différences de méthodologies, temporalité, pratiques d'élevage.

Concernant les émissions de ces PM dans l'atmosphère, il est reconnu depuis longtemps que les activités d'élevage, et plus particulièrement de volailles, constituent d'importantes contributrices (Takai et al., 1998). Selon le guide pour la réalisation des inventaires d'émission nationaux (EMEP/EEA, 2023), les facteurs d'émission de PM2.5 et PM10 s'élèveraient respectivement à 0,002 et 0,02 $\text{kg}/\text{emplacement}/\text{an}$ pour les poulets de chair. Toutefois, Genot et al (2022), précisent que pour les bâtiments en extraction latérale et sol en terre battue que l'on peut retrouver en France, ces valeurs seraient plutôt de à 0,001 et 0,0085 $\text{kg}/\text{emplacement}/\text{an}$. Dans cette même étude, les facteurs d'émissions de l'EMEP 2023 ont été confirmés au niveau français pour les autres combinaisons d'itinéraires techniques (sols béton/ terre battue avec extraction latérale/ haute). Pour les

poules pondeuses, les facteurs d'émission à considérer sont respectivement pour les PM_{2.5}, et PM₁₀ en poule 0,003 et 0,04 kg/emplacement/an, 0,02 et 0,11 kg/emplacement/an en dinde, 0,02 et 0,14 kg/emplacement/an en canards.

Le type de bâtiment et en particulier le système de ventilation, la présence de litière et sa composition, la saison (conditions climatiques et durée de jour), le type d'animaux, leur âge, leur poids, leur activité, la densité d'élevage, le type de gestion des effluents sont autant de facteurs importants de variation des quantités de PM produites, mises en suspension, puis émises à l'extérieur du bâtiment (Takai et al., 1998, Bist et al., 2022 ; Huneau et al., 2013, Oppliger et al., 2008, Peña Fernandez et al. 2019, Rousset et al., 2022).

5. Présence de virus IA HP dans l'environnement des bâtiments

Pour étayer le rôle de cette voie de transmission, plusieurs équipes de recherche ont collecté des bioaérosols et/ou réalisés des prélèvements environnementaux pour recueillir des particules sédimentées, et y rechercher la présence de génome viral. On peut citer par exemple en France, l'étude de Scoizec et al (2017) qui se sont intéressés à cette question dès l'épisode 2016-2017. Ils ont ainsi pu détecter du génome viral H5N8 HP, à l'intérieur et l'extérieur de 5 bâtiments d'élevage (canards et poulets de chair), entre 50 et jusqu'à 110 m sous le vent des sorties d'air. Au cours de l'hiver 2020-2021, Filaire et al (2022) ont quant à eux révélé la présence de génome viral IAHP H5N8 sur des particules sédimentées et aérosols, collectés dans des élevages avicoles (canards, poulets, cailles et oies) ne présentant pas encore de signes cliniques, bien que proches de foyers. A l'étranger, Wei et al, 2018 ont également détecté de l'ARN viral jusqu'à 100 m depuis un marché de volailles vivantes en Chine. Aux Etats-Unis, Torremorell et al (2016), ont quant à eux détecté la présence de virus infectieux IAHP H5N2 sur des prélèvements d'air, lors de l'épidémie de l'hiver 2015, dans et jusqu'à 70 m autour de bâtiments de dindes et poules pondeuses « foyers ». L'ARN viral a également été détecté jusqu'à 1 000 m de l'exploitation. Hostyn et al. (2025) ont quant à eux détecté de l'ARN viral jusqu'à 40 m autour d'un foyer de poules pondeuses en décembre 2021, en Belgique à partir d'un prélèvement de bioaérosols.

James et al, (2023) qui ont travaillé sur l'épidémie de 2022/2023 au Royaume-Uni, insistent néanmoins sur la notion de courte distance pour la transmission aéroportée de virus infectieux (<10 m), ce qui n'empêche pas que de l'ARN viral puisse être transporté à moyenne distance (< 80 m). Hostyn et al. (2025) suggèrent par ailleurs que la densité d'animaux à l'intérieur du bâtiment impacte la concentration virale émise et donc la viabilité et persistance du virus dans l'environnement. Scoizec et al. (2017), va également dans ce sens pour expliquer les différences de niveaux de détection obtenus dans les 5 foyers suivis, et ajoute également qu'il faut tenir compte de la proportion d'animaux excréteurs au moment du prélèvement.

Si les virus IAHP sont essentiellement excrétés par voies respiratoire et digestive (Beerens et al. 2021), il n'est pas surprenant de les retrouver dans les aérosols. En outre, les fragments de plumes seraient également susceptibles d'être contaminés/contaminants. En effet, Gaide et al. (2023) ont montré que l'infection par le virus IAHP H5 provoque des nécroses de l'épithélium et l'inflammation du derme des plumes, en particulier chez le canard, qui s'avère particulièrement sensible à l'infection par de faibles doses de virus (James 2023) et chez qui une importante fenêtre d'excrétion précédant la phase clinique est documentée (Vergne et al 2020). Il est ainsi possible de le détecter très précocement dans les plumes en croissance. Les fragments qui se détachent de l'épithélium des plumes des oiseaux infectés sont aérosolisés, et restent longtemps porteurs de particules virales infectieuses (Gaide, 2023).

De plus, il est également important de garder en mémoire que la viabilité des microorganismes, une fois aéroportés, dépend de plusieurs facteurs (humidité, température, concentration en oxygène, en ozone, radiation (UV, γ -ray, X-ray), ionisation de l'air, et polluants de l'air (CO, SO₂, et NO_x) (Zhao et al. 2014). D'une manière générale, les virus IA sont sensibles à la température : plus celle-ci augmente, plus les chances de survie du virus diminuent. Kurmi et al (2013), ont montré que le virus IA H5N1 isolé en Inde en 2006, pouvait survivre dans les fèces 8 semaines à 4 °C, 5 jours à 24°C, 24 h à 37 °C et 18h à 42 °C. Ces résultats confirment ceux obtenus par Shahid et al. (2009) qui concluaient à une inactivation du virus H5N1 isolé au Pakistan en 2006, après 1 jour à 28°C, mais qui restait viable pendant plus de 100 jours à 4°C. Cette même étude permettait de mettre en évidence un effet néfaste du pH sur la survie du

virus (pH acide <1-3, ou basique et basique >11-13). La lumière UV quant à elle ne s'est pas avérée efficace pour inactiver complètement le virus même en l'absence de matière organique.

6. Taille des particules véhiculant le virus IAHP

La taille des particules sur lesquelles le virus est détecté, est donc une question importante à la fois pour comprendre les distances potentielles de diffusion et la possibilité d'infecter d'autres animaux (pénétration pulmonaire).

De manière générale, plus les PM sont grosses, plus elles peuvent contenir de particules virales. Dans l'étude de Filaire et al., 2022, le génome viral a été détecté en plus grandes quantités sur les fractions de particules d'un diamètre > 1 µm, même si on en retrouve également sur des particules < 1 µm. Wei et al, 2018 vont également dans ce sens, ayant détecté de l'ARN viral en plus grande quantité sur les fractions de particules > 1 µm. Torremorell et al (2016), sur des aérosols de plus de 2,1 µm. Néanmoins, du point de vue du risque de transmission, il faudra également considérer que plus les PM ont un diamètre important, moins longtemps elles restent aéroportées et donc moins elles peuvent diffuser loin.

7. Trajectoires des particules véhiculant le virus IAHP

La modélisation de la trajectoire des particules, en tenant compte de leur taille et des conditions météorologiques, constitue une approche intéressante pour évaluer la contribution possible de la voie aéroportée à une épidémie.

Ainsi, en modélisant les trajectoires des mouvements d'air et les concentrations de virus associées, Zhao et al (2019) ont pu estimer que la majorité des 77 cas d'IAHP survenus dans l'Iowa lors de cette épidémie de l'hiver 2015 aux Etats-Unis (dindes, poules pondeuses et poulettes, reproducteurs, basse-cour, couvoirs), auraient pu avoir pour origine des virus en suspension dans l'air, transportés par des particules fines. Ssematimba et al., 2012, ont également conclu que la voie aéroportée pouvait contribuer à expliquer jusqu'à 25% des contaminations à courte distance à l'occasion d'une épidémie d'IAHP aux Pays-Bas. Ces conclusions sont issues d'un travail de modélisation des quantités de particules déposées à différentes distances sous le panache d'un foyer.

La contribution de la voie aéroportée semble cependant à relativiser lorsque les distances augmentent (plusieurs km) (Guinat et al, 2018 ; Nguyen et al., 2023, Zhao et al. 2019, Ssematimba, 2012), et dépend également du type de production, et de la taille du troupeau (Nguyen et al. 2023, Zhao et al., 2019). Les conditions météorologiques (vitesse du vent et directions), et topologiques pourraient également jouer un rôle en augmentant plus ou moins rapidement l'effet de dispersion des particules virales (Wei et al, 2018).

8. Stratégies de réduction des émissions de PM

Les stratégies de réduction des émissions de PM mettent généralement en œuvre des mécanismes physiques. Les PM sont éliminées de l'air en agissant sur les phénomènes de sédimentation (séparation des particules dispersées dans l'air sous l'action de la gravité), d'impaction (dépôt de particules dû à leur élan les faisant dévier des lignes d'écoulement de l'air et les faisant entrer en collision avec des bifurcations), de diffusion (processus de transfert de masse de particules provoqué par un mouvement moléculaire aléatoire (mouvement brownien) et associé à un mouvement moléculaire) ou de précipitation électrostatique (utilisation d'un champ électrostatique pour précipiter ou éliminer des particules chargées) (Zhao et al., 2014). Ces différents phénomènes agissent tous de manière combinée sur les particules, mais on peut retenir que les plus grosses particules seront plus sensibles à la sédimentation et l'impaction, tandis que les plus fines (<0,5 µm) seront plus impactées par les phénomènes de diffusion (Zhao et al., 2014, Bist et al. 2022).

Concernant la réduction des microorganismes aéroportés, des mécanismes biologiques peuvent être utilisés en complément, permettant de réduire leur viabilité (dénaturation de la membrane phospholipidique, des protéines ou des acides nucléiques, réduction de l'activité enzymatique) (Zhao et al., 2014).

Dans leur revue de littérature, Bist et al. (2022) rappellent que trois types de stratégie peuvent être mises en œuvre pour atténuer les émissions de PM : les techniques de dilution et brassage de l'air ambiant (système de ventilation et contrôle de la température et humidité...), les techniques de contrôle de la source (qualité de la litière, système de gestion des déjections, vaporisation d'huile ou d'eau, d'eau acidifiée ou électrolysée sur la litière...) et les

techniques d'élimination ou de nettoyage des PM (système de filtration sèche, et/ou biofiltration, laveurs d'air, précipitateurs électrostatiques ou des ionisateurs). Si ces différentes techniques ont pu montrer leur efficacité sur la réduction des émissions de PM, certaines peuvent impliquer des effets secondaires non désirables, comme la corrosion du matériel pour la vaporisation d'eau électrolysée sur la litière, ou l'augmentation des émissions d'ammoniac. La filtration de l'air semble à ce jour la stratégie la plus répandue pour piéger les PM en élevage, avec la contrainte technique de devoir (1) canaliser des volumes d'air viciés non négligeables et (2) de n'être utilisables que sur des bâtiments à ventilation dynamique. Ouyong et al. (2023) ont récemment réalisé une revue des technologies permettant de contrôler la diffusion des bioaérosols entre élevages. Les technologies (en développement) les plus prometteuses selon eux semblent être les précipitateurs électrostatiques (en complément ou non des filtres secs) et les UV-C (en combinaison avec une autre méthode de réduction des PM).

Par ailleurs, d'autres pistes peuvent être envisagées dans l'environnement extérieur proche du bâtiment. Parmi elles on peut citer la végétation. Qin et al. (2022) ont par exemple utilisé la dynamique des fluides computationnelle (CFD) pour évaluer les effets d'une amélioration de la végétation des parcs urbains sur la diffusion et les dépôts des PM. Cette étude montre qu'un taux de couverture de plus 37,8 % ou une densité de végétation de plus de 1,8 m³/m², permet une réduction importante des concentrations de PM_{2,5} au niveau des piétons. Guo et al. (2019) ont par ailleurs montré l'intérêt de l'installation de haies végétales en sortie de ventilation de bâtiments de poules pondeuses en cages (à environ 4 m), sur la réduction des émissions de PM_{2,5} et PM₁₀. L'importance de cette réduction varie avec le temps et le type de végétaux installés (de 0 à 60 % de réduction). Les auteurs soulignent par ailleurs que la rugosité des feuilles peut aider à intercepter davantage de PM. D'autres facteurs sont à prendre en considération tels que l'angle des pales, ou l'interaction avec le vent qui mériterait d'être investiguée.

Zhao et al (2019) ont montré, via des méthodes de modélisation des trajectoires des mouvements d'air et des concentrations de virus, que le risque de transmission du virus IAHP par voie aérienne était considérablement réduit par la filtration de l'air à l'entrée des bâtiments d'élevage. Sake et al. (2025)

ont par ailleurs testé un système de filtration de l'air entrant sur un bâtiment de dindes de chair (transformation du système de ventilation statique en système dynamique), avec des performances intéressantes sur la réduction des particules (-93 % des PM₁, PM₁₀ et nanoparticules sur la plupart des périodes suivies), des moisissures et levures.

9. Conclusion

Plusieurs indices étayent aujourd'hui la contribution de la diffusion aéroportée à la dissémination de virus IA HP entre élevages. Les sources de particules dans les élevages avicoles ne manquent pas même si les quantités émises dépendent de nombreux facteurs dont les caractéristiques du bâtiment, les pratiques d'élevage, les caractéristiques des animaux eux-mêmes. Le dépôt des particules virales est plutôt à considérer à des distances proches des bâtiments émetteurs (10aine de m). Le caractère infectieux de ces particules n'est néanmoins pas garanti et va dépendre de nombreux facteurs dont la charge virale du bâtiment émetteurs et les conditions climatiques extérieures. D'une manière générale la question de la diffusion de PM et leur dépôt dans l'environnement restent à creuser sous l'angle de l'analyse de risque sanitaire qu'elles peuvent représenter dans différents contextes d'élevage. Aussi, les facteurs qui modulent cette diffusion dans l'environnement seraient également à investiguer de manière plus approfondie.

Néanmoins, les éléments présentés dans cet article peuvent soulever la question de la contamination des voies de circulation de l'exploitation, qui pourrait favoriser de manière indirecte la propagation du virus à des bâtiments proches, via les mouvements de véhicules ou personnes. Ceci pourrait en partie expliquer que la densité d'élevages au sein d'un territoire soit un facteur de risque prépondérant.

La gestion de ce risque est cependant encore peu souvent réfléchi dans les plans de biosécurité des élevages. Au-delà des connaissances actuelles sur les facteurs d'émission de particules propres à chaque système d'élevage, il serait intéressant d'étudier comment ces particules se dispersent en sortie de bâtiment, quel est l'effet de dilution de ces particules, une fois émises à l'extérieur, et l'impact de différentes configurations (végétation, topologies...). Cela permettrait de pouvoir apporter quelques éléments de réponse sur la question de la dose virale à laquelle un bâtiment pourrait potentiellement être soumis en fonction de l'excrétion d'un bâtiment voisin émetteur.

Références bibliographiques

- Anses, 2022. Bilan IAHP 2022. Synthèse des travaux effectués par l'Anses (saisine 2022- AST-0098). Maisons-Alfort : Anses, 38 pp.
- Beerens N, Germeraad EA, Venema S, Verheij E, Pritz-Verschuren SBE, Gonzales JL. Comparative pathogenicity and environmental transmission of recent highly pathogenic avian influenza H5 viruses. *Emerg Microbes Infect.* 2021 Dec;10(1):97–108.
- Bist, R.B., Chai, L., (2022). Advanced Strategies for Mitigating Particulate Matter Generations in Poultry Houses. *Applied Sciences* 12, 11323.
- Cambra-López, M., Aarnink, A.J.A., Zhao, Y., Calvet, S., Torres, A.G., (2010). Airborne particulate matter from livestock production systems: A review of an air pollution problem. *Environmental Pollution* 158, 1–17.
- Casey, K.D., Bicudo, J.R., Schmidt, D.R., Singh, A., Gay, S.W., Gates, R.S., D, J.L., J, H.S., 2006. Air Quality and Emissions from Livestock and Poultry Production / Waste Management Systems. In M. Rice, D. F. Caldwell, F. J. Humenik, M. Rice, D. F. Caldwell, & F. J. Humenik (Éds.), *Animal Agriculture and the Environment* (p. 1-40).
- EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023. Technical guidance to prepare national emission inventories, pp32.
- Filaire, F., Lebre, L., Foret-Lucas, C., Vergne, T., Daniel, P., Lelièvre, A., de Barros, A., Jbenyeni, A., Bolon, P., Paul, M., Croville, G., Guérin, J.-L., 2022. Highly Pathogenic Avian Influenza A(H5N8) Clade 2.3.4.4b Virus in Dust Samples from Poultry Farms, France, 2021. *Emerg Infect Dis* 28, 1446–1450.
- Gaide, N., Filaire, F., Bertran, K., Crispo, M., Dirat, M., Secula, A., Foret-Lucas, C., Payré, B., Perlas, A., Cantero, G., Majó, N., Soubies, S., Guérin, J.-L., 2023. The Feather Epithelium Contributes to the Dissemination and Ecology of clade 2.3.4.4b H5 High Pathogenicity Avian Influenza Virus in Ducks. *Emerg Microb infect* 12:2, 2272644.
- Garber, L., Bjork, K., Patyk, K., Rawdon, T., Antognoli, M., Delgado, A., Ahola, S., McCluskey, B., 2016. Factors Associated with Highly Pathogenic Avian Influenza H5N2 Infection on Table-Egg Layer Farms in the Midwestern United States, 2015. *Avian Diseases* 60, 460–466.
- Genot N., Blazy V., Galliot P., Deruwez J., Desdouet E., Hassouna M., 2022. Facteur d'émission de particules en poulet de chair. Quatorzièmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras, Tours, 9 et 10 mars 2022
- Guinat, C., Valenzuela Agüí, C., Briand, F.-X., Chakraborty, D., Fournelle, L., Lambert, S., Jimenez Pellicer, A., Rautureau, S., Gerbier, G., du Plessis, L., Stadler, T., Grasland, B., Paul, M.C., Vergne, T., 2025. Poultry farm density and proximity drive highly pathogenic avian influenza spread. *Commun Biol* 8, 1306.
- Guinat, C., Rouchy, N., Camy, F., Guérin, J.L., Paul, M.C., 2018. Exploring the Wind-Borne Spread of Highly Pathogenic Avian Influenza H5N8 During the 2016–2017 Epizootic in France. *Avian Diseases* 63, 246–248.
- Guinat C, Artois J, Bronner A, Guérin JL, Gilbert M, Paul MC, 2019. Duck production systems and highly pathogenic avian influenza H5N8 in France, 2016-2017. *Sci Rep.* 2019 Apr 16;9(1):6177.
- Guinat, C., Durand, B., Artois, J., Gilbert, M., Bronner, A., Corre, T., Rautureau, S., Rouchy, N., Camy, F., Scoizec, A., Bouquin, S.L., Vergne, T., Guérin, J.-L., Paul, M., 2021. Revue des facteurs de risque spatialisés de transmission du virus de l'influenza aviaire hautement pathogène H5N8 en France en 2016-2017 92.
- Guo, L., Ma, S., Zhao, D., Zhao, B., Xu, B., Wu, J., Tong, J., Chen, D., Ma, Y., Li, M., Chang, Z., 2019. Experimental investigation of vegetative environment buffers in reducing particulate matters emitted from ventilated poultry house. *Journal of the Air & Waste Management Association* 69, 934–943.
- Hostyn, P., Steensels, M., Lambrecht, B., 2025. Detection, transmission and spread of airborne avian influenza and Newcastle disease viruses: experimental and field investigations. *Vet Res* 56, 102. <https://doi.org/10.1186/s13567-025-01533-9>
- Huneau-Salaün, A., Rousset, N., Homo, N., Balaine, L., Aubert, C., Le Bouquin, S., (2013). Concentration en poussières dans l'air ambiant des bâtiments de poules pondeuses. Dixièmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras, La Rochelle.
- James J, Billington E, Warren CJ, De Sliva D, Di Genova C, Airey M, et al. Clade 2.3.4.4b H5N1 high pathogenicity avian influenza virus (HPAIV) from the 2021/22 epizootic is highly duck adapted and poorly adapted to chickens. *J Gen Virol.* 2023 May;104(5).
- James, J., Warren, C.J., De Silva, D., Lewis, T., Grace, K., Reid, S.M., Falchieri, M., Brown, I.H., Banyard, A.C., 2023. The Role of Airborne Particles in the Epidemiology of Clade 2.3.4.4b H5N1 High Pathogenicity Avian Influenza Virus in Commercial Poultry Production Units. *Viruses* 15, 1002.
- Kim, W.-H., An, J.-U., Kim, J., Moon, O.-K., Bae, S.H., Bender, J.B., Cho, S., 2018. Risk factors associated with highly pathogenic avian influenza subtype H5N8 outbreaks on broiler duck farms in South Korea. *Transboundary and Emerging Diseases* 65, 1329–1338.
- Kurmi, B., Murugkar, H.V., Nagarajan, S., Tosh, C., Dubey, S.C., Kumar, M., 2013. Survivability of Highly Pathogenic Avian Influenza H5N1 Virus in Poultry Faeces at Different Temperatures. *Indian J. Virol.* 24, 272–277.

Références bibliographiques

- Lambert S, Durand B, Andraud M, Delacourt R, Scoizec A, Le Bouquin S, Rautureau S, Bauzile B, Guinat C, Fourtune L, Guérin JL, Paul MC, Vergne T, 2022. Two major epidemics of highly pathogenic avian influenza virus H5N8 and H5N1 in domestic poultry in France, 2020-2022. *Transbound Emerg Dis.* 2022 Nov;69(6):3160-3166
- Nguyen, X.D., 2023. Airborne transmission of pathogens emerging in the poultry industry. A Dissertation Presented for the Doctoral of Philosophy Degree The University of Tennessee, Knoxville
- Nishiguchi, A., Kobayashi, S., Yamamoto, T., Ouchi, Y., Sugizaki, T., Tsutsui, T., 2007. Risk Factors for the Introduction of Avian Influenza Virus into Commercial Layer Chicken Farms During the Outbreaks Caused by a Low-Pathogenic H5N2 Virus in Japan in 2005. *Zoonoses and Public Health* 54, 337–343.
- Oppliger, A., Charrière, N., Droz, P.-O., Rinsoz, T., (2008). Exposure to Bioaerosols in Poultry Houses at Different Stages of Fattening; Use of Real-time PCR for Airborne Bacterial Quantification. *The Annals of Occupational Hygiene* 52, 405–412.
- Peña Fernández, A., Demmers, T.G.M., Tong, Q., Youssef, A., Norton, T., Vranken, E., Berckmans, D., 2019. Real-time modelling of indoor particulate matter concentration in poultry houses using broiler activity and ventilation rate. *Biosystems Engineering* 187, 214–225.
- Plateforme ESA, 2021. Influenza aviaire hautement pathogène en Europe : bilan de la saison 2020-2021. *Veille sanitaire internationale – Note de Bilan.* 18 pp
- Rousset N., Brame C., Ruch M., Galliot P., Cleuziou A-C, Goizin G., Hassouna M., Huneau A., Guillemin M-T., (2017). Qualité de l'air en élevage de poulet de chair : exposition des éleveurs et premières voies de réduction. *TeMa*, 43, 21-28
- Rousset N., Brohan G., Vanhoye A., Boizumeau N., Delaqueze C., Bouillaud D., Litt J. (2022). Qualité de l'air en atelier d'engraissement de canards : niveaux d'exposition aux poussières, facteurs de variation. *Quatorzièmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras*, Tours, 9 et 10 mars 2022.
- Sake, B., Butenholz, K., Kempf, K., Kemper, N., Schulz, J., 2025. Hybrid barn: the switch from a naturally to a mechanically ventilated turkey barn to protect from harmful bioaerosols. *Front. Vet. Sci.* 12. <https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1443139>
- Scoizec A., Huneau-Salaün A., Souillard R., Thomas R., Schmitz A., Briand F-X., Massin P., Martenot C., Cherbonnel-Pansart M., Allée C., Busson R., Guillemoto C., Louboutin K., Pierre I., Souchaud F., Niqueux E., Grasland B., Mourrieras C. et Le Bouquin-Leneveu S., (2022). Maîtriser le risque de diffusion de l'Influenza hautement pathogène entre les élevages de volailles : un exemple de la zone vendée-Deux Sèvres lors de l'épizootie d'IAHP H5N8 de 2020-2021 en France. *Quatorzièmes Journées de la Recherche Avicole et Palmipèdes à Foie Gras*, Tours, 9 et 10 mars 2022
- Scoizec, A., Niqueux, E., Thomas, R., Daniel, P., Schmitz, A., Le Bouquin-Leneveu, S., 2017. Détection du génome de virus influenza aviaire A de sous type H5 dans des échantillons d'air collectés à l'intérieur, à l'extérieur et sous le vent de bâtiments de volailles infectées par un virus d'influenza aviaire hautement pathogène de sous type H5N8. *Bulletin épidémiologique, santé animale et alimentation.*
- Shahid, M.A., Abubakar, M., Hameed, S., Hassan, S., 2009. Avian influenza virus (H5N1); effects of physico-chemical factors on its survival. *Virol J* 6, 38.
- Ssematimba, A., Hagenaars, T.J., Jong, M.C.M. de, 2012. Modelling the Wind-Borne Spread of Highly Pathogenic Avian Influenza Virus between Farms. *PLOS ONE* 7, e31114.
- Takai, H., Pedersen, S., Johnsen, J.O., Metz, J.H.M., Groot Koerkamp, P.W.G., Uenk, G.H., Phillips, V.R., Holden, M.R., Sneath, R.W., Short, J.L., White, R.P., Hartung, J., Seedorf, J., Schröder, M., Linkert, K.H., Wathes, C.M., (1998). Concentrations and Emissions of Airborne Dust in Livestock Buildings in Northern Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research* 70, 59–77.
- Torremorell, M., Alonso, C., Davies, P.R., Raynor, P.C., Patnayak, D., Torchetti, M., McCluskey, B., 2016. Investigation into the Airborne Dissemination of H5N2 Highly Pathogenic Avian Influenza Virus During the 2015 Spring Outbreaks in the Midwestern United States. *Avian Diseases* 60, 637–643.
- Vergne T, Gubbins S, Guinat C, Bauzile B, Delpont M, Chakraborty D, et al. Inferring within-flock transmission dynamics of highly pathogenic avian influenza H5N8 virus in France, 2020. *Transbound Emerg Dis.* 2021 Nov;68(6):3151–5.
- Wei, J., Zhou, J., Cheng, K., Wu, J., Zhong, Z., Song, Y., ... & Li, Y. (2018). Assessing the risk of downwind spread of avian influenza virus via airborne particles from an urban wholesale poultry market. *Building and environment*, 127, 120-126.
- Wells, S.J., Kromm, M.M., VanBeusekom, E.T., Sorley, E.J., Sundaram, M.E., VanderWaal, K., Bowers, J.W.J., Papinaho, P.A., Osterholm, M.T., Bender, J., 2017. Epidemiologic Investigation of Highly Pathogenic H5N2 Avian Influenza Among Upper Midwest U.S. Turkey Farms, 2015. *Avian Diseases* 61, 198–204.

Références bibliographiques

- Zhao, Y., Aarnink, A.J.A., De Jong, M.C.M., Groot Koerkamp, P.W.G., 2014. Airborne Microorganisms From Livestock Production Systems and Their Relation to Dust. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 44, 1071–1128.
- Zhao, Y., Richardson, B., Takle, E., Chai, L., Schmitt, D., Xin, H., 2019. Airborne transmission may have played a role in the spread of 2015 highly pathogenic avian influenza outbreaks in the United States. *Sci Rep* 9, 11755.

Abstract :

Successive outbreaks of avian influenza (AI) have had a dramatic impact on the poultry industry in recent years, both economically and socially. In this context, understanding the potential contribution of airborne transmission of viral particles is crucial for improving prevention strategies. Several factors support the hypothesis of its involvement in the spread of the virus. Indeed, the air in poultry buildings is a complex mixture containing a significant quantity of particles that can be emitted outside. These particles come from feces and urine, food debris, feathers, skin, and litter. They may be contaminated and suspended by numerous factors, including ventilation and animal activity. Several studies have detected viral genomes outside of poultry houses whether they are infected or not, at relatively close distances (around several dozen meters). The infectious nature of these deposits depends on several factors (virus strain, viral load, climatic conditions, etc.). Several epidemiological studies, or studies based on particle trajectory modeling, have shown that airborne transmission may have played a role in the spread of AI viruses in certain recent epidemics in France and abroad. Among the various control strategies, air filtration appears to be the most efficient and widespread tool in chicken and pig farms. Even if the risk of airborne spread of pathogens remains difficult to assess, it is rarely accounted for in poultry farm biosecurity plans.