

Papovit - Particules en élevages de porcs et de volailles et itinéraires techniques : mise au point méthodologique et acquisition de facteurs d'émissions

Guingand N.¹, Blazy V.², Boulestreau-Boulay A.L.³, Génot N.⁴, Hassouna M.⁵, Lagadec S.⁴, Joubert A.⁶, Le Coq L.⁶

¹ Ifip-Institut du Porc, F-35651 Le Rheu

² Itavi, F- 22440 Ploufragan

³ Chambre Régionale d'Agriculture des Pays de Loire, F- 49105 Angers

⁴ Chambre d'Agriculture de Bretagne, F-35042 Rennes

⁵ INRAE, F-35000 Rennes

⁶ IMT Atlantique, F-44307 Nantes

Correspondance : nadine.guingand@ifip.asso.fr

Résumé

L'établissement de facteurs d'émissions de particules primaires (TSP, PM10 et PM2,5) représentatifs des conditions d'élevage porcin et avicole français est essentiel pour la conduite d'une politique efficace de réduction des émissions de particules permettant le respect des engagements de la France au niveau européen. C'est dans cet objectif que le projet Papovit a dans un premier temps établi une méthodologie de mesures adaptée aux bâtiments abritant des porcs charcutiers et des volailles de chair. Dans un deuxième temps, cette méthodologie a été appliquée à une trentaine de bâtiments pour chaque production en vue de déterminer les premiers facteurs d'émissions pour les trois fractions de particules primaires. Le projet Papovit a aussi permis de créer différents supports de diffusion (calculateur, vidéos, podcasts, fiche pédagogique interactive) en vue de sensibiliser les acteurs actuels de deux filières mais aussi les étudiants à l'importance des particules tant d'un point environnemental que de celui de la santé des animaux et des travailleurs.

Mots-clés : pratiques d'élevage, mesures, porcs charcutiers, poulets

Abstract : Papovit - Particles in pig and poultry housings and production systems: methodology definition and identification of emission factors.

The establishment of primary particle emissions factors (TSP, PM10 and PM2,5) representative of French pig and poultry farming conditions is essential for the implementation of an effective policy of reduction in order to meet the French commitments at the European level. With this aim in mind, the Papovit project first established a measurement methodology adapted to building housing for fattening pigs and broilers. In a second step, this methodology was applied to about thirty buildings for each production in order to determine the first emission factors for the three primary particle fractions. Various dissemination media (videos, podcast, calculator, interactive educational sheet) were developed during this project for teachers and future players of these production sectors.

Keywords: breeding practices, measurements, fattening pigs, broilers

Introduction

A ce jour, les inventaires nationaux réalisés par le Citepa sur les particules sont établis sur la base de facteurs d'émissions extraits du guide européen de l'EMEP (European Monitoring and Evaluation Program), facteurs obtenus dans des conditions différentes de nos conditions nationales de production. Le plan « Particules » établi par la France contient un volet agricole qui fixe des objectifs de réduction de plus de 50 % des PM_{2,5} par rapport aux émissions de 2005. Il est donc essentiel (i) de connaître les émissions de particules dans nos conditions nationales de production porcine et avicole et (ii) d'identifier des leviers d'action pour réduire ces émissions et (iii) de sensibiliser les acteurs des deux filières à cette thématique. Pour cela, le projet Papovit (Particules en élevages de porcs et de volailles ; mise au point méthodologique et acquisition de facteurs d'émissions) avait pour objectifs :

- La mise au point d'une méthodologie de mesures complète et robuste des émissions directes de particules primaires (TSP : particules toutes tailles confondues – acronyme de Total Suspended Particles, PM₁₀ : particules dont la taille est inférieure à 10 µm et PM_{2,5} : particules dont la taille est inférieure à 2,5 µm) adaptées aux bâtiments français d'élevage de porcs et de volailles
- L'acquisition de facteurs d'émission de particules primaires en élevages de porcs et de volailles pour différents itinéraires techniques représentatifs des conditions de terrain de ces deux productions ; l'objectif étant aussi d'identifier des itinéraires faiblement émetteurs de particules
- L'élaboration de support de diffusion de ces acquis (outil de calcul, kit pédagogique, vidéos) à destination des acteurs des deux productions en vue de les sensibiliser à cette problématique.

La réalisation du projet Papovit, porté par l'Ifip-Institut du porc, est le résultat d'une collaboration avec les chambres d'agriculture de Bretagne et des Pays de la Loire, l'Inrae, l'IMT Atlantique et Agrocampus Ouest.

1. Mettre au point une méthode de mesures des particules primaires adaptées à nos conditions nationales de production

1.1 Choisir une technologie de mesures adaptées aux conditions d'élevage

Une centaine de publications a été recensée concernant la mesure des particules primaires en conditions expérimentales mais aussi en conditions de terrain. Une analyse des différentes technologies de mesures des particules identifiées dans la littérature a fait l'objet d'une première synthèse sur laquelle les experts du projet se sont appuyés (Lagadec *et al.*, 2020).

Dans un même temps, un cahier des charges intégrant les spécificités des élevages de porcs et de volailles a été établi par les partenaires du projet. En effet, la méthode de mesure et l'équipement associé devaient répondre aux caractéristiques des lieux de mesures tant sur les niveaux de concentrations en particules attendus que sur les conditions d'ambiance (température, hygrométrie, concentration en gaz...). De plus, le poids et l'encombrement de l'équipement représentaient des critères supplémentaires à intégrer ; l'équipement devait pouvoir être aisément déplacé d'élevage en élevage. Les mesures devaient pouvoir être réalisées en continu pour accéder aux évolutions dynamiques des concentrations des trois fractions principales (TSP, PM₁₀ et PM_{2,5}) et permettre d'obtenir des concentrations en nombre et en masse. A partir de ce cahier des charges et de la synthèse sur les matériels de mesures, les partenaires du projet ont arrêté leurs choix sur deux méthodes de mesures ; à savoir la méthode optique et la méthode gravimétrique. Pour la méthode optique, le compteur Grimm Mini-Las 11-A (Grimm Aerosol Technik GmbH&Co. KG, Ainring, Germany) a été retenue. Ce compteur de particules est un spectromètre portatif qui permet la mesure instantanée et en continu de la concentration et de la granulométrie de plusieurs fractions de particules par diffraction de la lumière. Le résultat est exprimé en nombre de particules par m³ d'air ou en masse par m³ d'air après un calcul de conversion. L'ensemble de l'air

échantillonné est récupéré sur un filtre, permettant ainsi une analyse gravimétrique ou chimique des particules récoltées.

Afin de s'assurer de l'inter-comparabilité des compteurs Grimm acquis par les différents partenaires du projet, les compteurs ont été passés sur un banc de calibration avec un flux d'air chargé en particules connues générées à l'aide d'un générateur à brosse rotative (Palas RBG 1000). La réponse des trois compteurs en termes de distribution granulométrique en nombre de particules était tout à fait comparable.

Le compteur Grimm a ensuite été comparé avec une microbalance TEOM (méthode de référence de la concentration massique en particules) en conditions d'élevage dans une salle abritant des porcs charcutiers et dans un bâtiment abritant des volailles de chair (Figure 1). A l'issue des différentes campagnes de mesures, il est apparu qu'il y avait une différence entre les valeurs massiques obtenues avec le compteur Grimm et celle du TEOM. L'analyse des résultats en concertation avec l'IMT Atlantique a conduit les acteurs du projet à conclure qu'il fallait garder le compteur Grimm comme compteur en nombre de particules et le coupler avec une mesure gravimétrique complémentaire pour les valeurs en masse de particules.

Pour les mesures en élevage de la phase suivante du projet, les concentrations massiques pour chaque fraction (TSP, PM₁₀ et PM_{2,5}) ont donc été calculées à partir des concentrations en nombre mesurées avec le compteur Grimm et de la masse volumique moyenne apparente des particules estimées à partir du prélèvement gravimétrique sur filtre.



Figure 1 : Comparaison des compteurs Grimm avec la méthode de référence en élevage de porc (photo de gauche) et en élevage de volailles (photo de droite) (crédits photos : Ifip-Institut du Porc)

1.2 Déterminer les sites de mesures, la durée et les périodes de prélèvements

A partir des données collectées dans la littérature, les partenaires du projet ont mis en place une phase d'expérimentation visant à déterminer les sites de mesures des particules dans les bâtiments d'élevage ainsi que la durée et la fréquence des prélèvements. Les différents tests ont été réalisés au sein de la station expérimentale de l'Ifip pour les porcins et dans un élevage de production et dans l'atelier de l'Anses pour les volailles.

L'émission est calculée à partir du flux de particules entre l'ambiance de la salle (pour les porcs) ou du bâtiment (pour les volailles) et l'air extérieur multiplié par le débit de ventilation appliqué lors des mesures.

- Pour calculer le flux de particules, plusieurs sites de mesures sont donc nécessaires : à l'extérieur et à l'intérieur de la salle ou du bâtiment voire dans la gaine d'extraction. Pour l'air entrant, l'accès aux combles étant difficile, le choix a été fait de faire une mesure ponctuelle à l'extérieur du bâtiment afin d'éviter de surestimer la concentration avec une sonde polluée. Concernant le site de mesures dans l'ambiance, les différentes séries de tests ont permis de déterminer un

positionnement optimal tant en termes de qualité des mesures que d'accessibilité pour les opérateurs et de non-accessibilité pour les animaux – particulièrement pour les porcs. Ainsi, pour les volailles, dans le cas des bâtiments en extraction latérale, l'appareil est positionné à proximité d'un des ventilateurs d'extractions alors que pour les bâtiments en extraction haute, l'équipement de mesure des particules est placé au milieu du bâtiment à environ 1,20 mètres au-dessus de la litière. Pour les porcs, quel que soit le type d'extraction, l'appareil de mesure des particules est positionné au milieu du couloir à une hauteur de 1,2 mètres.

- Le débit de ventilation des salles/bâtiments est estimé à partir de la mesure du CO₂ réalisée avec une sonde (Carbocap ® GM70, Vaisala) et le calcul de la production de chaleur des animaux à partir des équations de la CIGR (International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering, Pedersen et Sällvik, 2002). Pour les élevages de porcs, les relevés des boîtiers de ventilation ont permis de confirmer les valeurs de débits obtenues par calculs.

L'objectif du projet est d'obtenir des facteurs d'émissions de particules sur un cycle de production : soit 110 jours pour les porcs charcutiers et de l'ordre de 40 jours pour les volailles de chair. Pour couvrir l'ensemble du cycle et du fait des variations de poids des animaux mais aussi des débits de ventilation sur la durée de présence des animaux, il est nécessaire de réaliser plusieurs campagnes de mesures. Selon les auteurs, le nombre de campagnes peut varier de 2 (Jacobson *et al.*, 2002) à 8 périodes (Modini *et al.*, 2010). Le choix s'est arrêté sur 3 campagnes de mesures réparties sur la durée de présence des animaux (pour les porcs : entre 12 et 20 jours, entre 43 et 52 jours et entre 76 et 84 jours de présence en engraissement – pour les volailles : entre 4 et 10 jours, entre 14 et 30 jours et entre 25 et 45 jours suivant la production après le démarrage du lot).

Dans la littérature, l'ensemble des auteurs s'accorde sur une durée de 24 heures de mesures en continu (Van Ransbeck *et al.*, 2013). En effet, cette durée permet de prendre en considération les variations diurnes et nocturnes de concentrations en particules liées aux variations d'activités des animaux et des débits de ventilation.

2. Appliquer la méthodologie en conditions de terrain pour acquérir les premiers facteurs d'émissions

En vue d'avoir un échantillon représentatif de nos modèles d'élevages nationaux, un premier travail d'analyse des typologies de bâtiments a été réalisé au sein de chacune des deux filières.

2.1 Choisir des bâtiments représentatifs des conditions nationales de production

En s'appuyant sur l'Enquête Avicole des Chambres d'Agriculture de Bretagne et des Pays de la Loire, trois productions avicoles principales ont été ciblées dans l'étude : le poulet lourd, le poulet standard et le poulet export. Le choix des élevages a été réalisé selon deux modalités de conditions d'élevage. Le type de sol et l'extraction d'air. La modalité type de sol a été intégrée dans le choix des élevages ; en effet, les élevages sur sol en terre battue (12 élevages sur 31) sont une spécificité française alors que le sol béton (19 élevages) prédomine au niveau européen. En complément, la modalité d'extraction de l'air est aussi un paramètre important pour catégoriser le parc bâtiment en élevage de poulet de chair. Ainsi, deux types ont pu être discriminés avec les extractions hautes (15 élevages) et les extractions latérales (16 élevages).

En élevage de porcs, le stade engraissement est celui qui abrite les animaux les plus lourds et dont la durée de présence en bâtiment est aussi la plus longue. Les porcs charcutiers sont très majoritairement élevés sur caillebotis intégral en France (plus de 80 % des places d'engraissement d'après le dernier Recensement Général Agricole). Bien que de nouvelles stratégies d'alimentation apparaissent (triphase voire multiphase), les aliments sont présentés soit sous forme sèche (granulés) soit sous forme liquide (soupe). Ces deux modalités de présentation de l'aliment ont donc été choisies pour être intégrées dans

les premiers itinéraires techniques caractérisés sur le volet particules. De même, la gestion des effluents évolue dans les élevages français, entre autres par rapport à des obligations réglementaires telles que la directive IED avec la mise en œuvre des MTD. Cependant, ces obligations ne concernent actuellement que les élevages IED (+ 2 000 places de porcs charcutiers ou 750 truies). Le stockage des effluents en préfosse sous les animaux reste donc la modalité majoritaire concernant la gestion des effluents. Cette modalité a donc été choisie en comparaison d'une modalité plus récente dans les élevages qu'est le raclage.

2.2 Des mesures en élevages commerciaux pour établir les premiers facteurs d'émissions

La méthode mise au point lors de la première partie de l'étude a ainsi été appliquée au sein de 28 salles d'engraissement pour la filière porcine et de 31 élevages de poulets de chair en claustration dans le Grand Ouest de la France. Pour les porcs, les principales caractéristiques des salles d'engraissement sont regroupées dans le Tableau 1. Pour les volailles, 22 bâtiments de poulet lourd ont été retenus contre 7 de poulet standard et 2 de poulet export. La surface des ateliers était comprise entre 965 et 2 400 m² avec une moyenne de $1\,330 \pm 317$ m². Douze élevages sur 31 sont sur sol terre battue alors que les 19 restants sont sur sol béton. Pour le type d'extraction, 15 élevages sont en extraction haute vs 16 en extraction latérale.

Tableau 1 : Caractéristiques des salles des élevages de porcs impliquées dans l'étude

Présentation aliment	Granulés	Soupe	
Gestion effluent	Préfosse		Raclage
Nombre de salles	13	9	6
Nombre de porcs/salle	109±42	155±47	238±142
Surface par porc	0,76±04	0,85±0,07	0,87±0,15

Pour les deux productions, les mesures ont été réalisées au cours de deux périodes climatiques contrastées : une période dite « chaude » (de juin à septembre 2018 et de mai à septembre 2019) et une période dite « froide » (de fin octobre 2018 à mars 2019 et de décembre 2019 à mars 2020).

2.2.1 Principaux résultats pour la production porcine

La première partie des résultats porte sur les concentrations en particules en nombre et en masse alors que la deuxième partie abordera les émissions et leurs comparaisons avec les valeurs de référence au niveau européen.

■ Analyse des concentrations en particules au regard des facteurs d'influence

La variation des concentrations en particules dans l'air extérieur n'a pas permis d'exploiter ces données. La courte durée de mesure combinée avec la variabilité des environnements des bâtiments d'élevage est à la base de cette variation. Les données de concentrations présentées dans les tableaux suivants ne sont donc pas corrigées des concentrations de l'air extérieur, comme c'est le cas dans l'ensemble de la littérature disponible actuellement.

L'effet de la **période climatique** est significatif sur les températures ambiantes, extérieures ainsi que sur le débit de ventilation : comme attendu, les valeurs de la période dite « chaude » sont toujours supérieures à celles de la période dite « froide » pour les trois paramètres (Tableau 2).

Les valeurs moyennes de température ambiante obtenues pour chacune des périodes de mesures sont cohérentes avec les recommandations de température de consigne pour des porcs à l'engraissement (entre 22 et 24°C). L'écart de débit par porc entre les deux périodes est marqué mais cohérent avec les températures extérieures et les concentrations en dioxyde de carbone. Ces dernières correspondent à

des niveaux d'émissions de 1,8 à 2,5 kg CO₂ par porc et par jour, respectivement pour la période froide et chaude. Ces valeurs sont en accord avec celles proposées par Philippe *et al.* (2007) qui citent des valeurs moyennes variant entre 1,6 et 2,0 kg de CO₂ par porc et par jour.

Tableau 2 : Valeurs moyennes des températures ambiante et extérieure, débit de ventilation et concentration en CO₂ selon la période de mesures

	Période chaude	Période froide	ETR ¹	Effet ²
Température extérieure (°C)	18,8	8,9	1,9	***
Température ambiante (C°)	25,5	23,3	3,4	***
Débit par porc (m ³ .h ⁻¹)	43,1	17,9	4,9	***
Concentration (CO ₂ (ppm)	1 367	2 318	422	***

¹ ETR – Ecart-type résiduel – ² T : Tendence * : P<0,05 ** : P<0,01 *** : P<0,001

Le lien entre le débit de ventilation et la concentration en particules est fait dans de nombreuses études (Hebert *et al.*, 1988 ; Costa *et al.*, 2009 ; Kwon *et al.*, 2016). De ce fait, la poursuite de l'analyse s'est déroulée sur des données journalières agrégées par période climatique (période chaude vs période froide) pour les concentrations et les émissions des différentes fractions de particules (TSP, PM10 et PM2,5).

L'effet de la période climatique est significatif sur les concentrations massiques en particules : la masse est supérieure en période froide par rapport à la période chaude alors que les concentrations en nombre sont proches entre les deux périodes (Tableau 3). La réduction des débits en période froide entraîne une moindre évacuation des particules vers l'extérieur, contribuant ainsi à augmenter la concentration massique dans l'ambiance. Ce constat a déjà été fait dans de nombreuses études (Hebert *et al.*, 1988 ; Takai *et al.*, 1998 ; Van Ransbeeck *et al.*, 2012 ; Xu *et al.*, 2016). La différence d'effet de la période climatiques sur les concentrations en masse et en nombre s'explique par la plus forte proportion de particules de plus grande taille ; les particules de plus de 10µm sont en effet plus nombreuses (+17%) en période froide par rapport à la période chaude. Une explication envisagée est l'augmentation de l'hygrométrie en période froide qui contribuerait à augmenter le diamètre des particules.

Tableau 3 : Concentrations moyennes en particules (masse et nombre) par période

	Période chaude	Période froide	ETR ¹	Effet ²
Concentration en masse (µg.m⁻³)				
TSP	1181	1371	537	***
PM10	580,1	757,9	282,1	***
PM2,5	35,6	53,1	20,5	T
Concentration en nombre (nombre.m⁻³)				
TSP	96 986	93 932	63 883	-
PM10	96 868	92 797	63 867	-
PM2,5	93 909	88 456	63 162	-

¹ ETR – Ecart-type résiduel – ² T : Tendence * : P<0,05 ** : P<0,01 *** : P<0,001

Les valeurs moyennes des concentrations massiques mesurées dans cette étude sont en accord avec la bibliographie. Ainsi, dans l'étude de Takai *et al.* (1998) sur des mesures réalisées dans des élevages d'Europe du Nord, la concentration en TSP varie entre 1 210 et 2 670 µg.m⁻³ tandis qu'elle est de 2 750 ± 20 µg.m⁻³ dans l'étude de Wang *et al.* (2002). Dans l'étude de Van Ransbeeck *et al.* (2012), les concentrations moyennes en PM10 et PM2,5 s'élèvent respectivement à 617 µg.m⁻³ et 33 ± 19 µg.m⁻³.

La comparaison des données du projet avec la littérature se limite cependant aux concentrations massiques du fait de l'absence de publications dans cette unité d'expression. En masse, les PM_{2,5} ne représentent que 3 à 4 % de la masse totale de particules, elles sont cependant très largement majoritaires en ombres avec 96,8 et 95,2% des TSP, respectivement pour la période chaude et la période froide.

Concernant l'effet **campagne de mesures**, la concentration massique en particules augmente entre la 1^{ère} et la 3^{ème} campagne de mesures sur les deux saisons. Cependant, l'effet n'est statistiquement significatif que pour la période froide. Pour les concentrations en nombre, les niveaux des deux premières campagnes sont proches alors que celui de la 3^{ème} campagne est toujours supérieur (Figure 1). Comme pour les concentrations en masse, l'effet campagne n'est significatif que pour la période froide. L'augmentation des concentrations entre la 1^{ère} et la 3^{ème} campagne est très probablement liée à l'augmentation de la ventilation et du poids des animaux au cours de la période d'engraissement. Cependant, la corrélation entre ces deux paramètres n'est statistiquement significative que pour la concentration massique des PM_{2,5} sur la période hivernale.

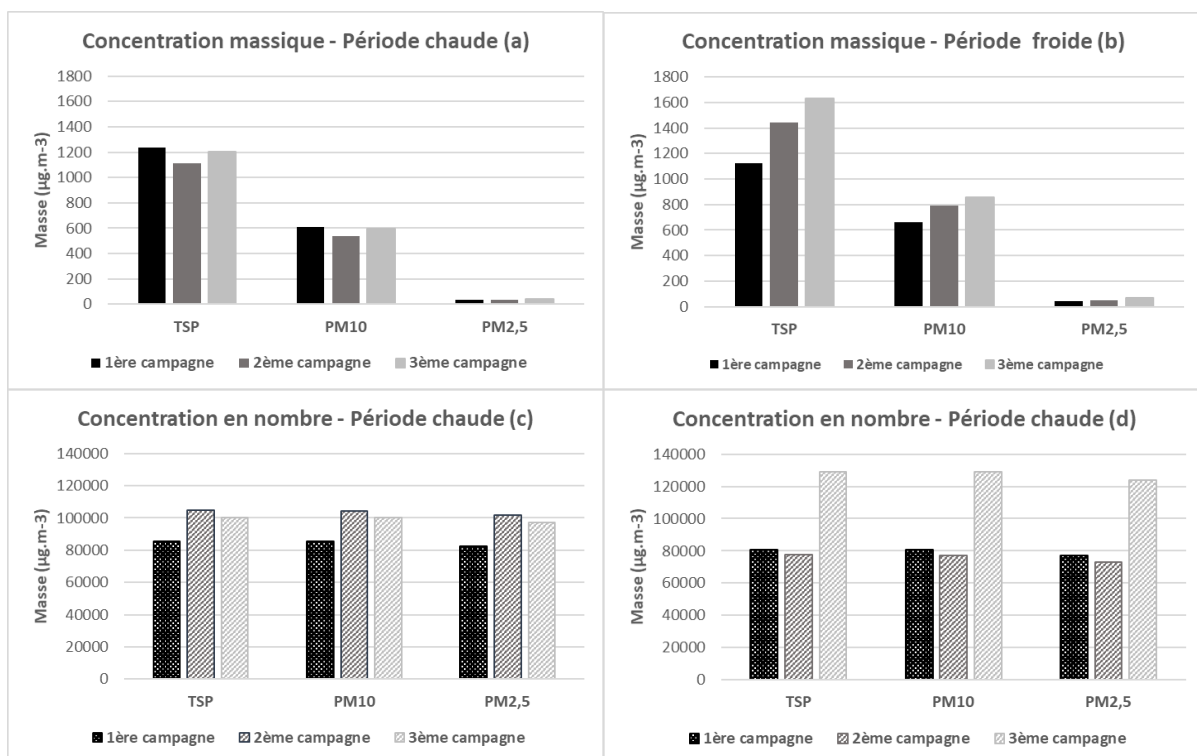


Figure 1 : Evolution des concentrations en particules par campagne selon la période en masse (a et b) et en nombre (c et d).

L'effet du mode de présentation de l'aliment (granulés vs soupe) et du mode de gestion des effluents (préfosse vs raclage) ont ensuite été étudiés. L'analyse des concentrations en nombre de particules par m³ ne met en évidence aucun effet statistiquement significatifs et ceci pour les deux périodes climatiques étudiées.

L'effet du **mode de présentation de l'aliment** a été étudié dans différentes publications qui montrent une réduction des concentrations en particules avec une alimentation liquide par rapport à une alimentation sèche (Takai *et al.*, 1996 ; Pearson et Sharples, 1995). Dans notre étude, l'effet du mode de présentation de l'aliment ne ressort pas comme statistiquement significatif. Cependant, la littérature existante concerne essentiellement des comparaisons de mode de présentation de l'aliment différent de ceux de notre étude. En effet, dans la majorité des études, l'aliment est distribué sous forme de farine et non pas de granulés comme dans notre étude, et comparé à une alimentation liquide. De plus, l'absence

d'effet significatif du mode de présentation de l'aliment dans notre étude peut aussi être lié à la composition des aliments et plus particulièrement à la teneur en matière grasse des aliments (Takai et Pedersen, 1994).

L'effet du **mode de gestion des effluents** a quant à lui été peu étudié à ce jour. Dans l'étude de Lagadec et Toudic (2012), la concentration massique en TSP variait entre 1,37 et 3,01 mg.m⁻³ dans un bâtiment où les effluents étaient stockés en préfosse. Dans la même étude, la concentration massique en TSP variait entre 0,78 et 2,14 mg.m⁻³ en présence de raclage. Dans les deux bâtiments, l'alimentation était de type soupe. Dans l'étude de Cambra-López *et al.* (2011), 88,8% des PM_{2,5} avaient pour origine les effluents stockés en préfosse. Dans notre étude, la réduction de la concentration massique en TSP pourrait être liée à la réduction du contact entre l'air et les effluents lorsque ces derniers sont évacués plusieurs fois par jour ; la limitation du dessèchement en surface du lisier pouvant être une source potentielle de particules.

■ Analyse des émissions de particules au regard des facteurs d'influence

Pour faciliter la comparaison avec la littérature, les émissions, calculées à partir des données acquises dans ce projet, sont exprimées en kg par place et par an. D'après Hans-Dieter (2010, cité par Faburé *et al.*, 2011), le facteur d'émission varie, selon les Etats-membres de l'Union Européenne, entre 0,21 et 0,81 kg.place⁻¹.an⁻¹ pour les TSP, entre 0,20 et 0,73 kg.place⁻¹.an⁻¹ pour les PM₁₀ et entre 0,01 et 0,11 kg.place⁻¹.an⁻¹ pour les PM_{2,5}. Les valeurs utilisées pour les inventaires sont celles de l'EMEP (2019) et sont respectivement de 1,05 0,14 et 0,006 kg.place⁻¹.an⁻¹ pour les TSP, PM₁₀ et PM_{2,5}. Van Ransbeeck *et al.* (2012) obtiennent des valeurs moyennes en PM₁₀ et PM_{2,5} respectivement de 0,17 et 0,0095 kg.place⁻¹.an⁻¹ à partir de mesures réalisées en élevages commerciaux. Les valeurs obtenues dans notre étude (Figure 2) sont inférieures à celles d'Hans-Dieter (2010) et de l'EMEP (2019) mais proches de celles de Van Ransbeeck *et al.* (2012) très probablement du fait d'une similarité de méthodologies de mesures avec celle appliquée par cette équipe (mesures optiques en cinq campagnes réparties sur la phase d'engraissement).

Comme pour les concentrations, l'effet période de mesures est significatif sur l'émissions des trois fractions : l'augmentation du débit d'air en période chaude induit une augmentation significative des émissions tant en masse qu'en nombre. Ces résultats confirment ceux déjà observés par Van Ransbeeck *et al.* (2012) et Xu *et al.* (2016).

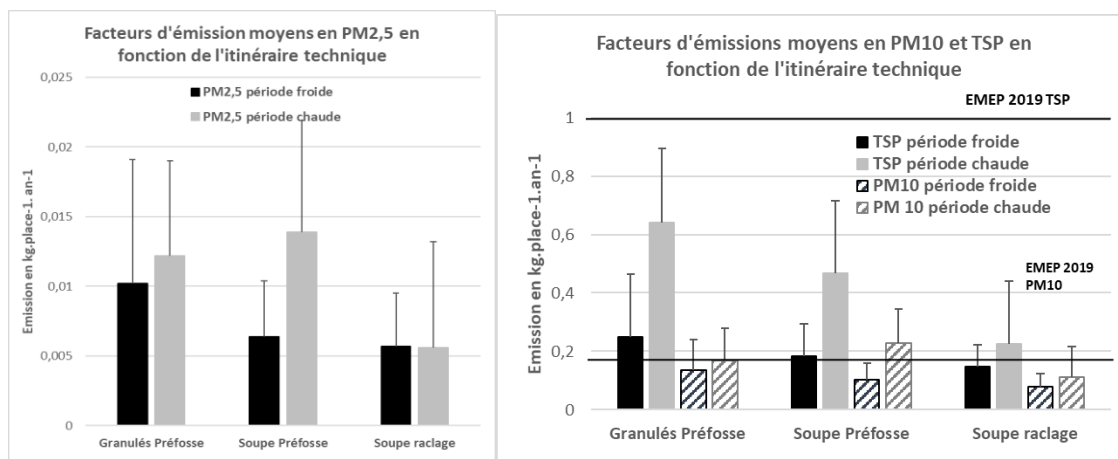


Figure 2 : Facteurs d'émissions moyens en PM_{2,5} (gauche) et en PM₁₀ et TSP (droite) selon l'itinéraire technique choisi en élevages de porcs

L'alimentation en soupe avec raclage conduit à des facteurs d'émission en PM_{2,5}, PM₁₀ et TSP inférieures à ceux obtenus avec les deux autres modalités à savoir un stockage des effluents en préfosse avec soit une alimentation en soupe soit une alimentation en granulés.

Historiquement, dans le contexte agricole, les particules ont été étudiées principalement pour leurs impacts sur la santé des animaux (Robertson *et al.*, 1990 ; Donham, 1991) ou des éleveurs (Lagadec *et al.*, 2018). Plus récemment, les recherches sur ce sujet se sont élargies pour prendre en compte l'impact des particules, non plus seulement à l'intérieur des bâtiments, mais aussi, via l'émission dans l'atmosphère, sur l'environnement (Cambra-López *et al.*, 2010 ; Dan *et al.*, 2019). Au plan réglementaire, la directive européenne sur la qualité de l'air (Directive 2008/50/CE, 2008) impose à la collectivité de respecter un seuil maximal de PM₁₀ de 40 µg.m⁻³ en moyenne annuelle et de 50 µg.m⁻³ en moyenne journalière pendant plus de 35 jours par an, sous peine de devoir mettre en oeuvre des restrictions spécifiques (sur la circulation routière, par exemple). En lien plus direct avec l'élevage de porcs, le BREF Elevage (Santonja *et al.*, 2017) établit une liste de Meilleures Techniques Disponibles dont certaines visent à réduire l'émission de particules par les bâtiments d'élevage. Dans cette liste, l'alimentation *ad libitum*, la distribution d'aliments humides ou sous forme de granulés sont des techniques considérées comme moins émissives.

Dans notre étude, les particules présentes dans l'ambiance des porcheries d'engraissement sont (i) principalement des PM_{2,5} (qui représentent entre 94 et 97 % des TSP en nombre mais seulement 2,5 à 3,4 % de leur masse) et (ii) des PM₁₀ (qui représentent environ 99 % du nombre des TSP et entre 46 et 57 % de leur masse). Les particules de plus de 10 µm de diamètre sont donc en très faible nombre mais représentent quasiment la moitié de la masse des particules dans l'air des porcheries. Le profil des particules - rapport des fractions PM_{2,5} et PM₁₀ avec les TSP - n'apparaît pas différent selon la présentation de l'aliment ou le mode de gestion des effluents.

Dans l'ambiance des bâtiments, les concentrations en particules sont plus élevées en période froide ce qui peut avoir des conséquences sur l'exposition des animaux et du personnel. A l'inverse, en période chaude, l'augmentation des débits de ventilation favorise l'évacuation des particules vers l'atmosphère.

Une réduction, tant en nombre qu'en masse de particules, est observée pour les concentrations et les émissions dans les salles recevant de la soupe et dont les effluents sont évacués par raclage, par rapport aux salles où les effluents sont stockés en préfosse, quel que soit le mode de présentation de l'aliment, granulés ou soupe, soit pour le premier cas une réduction des émissions de 40 % en masse et 53 % en nombre.

2.2.2 Principaux résultats pour la production avicole

Les mesures de concentrations en particules ont été réalisées au cours du cycle de production des poulets à savoir pour la 1^{ère} campagne entre 4 et 10 jours, pour la 2^{ème} entre 14 et 30 jours et pour la 3^{ème} entre 25-45 jours (suivant la production) après le démarrage du lot. Les émissions de particules augmentent avec l'âge des animaux et cela pour les trois fractions (Figure 3).

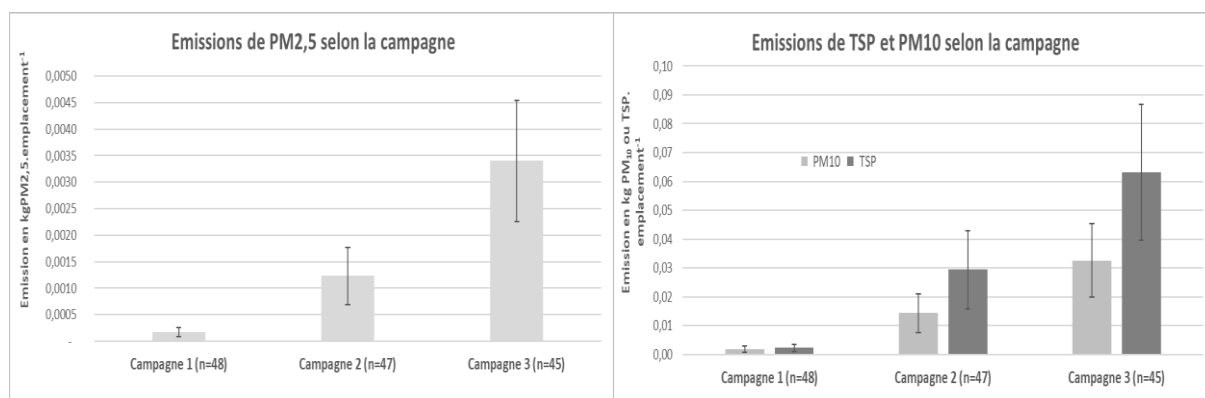


Figure 3 : Emissions de PM_{2,5} (gauche) et de PM₁₀ et de TSP (droite) selon la campagne de mesure

L'augmentation entre les campagnes 2 et 3 pourrait être plus importante mais que la pratique de détassage (retrait d'un tiers à la moitié des animaux sur le dernier tiers de la durée d'élevage) contribue à gommer les différences entre ces deux campagnes pour près de la moitié des bâtiments suivis.

Les facteurs d'émission acquis au sein de ce projet sont cohérents avec les valeurs de la littérature bien que les données sur les PM_{2,5} et les TSP se situent plutôt dans la fourchette basse. Aucune tendance franche ne peut être observée entre les valeurs de FE et **le type de ventilation et le mode de gestion de litière** renseignés. Une forte variabilité est également une observation commune aux différentes études. Les facteurs moyens obtenus dans cette étude (Figure 4) présentent des valeurs légèrement inférieures à celles de l'EMEP (2019) qui sont de 0,002, 0,02 et 0,04 kg.place⁻¹.an⁻¹, respectivement pour les PM_{2,5}, PM₁₀ et TSP.

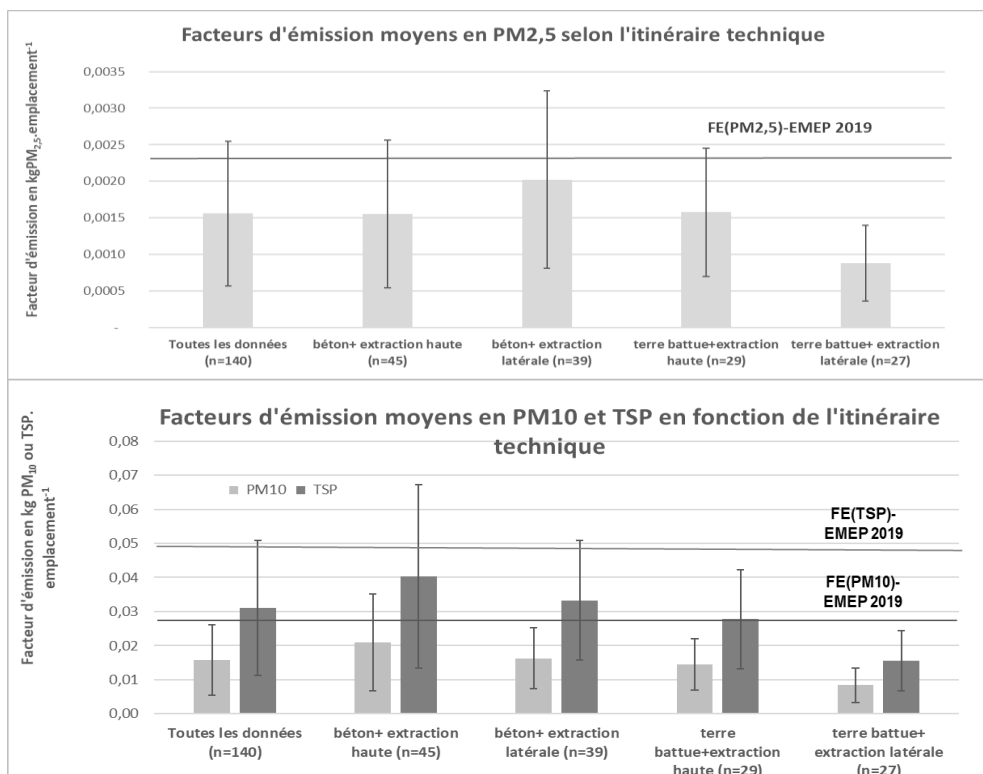


Figure 4 : Facteurs d'émissions moyens en PM_{2,5} (en haut) et en PM₁₀ et TSP (en bas) selon l'itinéraire technique choisi en élevages de porcs

Ces tendances peuvent s'expliquer par le choix des itinéraires techniques relatifs aux modes d'extraction de l'air (latérale vs haut) et du type de sol (béton vs terre battue).

Il apparaît que les bâtiments disposant d'un sol béton présentent des facteurs d'émissions très proches de ceux de l'EMEP 2019. Cela est particulièrement vrai quand le système d'extraction est en hauteur pour les PM₁₀ et les TSP et quand l'extraction est latérale pour les PM_{2,5}. Globalement, les bâtiments avec des systèmes d'extraction latérale ont tendance à être moins émetteurs que ceux avec une extraction haute. De la même manière et quel que soit la fraction considérée, les bâtiments sur sol en terre battue présentent des facteurs d'émissions inférieurs à ceux des bâtiments sur sol béton et *in fine* à ceux de l'EMEP 2019. Face à l'importance des écarts types observés, il convient de rester prudent vis-à-vis de ces conclusions. La combinaison couplant les deux modalités conduisant à une diminution des émissions (extraction latérale + sol terre battue) présente des facteurs d'émissions avec un écart relatif inférieur à ceux de l'EMEP 2019. Les élevages sur terre battue font partie des spécificités des ateliers avicoles français, il n'existe pas dans la bibliographie étudiée d'éléments de comparaison. Ces résultats mériteraient d'être complétés par de nouvelles séries de mesures et pourraient conduire à la proposition

de nouveaux facteurs d'émissions pour les bâtiments suivant cet itinéraire technique (extraction latérale+ sol terre battue) avec des valeurs de facteurs d'émissions respectivement de 0.001 ; 0.0085 et 0.016 kg. emplacement-1.an-1 pour les PM2.5, PM10 et TSP. Pour les autres modalités, les facteurs d'émissions de l'EMEP semblent être cohérents, même s'ils apparaissent légèrement supérieurs pour la modalité couplant extraction haute et terre battue.

L'interprétation de ces résultats montre l'impact majeur de l'âge des animaux dans le bâtiment sur l'émission en masse de particules, quelle que soit la fraction granulométrique investiguée. Ce résultat est conforté par de nombreux auteurs qui ont souligné une contribution aux émissions en masses de variables explicatives reliées au temps de présence des animaux dans le bâtiment (âge, poids, quantités de déjection produites et leur état de décomposition...) (Wathes *et al.*, 1997 ; Redwine *et al.*, 2002 ; Lacey *et al.*, 2003 ; Winkel *et al.*, 2014).

Concernant la ventilation, les études se sont plus concentrées sur les débits appliqués que la localisation des points d'extraction (Kic, 2016). Ainsi, l'effet du taux de ventilation et son incidence sur la dilution des concentrations et l'augmentation des émissions ont été également mis en avant dans plusieurs études (Hinz and Linke, 1998 ; Redwine *et al.*, 2002 ; Calvet *et al.*, 2010). La ventilation étant pilotée selon une exigence de température ambiante intérieure, certains auteurs ont observé des corrélations négatives entre ces variables et les concentrations en particules (Banhazi *et al.*, 2008 ; Hinz and Linke, 1998). Toutefois, il convient de préciser que la manière dont la température, l'humidité ou encore le taux de ventilation influencent la concentration en particules reste à ce jour encore incomprise (Cambra-López *et al.*, 2010). Les relations statistiques établies à travers la bibliographie se basent sur l'observation de tendances de variation similaire et non sur un lien de cause à effet direct.

Concernant la différence de type de sol, García-Florentino *et al.* (2020) suggèrent que des émissions de particules fines proviennent de la dégradation des matériaux de construction. Face à cette source de production, les bâtiments avec une dalle béton disposent d'un potentiel d'émission plus important. L'effet des sols béton et terre battue sur les concentrations en PM2,5 pourrait également s'appréhender à travers son incidence sur l'état de la litière (en termes d'humidité et de composition). La construction d'un indicateur plus précis sur cette variable (prélèvements de litière avec analyse d'humidité ou autres analyses physico-chimiques) serait judicieuse pour mieux comprendre et expliquer son incidence sur l'émission de particules.

D'autres paramètres comme la nature du matériau de litière ont été investigués dans notre étude sans observer de différences notables. Cela peut s'expliquer par une représentation très déséquilibrée des différents matériaux dans notre échantillon (92 mesures en paille broyée, 36 en cosse de sarrasin, 12 en granulés + copeaux). Van Harn *et al.*, (2010) n'ont observé aucun effet du matériau de litière sur les concentrations en masse des PM10 et une seule comparaison de matériaux (l'ensilage de maïs comparé à des copeaux de bois) a présenté une diminution des concentrations en PM2,5 parmi 4 types de matériaux testés (copeaux de bois, ensilage de maïs, paille de blé et paille de colza). Ces observations montrent que l'incidence du choix de matériau de litière et la conduite d'élevage relative à cet aspect (e.g. les repaillages) sur les concentrations et émissions de particules reste à approfondir tout en plaçant pour un indicateur litière, plus précis.

Enfin, un dernier déterminant des concentrations et émissions en poulet de chair est l'activité animale. Des premiers travaux ont mis en évidence l'incidence du programme lumineux sur la concentration en particules (Qi *et al.*, 1992 ; Ellen *et al.*, 2000 ; Yoder and Van Wicklen, 1988). Cette incidence n'a été reliée à l'activité des animaux que plus récemment (Calvet *et al.*, 2009), notamment grâce aux avancées de l'élevage de précision et la sélection de ce paramètre comme un indicateur potentiel de bien-être animal. Plus récemment, Fernandes *et al.* (2019) ont réussi à construire un modèle expliquant 51% de la variation quotidienne de concentration en particules par l'activité animale et le taux de ventilation. Par ailleurs, cette étude souligne la différence d'effet réponse sur la concentration en particules entre l'activité animale et le taux de ventilation qui respectivement peuvent avoir un effet très rapide (quelques heures)

ou plus lent (la journée). Cet élément peut également expliquer la forte variabilité intra-élevage observée dans nos travaux et dans la bibliographie. Le recueil de données sur l'activité des animaux (lié au programme lumineux, mais également aux passages des éleveurs, repaillages etc) est souhaitable pour mieux appréhender la variabilité des résultats.

Conclusion

Le projet Papovit a permis d'établir une méthodologie de mesures applicables aux élevages de porcs et de volailles en vue d'identifier les facteurs d'émissions des itinéraires techniques les plus représentatifs de nos conditions nationales de production. Pour les deux productions, l'influence de l'âge des animaux (et du poids directement) est déterminante dans l'augmentation des concentrations et des émissions de particules toutes fractions confondues. Cependant, si pour l'élevage de porc, l'influence de la saison via le débit de ventilation est ressortie comme un déterminant majeur de l'émission de particules, ce constat n'a pas été fait en poulets de chair. Pour les salles abritant des porcs charcutiers, la combinaison d'une alimentation liquide de type soupe avec une évacuation fréquente des effluents par raclage s'est révélée être l'itinéraire technique le moins émetteur de particules toutes fractions confondues. En poulets de chair, d'autres éléments explicatifs comme le niveau d'activité animale et l'état des litières gagneraient à être inclus dans les suivis d'émissions de particules pour mieux expliquer leur variabilité.

Les acquis du projet Papovit ont fait l'objet de diffusion de différents types (articles scientifiques sur la méthodologie et articles techniques sur les facteurs d'émission). D'autres supports ont cependant été développés comme un calculateur d'émissions de particules en élevage de porcs permettant aux techniciens de simuler l'impact de la mise en place de techniques de réduction. Dans un souci de sensibilisation des futurs acteurs des filières porc et volaille, une fiche pédagogique interactive incluant podcasts, vidéos et utilisation du calculateur a été conçue à destination des enseignants intéressés par la thématique « particules en élevages de porcs et de volailles ».

Remerciements

Ce projet a bénéficié de financements du Compte d'Affectation Spécial Développement Agricole et Rural (CASDAR) dans le cadre de l'AAP 2016 « Innovation et Partenariat » mais aussi de la région Pays de la Loire et du CIPC pour la partie volailles. Les auteurs tiennent à remercier les éleveurs de porcs et de volailles ayant accepté d'ouvrir leurs élevages pour la réalisation des mesures.

Références bibliographiques

- Banhazi T., Seedorf J., Laffrique M., Rutley D., 2008. Identification of the risk factors for high airborne particle concentrations in broiler buildings using statistical modeling. *Biosyst. Eng.* 101, 100–110.
- Calvet S., Cambra-Lopez M., Blanes-Vidal V., Estelles F., Torres A.G., 2010. Ventilation rates in mechanically ventilated commercial poultry buildings in Southern Europe: Measurement system development and uncertainty analysis. *Biosystems Engineering*, 106(4), 423-432.
- Cambra-López M., Aarninck 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.
- Citepa, 2019. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France - format Secten, 450 pp.
- Costa A., Borgonovo F., Leroy T., Berckmans D., Guarino M., 2009. Dust concentration variation in relation to animal activity in a pig barn. *Biosystems Engineering*, 104, 118-124.

- Dan S., Sheng W., Zhaojian L., Qian T., Pengyuan D., Yansen L., Chunmei L., 2019. Distribution and physicochemical properties of particulate matter in swine confinement barns. *Environmental Pollution*, 250, 746-753.
- Directive 2008/50/CE, 2018. Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe. *Journal Officiel de l'Union Européenne* du 11 juin 2008, L152/1-L152/44
- Donham K.J., 1991. Association of environmental air contaminants with disease and productivity in swine. *American Journal of Veterinary Research*, 52(10), 1723-1730.
- Ellen H.H., Bottcher R.W., von Wachenfelt E., Takai H., 2000. Dust levels and control methods in poultry houses. *Journal of Agricultural Safety and Health* 6(4), 275-282.
- EMEP/EEA, 2019. Air pollutant emission inventory guidebook. 3.B. Manure Management, 70 pp.
- Faburé J., Rogier S., Loubet B., Générumont S., Saint-Jean S., Bedos C., Cellier P., 2011. Synthèse bibliographique sur la contribution de l'agriculture à l'émission de particules vers l'atmosphère : identification de facteurs d'émissions. Rapport final. 164 pp.
- García-Florentino C., Maguregui M., Carrero J.A., Morillas H., Arana G., Madariaga J.M., 2020. Development of a cost-effective passive sampler to quantify the particulate matter depositions on building materials over time. *J. Clean. Prod.* 268, 122-134.
- Fernández A., Demmers T., 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*. Vol.187, 214-225.
- Hans-Dieter H., 2010. Calculations for emissions from German agriculture. National Emission Inventory Report (NIR) 2010 for 2008. Special Issue 334, 436 pp.
- Heber A.J., Stroik M., Faubion J.M., Willard L.H., 1988. Size distribution and identification of aerial dust particles in swine finishing buildings. *Transactions of ASAE*, 31(3), 882-887.
- Hinz T., Linke S., 1998. A comprehensive experimental study of aerial pollutants in and emissions from livestock buildings. Part 2. Results. *J. Agric. Eng. Res.* 70:111-118.
- Jacobson L., 2002. Development of methods to measure dust (PM10) and ammonia emissions from Minnesota pig facilities. Report. University of Minnesota.
- Kic P., 2016. Dust pollution in buildings for chicken fattening. 6th International Conference on Trends in Agricultural Engineering 7-9 September 2016, Prague, Czech Republic.
- Kwon K.S., Lee I.B., Ha T., 2016. Identification of key factors for dust generation in a nursery pig house and evaluation of dust reduction efficiency using a CFD technique. *Biosystems Engineering*, 151, 28-52.
- Lacey R., Redwine J., Parnell C., 2003. Particulate matter and ammonia emission factors for tunnel-ventilated broiler production houses in the Southern US. *Transactions of the ASAE*, 46(4), 1203.
- Lagadec S., Toudic A., 2012. Adaptation du système Prolap dans un bâtiment porc existant, rapport ADEME 0974C0304, 76 p.
- Lagadec S., Guingand N., Trucheau P., Gabrysiak L., Guinot L., Hassouna M., 2018. Exposition des travailleurs à l'ammoniac et aux particules PM2,5 durant l'alimentation des porcelets et le tri des porcs charcutiers. *Journées Rech. Porcine*, 50, 1-6.
- Lagadec S., Guingand N., Hassouna M., Joubert A., 2020. Les particules en élevage porcin. Etat de l'art sur les équipements de mesures et protocoles utilisés : choix de la méthode adaptée. *Les cahiers de l'Ifip*. 7 (1), 1-10.
- Modini R.L., Agranovski V., Meyer N.K. *et al.*, 2010. Dust emissions from a tunnel-ventilated broiler poultry shed with fresh and partially reused litter. *Animal Production Sciences*, 50 (5&6), 552-556.
- Pearson C.C., Sharples T.T., 1995. Airborne dust concentrations in livestock building and the effect of feed. *J. Agric. Engng Res.*, 60, 145-154.
- Pedersen S., Sällvik K., 2002. 4th Report of Working Group on Climatization of Animal Houses Heat and moisture production at animal and house levels. Research Centre Bygholm, Danish Institute of Agricultural Sciences.

- Robertson J.F., Wilson D., Smith W.J., 1990. Atrophic rhinitis: the influence of the aerial environment. *Animal Production*, 50(1), 173-182.
- Santonja G., Georgitzikis K., Scalet B.M., Montobbio P., Roudier S., Delgado L., 2017. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Intensive Rearing of Poultry or Pigs, EUR 28674 EN, doi: 10.2760/020485.
- Philippe F.X., Laitat M., Canart B., Vandenheede M., Nicks B., 2007. Comparison of ammonia and greenhouse gas emission during the fattening of pigs, kept either on fully slatted floor or on deep litter. *Livestock Science*, 111, 144-152.
- Qi R., Manbeck H.B., Maghirang R.G., 1992. Dust net generation rate in a poultry layer house. *Transactions of the ASAE* 35(5), 1639-1645.
- Redwine J.S., Lacey R., Mukhtar S., Carey J., 2002. Concentration and emissions of ammonia and particulate matter in tunnel-ventilated broiler houses under summer conditions in Texas. *Trans. ASAE* 45:1101-1109.
- Takai H., Pedersen S., 1994. Reduction of dust in swine buildings by adding animal fat in feed. *Proceedings: AgEng »94*, 5-8 September, Milano. Report 94-C-035
- Takai H., Jacobson L.D., Pedersen S., 1996. Reduction of dust concentration and exposure in pig building by adding animal fat in feed. *J. Agric. Engng*, 63, 113-120
- Takai H., Pedersen S., Johnsen J.O., Metz J.H.M., Groot Koerkamp 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. *J. agric. Engng. Res.*, 70, 5-77.
- Van Harn J., Aarnink A., Mosquera J., Ogink N., 2010. Effect of bedding material on dust and ammonia emission from broiler houses. *International Symposium on Air Quality and Manure Management for Agriculture*, Proceedings of the 13-16 September 2010, Dallas, Texas, United-States.
- Van Ransbeeck N., Van Langenhove H., Van Weyenberg S., Maes D., Demeyer P., 2012. Typical indoor concentrations and emissions rates of particulate matter at building level: a case study to setup a measuring strategy for pig fattening facilities. *Biosystems Engineering*, 111, 280-289.
- Van Ransbeeck N., Van Langenhove H., Demeyer P., 2013. Indoor concentrations and emissions factors for particulate matter, ammonia and greenhouse gases for pig fattening facilities. *Biosystems Engineering*, 116(4), 518-528.
- Wathes C.M., Holden M.R., Sneath R.W., White R.P., Phillips V.R., 1997. Concentrations and emission rates of aerial ammonia, nitrous oxide, methane, carbon dioxide, dust and endotoxin in UK broiler and layer houses. *British Poultry Science* 38(1), 14-28.
- Xu W., Zheng K., Meng L., Liu X., Hartung E., Roelcke M., Zhang F., 2016. Concentrations and emissions of particulate matter from intensive pig production at a large farm in north China. *Aerosol and Air Quality Research*, 16, 79-90.
- Wang X., Zhang Y., Riskowski G.L., Ellis M., 2002. Measurement and analysis of dust spatial distribution in a mechanically ventilated pig building. *Biosystems Engineering*, 81(2), 225-236.
- Winkel A., Cambra-López M., Groot Koerkamp P., Ogink N., Aarnink A., 2014. Abatement of particulate matter emission from experimental broiler housings using an optimized oil spraying method. *Transactions of the ASABE*, Vol. 57(6): 1853-1864.
- Yoder M.F., Van Wicklen G.L., 1988. Respirable aerosol generation by broiler chicken. *Transactions of the ASAE* 31, 1510-1517.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « *Innovations Agronomiques* », la date de sa publication, et son URL)