

Contribution de l'élevage porcin aux émissions de particules

Analyse des facteurs d'émission et simulations d'inventaires

Nadine GUINGAND (1), Mélynda HASSOUNA (2), Solène LAGADEC (3)

(1) IFIP-Institut du Porc, La Motte au Vicomte, 35651 Le Rheu Cedex, France

(2) INRAE, UMR SAS, rue de St Briec, 35042 Rennes, France

(3) CRAB, rue Maurice Le Lannou, 35042 Rennes, France

nadine.guingand@ifip.asso.fr

Contribution de l'élevage porcin aux émissions de particules : analyse des facteurs d'émissions et simulations

La France s'est engagée d'ici 2030 à réduire de 57 % ses émissions de particules en suspension d'un diamètre inférieur à 2,5 microns (PM_{2,5}) par rapport aux émissions de 2005. Le respect des engagements repose sur les inventaires annuels du Citepa, qui définit la contribution des différents secteurs d'activité, dont l'élevage porcin, en se basant sur les effectifs et les facteurs d'émission publiés par le programme de surveillance et d'évaluation des pollutions atmosphériques (EMEP, 2019). La première partie de l'article a pour objet de faire le point sur l'évolution des facteurs d'émission des particules de l'EMEP mais aussi de ceux actuellement disponibles dans la littérature en vue d'en faire l'analyse au regard des informations disponibles et des paramètres d'influence. Les facteurs de la littérature présentent une grande variabilité du fait de la diversité des modalités d'élevage et des méthodes de mesures appliquées. La majorité d'entre eux concerne le stade engraissement et il est souvent difficile de caractériser les modalités d'élevage (type de sol, alimentation...) du fait de l'absence d'informations. En parallèle, les valeurs des facteurs de l'EMEP ont été drastiquement revues à la baisse depuis 2006. Dans une deuxième partie, cinq scénarios de calculs des émissions de particules de l'élevage porcin sont comparés en intégrant les différents facteurs d'émission de l'EMEP ainsi que ceux de la littérature incluant des valeurs nationales. L'analyse de ces simulations par rapport à l'inventaire 2019 montre l'intérêt d'acquiescer et d'utiliser les facteurs d'émission représentatifs des conditions nationales de production.

Contribution of pig farming to primary particulate emissions : analysis of emission factors and simulations

France is committed to reducing its emissions of fine particulate matter less than 2.5 microns in size (PM_{2.5}) by 57% by 2030 compared to 2005 emissions. Compliance with the commitments is based on the annual inventory published by Citepa, which calculates the contribution of pig farming by multiplying the number of pigs by the emission factor published by the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP, 2019). This article first reviews the evolution of EMEP's emission factors since 2006 as well as the emission factors currently available in the literature. They are analysed based on the available information and the most influential parameters. Emission factors in the literature show wide variability due to the diversity of housing characteristics and measurement methods used. Most of them available in the literature concern finishing pigs, but it is often difficult to characterize their rearing conditions (e.g. type of floor, feed) due to a lack of information. In parallel, EMEP's emission factors have been drastically decreased since 2006. The article then compares five scenarios of particulate matter emissions to the 2019 inventory. These scenarios were developed using EMEP's emission factors, but also average factors established in the literature, including French-specific one. The analysis shows the utility of establishing and using emission factors representative of national production conditions.

INTRODUCTION

En 2019, d'après le Citepa, organisme en charge des inventaires nationaux, l'agriculture a participé aux émissions nationales de particules (PM) à hauteur de 58, 24,3 et 9,7 %, respectivement pour les TSP (particules de toutes tailles), PM10 (particules d'un diamètre inférieur à 10 μm) et PM2,5 (particules d'un diamètre inférieur à 2,5 μm). L'élevage est quant à lui contributeur à hauteur de 4, 9,8 et 3,8 % respectivement des TSP, PM10 et PM2,5. La part de la production porcine, par rapport aux émissions nationales, est de 1, 1,6 et 0,5 % respectivement pour les TSP, PM10 et PM2,5, soit une faible contribution, proche de celles des bovins et inférieures à celles des volailles (Citepa, 2021a). La prédominance des bâtiments sur litière en élevage de volailles explique la plus forte contribution de ce secteur. Pour les bovins, bien que majoritairement élevés sur litière, leur faible contribution s'explique par la plus faible durée de présence en bâtiments, les animaux ayant majoritairement un accès à l'extérieur.

Ces contributions relatives sont calculées annuellement dans les inventaires nationaux en utilisant les effectifs de chaque population, multipliés par le facteur d'émission (FE) en PM de la population. Ils permettent aussi de vérifier le respect des engagements des Etats-membres par rapport à certaines directives européennes ou protocoles internationaux (Protocole de Göteborg) mais aussi à définir les politiques à mettre en œuvre pour réduire les émissions des secteurs émetteurs. Dans ce cadre, la France s'est engagée, d'ici 2030, à réduire de 57% ses émissions de PM2,5 par rapport aux niveaux de 2005. Malgré sa faible contribution aux émissions nationales, la production porcine est elle aussi ciblée par la réduction des émissions de particules entre autres via la directive sur les émissions industrielles (directive IED 2010/75/UE).

L'objectif de cet article est de mettre en évidence l'importance du choix des facteurs d'émissions sur l'élaboration des inventaires et les conséquences possibles sur les voies de réduction à mettre en place au niveau de la filière. La première partie de l'article est consacrée à l'analyse des facteurs d'émission disponibles dans la littérature en s'attachant aux conditions d'acquisition des valeurs publiées. La deuxième partie de l'article est consacrée à l'analyse des FE fournis par l'European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) qui sont utilisés dans les calculs des inventaires nationaux. Dans une dernière partie, des simulations de contribution de la production porcine sont présentées et analysées au regard des objectifs que la France s'est fixée en termes de réduction des émissions de particules.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Collecte et analyse des FE de la littérature

Une extraction de la base de données ELFE (Elevage et Facteurs d'Emission - Vigan *et al.*, 2019) a été réalisée sur les FE en PM, actualisée des références bibliographiques collectées dans le cadre du projet Casdar Papovit (Guinand *et al.*, 2021) et d'une recherche complémentaire sur la base de données Web of Science. Un total de 17 références publiées entre 1998 et 2021, contenant un total de 107 FE sur au moins une des trois fractions (TSP, PM10 et PM2,5) acquis dans des bâtiments abritant au moins une des trois catégories animales (troupe, porcelet sevré et porc charcutier) a ainsi été collecté. Du fait de la multitude des unités d'expression, les FE ont été convertis, quand nécessaire, en $\text{kg}\cdot\text{place}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$, permettant la comparaison

avec les FE de l'EMEP. Cette conversion intègre des hypothèses sur le poids des animaux ainsi que la durée d'occupation des bâtiments par catégorie animale. Pour le poids des animaux, les valeurs de l'EMEP (2019) ont été appliquées ; 225 kg pour les truies, 20 kg pour les porcelets et 65 kg pour les porcs charcutiers. Les valeurs du taux d'occupation des bâtiments sont celles du calculateur GEREPA (Citepa, 2021b) : 95 % pour les bâtiments abritant des truies et 90% pour ceux abritant des porcelets et des porcs charcutiers. L'analyse des données a ensuite été effectuée en fonction des principaux facteurs de variation indiqués par l'EMEP (2019) à savoir le mode d'alimentation, l'activité des animaux et le type de litière. Le facteur « type de litière » ne concerne que peu d'élevages ; les porcs étant majoritairement élevés sur caillebotis (intégral ou partiel) et ne concerne qu'un nombre restreint de publications (3). Le facteur « activité des animaux » proposé par l'EMEP n'a pu être renseigné faute d'information disponible dans l'ensemble des publications collectées. Au regard des résultats obtenus dans une étude précédente (Guinand *et al.*, 2021), les données relatives au type de sol (caillebotis intégral vs caillebotis partiel vs litière), à la gestion des effluents (préfosse vs évacuation fréquente soit gravitaire soit par raclage) ont été intégrées à l'analyse. Le faible effectif de données par fraction de PM et par catégorie animale ne permet pas de tester les interactions entre les différentes modalités d'élevage.

Les analyses statistiques du paragraphe 2.4 ont été réalisées avec le logiciel R version 3.5.2 (R Core Team, 2018). Les données ont été soumises à un test de Kruskal-Wallis/Anova pour tester dans un premier temps, l'effet de la catégorie animale, puis les effets du type de sol, du mode présentation de l'aliment et de gestion des effluents sur les PM. Les différences sont considérées comme significatives avec une *P*-valeur inférieure ou égale à 0,05.

1.2. Collecte et analyse des FE fournis par l'EMEP

Les publications du guide EMEP (2006, 2009, 2013 et 2019) pour l'aide à la réalisation des inventaires ont été utilisées pour créer une base de données intégrant la catégorie animale (troupe, porcelet sevré, porc charcutier), le type d'effluent quand il était précisé (lisier, fumier), le niveau concerné (nommé Tier 1 ou Tier 2 ; correspondant à la différenciation ou non des types d'effluents) et la fraction de PM ainsi que le nombre de références utilisées pour l'établissement du FE concerné. Les FE étant tous exprimés en $\text{kg}\cdot\text{place}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$, aucune conversion en une unité standardisée n'a été nécessaire.

1.3. Réalisation des simulations d'émissions

Pour l'inventaire du Citepa en 2019, les émissions sont calculées en multipliant le FE moyen de chaque fraction de PM (FE de l'EMEP 2013 Tier 2) par l'effectif de chaque catégorie animale (effectifs de 2019). L'impact du choix de FE sur les émissions a été étudié à partir de scénarios combinant les différentes valeurs de l'EMEP sur 2013 et 2019, la prise en compte ou non du type d'effluents (Tier 2 et Tier 1) et les valeurs moyennes de FE de la littérature. Ces scénarios ont été ensuite comparés aux valeurs d'inventaire pour l'année 2019 (noté inventaire 2019) :

- Scénario « EMEP 2013 – Tier 1 » : utilisation des FE EMEP 2013 sans distinction du type d'effluents.
- Scénario « EMEP 2019 – Tier 1 » : utilisation des FE EMEP 2019 sans distinction du type d'effluents.
- Scénario « Littérature – Tier 2 » : utilisation des FE moyens issus de la littérature, avec distinction du type d'effluents.

- Scénario « Littérature – Tier 1 » : utilisation des FE moyens obtenus à partir de l'analyse de la littérature sans distinction du type d'effluents.
- Scénario « PC + EMEP 2013 -Tier 1 » : utilisation des FE de la publication de Guingand *et al.* (2021) pour les porcs charcutiers et les FE EMEP 2013 Tier 1 pour les truies et les porcelets, sans distinction du type d'effluents.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. Analyse des FE de la littérature

Les PM_{2,5} et PM₁₀, dont l'impact est le plus marqué sur la santé des éleveurs et des porcs, sont davantage ciblées dans les publications. Pour les truies (Tableau 1), les FE moyens en TSP, PM₁₀ et PM_{2,5} sont respectivement de 0,64, 0,79 ± 1,1 et 0,15 ± 0,18 kg.place⁻¹.an⁻¹. Pour les porcelets, (Tableau 1), les FE moyens en TSP, PM₁₀ et PM_{2,5} sont respectivement de 0,27, 0,16 ± 0,16 et 0,05 ± 0,05 kg.place⁻¹.an⁻¹. Pour les porcs charcutiers, (Tableau 2), les FE moyens en TSP, PM₁₀ et PM_{2,5} sont respectivement de 0,51 ± 0,31, 0,25 ± 0,24 et 0,02 ± 0,02 kg.place⁻¹.an⁻¹.

2.1.1. Variabilité des FE

Les FE par catégorie animale tous paramètres confondus (Tableaux 1 et 2) présentent une très grande variabilité et ceci pour les trois fractions de PM. Celle-ci s'explique, entre autres, par la diversité des méthodes de mesure, des modes d'élevages, principalement sur le mode de présentation de l'aliment (aliment sec vs aliment liquide), le type de sol (caillebotis intégral, caillebotis partiel et litière) et la gestion des effluents (stockage en préfosse, évacuation fréquente par gravité ou par raclage). Pour les TSP, le nombre de références, particulièrement pour les truies et les porcelets, est très faible, ne permettant donc pas vraiment de statuer sur la valeur du FE pour ces deux catégories animales.

2.1.2. Des informations incomplètes sur les modes d'élevage

A l'exception du type de sol pour les porcelets, chaque facteur comporte une modalité « non déterminée » (notée nd) qui correspond à une absence d'information sur le facteur concerné. La part des « nd » est variable selon les facteurs mais reste importante tant en termes d'effectif que de conséquence sur l'interprétation des résultats. A titre d'exemple, le mode de présentation des aliments n'est renseigné que dans moins de la moitié des références, toutes catégories animales confondues, alors que ce dernier était identifié dans les années 90 et plus récemment, comme un facteur prépondérant influençant la concentration en PM dans l'ambiance (Pearson et Sharples, 1995 ; Takai *et al.*, 1996 ; Guingand *et al.*, 2021).

Le mode de stockage des effluents est lui-aussi peu renseigné dans les publications portant sur les émissions de PM. Ainsi, près de 30% des publications ne précisent pas si les effluents sont stockés avec les animaux sur toute la durée d'élevage ou si des évacuations intermédiaires sont appliquées.

2.1.3. Des catégories animales peu renseignées

L'analyse de la littérature met aussi en évidence le peu de valeurs de FE pour les truies et les porcelets : 66% des FE collectés concernent le porc charcutier contre seulement 20% pour les truies et 14% pour les porcelets. Ce déséquilibre pourrait s'expliquer du fait de l'apparente contribution des porcs charcutiers à l'émission de PM. Cependant, le rôle des porcelets n'est pas à négliger du fait de leurs fortes activités et des températures élevées facilitant la remise en suspension des particules sédimentées dans l'ambiance des bâtiments.

2.1.4. Facteurs de variation des FE en PM₁₀ et PM_{2,5}

Le stade physiologique apparaît comme un facteur significatif d'influence (P<0,05) sur les FE en PM₁₀ et très significatif sur les FE en PM_{2,5} (P<0,001). En PM₁₀ et en PM_{2,5}, les FE des truies sont significativement supérieures à ceux des porcelets et des porcs charcutiers, ces derniers n'étant pas significativement différents entre eux. Différentes hypothèses peuvent être émises, comme la densité animale et/ou l'utilisation d'asséchant dans les bâtiments abritant des truies. L'analyse de l'effet du type de sol, du mode de présentation des aliments et du mode de gestion des effluents a ensuite été réalisée par stade physiologique (Tableaux 1 et 2).

Tableau 1 - Valeurs moyennes des FE (± écart-type) en kg.place⁻¹.an⁻¹ par fraction de PM pour les truies et les porcelets et par facteur de variation¹

FE	TSP	PM ₁₀	PM _{2,5}
Stade	Truie (21)		
Tous facteurs confondus	0,641 ± 0 (1)	0,786 ± 1,091 (13)	0,147 ± 0,182 (7)
Alimentation			
Sec ^a	-	0,153 ± 0,04 (3)	0,013 ± 0,0016 (2)
Liquide ^b	-	0,192 ± 0 (1)	-
Nd ^{c,d,e,f}	0,641 ± 0 (1)	1,064 ± 1,227 (9)	0,199 ± 0,193 (5)
Type de sol			
Cl ^{b,g,d,e}	-	0,810 ± 1,226 (7)	0,215 ± 0,272 (3)
CP ^a	0,641 ± 0 (1)	0,175 ± 0,014 (2)	0,013 ± 0,002 (2)
Litière ^e	-	1,680 ± 1,613 (2)	0,178 ± 0,008 (2)
Nd ^{c,f}	-	0,425 ± 0,274 (2)	-
Effluents			
Préfosse ^{a,b,d}	0,641 ± 0 (1)	0,182 ± 0,012 (4)	0,013 ± 0,002 (2)
Nd ^{c,e,f,g}	-	1,055 ± 1,234 (9)	0,199 ± 0,193 (5)
Stade	Porcelet (15)		
Tous facteurs confondus	0,270 ± 0 (1)	0,165 ± 0,165 (9)	0,052 ± 0,052 (5)
Alimentation			
Sec ^{a,g}	0,270 ± 0 (1)	0,048 ± 0,034 (3)	0,002 ± 0,0001 (2)
Liquide+Sec ^{b,g}	-	0,029 ± 0,003 (2)	-
Nd ^{e,f}	-	0,322 ± 0,115 (4)	0,086 ± 0,034 (3)
Type de sol			
Caillebotis intégral ^{a,b,e,g}	-	0,177 ± 0,173 (8)	0,065 ± 0,050 (4)
Caillebotis partiel ^a	0,270 ± 0 (1)	0,075 ± 0 (1)	0,002 ± 0 (1)
Effluents			
Préfosse ^{a,b}	0,270 ± 0 (1)	0,054 ± 0,025 (3)	0,002 ± 0,0001 (2)
nd ^{e,f,g}	-	0,221 ± 0,180 (6)	0,086 ± 0,035 (3)

¹ Références utilisées : a : Winkel *et al.* (2015), b : Costa *et Guarino* (2009), c : Chardon *et van der Hoek* (2002), d : Jacobson *et al.* (2006), e : Takai *et al.* (1998), f : Van der Hoek *et Hinz* (2007), g : Haeussermann *et al.* (2008) () : nombre de valeurs utilisées pour le calcul du FE ; nd : non déterminé

Seul le type de sol ressort comme ayant un effet significatif ($P < 0,05$) avec des FE plus élevés pour les animaux élevés sur litière par rapport à ceux élevés sur caillebotis. Aucune différence significative n'est identifiée entre le caillebotis intégral et le caillebotis partiel, ce qui est en accord avec Winkel *et al.* (2015) pour les porcelets.

Bien que le FE des animaux élevés sur litière soient plus élevés, ils présentent tout de même une forte variabilité, notamment pour les truies. Ceci est lié à l'absence d'information sur les matériaux constituant la litière et son mode de gestion (accumulée ou pas, fréquence de paillage et de raclage) impactant particulièrement son taux d'humidité. D'autres paramètres non intégrés dans cette étude sont cependant à prendre en considération. La période de mesure des PM apparaît comme un facteur supplémentaire de variation pour plusieurs auteurs (Van Ransbeeck *et al.*, 2012 ; Xu *et al.*, 2016 ; Shang *et al.*, 2020 ; Guingand *et al.*, 2021) ; les émissions de particules étant plus élevées en période chaude qu'en période froide du fait de l'augmentation des débits. Le protocole de mesures, incluant la durée et la période de mesures mais aussi les méthodes d'échantillonnages et les appareils de mesures, diffèrent selon les études.

Tableau 2 - Valeurs moyennes des FE (\pm écart-type) en $\text{kg}\cdot\text{place}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ par fraction de PM pour les porcs charcutiers et selon les facteurs de variation ¹

FE	TSP	PM10	PM2,5
Tous facteurs confondus	0,509 \pm 0,310 (20)	0,245 \pm 0,238 (30)	0,019 \pm 0,022 (21)
Aliment			
Sec ^{A, B, C, a}	0,464 \pm 0,197 (6)	0,165 \pm 0,050 (8)	0,008 \pm 0,002 (6)
Liquide ^{a, b, g, A, B}	0,258 \pm 0,145 (4)	0,137 \pm 0,062 (10)	0,007 \pm 0,003 (6)
Nd ^{c, d, e, f, D, E, F, G}	0,637 \pm 0,355 (10)	0,389 \pm 0,327 (12)	0,035 \pm 0,028 (9)
Type de sol			
Caillebotis intégral ^{b, d, e, g, A, C, D, E, F, G}	0,458 \pm 0,276 (17)	0,224 \pm 0,225 (21)	0,018 \pm 0,017 (12)
Caillebotis partiel ^{a, B, G}	0,590 \pm 0,245 (2)	0,145 \pm 0,040 (6)	0,007 \pm 0,001 (7)
Litière ^{e, D}	1,204 \pm 0 (1)	0,743 \pm 0,238 (2)	0,073 \pm 0,003 (2)
Nd ^c	-	0,305 \pm 0 (1)	-
Effluents			
Préfosse ^{a, c, d, e, A, C, D, F, G}	0,519 \pm 0,250 (12)	0,177 \pm 0,215 (15)	0,009 \pm 0,003 (8)
Gravitaire ^{2 a}	0,763 \pm 0 (1)	0,163 \pm 0,035 (2)	0,007 \pm 0,001 (2)
Raclage ^{2 A, D}	0,437 \pm 0,290 (4)	0,096 \pm 0,022 (2)	0,006 \pm 0,0001 (2)
Nd ^{c, e, f, g, B, D, E}	0,484 \pm 0,631 (3)	0,382 \pm 0,259 (11)	0,035 \pm 0,028 (9)

¹ Références utilisées : de a à g cf Tableau 1, A : Guingand *et al.* (2021), B : Mosquera *et al.* (2010), C : Xu *et al.* (2016), D : Kim *et al.* (2008), E : Schmidt *et al.* (2002), F : Shang *et al.* (2020), G : Van Ransbeeck *et al.* (2013), ² Evacuation fréquente, () : nombre de valeurs utilisées pour le calcul du FE, nd : non déterminé.

Sur les 95 publications analysées par Lagadec *et al.* (2020), la durée de mesure varie de 2 à 24 heures et la période de mesure au cours d'une bande d'une à six journées. Dans 56% des publications, la méthode de mesure est une collecte sur filtre et, dans 44%, il s'agit d'une méthode optique. Enfin, 17 appareils de mesure différents ont été recensés.

2.2. Évolution des FE de l'EMEP

L'EMEP propose des FE pour trois fractions de PM : TSP, PM10 et PM2,5 pour les truies, les porcelets et les porcs charcutiers (Tableau 3). Depuis 2006, l'EMEP considère que les émissions de particules proviennent exclusivement du poste bâtiment. Entre 2006 et 2013, le type d'effluent (lisier vs fumier) est un critère discriminant pour les FE par catégorie animale. On notera que pour ces versions de l'EMEP, les FE des systèmes sur litière sont supérieurs de 29 % pour les truies et de 19% pour les porcs charcutiers par rapport au système lisier ; la catégorie porcelet sur litière n'étant renseignée pour aucune des versions. En 2019, l'EMEP abandonne la différenciation des systèmes de gestion des effluents pour ne donner qu'un seul FE par fraction de PM et par catégorie animale. L'EMEP précise qu'il existe peu de littérature pour établir les FE des PM et qu'une approche par système de gestion des effluents (Tier 2) n'est donc pas envisageable. Selon l'EMEP, il est nécessaire d'avoir le maximum d'informations pour la détermination des FE ; les trois principaux critères étant les conditions d'alimentation, l'activité animale et le type de litière.

En 2013, les FE de l'EMEP ne sont basés que sur la publication de Takai *et al.* (1998) portant sur des bâtiments d'Europe du Nord. Dans son article, l'auteur met en évidence des différences significatives entre les 4 pays étudiés (Allemagne, Angleterre, Danemark et Pays-Bas) expliquées par le type de bâtiment, la saison et la période de prélèvement avec une interaction significative entre le pays et le type de bâtiment. Les concentrations mesurées sont exprimées en fraction inhalable et respirable que l'EMEP convertit ensuite en TSP, PM10 et PM2,5, augmentant ainsi l'incertitude sur les valeurs de FE.

En 2019, l'EMEP fournit un FE pour les trois fractions de PM et pour les trois catégories animales. Onze publications sont citées pour établir ces FE mais c'est principalement la publication de Winkel *et al.* (2015) qui est utilisée. Dans cette dernière, les FE proposés ont été mesurés dans des bâtiments néerlandais intégrant différents types des sols (caillebotis partiel vs intégral) et modes d'alimentation (alimentation sèche vs liquide) pour chaque catégorie animale.

Pour les truies, les FE de l'EMEP pour les TSP, PM10 et PM2,5 ont été drastiquement réduits depuis 2013. Le FE en TSP a été divisé par près de 2,5 (1,53 vs 0,62 $\text{kg}\cdot\text{place}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$), celui des PM10 par 4 (0,69 vs 0,17 $\text{kg}\cdot\text{place}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) et celui des PM2,5 par 12 (0,12 vs 0,01 $\text{kg}\cdot\text{place}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$). Pour les porcelets, les FE sont moins nombreux et ne portent que sur des animaux élevés sur caillebotis. Ainsi, entre 2013 et 2019, le FE en TSP a été multiplié par 1,3 (Tier 1 – 0,21 vs 0,27 $\text{kg}\cdot\text{place}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$), celui des PM10 a été divisé par 2 (0,1 vs 0,05 $\text{kg}\cdot\text{place}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) et celui des PM2,5 par 10 (0,02 vs 0,002 $\text{kg}\cdot\text{place}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$). Pour les porcs charcutiers entre 2013 et 2019, le FE en TSP a été multiplié par 1,4 (0,75 vs 1,05 $\text{kg}\cdot\text{place}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$), divisé par 2,5 pour le FE des PM10 (0,340 vs 0,14 $\text{kg}\cdot\text{place}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$), et par 10 pour le FE des PM2,5 (0,060 vs 0,006 $\text{kg}\cdot\text{place}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$). Globalement, les FE proposés par l'EMEP présentent des valeurs considérablement plus faibles depuis 2006 pour les trois catégories de porcs, principal résultat de l'augmentation des références disponibles dans la littérature internationale et à l'amélioration des méthodes de mesure. Cependant, l'augmentation des données disponibles fait apparaître une variabilité importante des valeurs utilisées pour la construction des FE de l'EMEP. L'EMEP (2019) encourage les états-membres à acquérir leurs propres FE argumentant de la diversité des itinéraires techniques mais aussi du nombre insuffisant de données disponibles dans la littérature. Ce point fût un argument majeur dans la construction du projet PAPOVIT

aboutissant à la mise au point d'un protocole de mesures adapté aux élevages français (Lagadec *et al.*, 2020) et à l'établissement de premiers FE pour les porcs charcutiers (Guinand *et al.*, 2021).

2.3. Impacts des valeurs de FE sur la contribution relative de l'élevage porcin aux émissions nationales de PM

Les 5 scénarios sont individuellement comparés aux valeurs de contribution de l'élevage porcin calculées par le Citepa pour l'année 2019 (Tableau 3 et Figure 1).

Le scénario « EMEP 2019 - Tier 1 » conduit à une augmentation de 21 % des émissions de TSP liée à l'augmentation du FE pour les porcs charcutiers (1,05 vs 0,7 kg.place⁻¹.an⁻¹ pour le système lisier et 0,83 kg.place⁻¹.an⁻¹ pour le système fumier) et à la part prépondérante des porcs charcutiers en termes d'effectif (64% du total). Cependant, ce scénario conduit à une importante réduction des PM10 (60 %) et des PM2,5 (91 %) du fait de l'importante baisse des FE par rapport aux valeurs de l'EMEP 2013 Tier 2 (Tableau 3).

Le scénario « EMEP 2013 Tier 1 » n'a que peu d'effet sur les valeurs d'émissions pour les trois fractions ; les valeurs des FE du Tier 1 correspondent globalement à la moyenne des FE lisier et fumier de l'EMEP Tier 2 utilisés pour l'inventaire 2019.

Le scénario « Littérature – Tier 1 » conduit à une réduction de 31 % des TSP, de 9 % des PM10 et de 30 % des PM2,5 par rapport à l'inventaire 2019. La chute des TSP s'explique par la réduction du FE des truies et des porcs charcutiers alors que celle des PM2,5 est liée à la baisse du FE des porcs charcutiers qui est divisé par 3.

Avec le scénario « Littérature – Tier 2 », la réduction des PM est similaire à celle obtenue avec le scénario précédent (TSP : 35 % - PM10 : 8 % - PM2,5 : 39 %) et résulte de la baisse du FE des porcs charcutiers en système « lisier » pour les trois fractions de PM par rapport aux valeurs de l'EMEP 2013 Tier 2.

Le scénario « PC+EMEP2013 » s'accompagne d'une réduction de toutes les fractions de PM (TSP : 39 % - PM10 : 35 % - PM2,5 : 57 %). Les FE des porcs charcutiers de l'étude de Guinand *et al.* (2021) sont en effet divisés par 2 par rapport à ceux de l'EMEP 2013 Tier 2.

Les cinq scénarios aboutissent à des réductions plus ou moins importantes des émissions de PM par rapport à celles de l'inventaire 2019. Si on applique, à l'élevage porcin, l'engagement de la France de réduire de 57% ses émissions de PM2,5 d'ici 2030 (0,33 kt en 2030 vs 0,77 kt en 2005), seuls les scénarios « EMEP 2019 » et « PC+EMEP2013 » permettent d'atteindre cet objectif dès 2019 (Figure 1) et de réduire de manière drastique les PM10.

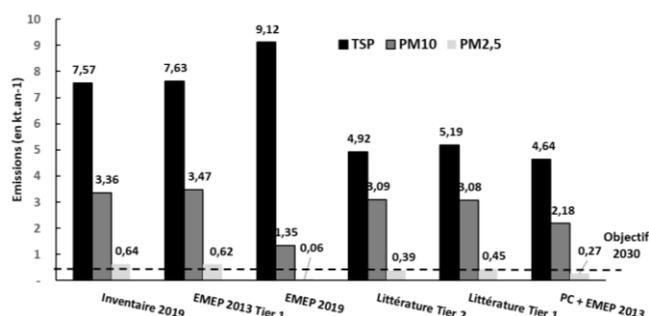


Figure 1 - Comparaison des différents scénarios d'émissions de PM de l'élevage porcin

Tableau 3 – Facteurs d'émission (en kg.place⁻¹.an⁻¹) et émissions totales par fraction de PM (en kt.an⁻¹) par scénario.

Effectif total (lisier/fumier) ¹	Truie			Porcelet			Porc charcutier		
	TSP	PM10	PM2,5	TSP	PM10	PM2,5	TSP	PM10	PM2,5
Fractions									
Facteur d'émission²									
EMEP 2019	0,62	0,17	0,01	0,27	0,05	0,002	1,050	0,140	0,006
EMEP 2013 Tier 1	1,53	0,69	0,12	0,21	0,1	0,02	0,750	0,340	0,060
EMEP 2013 Tier 2 Lisier	1,36	0,61	0,11	0,36	0,16	0,03	0,700	0,310	0,060
EMEP 2013 Tier 2 Fumier	1,77	0,8	0,14	Nd	nd	nd	0,83	0,370	0,070
Littérature -Tier 1	0,641	0,786	0,147	0,270	0,165	0,052	0,509	0,245	0,019
Littérature – Tier 2 Lisier	0,641	0,624	0,124	0,270	0,165	0,052	0,472	0,206	0,014
Littérature – Tier 2 Fumier	nd	1,680	0,178	Nd	nd	nd	1,204	0,744	0,073
Guinand <i>et al.</i> (2021) Lisier	-	-	-	-	-	-	0,306	0,152	0,011
Emissions³									
Inventaire 2019	1,368	0,614	0,110	1,036	0,461	0,086	5,162	2,287	0,442
Scénario EMEP 2013 - Tier1	1,500	0,677	0,118	0,655	0,312	0,062	5,479	2,484	0,438
Scénario EMEP 2019 - Tier1	0,608	0,167	0,010	0,842	0,156	0,006	7,670	1,023	0,044
Scénario littérature - Tier1	0,629	0,771	0,144	0,842	0,515	0,162	3,718	1,790	0,139
Scénario littérature - Tier 2	0,629	0,701	0,123	0,842	0,515	0,162	3,448	1,878	0,102
Scénario PC+EMEP2013 Tier 1	1,368	0,614	0,110	1,036	0,461	0,086	2,238	1,110	0,077

¹source : Citepa, 2021a ; ²en place.an⁻¹ ; ³en kt.an⁻¹

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le nombre de publications comportant des FE pour au moins une fraction de PM est très faible sur les 20 dernières années. La majorité des travaux porte sur les porcs charcutiers alors que les truies et les porcelets sont peu étudiés malgré leurs contributions significatives aux émissions de PM, comme le montre les inventaires présentés. Des études sont donc à prévoir pour combler cette lacune.

La variabilité des FE dans la littérature est très importante. La

diversité des modalités d'élevage y contribue ainsi que celle des méthodes mises en œuvre pour mesurer les particules. De plus, les informations nécessaires à la bonne caractérisation des modes d'élevages sont souvent manquantes dans la littérature disponible, ce qui rend difficile l'établissement de FE par modalité d'élevage. Bien que non abordés dans cette étude, les débits de ventilation ont un poids important dans le calcul des FE et peuvent présenter une grande variabilité en fonction des techniques de mesures appliquées mais aussi des conditions climatiques.

Les FE proposés par l'EMEP ont beaucoup évolué depuis 2006 avec une tendance globale à la baisse particulièrement pour les PM10 et les PM2,5 sans que cette baisse ne soit forcément argumentée.

Le scénario « PC+EMEP2013 » aboutit à une réduction considérable des trois fractions de PM – sans augmentation des TSP comme observé dans le scénario « EMEP 2019 » - et permet au secteur porcin, d'atteindre dès 2019 l'objectif de réduction des PM2,5 que s'est fixé la France pour 2030. L'utilisation de FE représentatifs des conditions françaises de production apparaît donc nécessaire à l'amélioration des inventaires. Cependant, de

nombreuses modalités d'élevage (litière, gestion des effluents, type de ventilation) doivent encore faire l'objet d'études complémentaires en vue de préciser les FE correspondants. Dans un parc de bâtiments vieillissant, l'usure des matériaux est probablement à intégrer également dans la détermination des FE. A moyen terme, l'évolution des bâtiments vers des structures ouvertes sur l'extérieur pose la question de la méthodologie de mesure tant pour les concentrations en PM que pour la détermination des taux de renouvellement.

Cette étude fait partie du projet PAPOVIT qui a reçu le soutien financier du CASDAR (5619).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Chardon W.J., van der Hoek K.W., 2002, Berekeningsmethode voor de emissie van fijn stof vanuit de landbouw [Calculation method for emission of fine dust from agriculture], Alterra/RIVM, Wageningen, the Netherlands.
- Citepa, 2021a. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – format Secten, 496 pp. https://www.citepa.org/wp-content/uploads/publications/secten/Citepa_Rapport-Secten_ed2021_v1_30072021.pdf
- Citepa, 2021b. Aide au remplissage du bloc Elevage sur la nouvelle plateforme GEREP. Janvier 2021, 33 pp
- Costa A., Guarino M., 2009. Definition of yearly emission factor of dust and greenhouse gases through continuous measurements in swine husbandry, *Atmos. Environ.*, 43, 1548–1556.
- EMEP, 2006. CORINAIR Emission Inventory Guidebook, Group 10: Agriculture, 1010 Fugitive PM sources, 101001 Particle emissions from animal husbandry, 15 pp.
- EMEP, 2009. Air pollutant emission inventory guidebook, Part B. Sectoral guidance chapters, 4.B Animal husbandry and manure management, 73 pp.
- EMEP, 2013. Air pollutant emission inventory guidebook, Part B Sectoral guidance chapters, 3. Agriculture, 3B Manure management, 65 pp.
- EMEP, 2019. Air pollutant emission inventory guidebook, Part B Sectoral guidance chapters, 3. Agriculture, 3B Manure management, 70 pp.
- Guingand N., Lagadec S., Hassouna M., Boulestreau-Boulay A.L., 2021. Particules en élevage porcin : établissement de facteurs d'émission des TSP, PM10 et PM2,5 en conditions de terrain. *Journées Rech. Porcine*, 53, 341-346.
- Jacobson L., Heber A.J., Hoff S.J., Zhang Y., Beasley D.B., Kroziel J.A., Hetchler B.P., 2006. Aerial pollutants emissions from confined animal buildings. *Agriculture and air quality*, Washington DC, USA, June 5-6, 775-784.
- Lagadec S., Guingand N., Joubert A., Le Coq L., Hassouna M., 2020. Mise au point d'une méthode de mesure des particules adaptée aux élevages de porc. *Journées Rech. Porcine*, 52, 343-344.
- Haeussermann A., Costa A., Aerts J.M., Hartung E., Jungbluth T., Guarino M., Berckmans D., 2008. Development of a dynamic model to predict PM10 emissions from swine houses. *J. Environ. Qual.*, 37, 557–564.
- Kim K.Y., KO H.J., Kim Y.S., Kim C.N., 2008. Assessment of korean farmer's exposure level to dust in pig buildings. *Ann. Agric. Environ. Med.*, 15, 51-58.
- Mosquera J., Hol J. M.G., Winkel A., Lovink E., Ogink N.W. M., Aarnink A.J.A., 2010. Dust emission from animal houses: Growing and finishing pigs. Wageningen, The Netherlands: Wageningen University and Research Center Publications.
- 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.
- R Core Team, 2018. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Shang B., Liu Y., Dong H., Tao X., Yao H., 2020. Particulate matter concentrations and emissions of a fattening pig facility in Northern China. *Atmos. Pollut. Res.*, 11, 192-1911.
- Schmidt D.R., Jacobson L.D., Janni K.A., 2002. Continuous monitoring of ammonia, hydrogen sulfide and dust emissions from swine, dairy and poultry barns. In: ASAE Annual International Meeting, ASAE Meeting Paper No. 024060, American Society of Agricultural Engineers (ASAE), Chicago, USA.
- 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 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. *J. Agric. Engng. Res.*, 70, 59-77.
- Van der Hoek K.W., Hinz, T., 2007. Particulate matter emissions from animal production in The Netherlands. DustConf International Conference in Maastricht, The Netherlands, 23-24 April 2007.
- Van Ransbeeck N., Van Langenhove H., Van Weyenberg S., Maes D., Demeyer P., 2012. Typical indoor concentrations and emission rates of particulate matter at building level: A case study to setup a measuring strategy for pig fattening facilities. *Biosyst. Eng.*, 111, 208-289.
- Van Ransbeeck N., Van Langenhove H., Demeyer P., 2013. Indoor concentrations and emissions factors of particulate matter, ammonia and greenhouse gases for pig fattening facilities. *Biosyst. Eng.*, 116, 518–528.
- Vigan A., Hassouna M., Guingand N., Brame C., Edouard N., Eglin T., Espagnol S., Eugène M., Génemont S., Lagadec S., Loringuer E., Loyon L., Ponchant P., Robin P., 2019. Development of a database to collect emission values for livestock systems. *J. Environ. Qual.*, 48, 1899-1906, doi: 10.2134/jeq2019.01.0007.
- Winkel A., Mosquera J., Groot Koerkamp P.W.G., Ogink N.W.M., Aarnink A.J.A., 2015. Emissions of particulate matter from animal houses in the Netherlands. *Atmos. Environ.*, 111, 202–212.
- 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 Air Qual. Res.*, 16, 79-90.