



Élaboration d'un protocole de mesure des émissions de particules en élevage avicole

Résumé

L'objectif de cette étude était de mettre au point un protocole de mesure des émissions de particules adapté aux élevages avicoles français. La revue bibliographique des options techniques et des protocoles existants, couplée à une phase de mise au point, a montré que l'appareil de mesure le plus adapté aux conditions et objectifs fixés était le compteur de particules optique Grimm 1.109 associé à une mesure gravimétrique sur porte-filtre. Les données de concentration massique en particules ont été converties en émissions en déterminant le taux de ventilation grâce à un bilan CO₂. Le protocole de mesure définit également la localisation du point de mesure, la durée et les périodes de prélèvement. Respectivement, les instruments de mesure ont été positionnés à proximité des ventilateurs d'extraction à une hauteur de 1,10m ; des mesures en continu ont été réalisées durant 24h au cours de 3 périodes comprises entre 4-10, 14-30 et 25-45 jours d'âge pour les volailles de chair « export », « standard » et « lourd ». Cette méthodologie a été appliquée sur 32 bâtiments d'élevage en périodes estivale et hivernale entre 2018 et 2020. Le jeu de données correspondantes dispose d'un peu moins de 200 enregistrements en cours de traitement.

1. Contexte

Les particules sont apparues dans le courant des années 2005-2010 comme une question environnementale et sanitaire importante dans le secteur de l'élevage. La prise de conscience des risques encourus par les éleveurs ainsi que le renforcement des attentes sociétales en matière de qualité de l'air ont à la fois suscité inquiétudes et intérêts croissants pour ces émissions.

Les particules en suspension dans les bâtiments d'élevage sont de nature non organique et organique. Elles sont constituées d'un mélange d'aliments, de fèces, poils, plumes, urine, insectes, parasites, pollen, minéraux, particules de litière et matériaux de construction, y compris les micro-organismes morts et vivants tels que les bactéries, les champignons, les virus et des endotoxines (Espagnol *et al.* 2019). En aviculture, les émissions de particules varient en fonction du type de sol (terre battue ou dalle béton), du type de litière (paille, sciure, ...), de l'aliment (farine, miette, granulé, composition), de l'animal (espèce, activité), de la densité animale, du type de bâtiment (âge, ventilation, entrée d'air, accès extérieur) et des conditions d'ambiance (température, hygrométrie relative...) (Espagnol *et al.*, 2019). Une production dite secondaire de particules en suspension peut également résulter de la recombinaison de l'ammoniac (abondamment émis en aviculture) avec des gaz acides issus de l'eau de boisson (acide chlorhydrique) et des fèces (Roumeliotis *et al.*, 2009). D'après Roumeliotis et Van Heyst (2008), ce processus de production représenterait entre 47 et 99% de l'émission totale des particules fines.

L'ensemble des particules en suspension dans l'air est désigné par l'acronyme TSP (Total Suspended Particles). Cet ensemble est sous-divisé en groupes de particules classées selon leur diamètre. Les plus grosses sont désignées sous le terme de poussières et se caractérisent par un diamètre supérieur à 10 µm. Les plus fines sont nommées PM (Particulate Matter), terme complété d'un nombre renseignant sur leur diamètre. Les particules grossières (PM₁₀) ont un diamètre compris entre 10 et 2.5 µm. Les particules fines ont un diamètre égal ou inférieur à 2.5 µm (PM_{2.5}).

Ce sont ces dernières qui, pénétrant plus facilement dans l'organisme, via le système respiratoire, présentent un risque élevé pour la santé humaine. Les pathologies en lien sont l'asthme, des allergies, des maladies respiratoires et cardiovasculaires et des cancers (AEE, 2019). L'exposition des éleveurs à de hautes concentrations de particules dans les bâtiments nuirait à leur santé tout en rendant plus difficile leurs conditions de travail. L'article R 4222-10 du Code du travail (2008) impose de ne pas dépasser, sur une période de 8h, en bâtiment d'élevage une concentration moyenne en PM₁₀ et PM_{2.5} de respectivement 10 et 5 mg.m⁻³. Les volailles sont également impactées à des seuils plus faibles (CIGR, 1992) avec des performances zootechniques moindres et des conditions sanitaires dégradées (Al Homidan *et al.*, 2003).

Les particules fines ont une masse trop faible pour chuter au sol par gravité et peuvent rester en suspension dans l'air des bâtiments d'élevage sur de longues périodes et/ou être diffusées sur de grandes distances une fois rejetées dans l'environnement. Cette caractéristique confère aux particules un rôle de vecteur dans la diffusion des odeurs et de biocontaminants (Kozziel *et al.*, 2007). Elles interfèrent

également sur de nombreux processus biogéochimiques (photosynthèse, acidification et eutrophisation des eaux, changement climatique...) et in fine sur la biodiversité.

L'impact environnemental de la pollution particulaire reste à clarifier sur bien des aspects mais ne peut être ignoré. Le protocole de Göteborg (amendé en 2012) retranscrit aux niveaux européen et national par la directive UE 2016/2284 et le plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques (PREPA, 2017) fixent des objectifs de réduction des émissions de PM_{2.5} aux horizons 2020 et 2030. À un niveau régional ou infrarégional, les schémas régionaux climat air énergie (SRCAE, 2013) et les plans de protection de l'atmosphère (PPA, 2014) prescrivent de manière plus ou moins ambitieuse des objectifs d'amélioration de la qualité de l'air.

Plus spécifique au secteur de l'élevage, la directive 2010/75/UE dite directive IED promeut la mise en place des meilleures techniques disponibles (MTD) d'ici le 21 février 2021 en production porcine (plus de 2000 emplacements en porcs charcutiers ou > 750 emplacements en truies) et avicole (plus de 40000 volailles). Bien que des MTD soient indiquées pour lutter contre les émissions de particules, aucune valeur limite de rejet n'est prescrite vis-à-vis de cette pollution. Le rapport Secten du CITEPA de 2019 (données de 2017) indique que l'élevage contribue respectivement à hauteur de 3,6, 7,7 et 2,8% des émissions nationales de TSP (849 kt), PM₁₀ (254 kt) et PM_{2.5} (164 kt), ce qui reste relativement modeste. Il doit toutefois être noté que le secteur de l'aviculture représente entre 44 et 68% des émissions imputées à l'élevage selon le type de pollution particulaire considéré. Les facteurs d'émission multiposte (bâtiment/stockage/épandage) sont indiqués dans le Tableau 1 pour différentes espèces avicoles, d'après EMEP 2016. Nous pouvons observer que les productions de palmipèdes et de dindes présentent les facteurs d'émissions les plus élevés et plus particulièrement sous forme de PM₁₀. La production de poules pondeuses présente un facteur d'émissions élevé pour les TSP, indiquant l'émission de particules plus grossières.

Dans ce contexte, le projet PAPOVIT s'est fixé comme objectif d'établir une méthodologie de mesure des émissions de particules adaptées aux conditions spécifiques des bâtiments d'élevages de porcs et de volailles. Toutes tentatives de prévention ou de lutte contre une pollution nécessitent une méthodologie de mesure représentative, robuste et reproductible. Cet article présente donc les différentes méthodes de mesure des émissions de particules pouvant être adaptées aux conditions d'élevage de volailles et la phase de mise au point développée dans le cadre de ce projet.

2. Principes et comparaisons des appareils de mesure de particules

Les méthodes de mesure de particules les plus répandues en élevage sont de deux types, la gravimétrie (sur filtre, sur microbalance oscillante et par atténuation de rayon bêta) et les méthodes optiques (spectrométrie, néphélométrie...) (Lagadec *et al.*, 2017). Pour chaque méthode, il est important de considérer sa sensibilité spécifique et les sources potentielles de biais (McMurphy, 2000) pouvant conduire à une sous- ou surestimation de la concentration réelle et des émissions.

2.1. Principes de mesures de particules et sources d'erreurs

2.1.1. Mesures gravimétriques

Le principe des méthodes gravimétriques réside en un prélèvement d'air vicié, de volume connu, couplé à la mesure par pesée à l'aide d'une balance. Le prélèvement de l'air se fait par aspiration avec trois catégories de prélèvements : (i) sans coupure granulométrique précise (mesures de toutes les catégories en taille de particules), (ii) avec coupure granulométrique (avec une tête de prélèvement qui ne capte qu'une taille de particules) ou (iii) avec fractionnement granulométrique (avec un impacteur pour opérer une sélection des particules selon leur taille afin d'en étudier la distribution granulométrique). Les filtres sont pesés avant et après échantillonnage dans des conditions standards de température et d'humidité relative. Le différentiel mesuré (balance haute résolution) permet de déterminer la masse des particules capturées. La concentration massique est obtenue en divisant la masse collectée par le volume d'air aspiré. Le résultat est une concentration massique moyenne de la période d'échantillonnage en g.m⁻³. Cette méthode est reconnue comme méthode de référence selon la norme EN 12341. Les biais liés à cette méthode de mesure sont, qu'à une concentration élevée, le fractionnement granulométrique est sujet à une surestimation. Les particules en dehors des fractions de taille ciblées ont tendance à atteindre la cellule de mesure et en perturber le résultat (Van Ransbeeck *et al.*, 2013 ; Zhao *et al.*, 2009). Concernant l'étape de pesée manuelle, la manutention du filtre (transport, stockage, autres manipulations...) présente toujours un risque de perte et de sous-estimation. Les capacités du matériau du filtre et des particules retenues à adsorber des composés en phase gazeuse qui seront pesés par erreur et assimilés à des particules fines (Anderen *et al.*, 2014) représentent une dernière source d'erreur.

La microbalance TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) repose sur un principe de mesure gravimétrique dynamique. Pour cela, un filtre est placé sur un élément creux dont les variations d'oscillation, suite aux aspirations d'air vicié, et l'accumulation de masse des particules sont suivies par le TEOM et converties en

concentration massique. Les limites de cette méthode sont le chauffage du flux d'échantillon à 50°C qui peut dénaturer les PM_{2.5} de l'échantillon, y compris sur des prélèvements en élevage (Li et al., 2012). Par ailleurs, une humidité élevée peut être source d'interférences si le filtre est déjà chargé (Heber et al., 2006).

Les appareils qui utilisent le principe de la jauge bêta (méthode AFNOR NF-X 43-017) collectent les particules sur un ruban filtre. La masse de particules est déterminée en dirigeant les rayons bêta d'une source radioactive à travers le ruban chargé en particules. L'atténuation du faisceau (lors du franchissement du ruban) dans le temps, couplé à une mesure de l'accumulation de masse de particules, permettent à l'appareil de calculer une concentration massique. Toutefois, cette technologie n'est pas compatible avec un préséparateur utilisant l'impaction, une surcharge de l'impacteur engendre le rebond de grosses particules sur le filtre et une surestimation de la concentration réelle. Le transport, le stockage et l'utilisation de sources radioactive nécessitent des mesures de sécurité et de prévention adéquates pouvant être contraignantes pour la mise en place du dispositif en élevage.

2.1.1. Mesures optiques

Le principe des méthodes optiques repose sur l'étude des quantités de lumière absorbées ou diffusées d'un faisceau lumineux traversant un volume de gaz contenant des particules en suspension. Les instruments de mesure correspondants sont le compteur optique et l'aérodynamique particle sizer (APS). Généralement, ces méthodes sont plus efficaces que les méthodes gravimétriques pour déterminer le nombre des particules par fraction (i.e. par taille) mais ne procèdent qu'à une semi-quantification de la masse à partir d'hypothèses sur la masse volumique des particules. En élevage, le risque d'erreur de mesure peut provenir d'un encrassement de l'optique au sein de l'appareil. Par ailleurs, ces dispositifs bénéficient d'un étalonnage d'usine avec un aérosol standard. Si celui-ci présente des propriétés différentes (indice de réfraction, de densité, de taille, de forme...) des aérosols étudiés, un biais substantiel sur la concentration massique calculée qui n'est pas à écarter (Cabra-López et al., 2014 ; Costa et al., 2012). Pour se rapprocher des conditions de mesure, une calibration peut être réalisée en utilisant une mesure parallèle de la concentration massique par gravimétrie (NF EN 12341) qui servira de référence.

2.2. Comparaison des appareils de mesures des particules

La configuration des méthodes de mesure et le contrôle des sources d'erreur doivent être intégrés aux études sur les émissions de particules. Cependant, il existe relativement peu d'études comparant les méthodes de mesures de particules et leur applicabilité dans les

ambiances complexes d'élevages. Seules les quelques études suivantes peuvent être citées :

Van Ransbeeck et al. (2013) ont testé cinq équipements : une collecte sur filtre avec pesée du filtre, un impacteur à cascade, une jauge bêta et deux spectromètres (GRIMM). Les résultats de la mesure sur filtre (NF EN 12341) ont servi de référence. Cette étude a été menée en bâtiments porcins. Dans la plupart des cas, les résultats de concentration en PM₁₀ ont été proches entre appareils, contrairement aux résultats de concentrations en PM_{2.5} et PM₁. En effet, si le spectromètre est proche de la méthode de référence pour les PM₁, les concentrations en PM_{2.5} et PM₁ sont 25 fois plus élevées avec l'impacteur en cascade qu'avec le spectromètre.

Winkel et al. (2015) ont également testé cinq équipements : une collecte sur filtre avec pesée du filtre, la jauge bêta, le TEOM, un spectromètre (GRIMM) et un photomètre (DustTrack). La méthode gravimétrique avec collecte et pesée du filtre est désignée comme la méthode de référence (NF EN 12341). Une régression linéaire a été appliquée sur chaque jeu de données pour apprécier les performances des équipements. La jauge bêta, le TEOM et le DustTrack ont sous-estimé la mesure de concentration en PM₁₀. À l'inverse, le GRIMM a surestimé d'un facteur 1,5 les concentrations massiques mesurées. Une régression linéaire de meilleure qualité a été trouvée dans les échantillons de porcherie ($R^2 = 0,98$) qu'en bâtiments avicoles de poules pondeuses ($R^2 = 0,85$) et de poulets de chair ($R^2 = 0,72$). Par ailleurs, les auteurs estiment que le GRIMM est l'équipement le plus sensible à l'encrassement et qu'au-delà d'un cumul de 43 mg de PM₁₀ analysées par l'appareil, une opération de maintenance est nécessaire pour garantir la qualité des mesures.

Cabra-López et al. (2015) ont comparé des mesures parallèles de photomètres (Dust Track) et gravimétriques (collecte par cyclone puis pesée sur filtre) de PM₁₀ en élevages avicoles et porcins. Pour chacune des productions, le Dust Track a sous-estimé les concentrations en particules d'un facteur 2.

Une analyse par régression linéaire des résultats a permis de développer des facteurs de calibration spécifiques aux productions animales pour la mesure par photomètre.

Enfin, Yang et al. (2015) ont comparé les performances de trois photomètres DustTrack avec une mesure de référence par TEOM en élevages de poules pondeuses et en poulet de chair. Les photomètres ont sous-estimé les concentrations en PM₁₀ comparé au TEOM. Une étude statistique a démontré qu'un facteur de correction dépendant de la concentration pouvait être appliqué pour corriger ce biais.

3. Equipements et méthodes de mesure retenus

Mesurer en élevage : Les choix en matière méthodologique et d'équipements ont nécessité de dresser un cahier des charges décrivant les spécifications des ambiances d'élevages et les capacités de mesures attendues. Il convenait de préciser le champ de caractérisation de la pollution particulaire qui peut être aussi bien mené sur un aspect qualitatif (taille des particules) que quantitatif (nombre et masse de particules).

Les principaux prérequis ont été les suivants :

- Équipement adapté aux conditions d'élevage (NH_3 : 0-50 ppm ; humidité : jusqu'à 100%, en moyenne 70-80% ; température : -10 à +40°C ; poids de l'appareil : -de 15 kg) ;
- Mesurer les particules TSP, PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$ dans l'ambiance/gaine d'extraction et à l'extérieur ;
- Mesurer en continu avec enregistrement des concentrations en particules (TSP, PM_{10} et $\text{PM}_{2.5}$) compris dans la gamme 0-20 mg.m^{-3} , définies d'après la bibliographie et les observations réalisées dans précédents projets (CASDAR Air Éleveur et AIRPOUL) ;
- Ne pas nécessiter de dilution préalable de l'air ;
- Si possible, mesurer une concentration massique et en nombre de différentes fractions afin d'appréhender la répartition granulométrique des particules ;
- Si possible, être équipé d'un filtre afin d'avoir un échantillon de particules pour observer leur morphologie à l'aide d'un microscope.

3.1. Mesure de la concentration massique des particules

L'analyse bibliographique, menée à travers le projet PAPOVIT, et la recherche de méthodes répondant au cahier des charges présenté ci-dessus ont montré que l'appareil de mesure le plus adapté aux conditions et objectifs fixés est le compteur de particules optique GRIMM 1.109 associé à une mesure gravimétrique (Figure 1) (Lagadec *et al.*, 2018).

Des essais de mise au point entre ce type de compteur (GRIMM) et une méthode de référence (TEOM) ont montré qu'un écart des valeurs massiques entre les deux méthodes ne pouvait être ignoré. Le GRIMM présente une bonne capacité à apprécier le nombre de particules et leur répartition granulométrique (fonctions initiales de ce type de compteur). Comme suggéré par Winkel *et al.* (2015) et Cambra-Lopez *et al.* (2015), un dispositif gravimétrique (mesures sur filtre) complémentaire, servant de mesure de référence, est nécessaire pour procéder à une calibration spécifique de la méthode optique. Un coefficient de

correction, propre aux conditions d'élevage rencontrées et tenant compte des concentrations en nombre et du volume des particules pourra être établi pour corriger les concentrations massiques données par le GRIMM. Les mesures gravimétriques, sans coupure gravimétrique, ont été réalisées à l'aide d'un porte-filtre, d'un filtre disposé en amont d'un compteur gaz et d'une pompe d'aspiration.

Des tests ont également été réalisés pour définir le modèle de sonde (isocinétique à haute vitesse et isocinétique radiale) le plus adapté. Comme montré en Figure 2, l'échantillonnage isocinétique des particules est primordiale lors d'un prélèvement à haute vitesse d'air ($> 2 \text{ m.s}^{-1}$). Un différentiel de vitesse trop important entre le flux d'échantillonnage (V_e) et d'écoulement du gaz (V_g) conduit à un sous-échantillonnage ou un sur-échantillonnage. Les essais de mise au point ont mis en évidence que la sonde isocinétique à haute vitesse sous-estime la concentration en nombre et en masse surtout pour les grosses particules (cas n°2 de la Figure 2) ; ces dernières ne pénétrant pas la chambre de mesures de l'appareil.

La sonde radiale a donc été retenue bien que la norme EN 13284-1 recommande un prélèvement isoaxial ($< 15^\circ$). Cette configuration est difficilement réalisable en élevage (Hofschreuder *et al.*, 2008) et n'a pu être appliquée dans ce protocole. Costa *et al.* (2007-2009) conseillent de réaliser le prélèvement d'air avec la sonde isocinétique radiale dans la salle.

3.2. Mesure des émissions de particules

Les émissions (g.h^{-1}) de particules sont calculées en multipliant le gradient de concentration en particules ($C_{\text{sortant}} - C_{\text{entrant}}$, g.m^{-3}) mesuré sur la période de mesure par le débit de ventilation moyen (D , $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) (Lagadec *et al.*, 2018).

$$\text{Émission} = (C_{\text{sortant}} - C_{\text{entrant}}) \times D$$

Ces taux d'émission peuvent être exprimés selon différentes unités de production (animal présent, par kg de vif...). Pour être plus facilement comparables aux données de la littérature, les émissions sont généralement exprimées par heure.

Le calcul des émissions annuelles s'exprime à partir des émissions moyennes horaires multipliées par 24 heures puis 365 jours. Ces émissions peuvent être aussi exprimées par animal produit auquel cas, il convient de les ramener au nombre de volailles mises en place au cours de l'année et en corrigeant ce chiffre par le taux réel d'occupation du bâtiment (correspondant aux durées de vide sanitaire) collecté auprès des éleveurs.

Concernant la mesure du débit de ventilation (D), la méthode de mesure indirecte du bilan CO_2 a été privilégiée

(Jacobson *et al.*, 2002). Le CO₂ produit à l'intérieur du bâtiment d'élevage est utilisé comme gaz traceur. En production avicole, ce protocole est souvent utilisé car les bâtiments peuvent être équipés de ventilateurs de différents diamètres rendant les mesures par anémomètre à roue peu pratiques. De plus, cet appareil de mesure n'est pas utilisable dans les bâtiments à ventilation statique.

La méthode du bilan CO₂ implique une estimation des volumes de CO₂ produits dans le bâtiment à partir des systèmes de chauffage par combustion interne, des animaux et la litière. La production issue des systèmes de chauffage est calculée à partir des consommations de combustibles et des facteurs d'émissions directes associés. Le volume de CO₂ produit par les animaux est obtenu en convertissant, d'après les données du CIGR, 2002, la production de chaleur (basée sur le poids). Enfin, l'hypothèse de Robin *et al.*, 2005 estimant que la production de chaleur de la litière correspond à 10% de la chaleur totale des animaux a été appliquée pour

déterminer cette dernière composante. La production des animaux et de la litière est obtenue en convertissant la production de chaleur (basée sur le poids) en volumes de CO₂ (d'après les données du CIGR, 2002). Ces volumes sont divisés par le gradient en CO₂ mesuré entre l'ambiance du bâtiment et l'air extérieur pour estimer le débit d'air du bâtiment. Les concentrations de CO₂ (ambiante et extérieure), la température et l'humidité ont été respectivement mesurées à l'aide d'une sonde Vaisala et d'une sonde Kimo (T° et RH). Le poids moyen des animaux a été mesuré à partir de relevés des systèmes de pesée automatiques.

Il convient de noter que les données issues du CIGR 2002 souffrent d'incertitudes au regard des vitesses de croissance plus importante des souches de volailles élevées. Les productions de chaleur des animaux ont évolué au même titre que leur vitesse de croissance et l'efficacité alimentaire.

1.A



1.B



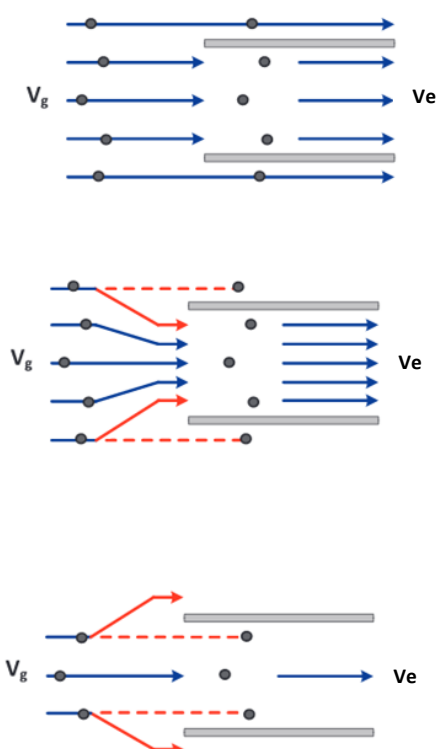
1.C



1.D



Figure 1 : Dispositifs de mesure des particules avec (1.A) compteur de particules optique GRIMM 1.109 ; (1.B) sa sonde de prélèvement isocinétique radiale ; (1.C) le porte-filtre et des filtres (avant/après mesure) et (1.D) Dispositif Porte-filtre et filtre pendant une mesure.



Prélèvement de PM isocinétique. La vitesse du flux d'échantillonnage est identique à celle du flux ambiant ($V_e = V_g$).

La vitesse du flux d'échantillonnage est supérieure à celle du flux ambiant ($V_e > V_g$). Des lignes d'écoulement du flux ambiant, en dehors du diamètre du conduit d'aspiration, sont prélevées. Les particules les plus petites suivent cette voie tandis que les plus grossières ont tendance à contourner l'échantillonneur. Il en découle une sous-estimation de la concentration massique de particules.

La vitesse du flux d'échantillonnage est inférieure à celle du flux ambiant ($V_e < V_g$). Les lignes d'écoulement contournent le conduit d'aspiration. Les petites particules ont tendance à ne pas être échantillonnées et inversement pour les plus grosses. Il en découle une surestimation de la concentration massique de particules.

Figure 2: Principe du prélèvement à isocinétique (V_g vitesse gaz et V_e vitesse échantillon d'air), d'après Winkel et al., 2014

4. Points de prélèvement, durée et périodes de mise en œuvre du dispositif expérimental

4.1. Points de prélèvement

Les calculs d'émissions nécessitent de mesurer les concentrations en particules de l'air entrant et sortant du bâtiment. La mesure de l'air entrant est facilement réalisable car la vitesse d'air est faible. Costa *et al.* (2007) préconisent de placer le dispositif de mesure dans les combles ou à l'extérieur du bâtiment. L'accès aux combles pouvant être difficile et afin d'éviter d'immobiliser et encrasser un second équipement, il a été choisi de réaliser une mesure ponctuelle de 30 minutes à l'extérieur des bâtiments pour chaque campagne de mesure.

Pour les mesures d'ambiance, d'après la bibliographie, le dispositif en salle peut être placé en face d'un des extracteurs (Jerez *et al.*, 2005). Hofschreuder *et al.* (2007) présentent un protocole plus détaillé et recommandent de prélever l'air à 50 cm du bord de l'extracteur et à 10 cm sous celui-ci afin d'avoir un angle de 30° entre le bord de l'extracteur et le point de prélèvement d'air. Pour nos expérimentations, les appareils ont été positionnés devant un des ventilateurs, sur une table à 1,10 m de haut. À la mise en place et au retrait de l'équipement, des contrôles de la vitesse d'air (anémomètre) ont été réalisés pour s'assurer que celle-ci était inférieure à 2 m.s^{-1} .

4.2. Durée et périodes d'échantillonnage

Conformément à la majorité des études et à la norme NF 12341 pour la mesure gravimétrique, une durée optimale de suivi en continu sur 24 heures a été réalisée lors de nos expérimentations. Ce compromis permet de prendre en compte l'incidence des périodes diurnes et nocturnes tout en prévenant une saturation de l'appareil. Entre chaque mesure, un filtre zéro a été utilisé sur l'appareil afin de nettoyer la chambre de mesure.

En poulets de chair, les cycles de production vont de 32 à 42 jours. Afin de tenir compte de l'incidence du stade physiologique de l'animal et des modifications de conduite d'élevage en résultant, trois campagnes de mesure (de 24h) des émissions de particules ont été réalisées au cours du cycle de production.

Ces campagnes ont été réparties comme suivants selon le type de production de volailles de chair :

Pour les poulets exports (inf. à 1.7 kg – entre 32 et 35 jours)

- Une première campagne entre 4 et 9 jours d'âge
- Une deuxième campagne entre 14 et 18 jours d'âge
- Une troisième campagne entre 25 et 29 jours d'âge

Pour les volailles standard (1.8 à 2.2 kg entre 37 et 42 jours)

- Une première campagne entre 5 et 9 jours d'âge
- Une deuxième campagne entre 17 et 21 jours d'âge
- Une troisième campagne entre 29 et 33 jours d'âge

Pour les poulets lourds (2.1 à 3.5 kg – plus de 42 jours)

- Une première campagne entre 5 et 10 jours d'âge
- Une deuxième campagne entre 25 et 30 jours d'âge
- Une troisième campagne entre 39 et 45 jours d'âge

Pour chaque élevage ayant fait l'objet de mesures, deux cycles de production ont été suivis sur une période estivale et hivernale. L'adaptation des pratiques d'élevages sur ces périodes contrastées et leur incidence sur les émissions de particules ont ainsi pu être appréhendées.

5. Conclusions et perspectives

La mesure des émissions de particules en élevage n'est pas chose aisée du fait de la diversité de protocoles et de technologies existantes. Cependant, les enjeux sanitaires (santé des éleveurs et des animaux) et environnementaux liés à ce flux polluant nécessitent d'affiner les connaissances et la contribution précise des systèmes de production avicole français.

Afin de fournir des facteurs d'émission de particules représentatifs des élevages avicoles nationaux ; une

méthodologie adaptée a été mise au point et fait appel à la mesure des concentrations en particules (TSP, PM₁₀, PM_{2.5}) par le couplage d'un compteur de particules optique GRIMM 1.109 et d'une mesure gravimétrique. Le taux de ventilation, pour calculer les émissions de particules, a été obtenu par la méthode du bilan CO₂. Le déploiement de la méthode (points de prélèvement, durée, périodes...) suit les prescriptions génériques de travaux similaires, menés en condition d'élevage, tout en intégrant les spécificités des productions nationales.

Des campagnes de mesures, en périodes climatiques contrastées, ont été réalisées sur 32 bâtiments avicoles sélectionnés pour garantir la représentativité des itinéraires techniques des élevages français. Les données sont actuellement en cours de traitement et permettront d'obtenir des facteurs d'émission en PM_{2.5}, PM₁₀ et TSP en élevage de volailles et d'identifier les itinéraires faiblement émetteurs.

Remerciements

La méthode présentée dans cet article a été développée dans le cadre du projet PAPOVIT-Particules en élevages de porcs et de volailles et itinéraires techniques : mise au point méthodologique et acquisition de facteurs d'émission qui a reçu le soutien financier du CASDAR (2016-2020). Ce projet a été porté par l'IFIP- institut du porc. Il regroupe l'ITAVI, les chambres d'agriculture Bretagne et Pays-de-la-Loire, INRAE UMR SAS et l'IMT Nantes Atlantique. Les travaux concernant plus spécifiquement les choix et la mise au point méthodologique des mesures de particules en élevage ont été menés par la Chambre d'agriculture de Bretagne, l'IFIP, INRAE et l'IMT Nantes Atlantique.

Les auteurs tiennent à remercier le CASDAR pour son soutien financier au projet PAPOVIT (n°5619) dont les acquis ont permis la réalisation de cet article.

Tableau 1 : Facteurs d'émission multiposte pour différentes espèces avicoles (EMEP, 2016)

Poste	Espèces	Valeurs Facteurs d'émission			Unités Facteurs d'émission
		TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	
Multiposte	Pondeuses	0,19	0,04	0,003	kg TSP ou PM ₁₀ ou PM _{2.5} / Population Moyenne Annuelle
	Poulets	0,04	0,02	0,002	
	Dindes	0,11	0,11	0,02	
	Canards	0,14	0,14	0,02	
	Oies	0,24	0,24	0,033	

Références bibliographiques

- AEE 2019 – Agence européenne de l'environnement - Air quality in Europe – 2019 report. N°10. ISSN 1977-8449.
- Al Homidan, A., Robertson, J.F., Petchey, A.M. 2003. Review of the effect of ammonia and dust concentrations on broiler performance. *World's Poultry Science Journal* 59, 340-349.
- Andersen, K.B., Glasius, M., Feilberg, A. 2014. Gas-particle partitioning of odorants in a pig house measured by thermal desorption GC/MS. *Environ. Sci. Process. Impacts* 16:1059–1068.
- Cambra-López, M., Winkel, A., Mosquera, J., Ogink, N.W.M., Aarnink, A.J.A. 2014. Comparison of light scattering devices and gravimetric samplers for PM10 mass concentration in livestock houses. *Atm. Environ* 111:20–27.
- CIGR, 1992. Climatization of animal houses. Commission Internationale du Génie Rural. Second Report of the Working Group on Climatization of Animal Houses. Centre for Climatization of Animal Houses, Ghent, Belgium (1992)
- CIGR, 2002. 4th Report of Working Group on Climatization of animal houses. Heat and moisture production at animal and house levels (eds. Pedersen, S. and K. Sällvik). International Commission of Agricultural Engineering (CIGR), Section II.
- CITEPA, 2019. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France– Format Secten.
- Costa, A., Guarino, A., Porro, M., et al. 2007. Evaluation of PM₁₀ emission from farrowing and fattening swine rooms by continuous on-line measurements. *Journal of Agricultural Engineering*, 38(1). doi: <https://doi.org/10.4081/jae.2007.1.59>
- Costa, A. et Guarino, M. 2009. Definition of yearly emission factor of dust and greenhouse gases through continuous measurements in swine husbandry. *Atmospheric Environment*, 43(8), 1548-1556. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.11.009.
- Costa, A., Ferrari, S., Guarino, M. 2012. Yearly emission factors of ammonia and particulate matter from three laying-hen housing systems. *Anim. Prod. Sci.* 52:1089–1098. CIGR 2013 - Centre international de recherche sur le cancer - 2013 - Air pollution and cancer - Editors, K. Straif, A. Cohen, J. Samet. IARC Scientific Publications ; 161. ISBN 978-92-832-2166-1.
- EMEP, 2016. 3.B: Manure management, 62p.
- Espagnol S., Brame C. et Dourmad. J.Y. (coord), 2019. Pratiques d'élevage et environnement : mesurer, évaluer, agir. Versailles, éditions QUAE, pp 376.
- Heber, A.J., Lim, T.T., Ni, J.Q., Tao, P.C., Schmidt, A.M., Koziel, J.A., Hoff, S.J., Jacobson, L.D., Zhang, Y.H., Baughman, G.B. 2006. Quality-assured measurements of animal building emissions: Particulate matter concentrations. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 56:1642–1648.
- Hofschreuder, P., Aarnink, A., Zhao, Y., Ogink, N.W.M. 2007. Measurement protocol for determining fine dust emission factors of animal housing systems. How to improve air quality, 2007-04-23/2007-04-24.
- Hofschreuder, P., Yang, Z., Aarnink, A.J.A., and Ogink, N.W.M. 2008. Measurement protocol for emissions of fine dust from animal houses: considerations, draft protocol and validation. Report 134.
- Jacobson, L. 2002. Development of methods to measure dust (PM₁₀) and ammonia emissions from Minnesota pig facilities. Report.
- Jerez, S.B., Zhang, Y., McClure, J.W., Heber, A.J., Ni, J., Koziel, J.A., Hoff, S.J., Jacobson, L.D. & Beasley, D. 2005. Aerial pollutant concentration and emission rate measurements from a swine farrowing building in Illinois. A&WMA's 98th Annual Conference & Exhibition, 21–24 June 2005, Minneapolis, MN. Paper # 1026. A&WMA, Pittsburgh, PA. p. 15.
- Koziel, J. A., Cai, L., Lo, Y.-C., et al. 2007. Characterization of volatile organic compounds and odorants associated with swine barn particulate matter. Paper presented at the International Conference How to improve air quality.
- Lagadec S., Hassouna M., Chiffe J., Guingand N., Joubert A., Mrad W., Le coq L. 2017. État de l'art des protocoles de mesures des particules et expérimentations complémentaires. Synthèse projet PAPOVIT, pp. 8.

Références bibliographiques

- Lagadec S., Hassouna M., Chiffe J., Guingand N., Joubert A., Mrad W., Le coq L. 2018. État des lieux des méthodes de mesures des particules et des équipements associés. Synthèse projet PAPOVIT, pp.12.
- Li, Q.F., Lingjuan, W.L., Liu, Z.F., Heber, A.J. 2012. Field evaluation of particulate matter measurements using tapered element oscillating microbalance in a layer house. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 62:322–335.
- McMurry, P.H. 2000. A review of atmospheric aerosol measurements. *Atm. Environ.* 34 : 1959–1999.
- NF EN 12341, 1998 : Air quality -Determination of the PM₁₀ fraction of suspended particulate matter -Reference method and field test procedure to demonstrate reference equivalence of measurement methods.
- NF EN 13284-1, 2017 : Émissions de sources fixes - Détermination de faibles concentrations en masse de poussières - Partie 1 : méthode gravimétrique manuelle.
- NF X43-017, 1984 : Mesure de la concentration des matières en suspension dans l'air ambiant - Méthode par absorption de rayons bêta.
- Robin, P., Hassouna, A., Amand, G. 2005. CalorSTA, logiciel de dimensionnement et de diagnostic des systèmes de refroidissement évaporatif des bâtiments avicoles. Sixièmes Journées de la Recherche Avicole Saint-Malo, France, pp. 136-140.
- Roumeliotis, T. and Van Heyst B. 2008. Investigation of Secondary Particulate Matter Formation in a Layer Barn. Conference paper, Livestock Environment VIII, Iguassu Falls, Brazil 31 August - 4 September 2008.
- Roumeliotis, T., Dixon, B., Van Heyst B. 2009. Investigating a Relationship between Ammonia and Particulate Matter in Poultry Houses II: Secondary Inorganic Aerosol Formation. Conference paper, Reno, Nevada, June 21 - June 24, 2009.
- Van Ransbeeck, N., Van Weyenberg, S., Van Langenhove, H., Demeyer, P. 2013. Indoor concentration measurements of particulate matter at a pig fattening facility: Comparison and equivalence tests with different sampling instruments and measuring techniques. *Biosystems Engineering*, 115, pp. 453–462.
- Winkel, A., Demeyer, P., Feilberg, A., Jorgensen, M., Puterflame, J. 2014. Measurement of particulate matter: recommendations for the VERA test protocol on air cleaning technologies. Report.
- Winkel, A., Rubio, J. L., Huis in't Veld, J., Vonk, J., and Ogink N.W.M. 2015. Equivalence Testing Of Filter-Based, Beta-Attenuation, TEOM, And Light-Scattering Devices For Measurement Of PM₁₀ Concentration In Animal Houses. *Journal of Aerosol Science*, 80, pp. 11-26. doi: 10.1016/j.jaerosci.2014.10.009.
- Yang, X., Li, H., Zhang C. 2015. Field Comparison of TSI DustTrak PM Monitor with Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM). ASABE-Annual International Meeting. doi : 10.13031/aim.20152161447.
- Zhao, Y., Aarnink, A.J.A., Hofschreuder, P., Groot Koerkamp, P.W.G. 2009. Evaluation of an impaction and a cyclone pre-separator for sampling high PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in livestock houses. *J. Aerosol Sci* 40:868–878.

Development of a protocol for measuring particulate emissions in poultry farms.

The objective of this study was to develop measurement protocol of particulate matter emissions adapted to French poultry production systems. The literature review of existing technical options and procedures, coupled to a validation process, showed that the most suitable measuring device for the conditions and objectives set was the optical particle counter Grimm 1.109 and equivalent gravimetric sampler on filter holder. Particles mass concentration results were converted into emissions by quantifying the ventilation rate using a CO₂ balance. The measurement protocol also defines the spot, the span and the sampling periods. Respectively, the devices were placed near the exhaust fans at a height of 1.10m ; continuous measures were carried out for 24 hours during 3 periods ranging between 4-10, 14-30 and 25-45 days of breeding for "export", "standard" and "heavy" poultry productions. This methodology was applied to 32 farms in summer and winter periods between 2018 and 2020. The corresponding data set includes just below 200 records being processed.