

MESURER LES ÉMISSIONS DE GAZ LIÉES AUX ACTIVITÉS AGRICOLES : DES MÉTHODES ET DES ENJEUX À RACCORDER

MEASURING GAS EMISSIONS FROM AGRICULTURAL ACTIVITIES: METHODS AND CHALLENGES TO CONNECT

Mélynda HASSOUNA,
INRA, UMR Sol-Agronomie-Spatialisation, 65 rue de St-Brieuc, F-35042 Cedex

Thomas EGLIN,
ADEME, DPED – Service Agriculture et Forêts, 20 avenue du Grésillé, F-49000 Angers

Paul ROBIN,
INRA, UMR Sol-Agronomie-Spatialisation, 65 rue de St Brieuc, F-35042 Cedex

Résumé

La quantification des émissions de gaz des activités agricoles est devenue incontournable si l'on souhaite répondre aux différents enjeux auxquels l'agriculture doit faire face. La particularité de ce secteur est liée à la multiplicité des sources d'émissions dites « diffuses ». Au cours de ces 20 dernières années, la communauté scientifique a contribué au développement de méthodes de mesure adaptées aux gaz ciblés, aux sources, aux moyens disponibles et aux enjeux. Des protocoles détaillés commencent à être disponibles, et leur standardisation est en cours. Néanmoins, cette étape ne pourra être complète que lorsque des méthodes d'évaluation des incertitudes sur les mesures seront également disponibles.

Mots-clés

Méthode de mesure, émission diffuse, ammoniac, gaz à effet de serre, incertitude, standardisation, fiabilité.

Abstract

The quantification of emissions from agricultural activities has become essential to meet the different challenges that agriculture has to cope with. The particularity of this sector is related to the multiplicity of emission sources called «diffuse». Over the past 20 years, the scientific community has contributed to the development of measurement methods adapted to target gas, sources, available resources and issues. Standard protocols are in development and standardization is going on. However, this step will not be complete until uncertainty assessment methods are not available.

Keywords

Measurement method, diffuse emission, ammonia, greenhouse gases, uncertainty, standardization, reliability.

1. Introduction

Quel que soit le système agricole considéré, des flux gazeux directs se produisent à chaque étape des cycles de production (Pellerin *et al.*, 2015 ; Peyraud *et al.*, 2012). Ces flux peuvent être considérés comme polluants (ex : ammoniac, oxydes d'azote, composés organiques volatils, produits phytopharmaceutiques) ou non (ex : N₂). Aujourd'hui, la réduction des émissions relève d'enjeux environnementaux et sanitaires, mais aussi techniques (ex : amélioration de la productivité des intrants), économiques et sociaux. Ces enjeux doivent être simultanément satisfaits.

Pour mettre en place des solutions adaptées, des méthodes de mesure des émissions doivent être développées et mises en œuvre pour évaluer les émissions de toutes les sources agricoles. Néanmoins, ce secteur d'activité, bien que très standardisé pour certaines productions, présente pour chaque catégorie de produit une typologie de systèmes basée sur un nombre important de catégories (par exemple, pour l'aviculture, poulet lourd, poulet léger, poudeuses...), avec une variabilité des émissions intra-catégorie potentiellement importante étant donné le nombre de paramètres pouvant influencer les émissions (conduites ou itinéraires techniques, pratiques, climat, génétique, type de sol...). C'est pourquoi il existe aujourd'hui un grand nombre de méthodes de mesure des émissions de gaz adaptées aux spécificités des systèmes de production mais aussi au caractère diffus des émissions du secteur agricole (Bouscaren, 1999). Certaines méthodes proviennent de l'industrie et permettent de mesurer certaines des émissions dites canalisées, comme celles des engins agricoles ou des bâtiments à ventilation dynamique avec cheminées. D'autres méthodes ont dû être mises au point pour étudier les émissions dites « fugitives » comme, par exemple, celles des méthaniseurs, des stabulations (Hensen *et al.*, 2009 ; Leytem *et al.*, 2013) ou « surfaciques » comme celles des fosses à lisier (Balsari *et al.*, 2007) ou des sols (Bruemmer *et al.*, 2013 ; Smith *et al.*, 1995 ; Stella *et al.*, 2012).

Une autre particularité du secteur agricole est que la mesure concerne des systèmes biologiques en évolution et en interaction constante avec leur environnement, ce qui implique une difficulté supplémentaire si l'on recherche généralité, représentativité et reproductibilité des résultats de mesure. Ainsi, différentes échelles d'approche

des émissions sont possibles et seront définies en fonction des objectifs des mesures. À cette diversité des situations, s'ajoutent celles des usages potentiels des données et également celles des intervenants dans le processus de mesure, ceux-ci pouvant avoir des niveaux de technicité très différents. Dans ce contexte, une bonne connaissance des méthodes de mesures, de leur domaine d'applicabilité et des conditions optimales de leur mise en œuvre apparaît essentielle.

Dans cet article, nous présenterons (1) les principes généraux des méthodes de mesures disponibles, (2) les principaux contextes d'usage des mesures, (3) une grille de lecture pour mettre en adéquation méthodes de mesures et usages, et enfin (4) des éléments sur les défis futurs concernant la métrologie des émissions.

2. Principes des méthodes de mesure dans le secteur agricole

Dans le secteur agricole, trois stratégies de caractérisation des émissions de polluants atmosphériques se distinguent :

- (1) les stratégies reposant sur des bilans massiques des éléments des composés volatils comme le C et l'N. Ces méthodes ne reposent pas sur une mesure directe des émissions mais sur une estimation à partir d'évolutions dans le temps des stocks d'éléments. Elles sont généralement les plus faciles à mettre en œuvre. Cependant, elles ne permettent pas d'avoir des valeurs d'émissions par espèce chimique (N-NH₃, N-N₂O, N₂, C-CH₄ and C-CO₂), ni de cinétique temporelle en lien avec des paramètres techniques (agronomique ou zootechnique) ou avec les variations climatiques. La précision des bilans de masse dépendra des informations techniques et zootechniques disponibles, mais aussi de la caractérisation des effluents et, dans certains cas, de la durée de la période concernée.
- (2) les stratégies reposant sur des mesures d'émissions « à la source ». Ce sont de manière générale des méthodes qui reposent sur la quantification des débits et des concentrations pour des sources confinées (méthode non intrusive) ou des

méthodes qui reposent sur l'utilisation de chambres soit statique soit dynamique (méthode intrusive parce qu'elles perturbent le fonctionnement biologique et physico-chimique du milieu étudié). Ces dernières ne permettent de quantifier l'émission que sur une petite portion de la source et nécessitent donc de mettre en œuvre des stratégies d'échantillonnage spatial et d'extrapolation adéquates.

- (3) les stratégies dites indirectes permettant d'estimer les émissions à distance des sources sans perturber leur fonctionnement (méthode non intrusive) et en prenant en compte l'hétérogénéité du site et des sources. Les émissions sont estimées à partir de mesures de concentrations à distance de la source associées à des mesures micro-météorologiques. Les flux sont ensuite estimés à partir de ces mesures et de modèles de dispersion utilisés pour calculer les coefficients de dispersion. Ces techniques sont assez contraignantes à mettre en œuvre et sont très liées aux conditions météorologiques. Enfin, elles sont utilisées pour caractériser l'émission globale au niveau d'une surface présentant des sources d'émissions hétérogènes et diffuses, sans permettre de distinguer les émissions propres à chacune des sources.

À l'exception des bilans massiques, ces différentes stratégies supposent des mesures de concentrations des gaz concernés dans les échantillons d'air prélevés. Les stratégies d'échantillonnage et les modalités de prélèvement ont un rôle déterminant sur la qualité et la représentativité des mesures d'émissions. Différentes méthodes de prélèvement existent et sont fonction des stratégies adoptées et des techniques utilisées pour déterminer les concentrations. En général, plusieurs méthodes de mesure de concentrations sont compatibles avec une même stratégie. Elles se caractérisent par les espèces moléculaires qu'elles permettent de détecter et les seuils de détection associés, leur fréquence d'acquisition, leur précision, leur coût et leur facilité d'emploi. Quel que soit le gaz ciblé, deux familles de méthodes de mesure des concentrations peuvent être considérées :

- Les méthodes physiques optiques (lasers, spectroscopie d'absorption...). La principale caractéristique de ces méthodes est leur rapidité de réponse, leur sensibilité et la

possibilité de suivre en temps réel des cinétiques de concentrations (souvent pour plusieurs gaz à différents niveaux de concentrations).

- Les méthodes chimiques (chimiluminescence, chromatographie en phase gazeuse, pièges acides, tubes colorimétriques...). Ces méthodes sont adaptées à des mesures ponctuelles ou à des mesures intégrées sur un pas de temps de quelques minutes à quelques semaines. De ce fait, elles sont moins adaptées au suivi de cinétique de concentration. Par ailleurs, la plupart de ces méthodes sont sélectives et ne permettent pas de mesurer plusieurs gaz en même temps avec le même principe.

Les principales méthodes de mesures utilisées en France pour les émissions de gaz azotés (NH_3 , NO_x) et de gaz à effet de serre liés aux activités d'élevage et au champ sont recensées dans Hassouna *et al.* (2015). Un recensement des méthodes de mesure des émissions de produits phytopharmaceutiques a été réalisé par Guiral *et al.* (2016).

3. Les différents contextes de mesure des émissions

La quantification des émissions gazeuses agricoles répond à des objectifs divers : scientifiques (compréhension des processus), techniques (développement de solutions d'atténuation, comparaison du potentiel d'émissions de différents procédés ou produits, amélioration des performances des systèmes de production), sanitaires (surveillance de la qualité de l'air), réglementaires (suivi et contrôle du respect de seuils d'émissions), etc. Les méthodes de quantification mises en œuvre doivent être en adéquation avec les objectifs, c'est-à-dire que le niveau d'incertitude associé aux résultats obtenus doit permettre de conclure de manière fiable. Elles doivent aussi être adaptées aux sources d'émissions, aux conditions (contrôlées ou pas) et aux moyens pouvant être mis en œuvre (financiers, compétences...).

D'après Robin *et al.* (2010), on distingue 3 catégories principales d'usage des mesures d'émissions : (1) politique ou réglementaire, (2) scientifique, (3) pour la certification.

3.1. Usage politique ou réglementaire

De nombreux pays se sont engagés à réduire leurs émissions nationales auxquelles contribue de façon notable le secteur agricole. Dans ce cadre, des inventaires nationaux doivent être fournis annuellement. Actuellement, ceux-ci sont basés principalement sur l'utilisation de facteurs d'émission par défaut comme ceux de EMEP/EEA (2013) et du GIEC (CITEPA, 2013), qui sont établis sur la base de mesures d'émissions publiées et ont fait l'objet d'un consensus national ou international. Malheureusement, ces facteurs d'émission par production apparaissent assez globaux et ne prennent pas du tout en compte la diversité des systèmes agricoles. Plus précisément, pour le secteur de l'élevage, certaines spécificités comme, par exemple, les modalités d'élevages au niveau du bâtiment, la gestion des déjections, le stockage et l'épandage mais aussi le climat ne sont pas pris en considération. Or ces facteurs induisent des niveaux d'émissions et une répartition entre gaz potentiellement différents. À titre d'exemple, une synthèse des valeurs d'émission d'ammoniac en bâtiment bovin lait issues de la littérature scientifique et recensées par Charpiot *et al.* (2012), est présentée. La figure 1, issue de cette synthèse, illustre la forte hétérogénéité des mesures d'émission que l'on peut obtenir au sein même d'une catégorie de systèmes de gestion des effluents, typologie généralement utilisée pour comparer les émissions de différents systèmes d'élevage. Ainsi, pour la catégorie « lisier raclé », les auteurs de l'analyse ont recensé des niveaux d'émissions mesurés variant de plus d'un facteur 100, sans pouvoir en identifier de manière fiable les facteurs explicatifs. Cette synthèse montre l'intérêt de construire une typologie d'élevage basée sur les émissions et permettant de mieux représenter la variabilité mesurée.

En outre, pour améliorer la pertinence et la précision des inventaires, il est donc impératif de mieux connaître l'état initial (la diversité et la typologie des systèmes), de pouvoir identifier et certifier les solutions d'atténuation, et de prendre en compte les réductions obtenues dans les inventaires. Pour ce faire, les facteurs d'émission à utiliser doivent couvrir une plus grande gamme de conditions d'élevage (dans un premier temps ceux pour lesquels les données d'activités sont disponibles et qui constituent les sources majeures d'émissions), et être associés à une incertitude réduite, de manière à proposer des

catégories d'élevage mieux différenciées sur la base de leurs émissions réelles. Cette étape de construction de facteurs d'émission requiert des méthodes de mesure rapides et faciles à mettre en œuvre.

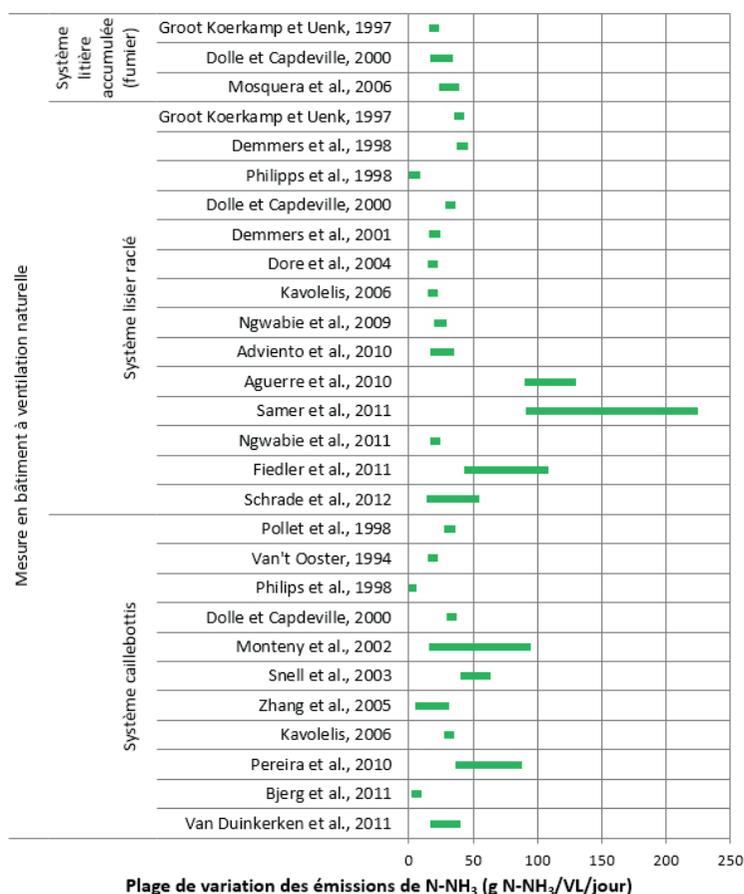


Figure 1. Variabilité des émissions de NH₃ en bâtiment bovin-lait dans la littérature internationale (Charpiot *et al.*, 2012).

Published ammonia emissions for different manure management systems in dairy cattle barns.

3.1. Usage scientifique

La thématique des émissions de gaz peut être abordée de différentes manières par les scientifiques, et les méthodes employées seront choisies également en fonction des objectifs scientifiques qui peuvent être appliqués ou plus fondamentaux comme, par exemple, la recherche de techniques d'atténuation des émissions, le développement de capteurs ou de nouvelles méthodes de mesure. Le développement de techniques d'atténuation repose sur une démarche scientifique dont la première étape est la compréhension des processus divers, à des échelles de temps et d'espace diverses en vue notamment d'identifier des facteurs d'influence. Cela exige donc de mettre en œuvre des méthodes de mesure d'émission variées et adaptées (ex : seuil de détection, sensibilité). Les connaissances acquises depuis plus d'une trentaine d'années en conditions contrôlées ou commerciales ont permis d'identifier des leviers d'actions (par exemple, l'alimentation, la gestion de l'ambiance dans les bâtiments d'élevage) et, pour chaque levier d'action, à partir de la connaissance des facteurs d'influence, de proposer des stratégies (par exemple, l'évacuation fréquente des déjections dans un bâtiments 'élevage) puis des solutions techniques (raclage en V, écoulement gravitaire...). La compréhension des processus est également fondamentale pour le développement de modèles à différentes échelles pour permettre de cerner la variabilité des émissions, de simuler des combinaisons de pratiques ou d'évaluer les performances de techniques d'atténuation à moindre coût, comme, par exemple, les simulations réalisées par avec le modèle MOLDAVI.

L'étude des processus et dynamiques des émissions peut également être nécessaire pour le développement de nouvelles méthodes de mesure reposant sur des mesures intermittentes. La mesure des émissions en continu sur un cycle de production permet d'identifier les moments les plus opportuns et pertinents pour des mesures ponctuelles qui conduiront à la représentativité et à la fiabilité des résultats finaux. C'est notamment la démarche adoptée en conditions expérimentales par Guingand *et al.* (2011) pour le développement d'une méthode de mesure simplifiée concernant les porcs à l'engrais. Le

Pratiques			NH ₃	N ₂ O	N ₂	Abatement total N
Alimentation	Abreuvoir	Paillage	kg (% N excrété)	kg (% N excrété)	Kg (% N excrété)	(% excrété)
Matière azote totale	Pipettes	6kg / m ²	318 (22%)	30,1 (2%)	22 (2%)	25%
		4kg / m ²	323 (22%)	31,9 (2%)	24 (2%)	26%
Normale	Cloches	6kg / m ²	488 (34%)	24,3 (1%)	8 (1%)	36%
		4kg / m ²	494 (34%)	26,2 (1%)	8 (1%)	36%
Matière azote totale	Pipettes	6kg / m ²	288 (22%)	27,3 (2%)	20 (2%)	26%
		4kg / m ²	292 (22%)	28,9 (2%)	22 (2%)	26%
-1%	Cloches	6kg / m ²	441 (34%)	22,1 (1%)	7 (1%)	36%
		4kg / m ²	448 (34%)	23,9 (1%)	8 (1%)	36%

Tableau 1. Effet des pratiques d'élevage sur les émissions totales de NH₃, N₂O, N₂ du bâtiment. (Meda *et al.*, 2011).

Evaluation of combination of different livestock practices on Nitrogen emissions in a poultry house.

tableau 2 illustre les écarts obtenus entre des valeurs d'émissions reposant sur des mesures en continu sur la durée d'élevage (EC) et des valeurs d'émissions obtenues à partir de deux ou trois jours de mesure jugés pertinents sur la période d'élevage. Les écarts obtenus entre les EC et les valeurs calculées avec 2 jours de mesures sont plus importants sur l'ammoniac et l'eau qu'avec les valeurs calculées avec 3 jours de mesures. La série J25, 60, 80 a été retenue pour des mesures ponctuelles, car les valeurs d'émissions obtenues sont proches de celles observées avec des mesures en continu (écart maximum 15 % pour l'ammoniac). De plus, le dernier prélèvement (J80) peut être réalisé avant les premiers départs des animaux pour l'abattoir.

	C_CO ₂	C_CH ₄	N_NH ₃	N_N ₂ O	H ₂ O
EC (kg/salle)	3514	44,9	41,2	1,0	15325
Avec 2 jours de mesures					
J15,95	5,7	-8,5	-24,1	-9,2	27,0
J25,60	5,9	-24,2	-15,5	-16,3	-8,8
J25,80	5,8	-12,2	-15,0	-5,1	-16,6
Avec 3 jours de mesures					
J25, 60, 95	5,6	1,0	-9,7	-5,1	16,4
J25, 80, 95	5,5	10,6	-9,3	3,1	10,8
J25, 60, 80	5,7	-9,4	-15,3	-2,0	-10,4
J25, 80,110	5,3	25,2	32,3	7,1	-17,2

Tableau 2. Écart (en %) entre les émissions mesurées en continu et les valeurs d'émissions reposant sur des mesures ponctuelles (avec 2 ou 3 jours de mesures ponctuelles). (N. Guingand *et al.*, 2011).

Differences between continuous emissions measurements and emissions estimated with spot measurements (2 or 3 days during the rearing period) in a fattening pig house.

3.3. Usage pour certification

Dans le cadre du protocole de Göteborg amendé le 4 mai 2012, la France a pour objectif de réduire ses émissions d'ammoniac de 4 % d'ici 2020, par rapport au niveau d'émission de 2005. Récemment, la commission européenne a proposé de renforcer de manière ambitieuse les objectifs nationaux de réduction des émissions d'ammoniac (NH₃) et de méthane (CH₄) à l'horizon 2030. Le secteur de l'élevage est le premier concerné par les obligations de respect de plafonds d'émissions de la directive NEC (National Emission Ceilings, 2001/81/CE) couplées avec la directive 2010/75/UE relative aux émissions industrielles (directive IED). Ces directives reposent sur la mise en œuvre du BREF (Best available techniques REFerence document), document de référence qui liste l'ensemble des Meilleures Techniques Disponibles (MTD) permettant de réduire l'impact environnemental d'élevages de porcs et de volailles dont la taille est supérieure aux seuils fixés dans la directive IED. La révision de ce document est actuellement en cours et pourrait aboutir à des obligations accrues de réduction des émissions vers l'air, voire même des objectifs de contrôle des émissions pour les grands élevages de porcs et de volailles. Un contrôle des performances des systèmes de réduction des émissions dans ce cadre pourrait être envisagé. Afin d'attester de leur performance réelle, des méthodes de mesure dont les résultats sont associés à une incertitude inférieure à la réduction attendue devraient être mises en œuvre et celles-ci devraient également avoir fait l'objet de protocoles standardisés. Actuellement la vérification des performances des techniques d'atténuation est réalisée avant commercialisation via le programme européen « Environmental Technology Verification (ETV) »¹. Des procédés applicables en élevage ont déjà été vérifiés dans

le cadre de ce mécanisme pour des entreprises danoises². En France, c'est le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) qui est l'organisme de vérification. Néanmoins certaines études sont réalisées en conditions contrôlées par les organismes de développement pour s'assurer des performances de certains matériels et élaborer des recommandations techniques en vue de l'optimisation des performances avant leur diffusion sur le terrain. Par exemple, grâce à des mesures d'émissions réalisées en continu sur plusieurs lots de porcs à l'engrais par Lagadec *et al.* (2012), l'efficacité de techniques permettant l'évacuation fréquente des déjections par raclage en V a été démontrée et l'incidence de la fréquence de raclage testée (Loussouarn *et al.*, 2014).

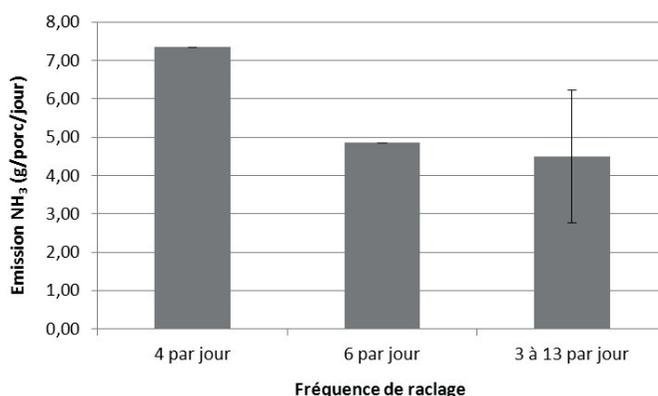


Figure 2. Incidence de la fréquence de raclage des déjections sur les émissions d'ammoniac dans un bâtiment d'élevage porcin (Loussouarn *et al.*, 2014).

Impact of the scraping frequency on NH₃ emissions in a pig house.

4. Mettre en adéquation les méthodes et les objectifs

En plus de devoir être en adéquation avec les enjeux poursuivis par les mesureurs, les méthodes de mesure doivent aussi être adaptées aux échelles de temps et d'espace, aux moyens et compétences à disposition. Quelques revues bibliographiques (Ferm, 1979, 1991 ; Harper, 2005 ; Hassouna *et al.*, 2016 ; Hu *et al.*, 2014 ; Ni *et al.*, 2008 ; Sommer *et al.*, 2004) sont actuellement disponibles concernant les différentes méthodes de mesure des émissions de gaz d'origine agricole. Les différentes méthodes présentées peuvent être distinguées en fonction de certaines caractéristiques métrologiques ; nombre et diversité des mesurandes, durée et continuité des enregistrements, diversité des données et modèles nécessaires... Ces méthodes sont plus ou moins coûteuses, faciles à mettre en œuvre, continues ou intermittentes, globales ou locales, intrusives ou non intrusives. Elles peuvent être classées dans trois grandes catégories en lien avec les objectifs précédemment cités (figure 3). Les **méthodes de référence** sont celles préconisées pour un usage scientifique ou cognitif (fabricants de matériel, d'engrais minéraux...). Elles sont basées sur des mesures en continu et requièrent une certaine technicité du mesureur de par le matériel mis en œuvre (analyseur de gaz, capteurs météorologiques...) ou les modèles utilisés pour l'interpolation ou l'extrapolation des données. Les coûts associés liés au matériel de mesure, aux consommables et au temps consacré peuvent être assez élevés. Ces méthodes sont dites de « référence » car elles servent de référence pour le développement de **méthodes dites « simplifiées »** (Dekock *et al.*, 2009 ; Famulari *et al.*, 2010 ; N. Guingand *et al.*, 2010 ; M. Hassouna *et al.*, 2010 ; Ponchant *et al.*, 2008) et parce qu'elles sont les plus utilisées dans le domaine scientifique. Ce second type de méthode repose sur des mesures intermittentes, ce qui engendre des coûts réduits. Les méthodes simplifiées sont, quant à elles, particulièrement adaptées pour la détermination des facteurs d'émission puisqu'elles permettent de multiplier les mesures d'émission dans une même catégorie de sources précisément caractérisée. Le troisième niveau méthodologique est celui des **méthodes de contrôle** dans un but de vérification des niveaux d'émissions à un instant donné.

Le résultat obtenu pourra alors être utilisé pour évaluer les émissions sur un cycle de production ou pour ajuster les itinéraires techniques ou pratiques, de manière à diminuer les émissions si nécessaire. Les outils mis en œuvre sont simples et peu coûteux. Les évaluations reposent sur ces mesures ponctuelles mais également sur des modèles construits à partir de connaissances acquises avec des méthodes de référence. Les incertitudes de mesure varient en fonction des niveaux méthodologiques choisis, de la taille des systèmes étudiés, du matériel mis en œuvre, de la technicité des mesureurs, de la durée et de la fréquence des mesures, etc.

Ces différents types de méthodes doivent pouvoir être mis en œuvre en conditions contrôlées ou commerciales. La contrainte principale des mesures d'émission dans les conditions commerciales est la garantie d'obtenir des mesures reproductibles. Cela nécessite que les méthodes de mesure mises en œuvre soient décrites de la manière la plus complète possible (démarche, matériel, enregistrement et traitements des données). La contrainte principale des mesures d'émission en conditions contrôlées est la garantie d'obtenir des mesures représentatives par rapport à des conditions commerciales. La combinaison et les répétitions des deux types d'expériences sont donc nécessaires pour développer la connaissance. Les mesures réalisées dans un cadre scientifique supposent une traçabilité importante des conditions de mesure et du système étudié, généralement spécifiques de l'étude.

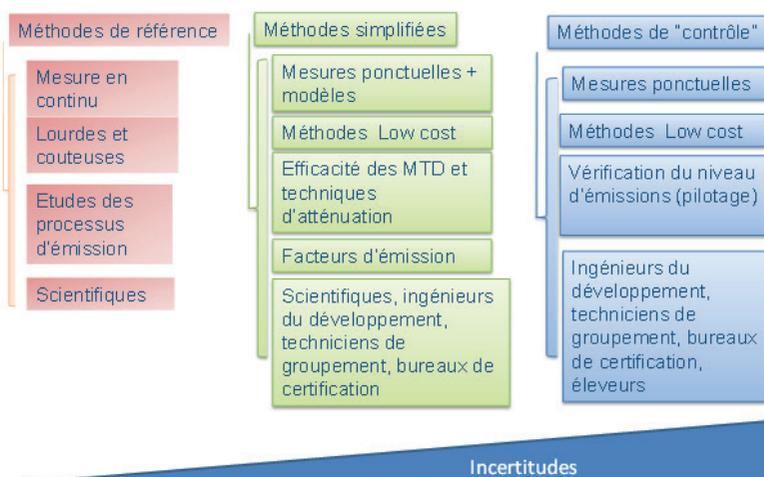


Figure 3. Les 3 classes de méthodes de mesure des émissions de gaz d'origine agricole.

The 3 different classes of methods to quantify emissions of agriculture.

5. Les futurs défis méthodologiques

Mesurer les émissions du secteur agricole est un processus complexe reposant sur des mesures correspondant à différents mesurandes : masse, température, hygrométrie, concentration en gaz, etc. Ces mesures sont effectuées sur un milieu vivant pouvant être caractérisé, par exemple, par des animaux, des aliments, des effluents, un mode de logement, des pratiques de gestion, des cultures... Au cours de la période de mesure, les conditions environnementales peuvent changer rapidement et avoir un impact sur les grandeurs mesurées et sur les instruments utilisés (dérive). C'est pourquoi il est impératif de proposer des protocoles de mesure détaillés permettant d'assurer une certaine reproductibilité des mesures et d'écartier un biais dû à la méthode en cas d'observation de niveaux d'émission très différents sur des sources équivalentes. Néanmoins, plus l'échelle est large et les conditions non contrôlées, plus il est difficile d'appliquer un protocole strictement identique. Les adaptations nécessaires peuvent alors expliquer des niveaux d'émissions variables, au même titre que des différences dans le système observé (ou l'absence d'information sur certaines de ses caractéristiques), au moment de la confrontation des résultats avec les données déjà disponibles. C'est pourquoi, dans le processus de standardisation des protocoles, le processus d'évaluation des incertitudes associées aux résultats doit également être décrit, au même titre que les différentes étapes de traitement des données. Cela permettra de prendre en compte de manière distincte les facteurs dus à la méthode (et aux techniques mises en œuvre) et ceux dus à la variabilité intrinsèque des systèmes.

Ceux-ci devront être précisément décrits pour limiter l'incertitude définitionnelle (définition du Vocabulaire International de Métrologie (JCGM, 2012)).

La standardisation de protocoles adaptés aux systèmes agricoles devrait permettre leur appropriation par le plus grand nombre, si la possibilité de suivre les développements technologiques et d'adapter le choix des instruments de mesure au niveau d'incertitude toléré et aux moyens disponibles est laissée. Néanmoins, plus le protocole sera précis sur les instruments à mettre en œuvre et le traitement des données associées, plus la reproductibilité

des résultats pourra être garantie. Les précisions apportées devront également porter sur la configuration des appareils de mesures car la moindre petite variation peut avoir des répercussions importantes sur les valeurs mesurées à l'insu du mesureur. Hassouna *et al.* (2013) ont montré que lors de l'utilisation d'analyseurs à infrarouge photoacoustiques pour des mesures de concentrations, certains biais peuvent apparaître si leur configuration n'est pas spécifique du milieu étudié. Sur la figure 4 sont présentées des mesures de concentrations réalisées au même endroit dans une salle d'élevage de vaches laitières au moyen de deux analyseurs à infrarouge photoacoustiques ayant des filtres optiques différents. L'un des analyseurs présente des variations de concentrations importantes (pics à 12 mg/m³ au moment de la distribution de l'ensilage), alors que l'autre enregistre des valeurs inférieures à 2 ppm pendant tout le suivi. Une analyse de la sélectivité des filtres optiques permettant la détection de l'ammoniac et d'autres gaz potentiellement émis dans la salle d'élevage a montré que les pics observés correspondent en fait à de l'éthanol et de l'acide acétique émis par l'ensilage et non à de l'ammoniac.

D'un point de vue réglementaire, l'utilisation de protocoles standards prenant en compte l'évaluation des incertitudes permettrait de valider et de certifier que la réduction attendue est réellement effective, ce qui semble fondamental d'un point de vue environnemental et sanitaire mais aussi social. La question de l'incertitude sur les mesures d'émissions est d'ailleurs devenue centrale depuis que des objectifs de réductions des émissions ont été fixés au niveau international. D'après le GUM (Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure ; (JCGM, 2008)) : « Lorsque l'on rend compte du résultat du mesurage d'une grandeur physique, il faut obligatoirement donner une indication quantitative sur la qualité du résultat pour que ceux qui l'utiliseront puissent en estimer sa fiabilité. En l'absence d'une telle indication, les résultats de mesure ne peuvent pas être comparés, soit entre eux, soit par rapport à des valeurs de référence... » Pour résumer, sans évaluation de l'incertitude sur les résultats, il est très difficile, voire impossible, de certifier les performances des techniques ou pratiques permettant la réduction des émissions.

En outre, les incertitudes indiquées par le CITEPA pour les facteurs d'émission (CITEPA, 2013) utilisés pour les inventaires d'émission

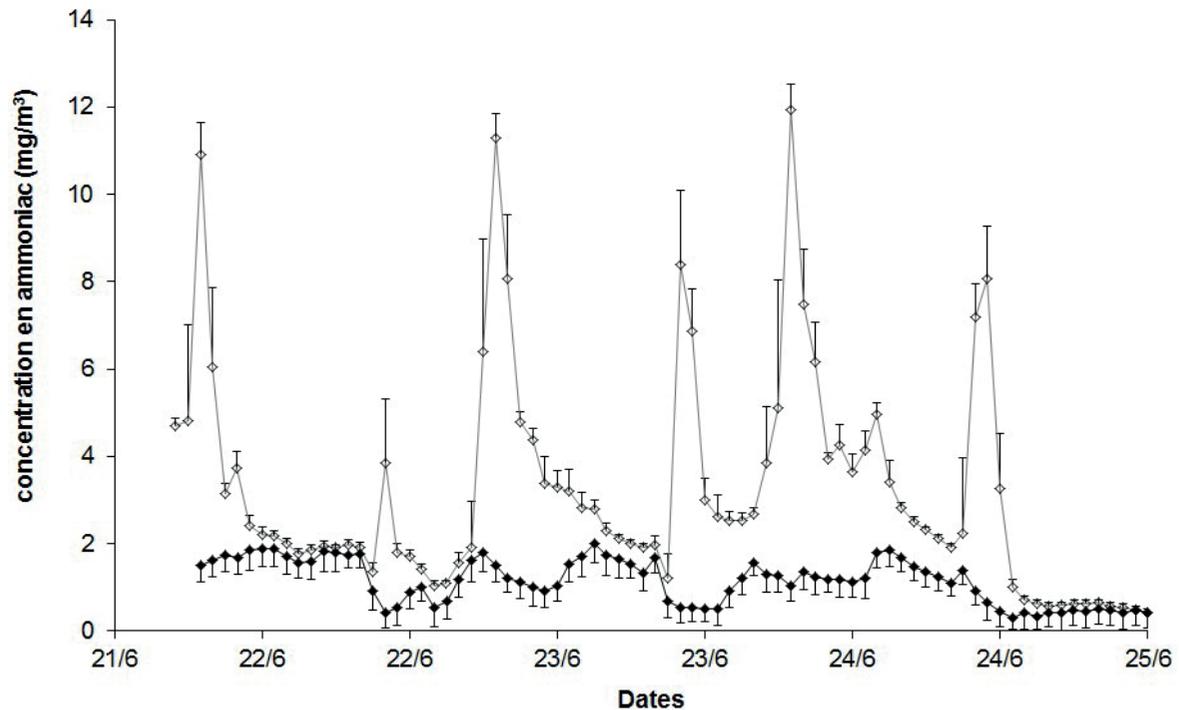


Figure 4. Concentrations en ammoniac mesurées dans une salle d'élevage de vaches laitières au moyen de deux analyseurs à infrarouge photoacoustiques ayant des filtres optiques différents.

Ammonia concentrations measured at the same location in a breeding room with 2 infra-red photo acoustic analyzers equipped with different optical filters.

reposent sur des dires d'experts mais ne résultent pas de méthodes de calcul des incertitudes standardisées depuis une dizaine d'années (JCGM, 2008). Ces incertitudes correspondent à la variabilité intra-catégorie mais ne prennent pas en compte les incertitudes sur les mesures d'émission ayant servi à l'élaboration des facteurs d'émission alors que des biais très importants restent possibles. Par exemple, pour les mesures en bâtiment d'élevage, ceux-ci peuvent aussi bien concerner la mesure du débit d'air (Robin *et al.*, 2010 ; Van Buggenhout *et al.*, 2009), des concentrations (M. Hassouna *et al.*, 2013 ; Zhao *et al.*, 2012) ou des émissions (Robin *et al.*, 2010). On trouve aujourd'hui dans la littérature quelques publications concernant l'évaluation de l'incertitude sur les mesures d'émission (Calvet *et al.*, 2010 ; Gates *et al.*, 2009). Néanmoins les méthodes de calculs proposées sont adaptées à des méthodes de mesure en continu mais sont insuffisantes lorsque les méthodes nécessitent l'interpolation temporelle d'observations ou l'extrapolation à l'ensemble d'une surface ou d'un cycle de production (échantillonnage d'un lot d'animaux, concomitance d'émissions et de dépôts sur le site d'élevage), comme c'est le cas

pour les méthodes simplifiées. La question se pose également pour l'étape de traitement des données.

Enfin, le panel de solutions proposées pour atténuer les émissions de gaz concerne les différentes sources d'émissions identifiées à l'échelle de l'exploitation. Ces solutions ciblent généralement un gaz et un poste. Or une synthèse réalisée par Webb *et al.* (2012) insiste sur l'intérêt de conduire des travaux selon une approche intégrée sur l'ensemble des postes d'émissions pour un effluent donné, permettant de tenir compte des interactions et potentiels transferts de pollution entre les différents postes d'émission. Espagnol *et al.* (2015) ont mesuré les émissions d'ammoniac et de gaz à effet de serre en continu à l'échelle d'itinéraires techniques en élevage de porcs (postes bâtiment, stockage et épandage) mettant en œuvre des techniques d'atténuation des émissions reconnues comme des bonnes pratiques environnementales (BREF, 2003). Les résultats ont montré l'intérêt de mettre en œuvre de bonnes pratiques sur l'ensemble de l'itinéraire pour conserver les bénéfices obtenus sur le poste le plus en amont.

6. Conclusion

La quantification des émissions est devenue incontournable et a motivé le développement par la communauté scientifique d'un large panel de méthodes de mesures permettant de répondre aux différents types d'usage des mesures, de sources et de contextes. Ces méthodes suivent l'évolution des matériels de mesure et sont inscrites dans une boucle de progrès qui induit des modifications au fur et à mesure de leur mise en œuvre sur le terrain. Pour certaines, on trouvera des protocoles détaillés ayant fait l'objet d'un consensus national ou international, ce qui permet d'avancer vers la standardisation. Néanmoins les différents objectifs motivant cette standardisation ne pourront être atteints que si les incertitudes sur les mesures sont évaluées. Enfin, l'appropriation de ces méthodes de mesure par

des communautés autres que scientifiques a été initiée afin d'évaluer les techniques d'atténuation. Cependant, des études récentes (Espagnol *et al.*, 2015 ; Webb *et al.*, 2012) ont montré qu'il est important que cette évaluation soit réalisée de manière intégrée pour prendre en compte les éventuels transferts d'émissions.

En France, on peut signaler le RMT Élevage et Environnement³, qui constitue un lieu d'échange et de partenariat entre acteurs scientifiques et techniques sur la mesure des émissions gazeuses liées aux activités d'élevage. Il est associé à plusieurs initiatives allant dans le sens d'une meilleure coordination de la mesure des émissions gazeuses et du transfert de connaissance vers les professionnels, notamment via la production de protocoles standards⁴.

Références

- Balsari P, Airoidi G, Dinuccio E. *et al.* (2007). Ammonia emissions from farmyard manure heaps and slurry stores - Effect of environmental conditions and measuring methods. [Proceedings Paper]. *Biosystems Engineering*, n° 97(4), p. 456-463. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2007.03.033
- Bouscaren R. (1999). Émissions diffuses et fugitives. Définitions et principes de quantification. *Pollution Atmosphérique*, n°163, p.67-79.
- BREF. (2003). Integrated pollution prevention and control. Reference document on best available techniques for intensive rearing of poultry and pigs: European commission.
- Bruemmer C, Marx O, Kutsch W. *et al.* (2013). Fluxes of total reactive atmospheric nitrogen (Sigma N-r) using eddy covariance above arable land. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, n° 65. doi: 10.3402/tellusb.v65i0.19770
- Calvet S, Cambra-Lopez M, Blanes-Vidal V. *et al.* (2010). Ventilation rates in mechanically-ventilated commercial poultry buildings in Southern Europe: Measurement system development and uncertainty analysis. *Biosystems Engineering*, n° 106, p. 423-432.
- Charpiot A, Dollé JB, Edouard N. *et al.* (2012). Acquisition de références complémentaires en vue d'appliquer une méthode simplifiée de mesure des émissions d'ammoniac en bâtiment d'élevage bovin. Rapport final.
- Citepa. (2013). Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France : séries sectorielles et analyses étendues.
- Dekock J, Vranken E, Gallmann E. *et al.* (2009). Optimisation and validation of the intermittent measurement method to determine ammonia emissions from livestock buildings. *Biosystems Engineering*, n° 104(3), p. 396-403. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.07.003
- EMEP/EEA. (2013). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013. Technical guidance to prepare national emission inventories.
- Espagnol S, Guingand N, Générumont S. *et al.* (2015). Efficacité sur les émissions gazeuses d'itinéraires techniques en élevage porcin intégrant des bonnes pratiques environnementales. Article présenté aux 47e Journées de la Recherche Porcine, Paris.
- Famulari D, Fowler D, Nemitz E. *et al.* (2010). Development of a low-cost system for measuring conditional time-averaged gradients of SO₂ and NH₃. *Environmental Monitoring and Assessment*, n° 161(1-4), p. 11-27. doi: 10.1007/s10661-008-0723-6

- Ferm M. (1979). Method for determination of atmospheric ammonia. *Atmospheric Environment*, n° 13(10), p. 1385-1393. doi: 10.1016/0004-6981(79)90107-0
- Ferm M. (1991). A sensitive diffusional sampler. Report B-1020.
- Gates RS, Casey KD, Xin H. *et al.* (2009). Building emissions uncertainty estimates. [Article]. *Transactions of the Asabe*, n° 52(4), p. 1345-1351.
- Guingand N, Lagadec S, Robin P. *et al.* (2010). A simplified method to assess greenhouse gas and ammonia emission factors of fattening pigs reared on fully slatted floor. Paper presented at the ASABE, Dallas (USA).
- Guingand N, Lagadec S, Robin P. *et al.* (2011). Mise au point d'une méthode de mesure simplifiée des émissions d'ammoniac et des gaz à effet de serre des bâtiments d'élevage de porc en engraissement. Article présenté aux 43e Journées de la recherche porcine, Paris.
- Harper LA. (2005). Ammonia: Measurement Issues. In Hatfield JL, Baker JM (eds.), *Micrometeorology in Agricultural Systems* (p. 345-379): American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- Hassouna M, Eglin T, Cellier P. *et al.* (2016). Measuring emissions from livestock farming: greenhouse gases, ammonia and nitrogen oxides (Diffusion INRA-ADEME ed.).
- Hassouna M, Robin P, Brachet A. *et al.* (2010). Development and validation of a simplified method to quantify gaseous emissions from cattle buildings. Paper presented at the XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR), Québec City, Canada
- Hassouna M, Robin P, Charpiot A. *et al.* (2013). Infrared photoacoustic spectroscopy in animal houses: Effect of non-compensated interferences on ammonia, nitrous oxide and methane air concentrations. *Biosystems Engineering*, n° 114(3), p. 318-326. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2012.12.011
- Hensen A, Loubet B, Mosquera J. *et al.* (2009). Estimation of NH₃ emissions from a naturally ventilated livestock farm using local-scale atmospheric dispersion modelling. *Biogeosciences*, n° 6(12), p. 2847-2860. doi : 10.5194/bg-6-2847-2009
- Hu E, Babcock EL, Bialkowski SE. *et al.* (2014). Methods and Techniques for Measuring Gas Emissions from Agricultural and Animal Feeding Operations. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, n° 44(3), p. 200-219. doi : 10.1080/10408347.2013.843055
- JCGM. (2008). Évaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure, vol. 100.
- JCGM. (2012). Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM), 3e édition, vol. 200.
- Lagadec S, Landrain B, Landrain P. *et al.* (2012). Ammonia and greenhouse gas emissions in pig fattening on slatted floor with excrement discharge by flat scraping. Paper presented at the Emissions of gas and dust from Livestock (EMILI 2012), France. http://www6.inra.fr/animal_emissions/Page-d-accueil/Actualites/EMILI-2012
- Leytem AB, Dungan RS, Bjorneberg DL. *et al.* (2013). Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from an Open-Freestall Dairy in Southern Idaho. *Journal of Environmental Quality*, n° 42(1), p. 10-20. doi : 10.2134/jeq2012.0106
- Loussouarn A, Lagadec S, Robin P. *et al.* (2014). Raclage en « V » : bilan environnemental et zootechnique lors de sept années de fonctionnement à Guernévez. Article présenté aux 46e Journées de la Recherche Porcine.
- Meda B, Robin P, Aubert C. *et al.* (2011). MOLDAVI : un modèle pour simuler les flux d'éléments et d'énergie des ateliers de production de volailles de chair avec ou sans parcours. Article présenté aux 9e Journées de la Recherche Avicole, Tours, France.
- Ni JQ, Heber AJ. (2008). Sampling and measurement of ammonia at animal facilities. In Sparks DL (ed.), *Advances in Agronomy*, vol. 98, p. 201-269. San Diego: Elsevier Academic Press Inc.
- Pellerin S, Bamière L, Angers D. *et al.* (2015). Agriculture et gaz à effet de serre - Dix actions pour réduire les émissions Quae.
- Peyraud JL, Vertès F, Delaby L. *et al.* (2012). Bilans des flux d'azote au niveau des systèmes de production animale. In Peyraud JL, Cellier P, Aarts F *et al.* (dir.), *Les flux d'azote liés aux élevages. Réduire les pertes, rétablir les équilibres*, Inra (France), p. 295-331.
- Ponchant P, Hassouna M, Ehrlicher A. *et al.* (2008). Application et validation d'une méthode de mesures simplifiées des émissions gazeuses dans les bâtiments d'élevage à ventilation naturelle. *Tema techniques et Marchés Avicoles*, n° 6.
- Robin P, Amand G, Aubert C. *et al.* (2010). Procédures de référence pour la mesure des émissions de polluants gazeux des bâtiments d'élevage et stockages d'effluents d'élevage. Rapport final.
- Smith KA, Clayton H, McTaggart IP. *et al.* (1995). The measurement of nitrous-oxide emissions from soil by using

chambers. *Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, n° 351(1696), p. 327-337. doi: 10.1098/rsta.1995.0037

- Sommer, SG, McGinn, SM, Hao X. *et al.* (2004). Techniques for measuring gas emissions from a composting stockpile of cattle manure. *Atmospheric Environment*, n° 38(28), p. 4643-4652. doi : 10.1016/j.atmosenv.2004.05.014
- Stella P, Loubet B, Laville P. *et al.* (2012). Comparison of methods for the determination of NO-O3-NO2 fluxes and chemical interactions over a bare soil. *Atmos. Meas. Tech.*, n° 5(6), p. 1241-1257. doi: 10.5194/amt-5-1241-2012
- Van Buggenhout S, Van Brecht A, Ozcan SE. *et al.* (2009). Influence of sampling positions on accuracy of tracer gas measurements in ventilated spaces. [Article]. *Biosystems Engineering*, n° 104(2), p. 216-223. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.04.018
- Webb J, Sommer SG, Kupper T. *et al.* (2012). Emissions of Ammonia, Nitrous Oxide and Methane During the Management of Solid Manures; Agroecology and Strategies for Climate Change. *Sustainable Agriculture Reviews*, n° 8, p. 67-107.
- Zhao YJ, Pan YE, Rutherford J. *et al.* (2012). Estimation of the Interference in Multi-Gas Measurements Using Infrared Photoacoustic Analyzers. *Atmosphere*, n° 3(2), p. 246-265. doi : 10.3390/atmos3020246

Notes

1. <http://www.verification-etv.fr/>
2. http://www.etv-denmark.com/agriculture/emissions_from_livestock_houses.html
3. <http://www.rmtelevagesenvironnement.org/>
4. Consultables sur : https://www6.inra.fr/animal_emissions/