



MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
DE L'AGROALIMENTAIRE
ET DE LA FORÊT

*avec la contribution financière du
compte d'affectation spéciale
« Développement agricole et rural »*

Rapport final du projet CAS DAR - EMISOL BV

« Méthode de quantification standardisée des émissions d'ammoniac et de gaz à effet de serre des sols de bâtiments bovins »

N° du projet : **CONVENTION AAP n°18ART1808**

Maître d'œuvre du projet : Institut de l'Élevage

Organismes partenaires (recevant une partie de la dotation CASDAR accordée au projet) :

- Chambre Régionale d'Agriculture des Pays de Loire – Ferme Expérimentale de Derval
- INRAE UMR SAS

1. RÉSUMÉ

Pour suivre le rythme de la demande croissante de produits animaux, le secteur de l'élevage doit minimiser ses impacts environnementaux et assurer sa pérennité. Cependant, avant de mettre en œuvre de bonnes pratiques de gestion agricole, il est d'abord important de développer des méthodes de mesure adaptées. La méthode EMISOLBV développée dans ce projet a été conçue pour mesurer les émissions gazeuses en provenance du sol des bâtiments agricoles. Elle combine des mesures de sources ponctuelles à l'aide d'une chambre semi-statique ventilée et des observations spectrales des sols étudiés pour calculer les émissions de l'ensemble du bâtiment.

Pour développer cette méthode, nous avons utilisé :

- 1- des chambres semi-statiques ventilées d'échantillonnage de gaz ;
- 2- un spectromètre photo-acoustique d'absorption infrarouge (INNOVA) analyseur des concentrations de l'air en gaz à effet de serre (GES) et ammoniac ;
- 3- des «solutions de raccordement», pour les émissions d'ammoniac NH_3 [Na_2CO_3 et $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ en solution aqueuse] afin de d'étudier l'impact potentiel des chambres sur les mesures, d'établir les durées d'échantillonnage et de mettre en place un contrôle de qualité sur le terrain ;
- 4- des mesures spectroscopiques proche infrarouge (SPIR) pour évaluer l'hétérogénéité des dépôts d'excréments animaux dans le bâtiment.

Les travaux ont été effectués en laboratoire (Halle PSN de l'INRAe de Rennes) puis sur fermes expérimentales (Derval et Trévarez)

Méthode EMISOLBV

La méthode développée ici s'appuie sur les mesures d'émissions d'ammoniac. Ces émissions sont, en effet, spécifiquement reliées aux sols souillées (objectif des mesures) à la différence d'autres gaz comme le méthane, par exemple, qui est également produit directement par les animaux par fermentation entérique. La méthode développée est cependant valable pour toutes les émissions gazeuses analysable par l'INNOVA et donc également pour les GES.

Cette méthode est déployée en trois phases :

- 1- mesure des valeurs de références,
- 2- mesure de l'accroissement des concentrations de gaz sous la chambre d'échantillonnage,
- 3- contrôle de qualité avec utilisation de solutions aqueuses de « raccordement ».

Seuil de détection :

La limite de détection des émissions d'ammoniac est associée aux caractéristiques suivantes du fumier: pH = 7,15 et teneur en azote ammoniacal de 0,518 kg N- NH_4^+ /m³. Sachant que les concentrations en NH_4^+ des déjections sont généralement supérieures à 0,602 kg N- NH_4^+ /m³ (ou 0,043 mol/l) et supérieure à 7 de pH, le seuil de détection d'ammoniac couvre donc la quasi-totalité des types de déjections.

Etude de différentes pratiques de gestion des déjections

En première analyse, il apparaît que les émissions après raclage et de même que sur un sol souillé paillé ne diminuent pas les émissions d'ammoniac. D'autres études devront être entreprises pour confirmer et interpréter ces résultats préliminaires.

Extrapolation au bâtiment :

A partir des spectres obtenus avec le SPIRS, 3 classes de salissures ont été identifiées. À plus long terme, les étalonnages avec les chambres associeront les niveaux d'émission aux classes identifiées par le SPIR et un modèle sera ensuite développé pour évaluer les émissions gazeuses des bâtiments sur la base des observations spectrales uniquement.

Déploiement à court et moyen/long termes :

Cette méthode a été présentée à des conseillers de la Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne (CRAB) qui l'ont ensuite utilisée sur ferme (Trévarez) et ont rédigé une note en présentant les limites et les points forts (analyse SWOT).

- Ainsi, à court terme, la méthode peut donc être déployée par un public formé. Mais pour un déploiement plus vaste, il serait intéressant que le guide fourni soit revu et complété.
- D'un point de vue technique, également, et de mise en place de terrain, le programme d'échantillonnage pourrait être revu pour certains minutages ; il serait bon aussi que des fiches de prises de notes soient fournies, et un système de purge des sacs échantillonneurs plus rapide serait à prévoir.
- Apportant ces corrections, il est noté qu'il serait très intéressant de déployer cette méthode de manière routinière sur un grand nombre de systèmes de gestion de déjections différents pour obtenir un corpus de références précises variées facilement utilisables.

Il est également prévu d'évaluer les systèmes innovants qui ont été et seront introduits dans les bâtiments d'élevages. L'ensemble de ces résultats apportera un soutien aux décisions politiques visant l'atténuation des émissions gazeuses en agriculture et permettra de préciser des Rapports des Inventaires Nationaux dans ce domaine.

MOTS CLEFS : émissions gazeuses, ammoniac, bâtiment d'élevage, bovin, SPIR, chambre semi-statique

2. Introduction

Les filières bovins lait et viande sont engagées dans des démarches nationales de réduction de leur empreinte environnementale que sont Carbon Dairy et Beef Carbon. Alors que les leviers d'action concernent aujourd'hui l'amélioration de l'efficacité des systèmes, un espoir important est mis sur la réduction des pertes de carbone et d'azote sous formes gazeuses en lien avec la gestion des déjections animales. Pour les filières, l'enjeu des années futures réside donc dans la mise en place de solutions techniques validées dans le contexte économique et de la diversité des systèmes d'élevage, répondant aux problématiques qualité de l'air et climat. En parallèle, la France s'est engagée à différents niveaux (international, européen, national) à réduire ses émissions gazeuses en lien avec deux enjeux environnementaux : la Qualité de l'air et le Climat. Il est donc nécessaire également que les solutions mises en œuvre pour réduire les émissions soient effectivement prises en compte dans les inventaires nationaux d'émissions atmosphériques.

L'ambition de ce projet est d'accompagner la réduction des émissions gazeuses des sols de bâtiments bovins. La méthode développée ici a pour objectif d'étudier et de quantifier ces réductions pour permettre, in fine, d'orienter vers des choix de pratiques, d'équipements ou de concepts de construction efficaces en termes d'atténuations et adaptées aux diverses situations de production agricoles en bâtiments.

Le projet s'articule avec le Programme de Développement Agricole et Rural 2014-2020 de l'Institut de l'Élevage. Il se rattache notamment à la thématique prioritaire du PNDAR "Conception et conduite de systèmes de production diversifiés et viables, basés sur l'agroécologie" et à l'action de référence du contrat d'objectifs "Concevoir des approches systémiques de production agricole portant sur différentes échelles de temps et d'espace". Ce projet est rattaché à l'opération "Valoriser l'environnement et préparer les bâtiments de demain". De par sa dimension et la dissémination envisagée, les actions du projet sont complémentaires mais distinctes des actions prévues dans le programme de développement agricole et rural.

3. Généralités et contexte

3.1 Cadre et soutien aux décisions politiques

Des engagements politiques ont été pris en lien avec les enjeux climat et qualité de l'air au niveau international et européen et déclinés au niveau national :

- Au niveau du climat : une réduction de 12% des GES à échéance 2028 par rapport aux émissions 2013.
- Au niveau qualité de l'air : une réduction de 13% du plafond d'ammoniac à échéance 2030 par rapport à 2005.

Afin de respecter ces engagements, il est nécessaire de mettre en place non seulement des plans d'action de réduction des émissions gazeuses dans tous les secteurs mais aussi les procédures permettant d'intégrer les évolutions dans le calcul des inventaires nationaux.

Cependant, certaines pratiques dites vertueuses et donc recommandées n'ont pas encore été évaluées dans le contexte français. La Commission économique des Nations Unies pour l'Europe (UNECE, 1999) précise, par exemple, que les émissions ammoniacales dans les bâtiments porcs et bovins peuvent être réduites lorsque la surface d'échange air / effluent est réduite et/ou quand ils sont évacués plus rapidement. Le taux d'abattement lors de l'augmentation de la fréquence de raclage dans les bâtiments logettes en bovins lait pourrait ainsi atteindre 20% selon certaines études (Webb et al., 2006 ; NEWELL et al., 2011). Cette valeur a été intégrée dans l'étude « Aide à la décision pour le PREPA » commandité par le MEDDE en 2015. Cependant, les pratiques retenues dans certaines de ces études ne sont pas réalistes en pratique (par exemple, passer de 12 à 96 raclages/jour). Or des scénarios d'évolutions des émissions ammoniacales françaises s'appuient sur ces références (CITEPA, INERIS, et al. 2015).

Même s'il est nécessaire d'adapter le mode de calcul des émissions des élevages bovins si l'on veut pouvoir prendre en compte ce changement de pratique dans le cadre des inventaires nationaux, il est toutefois nécessaire de quantifier l'efficacité des scénarios retenus. Cela est également souhaitable pour informer les décideurs politiques afin d'orienter les décisions vers la mise en œuvre de pratiques agricoles réalistes et adaptées.

L'intérêt du projet EMISOL BV réside donc également dans la production de références sur les émissions gazeuses des sols permettant d'affiner les inventaires nationaux et qui seront également intégrées dans les outils d'évaluation environnementaux tel que CAP'2ER® déployé dans les démarches environnementales des filières de ruminants.

3.2 Emissions en bâtiment du cheptel bovin

Le cheptel bovin participe à hauteur de 60% aux émissions d'ammoniac (CITEPA, 2012) et le bâtiment représente près de 35% des pertes en ammoniac sur l'exploitation d'élevage. En ce qui concerne les émissions de méthane des élevages agricoles, environ 25% sont reliées aux postes bâtiments / stockage et épandage. Pour le N_2O , les émissions ont lieu principalement au stockage et à l'épandage des déjections mais pas d'émission spécifique au bâtiment.

Le bâtiment étant le premier lieu de transit des déjections il représente un enjeu important pour limiter les pertes par voie gazeuse d'ammoniac. Pourtant, une synthèse bibliographique réalisée par l'INRA (Faburé, 2011) montre l'absence de données spécifiques à la France concernant les émissions d'ammoniac pour le poste bâtiment alors même que les émissions d'ammoniac sont très variables dans le temps et suivant les situations. Elles dépendent, en effet, de plusieurs phénomènes physico-chimiques successifs (Monteny et Erisman, 1998 ; Zähler *et al.*, 2006) qui débutent par l'hydrolyse de l'urée (présente dans l'urine) par l'uréase bactérienne (présente dans les déjections). Les étapes suivantes aboutissent à une volatilisation de l'ammoniac qui sera alors variable selon le type d'alimentation des animaux, les caractéristiques des déjections, du sol, du pH, de la température, de l'humidité relative, de la surface en contact avec l'atmosphère et de la vitesse de l'air. L'ensemble de ces paramètres est à prendre en compte dans les émissions d'ammoniac et cela explique la forte variabilité observée. La bibliographie internationale présente, par exemple, des émissions mesurées variant de 0 à 225 g N- NH_3 /VL.jour (Javon et al., 2012, Hristov et al. 2011).

La première étude française réalisée dans le projet EMBB a confirmé cette variabilité des émissions gazeuses à l'échelle des bâtiments d'élevage de bovins laitiers qui présentent des valeurs comprises entre 5 à 37.6 kg de NH_3 / Vache laitière.an selon les types de bâtiments

étudiés et sur la base de mesures globales à l'échelle du bâtiment. Le projet EMAFUM (Lorinquer et al., 2015) a permis d'intégrer les connaissances sur les processus physiques et biologiques déterminant les émissions, sous la dépendance des variations du climat, dans un modèle des émissions de NH₃, N₂O, CO₂, CH₄, H₂O lors du stockage des fumiers bovins..

3.3 Méthodes et échelles de mesures

Il existe principalement 4 types d'approches différentes pour mesurer les émissions gazeuses en élevage :

- (i) des méthodes indirectes comme les bilans de masse (perte gazeuse = défaut du bilan de masse),
- (ii) les mesures à la source non intrusives (c'est-à-dire sans perturbation du milieu émetteur) nécessitant la connaissance du débit d'air et des concentrations,
- (iii) les mesures à la source intrusives (c'est-à-dire pouvant perturber le milieu émetteur comme les chambres qui réduisent la vitesse d'air ; Espagnol et al., 2009)
- (iv) les stratégies à distance de la source émettrice (Hassouna, Eglin, et al., 2015).

Parmi les références disponibles dans la bibliographie internationale, la majorité des publications qui traitent des émissions à l'échelle du bâtiment d'élevage, comprennent non seulement les émissions liées aux déjections mais aussi celle de l'animal lui-même. C'est également le cas du protocole de test VERA (Verification of Environmental Technologies for Agricultural Production, 2011). Ce protocole, développé pour les bâtiments d'élevage et systèmes de gestion des effluents, a été réalisé par un comité d'experts Danois, Hollandais et Allemands pour promouvoir des technologies réduisant les émissions gazeuses, les odeurs et les poussières (Meilleures Techniques Disponibles (MTD), <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/>). Le protocole est conçu pour des bâtiments sur lisier en ventilation dynamique où la concentration en CO₂, de source animale principalement, est nettement supérieure à celle de l'air extérieur. Or en France, la très grande majorité des bâtiments bovins est en ventilation naturelle, avec des concentrations en CO₂ qui sont proches de celles à l'extérieur et provenant à la fois des animaux et des déjections. Vu que les émissions ammoniacales sont liées à de nombreux paramètres (alimentation, climat, gestion des effluents) ce protocole n'est pas adapté pour évaluer les émissions des différents types de sols existant en élevage.

Seules quelques études s'intéressent à la comparaison de sols différents comme celle de Pereira et al. (2011), cependant les essais ont été réalisés sur des sols reconstitués de 1m², les mesures étant réalisées dans une chambre « laboratoire » en béton et la méthodologie employée pour la quantification des émissions n'étant pas reproductible à l'échelle des élevages commerciaux, ni représentatif des émissions réelles en élevages.

Parmi les méthodes permettant de mesurer les émissions des sols, il existe principalement trois techniques : 1- les capteurs passifs, 2- les chambres dynamiques et 3- les chambres statiques (ADEME, 2012 ; Hassouna, Eglin, et al., 2015).

- 1- Les **capteurs passifs** à diffusion, tout d'abord, permettent la mesure de concentrations moyennes de composés azotés comme l'ammoniac ou le dioxyde d'azote, cette méthode présente l'intérêt d'être facile à mettre en œuvre sur le terrain, d'avoir une bonne sensibilité et d'être peu coûteuse (Hassouna, Eglin, et al., 2015).
- 2- Ensuite, la méthode des **chambres dynamiques**. Elle consiste en une circulation contrôlée d'air. Elle est souvent utilisée pour caractériser des composés réactifs comme l'ammoniac, cette méthode présente l'avantage de pouvoir assez bien caractériser l'ammoniac, mais est lourde à mettre en œuvre en routine en situation d'élevage

commercial (accès au 220V) et des questions persistent sur l'effet du débit important d'air par rapport aux émissions gazeuses.

- 3- Enfin, la **chambre statique** présente l'avantage d'être facile à mettre en œuvre en élevage (ne nécessite pas l'installation de l'analyseur dans l'élevage), reproductible et relativement peu coûteuse, cette méthode est fréquemment utilisée pour quantifier les émissions de GES, le protoxyde d'azote notamment, lors de l'épandage des déjections sur les sols agricoles et au stockage des déjections.

Compte tenu de la forte affinité de l'ammoniac avec l'eau et l'influence de la vitesse d'air sur les processus d'émission, cette méthode est peu employée pour ce gaz. Cependant, les concentrations à mesurer par l'analyseur de gaz INNOVA sont bien au-dessus du seuil de détection de l'analyseur pour l'ammoniac. Cette méthode permet donc malgré tout d'avoir une sensibilité suffisante pour discriminer les différents types de sol. Sa mise en œuvre doit alors être adaptée et validée pour s'assurer de l'absence de biais.

4. Partenaires impliqués

Ce projet associe les compétences complémentaires de l'Institut de l'Élevage et de l'INRA afin de mettre au point une méthode standardisée de mesure du pouvoir émissif d'un sol de bâtiment bovin.

4.1 Partenaires et fonctions :

- *partenaires techniques impliqués dans la réalisation du projet (destinataires de financements CASDAR, avec lettre d'engagement) :* Institut de l'Élevage (IDELE), INRAE UMR SAS, Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire (ferme expérimentale de Derval). La Chambre d'Agriculture de Bretagne interviendra également dans le projet en qualité de prestataire.
- *autres partenaires techniques (hors financements CASDAR) :* CRD Concept Rolland Développement La société CRD est spécialisée dans la gestion des déjections animales et équipe de nombreux élevages en France depuis plus de 20 ans. L'entreprise CRD s'est engagée à fournir à l'Institut de l'Élevage les coordonnées d'une exploitation équipée de sa solution.
- *partenaires associés au comité de pilotage du projet :* APCA, ADEME, Ministères (MEEM, MAAF), INRA UMR PEGASE, CITEPA, RMT bâtiments d'élevage de demain, RMT Elevage et Environnement
- *partenaires financiers :* CASDAR RT.

4.2 Institut de l'Élevage

Département Technique d'Élevage et Environnement – Service Environnement Bâtiments

- Elise Lorinquer et Xavier Vergé, Chefs de projet, Service Environnement, assurent le pilotage du projet EMISOLBV
- Jacques Capdeville, Chef de projet, Bâtiment et gestion des déjections
- Jean-Baptiste Dollé, Chef de service Environnement Bâtiments
- Jean-Luc Ménard, Chef de projet, Bâtiment et santé des animaux

Chef de file de projet :

L'Institut de l'Élevage (IDELE) est le lieu privilégié de la concertation professionnelle sur la politique de recherche - développement pour les productions d'herbivores. L'Institut de l'élevage conduit des essais dans un réseau de 12 fermes expérimentales. Il supervise le contrôle de

performances dans près de 100 000 élevages. Dans le cadre des réseaux d'élevage, il anime un dispositif national qui s'appuie sur 1 300 exploitations. L'Institut de l'Elevage est également investi dans le domaine de l'environnement depuis de nombreuses années. Ses investigations sont multiples et permettent notamment d'apprécier les flux de matières (azote, phosphore, carbone, etc.) entre les compartiments du système de production agricole et son environnement. D'importants moyens sont mis en œuvre afin d'évaluer les émissions d'ammoniac et de gaz à effet de serre sur l'amont agricole. Ces moyens concernent la mise au point de méthodes de mesure et l'évaluation de l'impact de l'activité agricole. Dans ce cadre, l'Institut de l'Elevage coordonne les projets nationaux et européens Carbon Dairy et Beef Carbon de réduction des émissions de GES en élevage.

4.3 INRAE - UMR SAS Sol Agro et hydrosystème Spatialisation

- Mélynda Hassouna, Chercheuse, animatrice du groupe ANGAEL du RMT Elevage et Environnement et co-animatrice du groupe ELFE du RMT Elevage et Environnement, Membre de la GLOBALE RESEARCH ALLIANCE
- Paul Robin, chercheur, co-animateur du groupe ELFE du RMT Elevage et Environnement
- Youssef Fouad, enseignant chercheur, spécialisé dans l'acquisition et l'interprétation des mesures spectrales
- Marcel Lecomte, technicien, fabrication et adaptation des chambres de mesure
- Pascale Bréger, technicienne, mesures spectrales au laboratoire et sur le terrain

4.4 Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire - Ferme expérimentale de Derval

- Marc Fougère : directeur de la ferme expérimentale de Derval

4.5 Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne, prestataire de l'Institut de l'Elevage

- Jacques Charlery

4.6 Concept Rolland Développement

- Louis Rolland : directeur de l'entreprise accompagné de son équipe technique

5. Budget

5.1 Budget prévisionnel détaillé par action

1	DEPENSES	Action 1	Action 2	Action 3	Action 4	TOTAL GENERAL
2	salaires, charges et taxes afférentes des personnels impliqués dans le projet	16 800	19 200	4 200	11 200	51 400
3	frais de déplacement des personnels impliqués dans le projet	2 745	3 500	500	3 200	9 945
4	Total des dépenses des personnels techniques (2+3)	19 545	22 700	4 700	14 400	61 345
5	salaires, charges et taxes afférentes des autres personnels impliqués dans le projet	4 950	1 350	0	0	6 300
6	prestations de service	10 140	2 000	4 550	0	16 690
7	acquisition de matériels	5 870	900	0	0	6 770
8	autres dépenses directes	6 000	2 000	0	2 400	10 400
9	Total des autres dépenses directes (5+6+7+8)	26 960	6 250	4 550	2 400	40 160
10	Dépenses indirectes affectées au projet 20%*(4+9) ou 8%*(4+9)*	9 301	5 790	1 850	3 360	20 301
12	Total des dépenses (4+9+10)	55 806	34 740	11 100	20 160	121 806

* 20% pour les organismes privés et 8% pour les organismes publics

	RECETTES	Action 1	Action 2	Action 3	Action 4	TOTAL GENERAL
13	SUBVENTION CASDAR DEMANDEE	44 645	27 792	8 880	16 128	97 445
14	Chambres d'agriculture (TAFNB – taxe sur le foncier non bâti)					
15	Conseils généraux					
16	Conseils régionaux					
17	FranceAgriMer					
18	Cotisations volontaires obligatoires (CVO) et autre taxe fiscale affectée					
19	Etat (autres sources)					
20	Union Européenne					
20					
21	Autres	11 161	6 948	2 220	4 032	24 361
22	Prestations de services, redevances, ventes liées à la conduite du projet, recettes propres (cotisations, réserves...)					
23	Total des autres recettes (14) à (22)	11 161	6 948	2 220	4 032	24 361
24	Total des recettes (13+23) = 12 = (4+9+10)	55 806	34 740	11 100	20 160	121 806

	POUR MEMOIRE	Action 1	Action 2	Action 3	Action 4	TOTAL GENERAL
25	Montant des salaires publics	156 665	22 350	0	21 545	200 560
26	cout total du projet (12+25)	212 471	57 090	11 100	41 705	322 366

* 20 % pour les organismes privés et 8 % pour les organismes publics

5.2 Tableau récapitulatif par partenaire

Nom des partenaires	Ferme expérimentale de Derval	INRA UMR SAS	Institut de l'Elevage	Total général
Coût total en €	6 600	200 560	115 206	322 366
<i>Dont salaire public</i>	-	<i>200 560</i>	-	<i>200 560</i>
Montant éligible	6 600	-	115 206	121 806
Aide sollicitée du CASDAR	5 280	-	92 165	97 445
Autres concours financiers	-	-	-	-
Autofinancement	1 320	200 560	23 041	224 921

La Chambre d'agriculture de Bretagne interviendra en qualité de prestataire de l'Institut de l'Elevage (Action 3) pour la mise en œuvre de la méthode EMISOLBV dans deux bâtiments d'élevage.

5.3 Calendrier des travaux : diagramme de Gantt

Phases du projet (l'implication des partenaires dans les différentes phases du projet aura été précisée au point III-1)

Ci-après le diagramme de Gantt du projet est présenté :

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18
Action 1	■	■	■	■	■	■	■	■										
Action 2					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			
Action 3									■	■	■	■	■	■	■			
Action 4			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

6. Objectifs du projet et actions résumées

6.1 Objectifs

Afin de contribuer à la réduction des émissions gazeuses des sols des bâtiments d'élevage bovin, les objectifs du projet sont :

- De mettre au point une méthode opérationnelle de quantification des émissions gazeuses des sols des bâtiments bovin - EMISOLBV - composée :
 1. d'une méthode de mesure standardisée des émissions gazeuses (CH₄, CO₂, N₂O, NH₃, H₂O) des sols de bâtiment bovins mobilisable en conditions réelles, et
 2. d'un modèle d'extrapolation des émissions annuelles des sols des bâtiments d'élevage.
- De mobiliser EMISOLBV pour évaluer les émissions des sols de bâtiments et l'intérêt environnemental de deux innovations axées sur les pratiques de raclage et la conception des sols ;
- De transférer EMISOLBV aux conseillers d'élevage pour une utilisation en conditions réelles.

L'objectif est de disposer d'une méthode de mesure des émissions gazeuses diffusable à grande échelle et partagée par les différents acteurs. Cette méthode est destinée à prendre en compte les effets, sur les émissions gazeuses, du déploiement de sols innovants dans une diversité de systèmes d'élevage (bâtiments-animaux-aliments-pratiques-climats) ainsi que des évolutions des pratiques de gestion des sols dans les bâtiments existants.

Cet outil entre dans la démarche globale de mise en œuvre d'une stratégie nationale de réduction des émissions crédible par les acteurs professionnels et traçable pour les organismes de supervision, dans un contexte évolutif des bâtiments d'élevage bovin.

Le projet est structuré en 4 actions.

La première s'attache à la mise au point de la méthode EMISOLBV en conditions contrôlées (Action 1). A l'issue de cette action un protocole décrivant comment mettre en œuvre la méthode de mesure sera établi et testé dans le cadre de mesures réalisées en ferme expérimentale (Action 2) et par des conseillers d'élevage pour des mesures en élevage commercial (Action 3). Enfin, la dernière action a pour double objectif de coordonner le projet et d'assurer la diffusion des résultats (Action 4).

6.2 Actions résumées

6.2.1 Action 1 : Mise au point d'une méthode de quantification des émissions des sols de bâtiment bovin : EMISOLBV

L'action 1 a pour objectif de mettre au point, en conditions contrôlées, une méthode de quantification des émissions que l'on appellera EMISOLBV. Il s'agit pour cela de concevoir une méthode de mesure standardisée des émissions gazeuses (CH₄, CO₂, N₂O, NH₃) des sols de bâtiment bovins aisément mobilisable et d'élaborer un modèle d'extrapolation des émissions annuelles des sols des bâtiments d'élevage. Ainsi la méthode EMISOLBV produira deux catégories d'informations :

- 1- l'émission observée à un instant t ;
- 2- l'émission calculée sur une période donnée en incorporant les caractéristiques de l'élevage (climat, animaux, alimentation, gestion du sol).

La méthode EMISOLBV élaborée puis testée en conditions contrôlée pourra ensuite être déployée en conditions réelles (Actions 2 et 3).

6.2.2 Action 2 : Mise en œuvre de la méthode EMISOLBV - en ferme expérimentale

En mobilisant EMISOLBV, l'action 2, vise à :

- Utiliser en élevage la méthode mise au point en conditions contrôlées (Action 1) ;
- Quantifier l'effet des pratiques (raclage, paillage) sur les émissions gazeuses en conditions d'élevage.

Les suivis sont réalisés à la ferme expérimentale de Derval qui dispose d'un nombre important de données d'activité. La mise en œuvre d'EMISOLBV permet de déterminer les émissions gazeuses dans les conditions actuelles de raclage et de quantifier les émissions associées à l'augmentation de la fréquence de raclages quotidiens.

6.2.3 Action 3 : Mise en œuvre de la méthode EMISOLBV par des conseillers d'élevage

L'action 3 vise à évaluer l'opérationnalité et le niveau de transférabilité de la méthode EMISOLBV. Il s'agit pour cela de former deux conseillers en élevage à la méthode EMISOLBV. Ces derniers utiliseront la méthode de mesure, détermineront le pouvoir émissif du sol étudié et feront une analyse SWOT de la méthode développée.

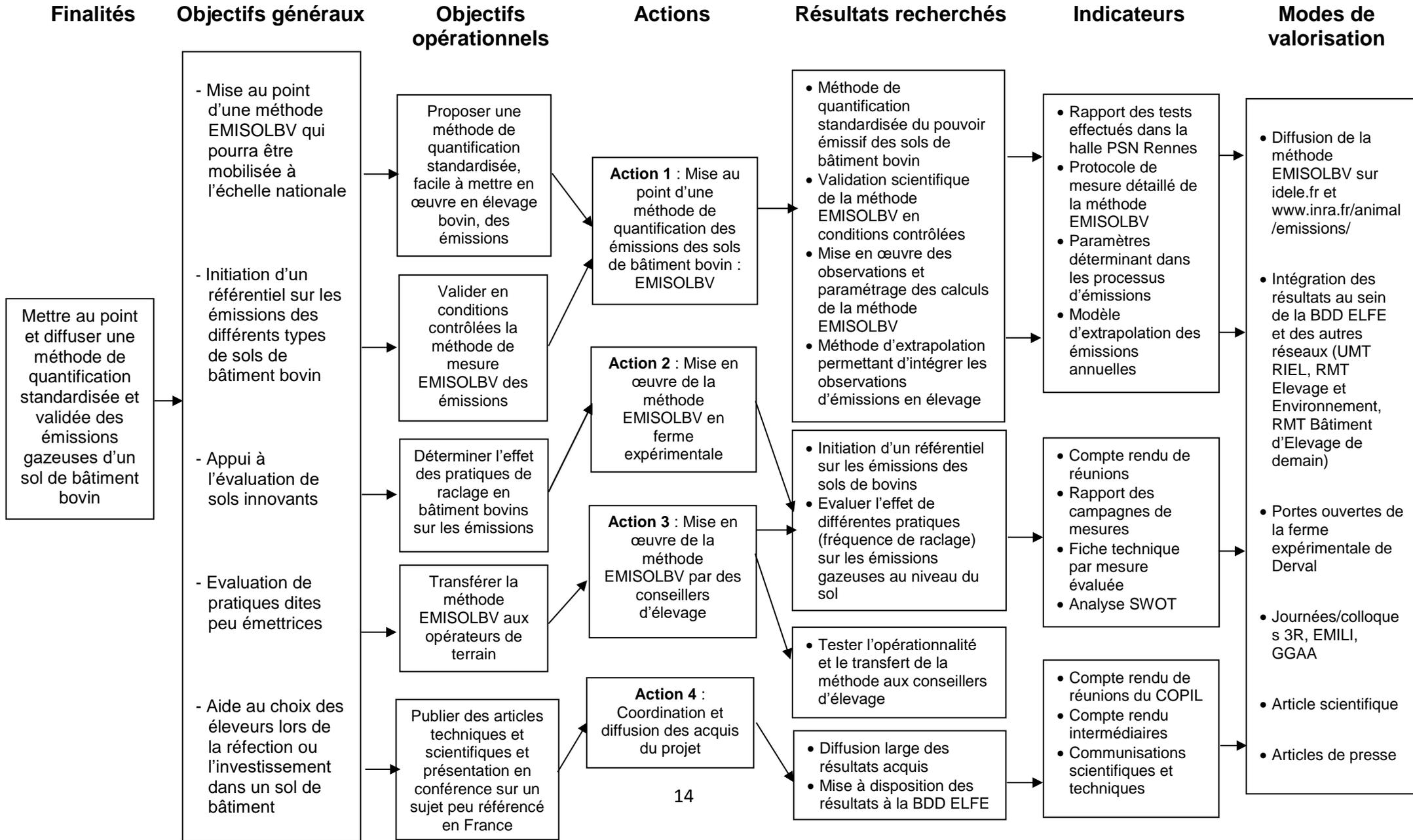
6.2.4 Action 4 : Coordination et diffusion des acquis du projet

Ce projet associe des compétences complémentaires de :

- L'Institut de l'Élevage pour sa connaissance des pratiques et bâtiments d'élevage bovin en lien avec les émissions gazeuses ;
- L'INRA pour la maîtrise des processus d'émissions gazeuses et métrologie des émissions gazeuses qui viendra en appui au développement d'EMISOLBV ;
- La ferme expérimentale de Derval (Chambre d'Agriculture 44) ;
- Deux conseillers en élevage de Chambres d'Agriculture ;
- Un équipementier ayant développé des sols en pente transversale (Société CRD).

L'objectif de cette action est d'assurer la coordination et le pilotage du programme entre les partenaires. Le comité de pilotage s'assure du bon avancement du projet, valide les choix stratégiques et méthodologiques retenus, contrôle la rigueur scientifique, valide les résultats.

6.3 Schéma "Finalités - Actions"



7. Difficultés rencontrées

7.1 Ajustement du budget (10 octobre 2018)

La répartition budgétaire du projet CASDAR EMISOLBV a été revue entre le dépôt et le budget consolidé envoyé par Quentin Roussel le 10/10/2018 pour le conventionnement.

Les éléments qui ont motivé cette révision sont principalement :

- Calibration de l'analyseur de gaz Innova 1412 : L'utilisation de l'analyseur de gaz dans le cadre du projet nécessite une nouvelle calibration non prévue au budget. La somme correspondante (10 000 €) a été reprise sur du temps IDELE (pour partie du temps de l'action 4 rebasculée sur l'action 2 avec des réajustements à également depuis les autres actions).
- Partenariat INRA : IDELE avait budgété des dépenses d'équipements et autres charges directes qui ont été réaffectées au partenaire INRA pour faciliter la gestion administrative et les facturations (19 955 € - réaffectations qui ont concernées l'action 1 principalement)

Ces évolutions budgétaires n'ont pas modifié le budget global ni le programme de travail décrit initialement.

7.2 Remplacement de personnel

A la fin de l'année 2020 le chef de projet, responsable technique d'EMISOLBV, a quitté ses fonctions au sein de l'IDELE. L'institut, chef de file du projet, a alors procédé à son remplacement par l'embauche d'un nouvel employé début Novembre 2020, un « tuilage » d'environ deux mois étant prévu. La passation de l'ensemble des projets a cependant été rendu très difficile par le nouveau confinement strict décrété au même moment (début Novembre 2020).

7.3 Avenants à la Convention AAP n°18ART1808 EmisolBV du 29/10/2018

Des difficultés liées à la mise en fonctionnement de la Halle MEVEGE initialement prévue pour développer la méthode prévue et effectuer des tests en conditions environnementales contrôlées ont obligé les gestionnaires du projets à formuler deux demandes d'avenant. Le premier, fin janvier 2020 a été accepté prolongeant alors de six mois la durée de la convention (du 31 mai 2020 au 30 novembre 2020). Le deuxième présenté en novembre 2020 n'a pas reçu d'avis positif. Les deux demandes d'avenant sont jointes ci-après.

7.3.1 Premier avenant à la Convention AAP n°18ART1808 EmisoIBV du 29/10/2018



149 Rue de Bercy
75595 PARIS Cedex 12
France
Tel : +33 1 40 04 51 75
www.idele.fr

Votre interlocuteur :
Elise Lorinquer - Responsable Effluents et Qualité de l'air Institut de l'Elevage
Lieu dit monvoisin – BP 85225
35652 LE RHEU CEDEX
Tél : 0299148953

Sandrine CANAS Chargée de mission Bureau du développement agricole et des partenariats pour l'innovation Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation Direction Générale de l'Enseignement et de la Recherche Sous-direction de la recherche, de l'innovation et des coopérations internationales
1 ter avenue de Lowendal 75007 PARIS

Le Rheu, le 31 janvier 2020

Objet : DEMANDE D'AVENANT A LA CONVENTION AAP n°18ART1808 EmisoIBV du 29/10/2018

Madame Canas

Je me permets de vous adresser une demande d'avenant pour la convention AAP n°18ART1808 EmisoIBV. Cette demande fait suite au retard de mise en service de la halle expérimentale INRA - MEGEVE. Ces retards sont dus principalement aux difficultés de la climatisation négative ($T < 0^{\circ}\text{C}$). L'entreprise est engagée auprès de l'INRA de répondre au cahier des charges décrit dans l'appel d'offre public pour lequel elle a répondu et se doit de fournir un outil fonctionnel.

De son côté, l'INRA s'est engagée auprès de ses tutelles (qui finance la halle MEGEVE) à présenter la halle MEGEVE en fonctionnement, c'est-à-dire avec des essais, le 19/03/2020. Les essais prévus, pour cette date, sont ceux du projet EMISOLBV concernant l'action 1.

C'est pourquoi via cette présente lettre, nous vous sollicitons pour une demande de prolongation de 6 mois de la convention initiale, afin de pouvoir répondre au mieux aux engagements concernant l'action 1.

Nous ne rencontrons pas de difficulté par ailleurs et le projet se déroule conformément aux attentes ([cf. rapport MH Rozé, 2019](#)).

Je vous prie de bien vouloir agréer, Madame Canas, l'expression de mes salutations distinguées.

Elise Lorinquer, responsable du projet

EmisoIBV

7.3.2 Deuxième avenant à la Convention AAP n°18ART1808 EmisoIBV du 29/10/2018



149 Rue de Bercy
75595 PARIS Cedex 12
France
Tel : +33 1 40 04 51 75
www.idele.fr

Votre interlocuteur :
Elise Lorinquer - Responsable Effluents et Qualité de l'air Institut de l'Elevage
Lieu dit monvoisin – BP 85225
35652 LE RHEU CEDEX
Tél : 0299148953

Sandrine CANAS Chargée de mission Bureau du développement agricole et des partenariats pour l'innovation Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation Direction Générale de l'Enseignement et de la Recherche Sous-direction de la recherche, de l'innovation et des coopérations internationales
1 ter avenue de Lowendal 75007 PARIS

Le Rheu, le 19 novembre 2020

Objet : DEMANDE D'AVENANT A LA CONVENTION AAP n°18ART1808 EmisoIBV du 29/10/2018

Madame Canas

Je me permets de vous adresser une demande d'avenant pour la convention AAP n°18ART1808 EmisoIBV. Cette demande fait suite au retard de mise en place des essais du projet au sein de la halle expérimentale INRA – MEGEVE prévu initialement courant mars. Ces retards sont dus principalement au confinement total en lien avec le coronavirus, puis au reconfinement actuel. L'INRAE ayant bloqué les accès aux bâtiments jugés non prioritaires (cf. plan de continuation de l'activité). A cela c'est rajouter une reprise partielle sur mai et juin, empêchant la mise en place des essais (limitation des accès imposée par l'INRAE) qui se sont poursuivis avec les congés d'été (effectif réduit). Et de nouveau, des difficultés pour lancer l'essai avec le contexte actuel.

De plus, l'entreprise de climatisation qui s'était engagée auprès de l'INRAE pour répondre au cahier des charges décrit dans l'appel d'offre public n'a pas pu apporter les corrections pour que l'outil soit fonctionnel dans les délais précédemment acté (cf. courrier de janvier ; cf. courrier Fluditec).

C'est pourquoi via cette présente lettre, nous vous sollicitons pour une demande de prolongation de 6 mois de la convention initiale, afin de pouvoir répondre au mieux aux engagements concernant le projet.

Je vous prie de bien vouloir agréer, Madame Canas, l'expression de mes salutations distinguées.

Elise Lorinquer, responsable du projet

EmisoIBV

8. Résultats

8.1 Introduction

Les résultats du projet sont les suivants

1. La méthode de quantification EMISOLBV avec sa méthode de mesure et son modèle d'extrapolation ;
2. Résultats de son utilisation sur la ferme de Derval : émissions des sols, étude de méthodes d'atténuations ;
3. Formation pour des conseillers en élevage ;
4. Analyse SWOT de la méthode EMISOLBV.

Chaque tâche a pu être menée à bien malgré les difficultés rencontrées mentionnées précédemment. Il faut cependant noter que certaines ont dû être allégées en raison du manque de temps qui en a résulté. Les détails et précisions sont repris au cas par cas pour chaque action.

8.2 Action 1 : Mise au point d'une méthode de quantification des émissions des sols de bâtiment bovin - EMISOLBV

Le premier objectif de cette action concerne la mise au point de la méthode de mesure et le second la mise au point du modèle d'extrapolation.

8.2.1 Choix méthodologiques

Cette action devait être mise en œuvre en conditions contrôlées dans la halle MEGEVE de l'INRAe. En conséquence des nombreux retards et difficultés évoqués précédemment, cette première action a été réalisée sur deux sites de l'UMRSAS : pour partie dans la halle expérimentale de « physique des surfaces naturelles » d'Agrocampus Ouest ; pour partie dans la halle bioclimatologique à Saint-Gilles. Ces travaux ont d'abord fait l'objet d'un contrat de stage dont le rapport est présenté en Annexe (M.H. Rozé, 2019). Ils ont ensuite été poursuivis à l'issue de ce stage pour parvenir à la solution proposée aux « conseillers bâtiment ».

8.2.1.1 Choix des facteurs pris en compte

Les facteurs *a priori* actifs, issus de l'analyse bibliographique initiale rappelée ci-dessus, sont :

- la durée de présence de déjections humides (lisier) dans le bâtiment en interaction avec la présence des animaux (cf. action de l'uréase à l'origine d'une augmentation de la teneur en azote ammoniacal [noté TAN pour « total ammoniacal nitrogen »] après excrétion ; action de séchage des déjections sur le sol du bâtiment lorsque les animaux sont au pâturage et que la pellicule souillée est mince) ;
- la teneur en azote et le pH des déjections qui sont influencés par l'alimentation et la production des animaux ;
- le type de sol, la gestion des déjections et des animaux (parc d'attente avant la traite, aires de couchage et d'alimentation) à l'origine de zones plus ou moins sèches ou souillées dans le bâtiment ;
- des variables climatiques telles que la température de l'air, son humidité, la vitesse du vent, l'arrivée directe des rayons du soleil sur le sol du bâtiment.

Nous avons ainsi choisi de considérer deux groupes de facteurs :

- ceux qui pouvaient être observés (ou « prédits » et le cas échéant vérifiés) en élevage : le TAN et le pH des déjections au moment de la mesure ; l'extension de la surface souillée ; le nombre d'animaux et leur durée théorique de présence ; la température et l'humidité de l'air ;
- ceux qui ne pouvaient ni être prédits ni être observés dans le cadre d'une méthode « déployable en routine sur un grand nombre d'élevages » : la vitesse d'air, les surfaces éclairées par le soleil, l'emplacement des animaux, les interactions entre le TAN et le sol et les matières organiques apportées (bouses, paillage, etc. ; à l'origine de la diminution de l'azote ammoniacal effectivement disponible pour la volatilisation).

8.2.1.2 Modalités de prise en compte des facteurs influençant les émissions d'ammoniac et de GES

Les outils que nous proposons de déployer sont de quatre natures :

- les mesures *in situ* répétées une fois (température, hygrométrie de l'air et concentrations en gaz : extérieur au bâtiment, intérieur du bâtiment, intérieur de la chambre ; aspect plus ou moins souillé du sol, si possible, caractérisation objective par mesure spectrale [SPIR]) ;
- des « matériaux de référence » permettant d'une part de vérifier que les mesures « fonctionnent correctement », quels que soient les aléas pouvant être rencontrés lors du déploiement sur le terrain (reproductibilité métrologique¹), d'autre part de « positionner la surface émettrice » (le sol du bâtiment) au-dessus ou en-dessous d'une émission de référence ;
- les informations spécifiques de l'élevage, à dire d'éleveur (planification annuelle du cheptel et de son alimentation : effectif, production, alimentation, pâturage) ;
- les informations de référence (climat du site, composition théorique des déjections si elle n'est pas connue ou ne peut pas être mesurée

Les paragraphes suivants décrivent comment ces quatre catégories d'outils sont combinées pour apporter *in fine* des mesures comparables entre elles ainsi qu'à des émissions de référence, typiquement émission d'ammoniac ou de GES par vache laitière et par an.

La mise au point de ces choix (variables, combinaisons) a été élaborée au cours de trois étapes :

- 1- une phase de calibrage de la méthode avec des solutions connues (T, pH, NH₄⁺) (solutions de « raccordement ») ;
- 2- une phase de déploiement de la méthode avec mesures sur site et adaptations associées ;
- 3- une phase de développement de la méthode d'extrapolation spatiale de la chambre de mesure au bâtiment.

8.2.2 Mesure locale *in situ* des émissions gazeuses sous chambre semi-statique

8.2.2.1 Chambre semi-statique

Pour caractériser spécifiquement la contribution du sol (des zones *a priori* les plus émettrices) à l'émission d'ammoniac et de GES du bâtiment dans son ensemble, nous avons choisi de mettre

¹ conditions de mesurage dans un ensemble de conditions qui comprennent des lieux, des opérateurs et des systèmes de mesure différents, ainsi que des mesurages répétés sur le même objet ou des objets similaires (cf.

<https://jcgm.bipm.org/vim/fr/2.24.html>)

en œuvre une chambre de mesure semi-statique (fermée, à l'inverse d'un tunnel de ventilation ; équipée de ventilateurs garantissant un échange d'air minimum au niveau de la surface émettrice).

Pour fiabiliser la prise d'observations *in situ* sans requérir ni un volume total d'équipement trop important ni une période de mesure trop longue (séquence d'observation n'excédant pas une demi-journée), le compromis que nous préconisons dans la perspective du déploiement est la mise en œuvre quasi-simultanée de deux chambres identiques, d'environ 40 cm de côté, posées dans une zone représentatives de la partie « fortement émettrice » du bâtiment, durant une séquence totale, y compris les opérations de balisage, d'installation et de « démontage », d'environ 2 heures.

En regard d'autres équipements, cette procédure d'observation *in situ* peut être mise en œuvre par un seul opérateur et elle apporte une sensibilité suffisante pour différencier les types de sol et identifier les pratiques réduisant les émissions.

Si la mesure a pour but de quantifier la contribution du sol aux émissions de méthane (CH_4) du bâtiment, ou si l'on souhaite vérifier la procédure d'extrapolation de l'émission d'ammoniac, de la prise d'observations locales à l'ensemble du bâtiment, il convient de compléter ces mesures par chambre par une mesure globale par la « méthode simplifiée » (prélèvements d'air à l'intérieur du bâtiment, en se déplaçant dans l'ensemble de la zone occupée par les animaux, et à l'extérieur en se déplaçant autour du bâtiment).

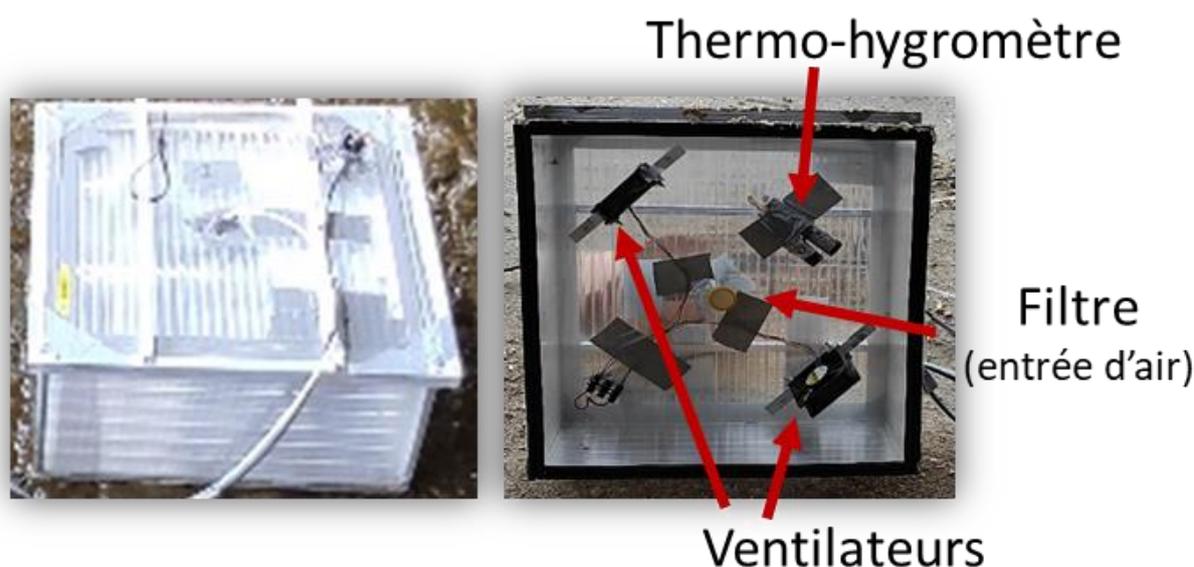


Figure 1 : Chambre semi-statique pour les prélèvements de gaz

8.2.2.2 Solutions aqueuses de « raccordement »

Les études au laboratoire ont conduit à la mise au point de solutions de « raccordement ». Elles sont dites de « raccordement » car elles permettent de faire le lien entre les travaux en laboratoire et les mesures de terrain. Ces solutions aqueuses ont été élaborées de façon à posséder les caractéristiques d'acidité (pH) et de concentrations en ions ammonium (NH_4^+) que l'on observe communément dans les lisiers de bovins :

- Concentration NH_4^+ entre 0,043 et 0,15 mol/l
- Valeurs de **pH** entre 7 et 9.3

Elles sont constituées de sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ et de carbonate de sodium Na_2CO_3 dissout dans de l'eau pure. A l'instar des lisiers et fumiers, elles émettent à la fois du NH_3 et du CO_2 qui ont un effet opposé sur la variation de pH de la solution : l'émission d' NH_3 diminue le pH ce qui conduit à ralentir l'émission d' NH_3 , l'émission de CO_2 augmente le pH ce qui conduit à ralentir l'émission de CO_2 . Ainsi chaque solution a une cinétique théorique d'émission dont le calcul a été confronté aux observations.

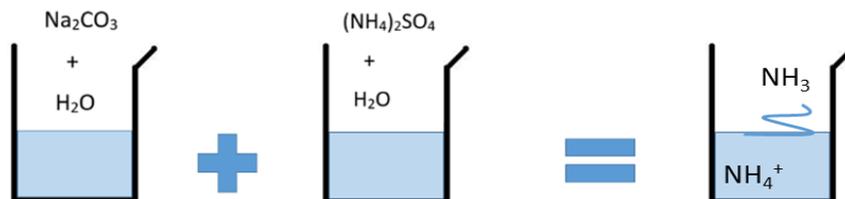


Figure 2 : Schéma d'obtention des solutions aqueuses de raccordement

Treize solutions aqueuses ont été mises au point. Chacune possède une concentration en ions ammonium et un pH spécifique. La préparation de chacune de ces solutions a été décrite. L'ensemble de ces solutions permet de représenter l'ensemble des situations de lisiers de bovins. Ainsi, lorsque l'on connaît *a priori* (ou après mesure *in situ*) la composition du lisier, cette composante de la méthode EMISOLBV permet de fabriquer le « matériau de référence » dont l'émission d'ammoniac sera *a priori* proche de celle du lisier.

Solution	$[\text{NH}_4^+]$ mol/L	pH
Solution 1	0,125	7,49
Solution 2	0,125	7,88
Solution 3	0,124	8,12
Solution 4	0,124	8,45
Solution 5	0,123	8,73
Solution 6	0,120	9,05
Solution 7	0,114	9,50
Solution 8	0,105	9,85
Solution 9	0,102	10,35
Solution 10	0,148	8,43
Solution 11	0,075	8,35
Solution 12	0,037	8,56
Solution 13	0,037	7,15

Suite à l'ensemble des essais réalisés en conditions de laboratoire et sur le terrain et compte tenu de la difficulté à connaître précisément les caractéristiques du lisier et du temps imparti à la préparation sur site, nous avons finalement retenu 3 mélanges qui encadrent la variabilité attendue : les solutions 8 (très émettrice), 12 (moyennement émettrice) et 13 (peu émettrice). Suite aux discussions et aux commentaires donnés par les conseillers bâtiments, dans une perspective de simplification et standardisation accrue de la méthode, seul l'usage de la solution 12 est finalement préconisé pour le déploiement.

8.2.2.3 Echantillonneur

Pour standardiser le prélèvement d'air, chaque chambre est couplée à une pompe d'aspiration contrôlée par un automate (Crouzet®) (nommé « contrôleur » sur la photo ci-après).

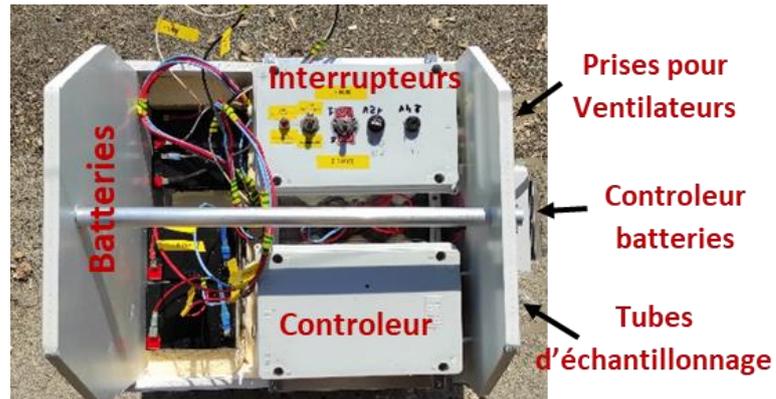


Figure 3 : Système de contrôle des échantillonnages

La chambre semi-statique est reliée à une pompe de prélèvement pour le remplissage de sacs souples de marque Flexfoil® (10l).



Figure 4 : Echantillonnage des gaz provenant de la chambre

8.2.2.4 Etudes laboratoire

8.2.2.4.1 Influence de la chambre d'échantillonnage sur les mesures

La méthode des chambres est une méthode qui est dite « intrusive » parce qu'elle modifie les conditions d'émission et peut, suivant les gaz mesurés, modifier les concentrations mesurées (effets d'adsorption, rétroaction des concentrations en gaz dans la chambre sur la cinétique d'émission, effet de la vitesse d'air à la surface émettrice sur la cinétique d'émission). Pour

pallier à ces perturbations il est recommandé de limiter le temps de la mesure, de s'assurer d'un bon mélange du gaz à l'intérieur de l'enceinte (avec ventilateur par exemple) et d'assurer une étanchéité maximale au sol en limitant les diffusions latérales. La chambre d'échantillonnage a été développée en prenant en considération l'ensemble de ces recommandations (ventilateurs, système d'étanchéité à la base).

Pour s'assurer du « comportement » de l'enceinte lors des mesures deux types d'études ont été menées en laboratoire :

- 1- La première concerne **l'effet de ces enceintes sur les concentrations** (vitesse d'air, étanchéité, interaction entre le sol et la cinétique d'émission) tant pour ce qui concerne les taux d'accroissement que sur le maximum atteint, c'est-à-dire sur le plateau de concentration ;
- 2- La seconde concerne **la durée et les séquences d'échantillonnage** qui sont dépendantes de la phase de croissance des concentrations. Cette étude a permis d'établir le programme d'échantillonnage automatisé.

8.2.2.4.2 Effets d'adsorption dans les enceintes d'échantillonnage

La figure ci-dessous compare les résultats des émissions d'ammoniac calculées (hypothèse d'absence d'interactions avec l'enceinte) en utilisant la solution de raccordement n°12 (en marron) à celles effectivement observées (en rouge).

Les valeurs observées à l'équilibre (plateau) sont plus faibles que celles calculées. La cinétique de mise à l'équilibre est également différente : subite dans le cas théorique et progressive dans celui observé. Ces différences importantes sont dues aux effets d'adsorption liées aux surfaces internes en contact avec les émissions d'ammoniac ainsi qu'à la disponibilité de l' NH_3 au niveau de la surface émettrice. Ainsi, les solutions de raccordement permettent de s'assurer qu'au moment de la mesure *in situ* les différences entre chambres (par fabrication ou du fait d'une évolution au cours du temps en fonction de leur usage) sont prises en compte lors de l'interprétation des mesures de concentrations.

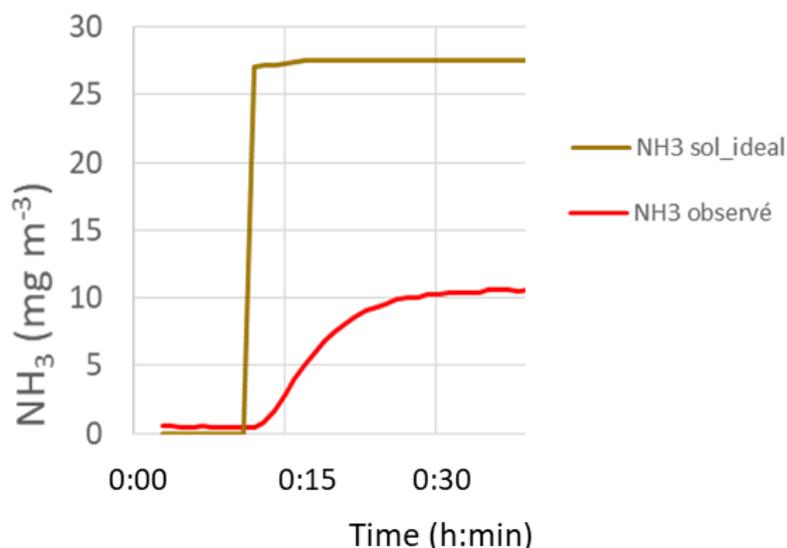


Figure 5 : comparaison des concentrations d'ammoniac calculées et observées

Une deuxième étude sur l'effet d'adsorption a été menée en plaçant un bloc de béton dans l'enceinte (effet de la nature du sol sur la cinétique d'émission). Le bloc est présenté dans la photo ci-après. C'est une plaque carrée de 32cm de côté externe sur 3cm d'épaisseur surmonté d'un cerclage carré de 3cm de section. La hauteur totale étant donc de 6cm.



Figure 6: plaque de béton utilisée pour étudier les phénomènes d'adsorption

La figure ci-dessous présente les effets d'adsorptions observés sous différentes conditions :

- Courbe grise : rien n'est présent dans l'enceinte,
- Courbe rouge : plaque de béton installée et sèche
- Courbe orange clair : plaque de béton installée et humide
- Courbe bleu : plaque de béton installée et recouverte d'un film cellophane

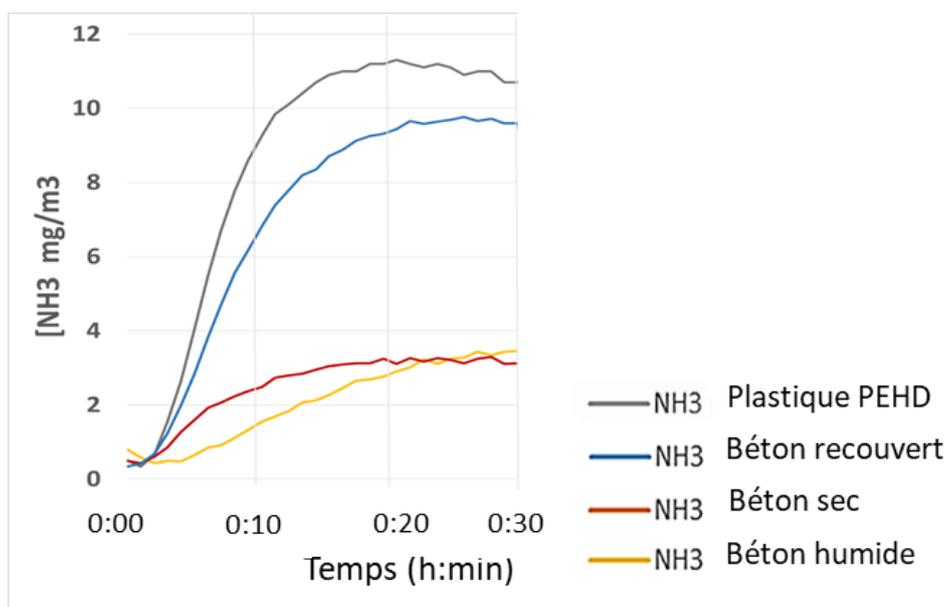


Figure 7 : Etude de l'effet d'adsorption dans les chambres d'échantillonnage

Que le béton soit sec ou humide le même plateau des émissions d'ammoniac est observé cependant les courbes de croissance des concentrations sont différentes. Les maximums observés (plateaux) sont alors environ 4 fois plus faibles que ce qui est mesuré lorsque rien n'est placé dans l'enceinte.

Lorsque le béton est recouvert par un plastique cellophane les effets d'adsorption sont nettement plus faibles mais persistent cependant légèrement.

L'ensemble de ces études expérimentales et théoriques ont conduit à préconiser pour le déploiement, une phase de mise en œuvre de la chambre sur un support inerte, assurant un contact répétable avec la chambre, avec la solution de raccordement elle-même placée dans un récipient inerte (chambre recouvrant une boîte de pétri de diamètre 13 cm, contenant la solution de raccordement, placée sur un plastique épais PEHD posé sur le sol de la stabulation).

8.2.2.5 Programme d'échantillonnage

Le programme d'échantillonnage a été mis au point à partir des travaux menés en laboratoire qui ont permis de déterminer les temps nécessaires pour laisser l'atmosphère sous la chambre s'homogénéiser ainsi que pour pouvoir observer les taux de croissance des concentrations d' NH_3 sous la chambre (droite en pointillés sur la Figure ci-après).

Cette phase d'accroissement dure une dizaine de minutes pour la solution représentant le « lisier moyen », puis un plateau est atteint qui traduit l'équilibre entre les processus d'émission, les processus de dépôt, les processus d'échange d'air (remplissage des poches, fuites éventuelles), les processus d'adsorption/désorption (dépôt/émission d' NH_3 sur les matériaux internes à la chambre, au contact de l'air brassé par les ventilateurs).

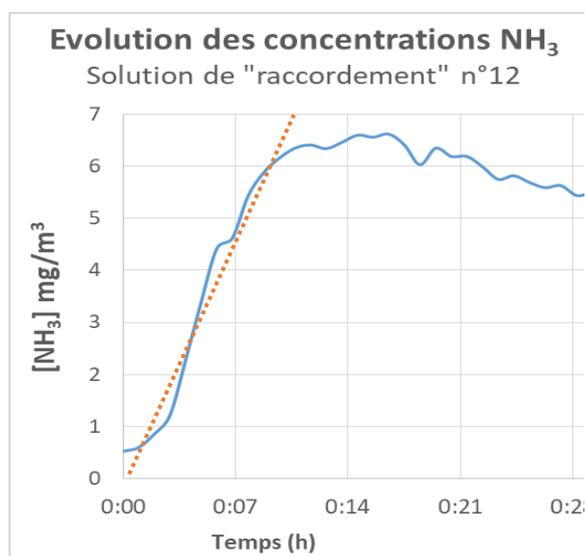


Figure 8 : Accroissement des concentrations d' NH_3 observé en laboratoire

C'est pourquoi nous préconisons pour le déploiement le programme présenté dans le schéma suivant :

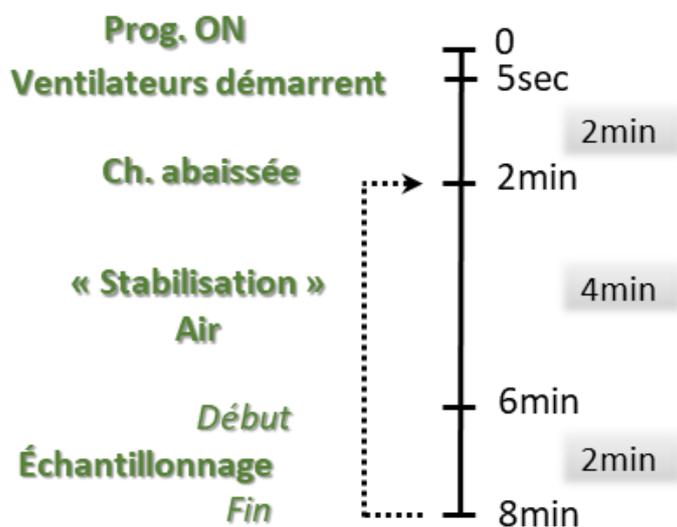


Figure 9 : Programme développé pour l'échantillonneur (automate Crouzet®)

Après une phase de mise en route (durée de deux minutes), la chambre est abaissée et le premier échantillonnage a lieu 4 minutes après (le temps que l'atmosphère sous la chambre s'homogénéise) et cela pendant 2 minutes. Cinq litres environ sont prélevés et le programme reprend un cycle de « 4min stabilisation » / « 2min d'échantillonnage ».

Avec ce choix de séquence, après « fermeture » de la chambre sur le lisier, une première poche est prélevée à 6-8min puis 12-14min puis 18-20min. Ainsi, dans le cas d'un lisier moyennement émetteur, la pente doit être relativement constante sur les deux premières poches, dans le cas d'un lisier très émetteur, la première poche est proche du plateau, dans le cas d'un lisier peu émetteur, l'augmentation est régulière sur les 3 poches.

8.2.2.6 Séquences de mesure sur site

Lors des mesures sur site nous préconisons de compléter la séquence de caractérisation de l'augmentation des concentrations en NH_3 et GES par, au préalable, une mesure de « point initial » puis, après purge de l'air de la chambre, par des mesures de vérification utilisant la solution de raccordement.

Ainsi, la période de prélèvement comporte au total trois séquences :

- 1- La première permet d'avoir les mesures de références (le « blanc », caractérisation de l'air « sans émission », vérification de l'absence de relargage d' NH_3 par les chambres, point de départ de l'augmentation des concentrations).
- 2- La deuxième correspond aux mesures des concentrations d' NH_3 émises par les déjections (trois échantillonnages ou trois sacs prélevés ; caractérisation quasi-simultanée de deux cinétiques d'augmentation de la concentration en NH_3 au contact du sol souillé).
- 3- La troisième correspond à un contrôle de qualité des échantillonnages (vérification de la cinétique théorique avec la solution de raccordement sur le PEHD ; constat d'une augmentation ou d'une baisse de l'émission d' NH_3 lorsque la solution de raccordement dans la boîte de Pétri recouvre une partie du sol souillé).

L'ensemble est illustré dans la figure suivante.

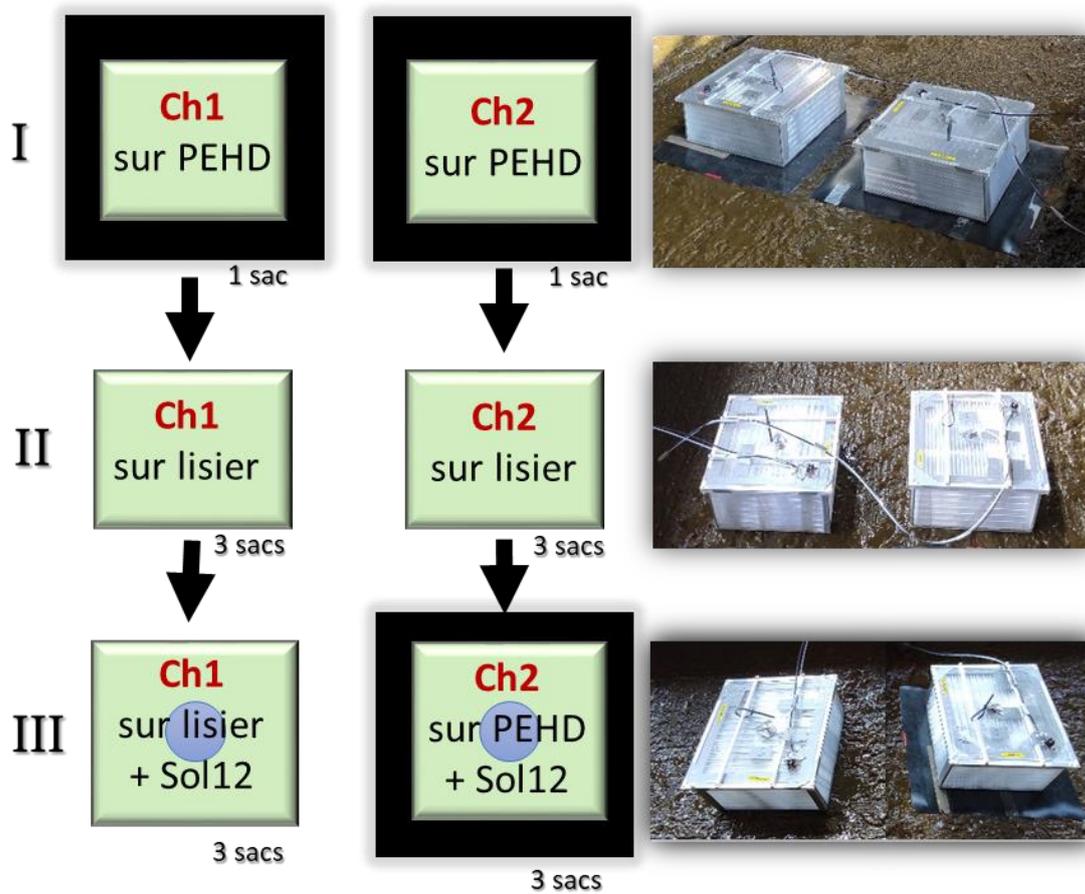


Figure 10 : Protocole d'échantillonnage lors du déploiement en ferme

Lors de la troisième séquence une des deux chambres est laissée sur le sol souillé et l'autre revient sur la plaque de plastique PEHD et, sous chacune est placée une boîte de Pétri contenant la solution de raccordement. L'objectif est de contrôler le bon fonctionnement du système d'échantillonnage et d'avoir une première idée des émissions d' NH_3 provenant des déjections :

- chambre posée sur le plastique : si ce qui est mesuré ne correspond pas à ce que l'on doit observer avec la solution aqueuse, c'est alors le signe d'un problème d'échantillonnage ; possibilité de corriger ou rejeter les valeurs observées en fonction de l'importance de l'écart entre les valeurs escomptées et celles observées.
- mesures d'acidité : une première évaluation des émissions qui ont eues lieu se fait de la manière suivante. Le pH de la solution est mesuré avant d'être placé sous la chambre et elle est de nouveau prise après toute la durée de cette séquence. Ainsi, si le pH augmente cela signifie que les émissions liées aux déjections sont supérieures à celles de la solution de raccordement car une partie de l'ammoniac s'y est alors dissous. En revanche, si le pH diminue, c'est le signe qu'il y a eu perte d'ammoniac de la solution aqueuse et cela signifie que les émissions liées aux déjections sont inférieures à celles de la solution de raccordement (l' NH_3 émis par la solution s'est en partie déposé sur le sol souillé sous la chambre). L'importance de l'écart avec le pH d'origine donne alors une idée de la différence d'émissions (positive ou négative) par rapport à la solution de référence.

8.2.2.7 Analyse des échantillonnages

Le contenu des sacs est ensuite analysé à l'aide de l'analyseur INNOVA 1412 que possède l'Institut de l'Élevage. Les sacs flexfoil que nous préconisons permettent de différer la mesure de concentration au lendemain ou surlendemain en fonction des aléas de terrain. Néanmoins, les automatismes développés spécifiquement pour ce projet permettent de lancer la séquence d'analyse d'un groupe de poches en sorte de pouvoir disposer des concentrations en gaz l'après-midi ou le lendemain matin.

Les paramétrages de la chambre concernent la vitesse d'air dans la chambre, le flux d'air prélevé, l'étanchéité de la chambre au contact du sol et l'influence de la concentration intérieure (notamment NH_3) sur le processus d'émission. Dans le cas où seul l' NH_3 est recherché (par d'analyse des émissions de GES), nous avons vérifié la faisabilité technique d'une mesure avec lecture directe par tube colorimétrique (type tube Draeger).

Les mesures de température de l'air et du pH de la solution de raccordement permettent de renseigner le modèle théorique d'émission de cette solution. Ainsi, une même solution donnera des augmentations de concentrations plus faibles si la température ambiante est plus faible. De même, si on constate une augmentation de pH de la solution (sol plus émetteur que la solution) mais une pente d'augmentation d' NH_3 plus faible que celle attendue, on applique un coefficient correctif pour tenir compte de l' NH_3 émis par le sol et perdu par les défauts d'étanchéité de la chambre au contact du sol (cas des rainures profondes, fuites accentuées en cas de vent longitudinal).

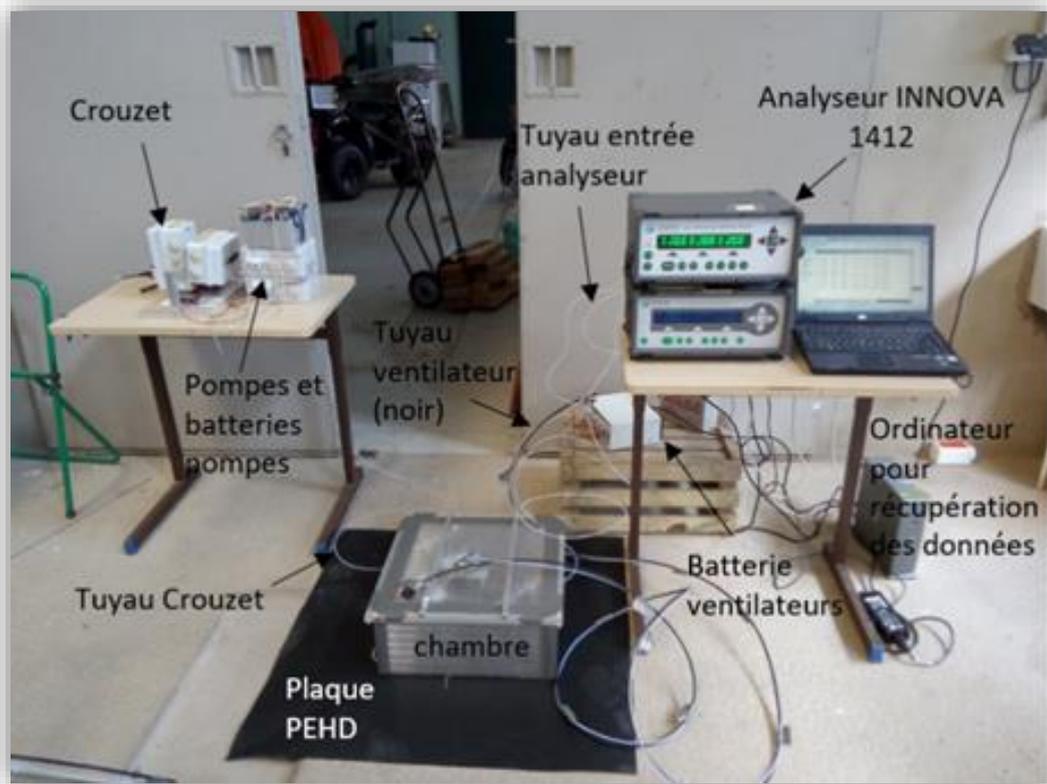


Figure 11 : dispositif de mesure des émissions gazeuses

8.2.3 Extrapolation des mesures au bâtiment d'élevage

La mesure par chambre étant locale et destinée à accompagner les stratégies de réduction des émissions via les aménagements de sols ou les pratiques de conduite du troupeau ou des effluents, nous préconisons de cibler les mesures sur une zone *a priori* représentative des surfaces les plus émettrices.

Pour extrapoler spatialement les émissions mesurées localement, sous les chambres semi-statiques, à la totalité du bâtiment une méthode utilisant la Spectroscopie Proche Infra Rouge (SPIR) a été développée.

La SPIR est déjà utilisée pour étudier certaines caractéristiques des déjections animales et elle est employée ici pour caractériser les surfaces du sol souillé des bâtiments.

Le matériel est présenté dans la figure ci-après.



Figure 12 : Spectroscopie Proche Infrarouge

A partir des spectres obtenus (Figure suivante) les sols ont pu être répartis en trois catégories :

- 1- Surfaces peu souillées et/ou sèches (Classe 0)
- 2- Surfaces moyennement souillées et partiellement humides (Classe 1)
- 3- Surfaces entièrement recouvertes de déjections humides ou liquides (Classe 2)

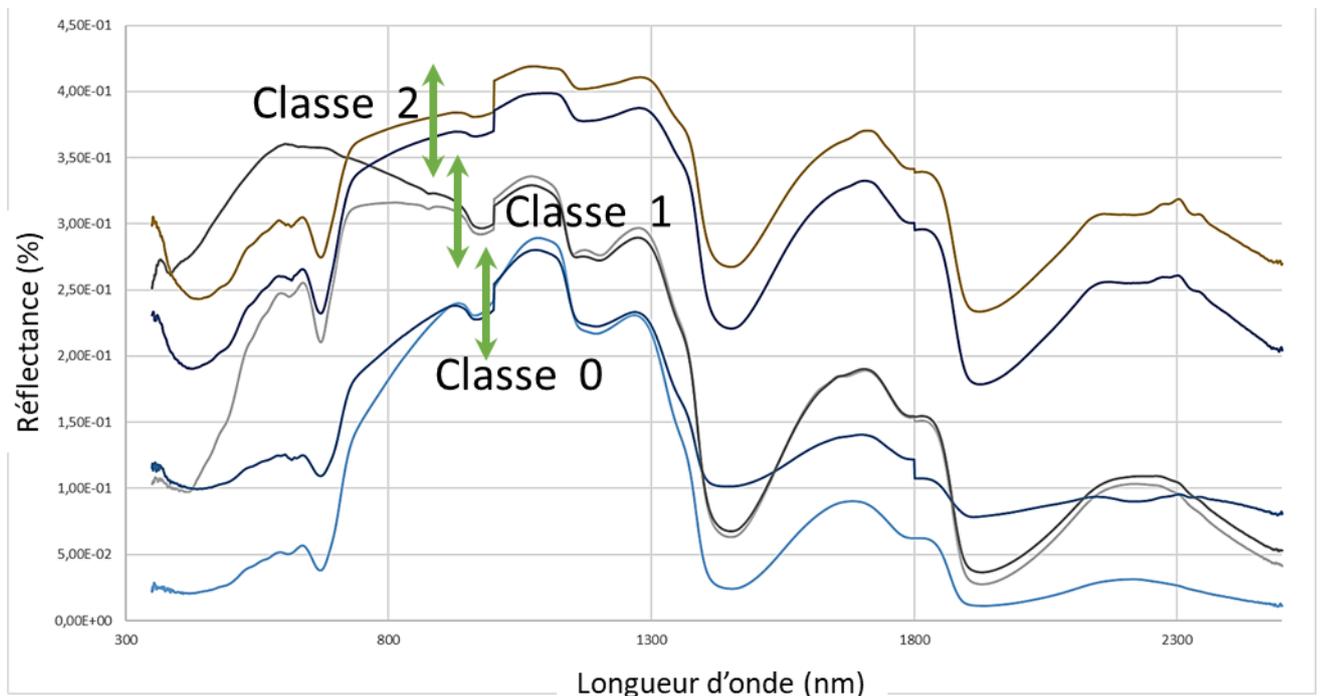


Figure 13 : Spectres obtenus pour différents types de sols souillés

Les nombreuses observations spectrales effectuées ont été analysées et classées pour obtenir la répartition suivante :

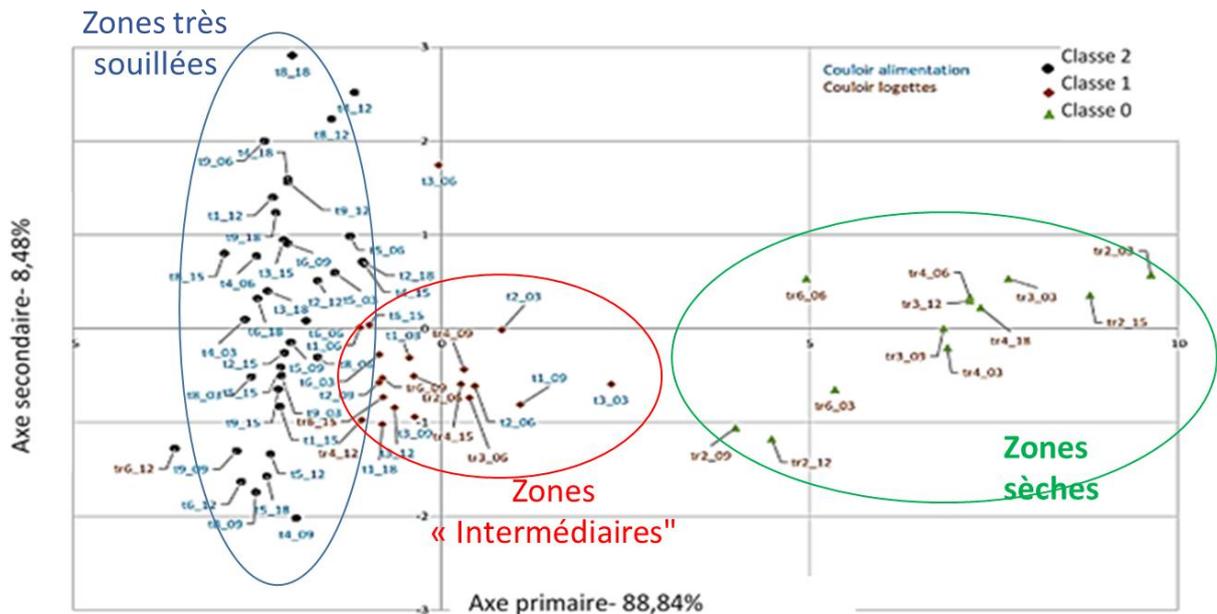


Figure 14 : organisation des mesures spectrales et répartition en classes de sols souillés

La méthode d'extrapolation spatiale proposée consiste :

- 1- à utiliser la Spectroscopie Proche Infrarouge (SPIR) pour quantifier les surfaces de chacune des classes proposées (0, 1 et 2) ;
- 2- à placer les chambres semi-statiques sur un emplacement représentatif des zones les plus émettrices (zones très souillées par les déjections, classe 2) et à utiliser le protocole de mesures présenté précédemment (en trois séquences d'échantillonnage) ;
- 3- d'appliquer le facteur d'émission mesuré localement à toutes les surfaces de classe 2, de ne compter que 50% des émissions aux surfaces associées à la classe 1 et aucune émission pour celles appartenant à la classe 0.

La figure suivante reprend les différentes classes d'émission en les illustrant d'une photo et en mentionnant le facteur d'abattement associé.

Classe	Photo	Caractéristiques	%émission chambre
0		Zones majoritairement sèches ou propres	0%
1		Mosaïques des classes 0 et 2	50%
2		Zones globalement très humides : flaques d'urine ou déjections liquides	100%

Figure 15 : Classes de sols souillés et facteurs d'abattement des émissions préconisés pour le déploiement

Les résultats détaillés concernant les études du comportement de la chambre d'échantillonnage au laboratoire et des mesures spectrales sont présentés à l'Annexe (M.H. Rozé, 2019).

8.3 Action 2 : Mise en œuvre de la méthode EMISOLBV en ferme expérimentale

La méthode développée précédemment a été mise en application dans le bâtiment de la ferme expérimentale de Derval en présence des animaux. Les objectifs étant les suivants :

1. Tester la méthode EMISOLBV en conditions réelles (compatibilité avec l'activité habituelle de l'élevage) ;
2. Quantifier les émissions gazeuses des sols bétonnées d'un bâtiment logettes ;
3. Evaluer le potentiel de réduction de ces émissions gazeuses en lien avec :
 - . l'augmentation de la fréquence de raclage des sols,
 - . le paillage des sols.

Le bâtiment des vaches laitières de la ferme expérimentale est composé de logettes avec aires bétonnées. Le lisier produit est raclé quatre fois dans la journée.

8.3.1 Mise au point opérationnelle de la méthode EMISOLBV

La mise en œuvre de la méthode sur la ferme expérimentale de Derval a conduit à plusieurs modifications, d'ordre métrologique ou technique, dans la perspective d'un déploiement facilité et d'acquisition de résultats comparables sur un grand nombre de fermes.

L'objectif *in fine* est que la méthode proposée ici puisse accompagner toutes les initiatives, quels que soient les territoires, les systèmes d'élevage, les modalités de réduction d'émissions des sols des bâtiments bovins, contribuant ainsi à une baisse d'ampleur significative, pouvant être objectivée au plan national.

Ainsi, ces phases terrain ont conduit aux préconisations suivantes :

- choix de réactifs stables pouvant être mis en œuvre en ferme pour « fabriquer » la solution de raccordement spécifique d'un élevage donné (ou d'une catégorie) ;
- choix de la séquence de mesure (nombre de chambres, succession des configurations, intervalles entre prélèvements, durées de prélèvements) permettant de couvrir l'ensemble des situations d'émission d' NH_3 (diversité de saisons, diversité d'effluents) ;
- spécifications du système d'échantillonnage (cf. Figure 3 : automate, pompes, batteries, connectique électrique et pneumatique) et des chambres (dimensions, voyants de contrôle de la mise sous tension des ventilateurs et pompes, protection des fils et tuyaux) afin de faciliter leur transport et leur mise en œuvre en ferme ;
- sélection des informations (bâtiment, gestion du troupeau, climat) mobilisées pour extrapoler la mesure locale à l'ensemble du bâtiment et à l'année ;
- possibilités de simplifications en fonction des contraintes et des résultats attendus d'un déploiement à l'issue de ce projet.

8.3.2 Influence de la fréquence de raclage sur les émissions gazeuses

8.3.2.1 Objectifs et travaux

L'objectif de l'expérimentation est d'évaluer si la méthode permet de diagnostiquer l'effet des conditions actuelles de raclage (à Derval) sur une diminution des émissions afin de décider si une augmentation de la fréquence (nombre de raclages quotidiens) ou une modification des heures de raclage sont mises en œuvre pour réduire l'émission d' NH_3 du bâtiment.

De manière pratique l'étude a consisté à faire une première série de mesures *in situ* avant raclage, et donc plusieurs heures après le dépôt de lisier, et une deuxième juste après le raclage. De cette manière l'influence éventuelle du raclage sur les émissions est caractérisée et peut alors servir de résultat de base pour évaluer l'intérêt de modifier les modalités de raclage.

Dans la perspective du déploiement, nous préconisons dans un premier temps de réaliser les mesures *in situ* « avant raclage », dans un échantillon représentatif de la diversité des systèmes utilisant le raclage. Ainsi, ces valeurs de référence pourront servir de point de repère, dans un second temps, en sorte que seules les mesures *in situ* « après raclage » soient nécessaires pour adapter les préconisations à chaque élevage ou pour améliorer les facteurs d'émissions nationaux utilisés pour les élevages avec raclage régulier des déjections.

8.3.2.2 Résultats

Les résultats obtenus sont présentés ci-après. Ils montrent l'absence d'effet significatif d'abattement des émissions d'ammoniac après raclage. Ainsi dans le cas spécifique de la ferme expérimentale de Derval, il n'est pas utile de préconiser des modifications des modalités de raclage pour réduire les émissions d'ammoniac.

Les travaux ont été menés une première fois en juillet 2019. La durée totale des échantillonnages sous chambre est de 20 minutes (cf. premier protocole de mesures – Rapport M.H. Rozé, 2019). Les durées présentées sur les graphes ci-dessous sont celles lues sur l'analyseur et non pas celles des échantillonnages proprement dits. Chaque « voie » correspond à une poche d'air. Les « points » de chaque segment de courbe représentent une mesure de concentration de l'analyseur. Il y a donc 7 ou 8 mesures par poches.

Sol avant raclage – juillet 2019

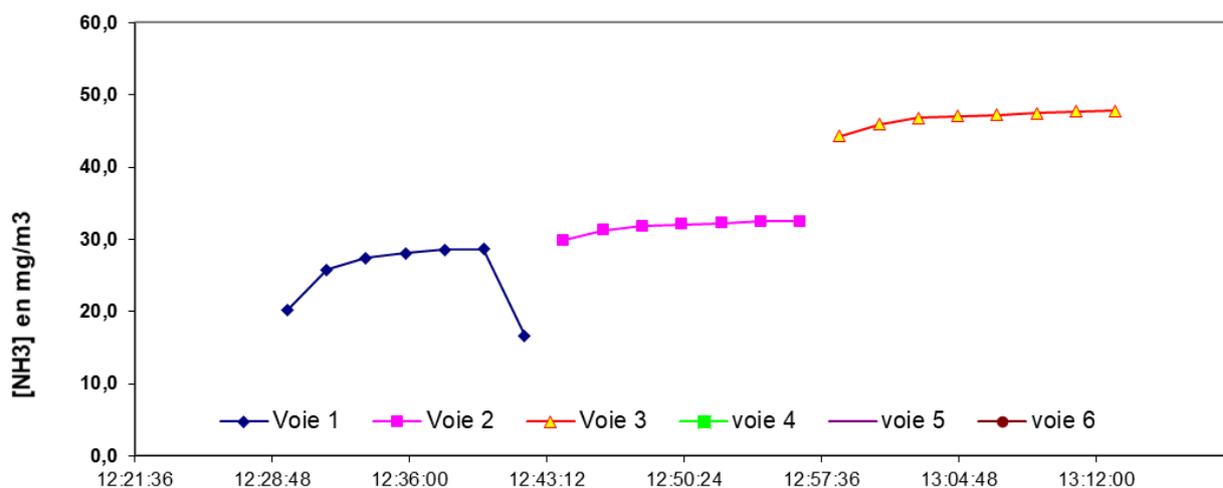


Figure 16 : Evolution des concentrations d'ammoniac avant le passage du racleur

Sol après raclage – juillet 2019

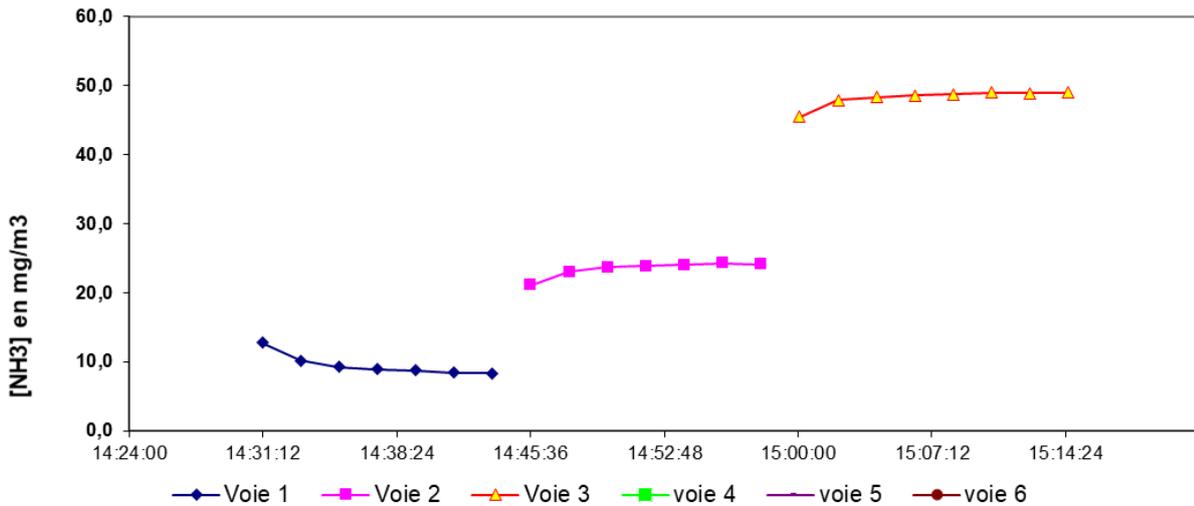


Figure 17 : Evolution des concentrations d’ammoniac après le passage du racleur

Après le raclage il apparaît cependant une diminution de la concentration d’NH₃ lors du premier échantillonnage. Mais cette diminution est presque nulle au deuxième et inexistante au troisième et dernier échantillonnage. En d’autres termes, le plateau d’émissions atteint ne change pas sous l’effet du raclage, c’est seulement le taux d’accroissement des concentrations qui est modifié : plus important après le raclage qu’avant.

Ces observations ont été confirmées en avril 2020. La durée totale des échantillonnages sous chambre est similaire (cf. protocole préconisé, § 8.2.2.5). Deux « voies » successives correspondent aux deux chambres conduites en parallèle.

Sol avant raclage – avril 2021

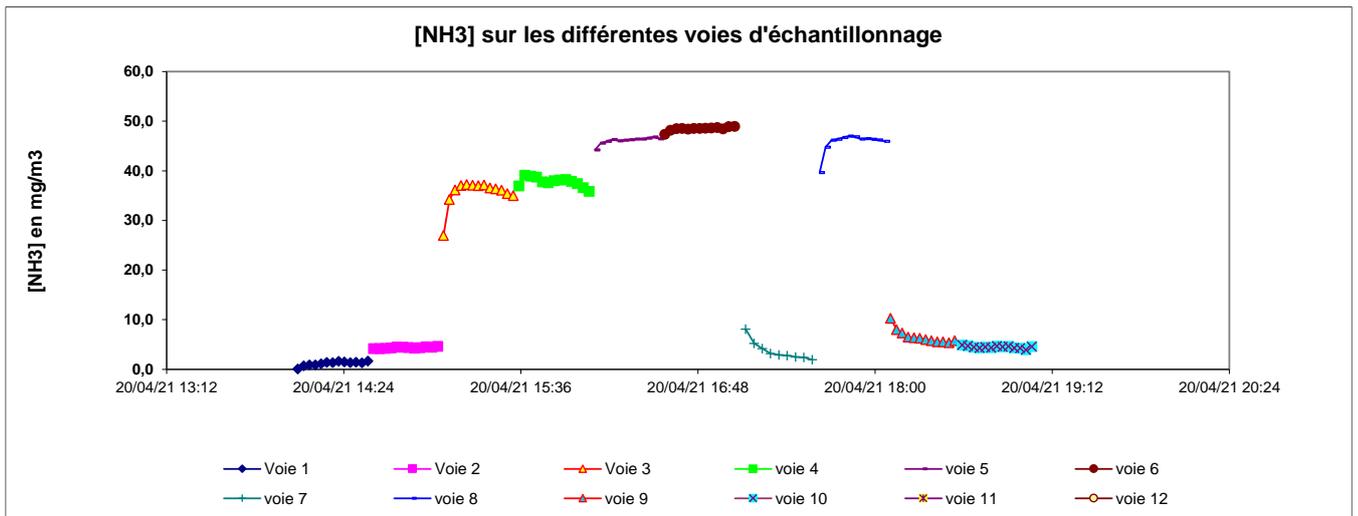


Figure 18 : Evolution des concentrations d’ammoniac avant le passage du racleur

Bien que la séquence d'échantillonnage de l'air dans la chambre utilise un intervalle entre poches plus court (4 min au lieu de 8 min) on constate toujours une augmentation rapide de la concentration après que la chambre soit posée sur le sol émetteur. Cette augmentation est bien répétable entre les deux chambres. La nécessité de doubler la mesure est montrée par l'analyse de la poche n°4 sur la chambre 1 (voie 7) pour laquelle on constate une baisse anormale de la concentration (on devrait être sur le plateau, cf. voie 8, chambre 2).

Sol après raclage – avril 2021

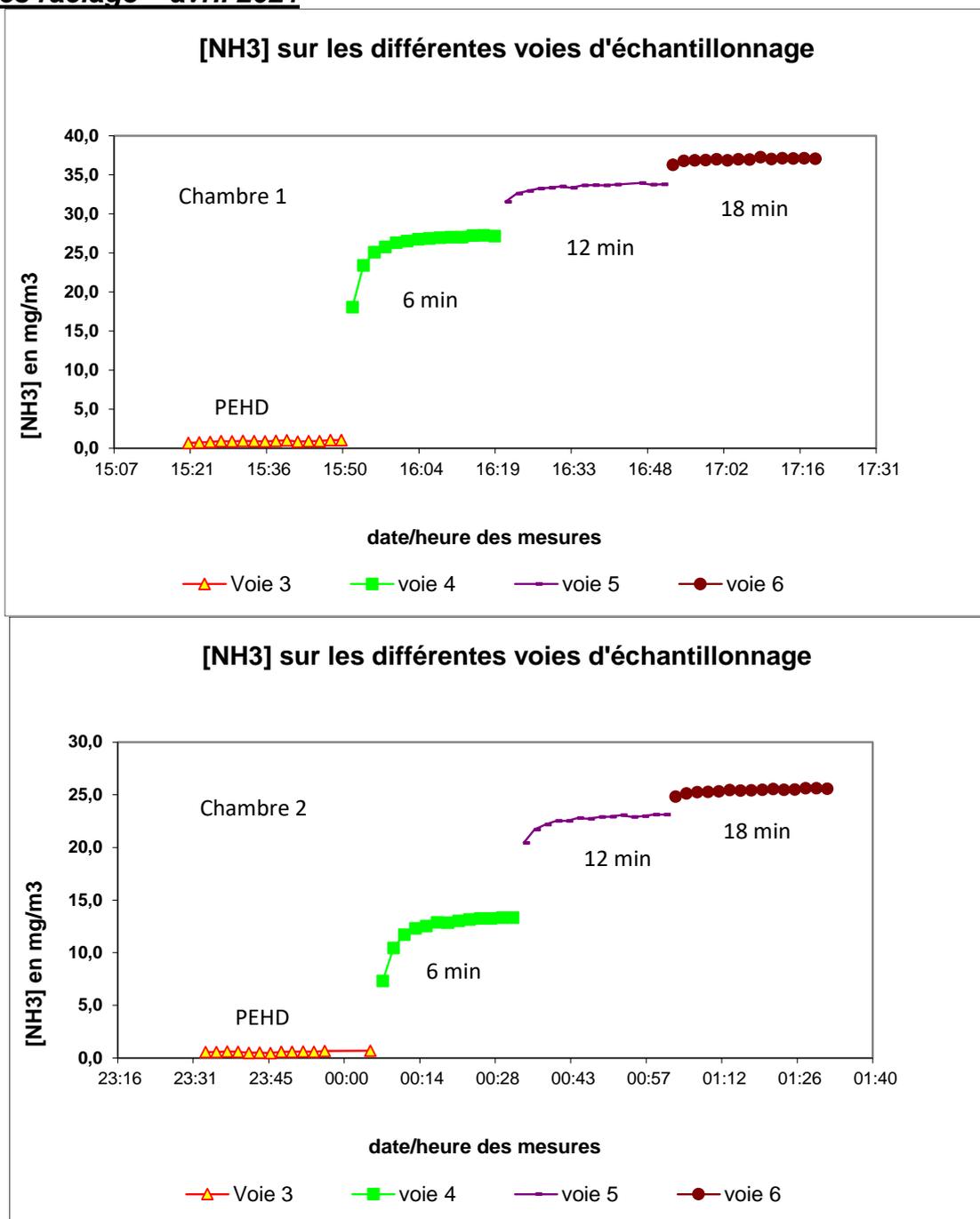


Figure 19 : Evolution des concentrations d'ammoniac après le passage du racleur

Après le raclage il apparaît comme en 2019 une diminution de la concentration d'NH₃ lors du premier échantillonnage. Mais cette diminution devient négligeable aux deuxième et troisième échantillonnages. En d'autres termes, le plateau d'émissions atteint ne change pas sous l'effet du raclage. Ainsi, la méthode préconisée rend compte de façon reproductible de l'effet du raclage dans cet élevage.

8.3.3 Influence du paillage des sols

8.3.3.1 Objectifs et travaux

L'augmentation de la quantité de paille est une des pratiques mise en avant par l'ADEME dans le Guide des Bonnes Pratiques Agricoles pour améliorer la qualité de l'air (ADEME, 2019).

Pour étudier l'effet de cette pratique, 10kg de paille ont été réparti de manière homogène sur une aire de 16 m² (4m x 4m) pour une densité d'environ 600g de paille au m². Les chambres de mesures ont été posées sur ce tapis pailleux (cf. photo suivante). L'étude a été menée à la ferme expérimentale de Derval.



Figure 20 : Chambres posées sur l'aire paillée (séquence de mesure III)

8.3.3.2 Résultats

Sol après paillage – avril 2021

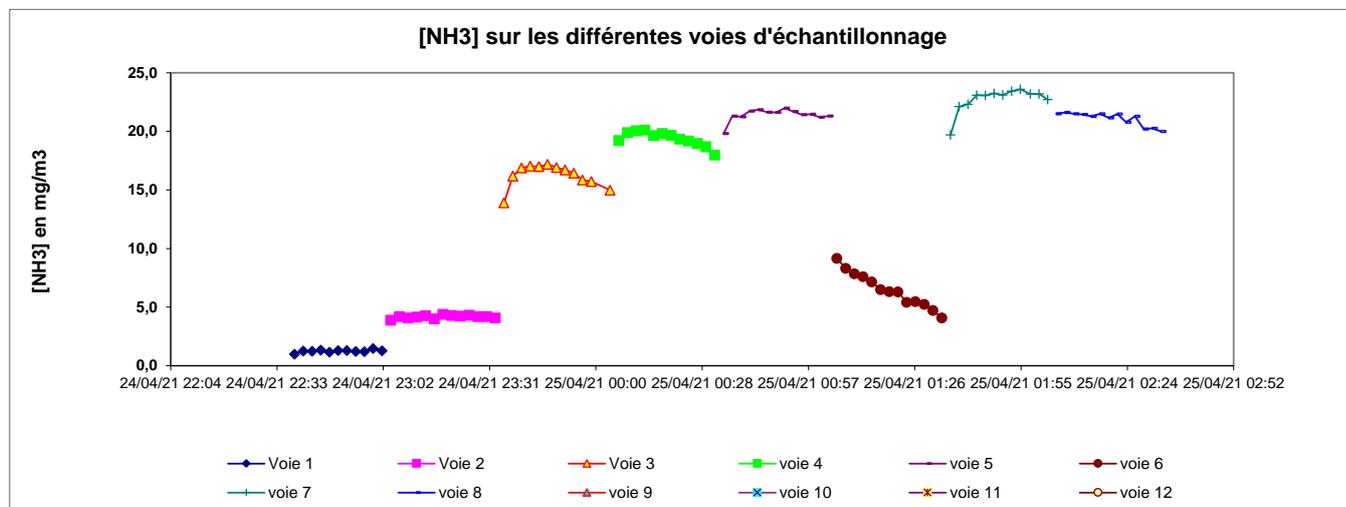


Figure 21 : Evolution des concentrations d'ammoniac après paillage de la surface raclée (environ 2 kg/m²)

On constate sur les deux chambres une légère atténuation de l'émission d' NH_3 en comparaison des évolutions observées précédemment avant ou après raclage qui se traduit par des premières poches et un plateau avec des valeurs plus faibles de concentration. En revanche, la diminution est très loin de l'importance attendue. Compte tenu de l'importance de l'apport de paille et des conditions de mesure (observations *in situ* juste après l'apport ; cf. Figure 20) nous attendions une baisse beaucoup plus importante. On peut s'attendre à ce que l'effet observé diminue rapidement (augmentation de l'émission) dès lors que les animaux vont piétiner la zone paillée et y déposer des déjections. En conséquence, nous concluons sur le plan méthodologique que la méthode préconisée est appropriée pour détecter les effets des équipements ou des pratiques destinées à réduire les émissions d' NH_3 et sur le plan finalisé que les pratiques testées (raclage, paillage) n'ont pas apporté les résultats escomptés.

8.4 Action 3 : Mise en œuvre de la méthode EMISOLBV par des conseillers d'élevage

8.4.1 Objectifs et travaux

Le déploiement à l'échelle nationale d'EMISOLBV dans des situations contrastées nécessite l'appropriation de la méthode par les conseillers d'élevage. Pour cette Action 3 deux conseillers de la Chambre d'Agriculture de Bretagne ont été contactés afin qu'ils mettent en pratique cette méthode de mesure des émissions en élevages.

Une formation d'une journée leur a été dispensée. Pour cela, un guide présentant la méthode et le protocole de mesure a été développé et leur a été fourni. Il est présenté en Annexe. La journée de formation s'est déroulée à la ferme expérimentale de Derval.

Il était prévu qu'ils déploieraient la méthode sur deux fermes commerciales mais les contraintes de temps liées aux retards sur l'agenda mentionnés précédemment ont imposé un réajustement des objectifs. Il a été ainsi décidé qu'ils utiliseraient cette méthode sur une seule ferme. Puisqu'ils travaillent notamment avec la ferme expérimentale de Trévarez dans le Finistère il s'est avéré que c'était le choix le plus judicieux en termes de commodité et de rapidité de mise en place.

Une fois la méthode utilisée, les résultats obtenus de même qu'une analyse de type SWOT ont été remis.

8.4.2 Résultats

Les résultats des échantillonnages et des mesures effectuées à Trévarez sont présentés dans les figures suivantes.

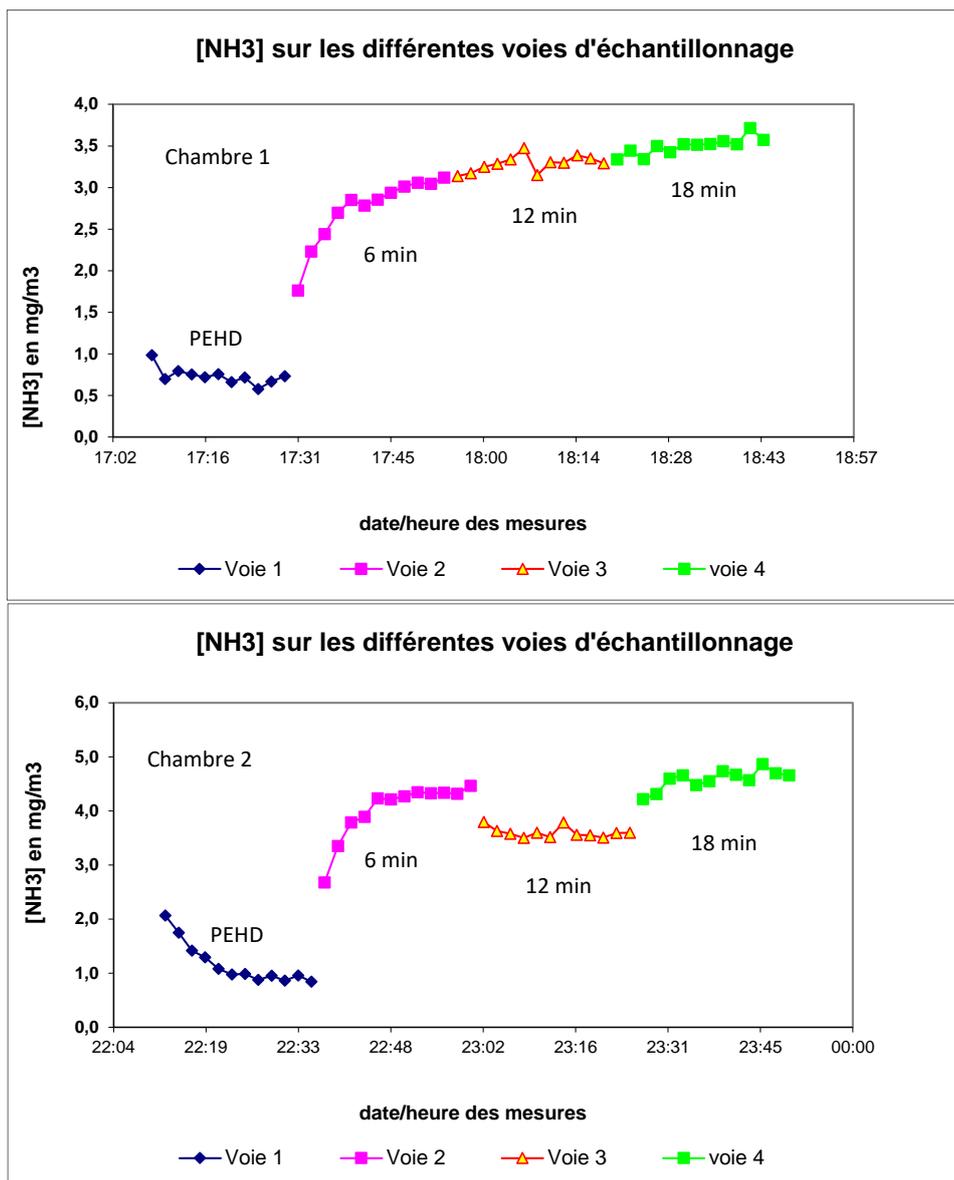


Figure 22 : Evolution des concentrations d'ammoniac mesurées à Trévarez

On constate sur les deux chambres une atténuation de l'émission d' NH_3 très claire en comparaison des évolutions observées à Derval.

En conséquence, nous concluons sur le plan méthodologique que la méthode préconisée est appropriée pour détecter les effets des changements de système de production animale destinés à réduire les émissions d' NH_3 et sur le plan finalisé que le système d'élevage mis en œuvre à Trévarez a pour effet une émission plus faible que le système mis en œuvre à Derval.

8.4.3 Analyse critique de la méthode

La méthode a été évaluée tant sur le plan de sa présentation, c'est-à-dire en ce qui concerne le manuel présentant la méthode et sa mise en œuvre, que sur la méthode elle-même et son déploiement sur le terrain.

8.4.3.1 Guide d'utilisation

Certaines explications supplémentaires se sont avérées nécessaires notamment concernant l'utilisation des logiciels pour la mise en marche et le contrôle des thermo-hygromètres ainsi que pour lancer l'analyseur INNOVA 1412 et les calculs associés pour récupérer et présenter les concentrations mesurées.

Des précisions sont à ajouter dans le protocole de mise en place des chambres de mesures et les étapes à suivre pour garantir un très bon échantillonnage (éviter de « contaminer » les gaz échantillonnés et conserver des températures stables durant les échantillonnages).

Par ailleurs, certaines illustrations proposées manquaient de clarté tant sur le plan des légendes que sur les photographies proposées.

Enfin, il sera nécessaire de compléter la liste des informations à récupérer et d'ajouter des feuilles de notes adaptées dans le guide d'utilisation.

8.4.3.2 Mise en œuvre de la méthode

L'utilisation des solutions de raccordements est à expliquer plus clairement et une proposition est faite de ne garder qu'une seule solution. Les mesures de concentrations d'ions ammonium (NH_4^+) dans le lisier n'est pas une pratique ni courante, ni simple à mettre en œuvre de manière routinière que ce soit pour les fermiers ou pour les conseiller. De plus, faisant ainsi, le protocole est « allégé » et son temps de mise en place écourté.

Pour ce qui est du temps de mise en œuvre de la méthode dans sa globalité, il ressort des commentaires, qu'il serait intéressant de trouver des moyens de le raccourcir. Il ne sera pas possible d'écouter les temps d'échantillonnages puisqu'ils sont dépendant du temps nécessaire pour atteindre le plateau des émissions (environ un quart d'heure par séquence), mais il sera possible de chercher des solutions techniques ainsi que des pratiques associées à la préparation, l'installation et la finalisation (purge des sacs notamment) permettant de réduire le temps global de mise en œuvre de cette méthode.

Cela devra être fait en lien également avec le commentaire mentionnant la difficulté de mener à bien tous ces travaux par une personne seule. Des simplifications d'utilisation sont nécessaires.

Concernant la possibilité de mesurer d'autres gaz que l'ammoniac par cette méthode, la difficulté qui avait été mentionnée concernait le fait que l'analyseur INNOVA 1214 génère des interférences lors des mesures effectuées simultanément sur l'ensemble des gaz qu'il prend en compte (CH_4 , N_2O , CO_2 , NH_3 , CH_3COOH et H_2O). Ces interférences peuvent cependant être corrigées et les concentrations pour l'ensemble des six composés mentionnés ci-avant sont donc accessibles. Les corrections ayant été appliquées.

Il faudra également porter une attention particulière sur deux importantes questions de « fond » posées en fin de note. Elles concernent tout d'abord la représentativité des pratiques étudiées (pour pouvoir faire les échantillonnages certaines dispositions comme l'arrêt momentané du racleur, ont dû être prises) ainsi que son adaptabilité : la méthode est-elle adaptable à tous les types de gestion des déjections tels que les systèmes mixtes et/ou les systèmes fumiers uniquement ?

Il est alors conseiller de multiplier les études dans des conditions différentes afin de développer un corpus de « références précises des émissions d'ammoniac en bâtiment ».

8.5 Action 4 : Diffusion des acquis du projet

Les résultats ont été présentés a plusieurs publics

- par conférences scientifiques
- dans des groupes techniques
- en école d'ingénieur

La situation sanitaire actuelle ainsi que les retards mentionnés précédemment auront cependant freiné les objectifs de diffusions des résultats prévus initialement.

Le projet a fait l'objet d'un stage d'ingénieur. Le rapport est présenté en annexe (Marie-Hermeline Rozé, 2019).

A la suite de ce travail un projet de communication aux Rencontres Recherches Ruminants a été proposé. Ce-dernier est présenté en annexe du rapport de stage de MH Rozé.

La méthode EMISOLBV a également fait l'objet d'une présentation à la conférence internationale du CIGR (5th CIGR International Conference 2021 –May 11-14, Virtual - Integrating Agriculture and Society Through Ingeeneering). Le titre de la présentation étant : « Local measurements of ammonia emissions of soiled soils and spatial extrapolation to the cattle building ». Cette communication est présentée en annexe.

Par ailleurs, pour plus de facilité de diffusion elle a été également traduite en français (diapositives et présentation orale). La traduction écrite est également disponible à la fin de ce rapport, en annexe.

Cette méthode a été présentée au Groupe de Travail Régional Air-Agriculture de la Chambre d'Agriculture Grand Est. Le titre de la communication étant : « Evaluation des émissions en élevage et leviers d'action. (X.Vergé) » (2 juin 2021).

Enfin, la méthode a également été présentée à la Chambre d'Agriculture de Bretagne qui a été impliquée dans l'analyse critique (SWOT) de la méthode.

9. Conclusion

Au vue, de l'importance de la contribution de la gestion des déjections dans les émissions nationales, il est indispensable de mettre au point une méthode permettant de mettre en avant les concepts et les pratiques à faible niveau d'émission en réponse aux objectifs des directives et de s'assurer que ces aménagements ne génèrent pas un transfert de pollution.

Ce projet, qui vise donc à quantifier, en conditions réelles, l'effet de pratiques telles que l'augmentation de la fréquence de raclage d'un bâtiment de vaches laitières et la mise en place de solutions de sol innovantes, représente ainsi une opportunité très intéressante pour les éleveurs et mais aussi les constructeurs afin de déterminer le potentiel d'abattement des différentes solutions techniques.

En effet, alors que la durée de vie moyenne des bâtiments est comprise entre 25 et 30 ans, il est essentiel aujourd'hui de proposer des solutions techniques innovantes qui répondront aux exigences environnementales de demain, notamment en matière d'émissions gazeuses. Il est également important d'organiser le retour d'expérience des innovations mises en place afin d'améliorer les choix d'investissements.

La méthode présentée dans ce rapport a été développée pour répondre à ces attentes. Elle a été pensée pour pouvoir être déployée rapidement en bâtiment d'élevage bovin, de manière relativement simple et abordable par un grand nombre d'utilisateurs formés mais pas nécessairement experts dans le domaine des mesures d'émissions gazeuses.

Les retours de terrain montrent un grand intérêt et le souhait qu'elle puisse être utilisée de manière « routinière » pour développer un corpus de facteurs d'émissions pour l'ensemble des différents systèmes d'élevage et tant pour l'ammoniac que pour les gaz à effet de serre. Il apparaît cependant que des améliorations et simplifications sont à apporter pour y parvenir.

Dans le futur, l'ambition de ce projet est donc mener à bien ces modifications et de déployer la méthode d'EMISOLBV vers des conditions contrastées pour permettre de construire un groupe de facteurs d'émissions de sols de références c'est-à-dire correspondant non seulement aux sols les plus fréquemment rencontrés mais aussi adaptés à des sols/équipements innovants et à des changements de pratiques.

Alors que la filière élevage est souvent placée sous les critiques, ce projet illustre l'implication de la profession agricole pour limiter son impact sur l'environnement et améliorer l'image du métier d'éleveur vis-à-vis de la société.

10. ANNEXES

10.1 Quantification des émissions des sols des bâtiments bovins - Mesure locale de l'émission d'ammoniac d'un sol souillé et extrapolation spatiale au bâtiment bovin (Marie-Hermeline Rozé, 2019)

10.2 Projet de communication

10.3 Guide Méthode EMISOLBV

10.4 Note commentaires des conseillers agricoles

10.5 Communication Conférence CIGR 2021 : « Local measurements of ammonia emissions of soiled soils and spatial extrapolation to the cattle building ». 11-14 May

10.6 Communication Conférence CIGR 2021 : « Développement d'une méthode pour évaluer les émissions d'ammoniac des sols de bâtiments d'élevage bovins ». (traduction française)

Quantification des émissions des sols des bâtiments bovins

Mesure locale de l'émission d'ammoniac d'un sol souillé et
extrapolation spatiale au bâtiment bovin

Marie-Hermeline Rozé

Stage ingénieur avril 2019-août 2019



Encadrants : Paul ROBIN, Youssef FOUAD, Elise LORINQUER

Table des matières

1. Introduction	4
2. Généralités et contexte	4
2.1 Cadre et soutien aux décisions politiques.....	4
2.2 Emissions en bâtiment du cheptel bovin	5
2.3 Méthodes et échelles de mesures	6
3. Partenaires impliqués	7
3.1 Partenaires et fonctions :	7
3.2 Institut de l'Élevage.....	7
3.3 INRAE - UMR SAS Sol Agro et hydrosystème Spatialisation.....	8
3.4 Chambre d'Agriculture des Pays de la Loire - Ferme expérimentale de Derval	8
3.5 Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne, prestataire de l'Institut de l'Élevage	8
3.6 Concept Rolland Développement	8
4. Budget.....	9
4.1 Budget prévisionnel détaillé par action	9
4.2 Tableau récapitulatif par partenaire	10
4.3 Calendrier des travaux : diagramme de Gantt.....	11
5. Objectifs du projet et actions résumées.....	12
5.1 Objectifs	12
5.2 Actions résumées	12
5.2.1 Action 1 : Mise au point d'une méthode de quantification des émissions des sols de bâtiment bovin : EMISOLBV	12
5.2.2 Action 2 : Mise en œuvre de la méthode EMISOLBV - en ferme expérimentale.....	13
5.2.3 Action 3 : Mise en œuvre de la méthode EMISOLBV par des conseillers d'élevage.....	13
5.2.4 Action 4 : Coordination et diffusion des acquis du projet.....	13
5.3 Schéma "Finalités - Actions"	14
6. Difficultés rencontrées.....	15
6.1 Ajustement du budget (10 octobre 2018)	15
6.2 Avenants à la Convention AAP n°18ART1808 EmisolBV du 29/10/2018.....	15
6.3 Remplacement de personnel.....	15
6.3.1 Premier avenant à la Convention AAP n°18ART1808 EmisolBV du 29/10/2018	16
Objet : DEMANDE D'AVENANT A LA CONVENTION AAP n°18ART1808 EmisolBV du 29/10/2018	16
6.3.2 Deuxième avenant à la Convention AAP n°18ART1808 EmisolBV du 29/10/2018.....	17
Objet : DEMANDE D'AVENANT A LA CONVENTION AAP n°18ART1808 EmisolBV du 29/10/2018	17
7. Résultats.....	18
7.1 Synthèse	Erreur ! Signet non défini.

7.2	Action 1 : Mise au point d'une méthode de quantification des émissions des sols de bâtiment bovin - EMISOLBV	18
7.2.1	Travaux prévus et difficultés rencontrées	Erreur ! Signet non défini.
7.2.2	Méthode de mesure des émissions gazeuses sous chambre ventilée	19
7.2.3	Extrapolation des mesures au bâtiment d'élevage	- 29 -
7.3	Action 2 : Mise en œuvre de la méthode EMISOLBV en ferme expérimentale	- 33 -
7.3.1	Test de la méthode EMISOLBV	- 33 -
7.3.2	Influence de la fréquence de raclage sur les émissions gazeuses	- 33 -
7.3.3	Influence du paillage des sols	- 37 -
7.4	Action 3 : Mise en œuvre de la méthode EMISOLBV par des conseillers d'élevage	- 39 -
7.4.1	Objectifs et travaux	- 39 -
7.4.2	Résultats	- 39 -
7.4.3	Analyse critique de la méthode	- 40 -
7.5	Action 4 : Diffusion des acquis du projet	- 42 -
8.	Conclusion	- 43 -
9.	ANNEXES	- 44 -
9.1	Quantification des émissions des sols des bâtiments bovins - Mesure locale de l'émission d'ammoniac d'un sol souillé et extrapolation spatiale au bâtiment bovin (Marie-Hermeline Rozé, 2019)	- 44 -
9.2	Projet de communication	- 44 -
9.3	Guide Méthode EMISOLBV	- 44 -
9.4	Note commentaires des conseillers agricoles	- 44 -
9.5	Communication Conférence CIGR 2021 : « Local measurements of ammonia emissions of soiled soils and spatial extrapolation to the cattle building ». 11-14 May	- 44 -
9.6	Communication Conférence CIGR 2021 : « Développement d'une méthode pour évaluer les émissions d'ammoniac des sols de bâtiments d'élevage bovins ». (traduction française)	- 44 -
1	L'élevage de ruminants français : diversité et ancrage territorial	1
2	Contexte et positionnement du projet	1
2.1	Contexte environnemental et enjeux économiques et sociétaux	2
2.1.1	Prise de conscience du problème environnemental avec des conséquences sur la santé et l'économie	2
2.1.2	Action des politiques avec mise en place du cadre réglementaire	3
2.2	Positionnement du projet	4
2.3	Programme scientifique et technique, organisation du projet	4
2.3.1	Structuration du projet : description des différentes actions	4
2.3.2	Management du projet : partenaires engagés et description des organismes d'accueil	4
2.4	Positionnement du stage dans le projet et objectifs	5
2.4.1	Objectifs du stage	5
2.4.2	Livrables du stage	5

2.4.3	Questions scientifiques du stage.....	5
3	Synthèse bibliographique	5
3.1	Les effluents bovins : caractéristiques	5
3.1.1	Composition des effluents.....	5
3.1.2	pH des effluents.....	6
3.2	Mécanismes d'émission d'ammoniac et équilibres chimiques	6
3.2.1	Uréolyse et adsorption	7
3.2.2	Equilibre acido-basique : dissociation	7
3.2.3	Volatilisation : loi de Henry	9
3.2.4	Diffusion par transfert de masse	9
3.3	Emissions gazeuses et bâtiments : facteurs influençant les émissions d'ammoniac	9
3.3.1	Facteurs climatiques.....	9
3.3.2	Pratiques de l'éleveur.....	10
3.4	Méthodes de mesure des émissions gazeuses en élevage.....	11
3.5	Utilisation de la SPIR en élevage	12
3.5.1	La SPIR : méthode analytique pour caractériser les effluents d'élevage	12
3.5.2	Spectres connus de certains composés caractéristiques des lisiers	12
4	Matériel et méthodes	13
4.1	Démarche expérimentale.....	13
4.2	Mise au point d'une gamme de solution de raccordement	13
4.2.1	Calcul des concentrations initiales	14
4.2.2	Calcul du pH des solutions initiales	15
4.2.3	Réactions dans le mélange	15
4.3	Méthode de mesure des chambres statiques ventilées	15
4.3.1	Calcul des émissions théoriques.....	15
4.3.2	Etude de l'influence de différents paramètres sur les émissions	16
4.4	Méthode de mesure SPIR.....	18
4.4.1	Présentation de l'appareil utilisé.....	18
4.4.2	Présentation des mesures réalisées.....	18
4.4.3	Traitements chimométriques appliqués	19
4.5	Déploiement de la méthode en élevage.....	19
5	Résultats.....	21
5.1	Gamme de solutions de raccordement.....	21
5.2	Concentrations en gaz mesurées dans la chambre	21
5.2.1	Concentrations en ammoniac calculées selon différents modèles.....	21
5.2.2	Comparaison des cinétiques de concentrations observées en fonctions de différents paramètres	

5.3	Mesures laboratoires SPIR	23
5.3.1	Spectres obtenus	23
5.3.2	Modèles de prédiction du pH et de $[NH_4^+]$	25
5.4	Mesures en élevage	26
5.4.1	Résultats méthode chambre	26
5.4.2	Résultats SPIR	26
6	Discussion	28
6.1	Calcul des concentrations dans la chambre.....	28
6.2	Méthode chambre	28
6.2.1	Conditions de validité de la méthode chambre	28
6.2.2	Paramètres influençant les valeurs de concentration dans la chambre.....	28
6.2.3	Validation sur le terrain de certaines hypothèses.....	29
6.3	Modèle de prédiction SPIR du pH et de $[NH_4^+]$	29
6.4	Intérêt de la SPIR en élevage.....	29
6.5	Protocole chambre à déployer en élevage	30
7	Conclusion et perspectives	30
7.1	Protocole complet à déployer en élevage	30
7.2	Valorisation du protocole à l'issue du projet.....	30
8	Bibliographie	31
	ANNEXES.....	33
	Annexe 1 Données physico-chimiques des composés des solutions de raccordement (Rumble et al., 2019).....	34
	Annexe 2 La spectrométrie proche infrarouge (SPIR).....	35
	Principe général	35
	Transmission, absorption, loi de Beer-Lambert	35
	Réflexion diffuse et réflexion spéculaire	35
	La chimiométrie : outil pour le traitement des données spectrales.....	35
	Annexe 3 Schéma bilan des méthodes mises en œuvre durant le stage.....	37
	Annexe 4 Protocole d'élaboration de la gamme de solutions de raccordement.....	38
	Matériel.....	38
	Solution basique.....	38
	Solution ammoniacale.....	38
	Solutions de raccordement	38
	Annexe 5 Bilan des tests avec chambre ½ statique ventilée à la halle expérimentale PSN	39
	Annexe 6 Tests SPIR sur solutions de raccordement à la halle expérimentale.....	40
	Fond noir et fond blanc.....	40
	Silice	41
	Traitements chimiométriques : équation de prédiction SNV et MSC du pH.....	47

Annexe 7	Tests laboratoires SPIR sur lisier et fumier.....	48
Annexe 8	Compte-rendu journée du 11/07 Derval.....	49
	Protocole.....	49
	Résultats méthode chambres.....	50
	Observations.....	56
Annexe 9	Compte-rendu journée du 17/07 Derval.....	57
	Protocole.....	57
	Résultats méthode chambres.....	58
	Observations.....	68
Annexe 10	Résultats transects Derval, 11/07/19.....	69
	ACP et cluster issus des transects.....	75
	Photos correspondant aux transects et répartition dans les différentes classes.....	77
Annexe 11	Protocole choix de la solution de raccordement à utiliser en élevage.....	80
Annexe 12	Dispositif chambre à déployer selon l'objectif de la mesure.....	81
Annexe 13	Protocole méthode simplifiée et questionnaire élèves.....	83
Annexe 14	Projet de communication aux Rencontres Recherches Ruminants.....	92

Liste des figures

Figure 1: présence de l'élevage herbivore sur le territoire français, source Agreste, recensement agricole 2010, traitement Idele	1
Figure 2: diversité des modes de logement des bovins	1
Figure 3: Diversité des races présentes sur le territoire français.....	1
Figure 4: : Emission ammoniacale en élevage bovin, source CITEPA, moyenne des inventaires 1990-2016, traitement Idele	2
Figure 5: Emission ammoniacale par secteur en France, source CITEPA 2017, traitement Idele.....	2
Figure 6: Cadre réglementaire sur la qualité de l'air (Lorinquer, 2016).....	3
Figure 7 : modèle mécaniste du dégagement d'ammoniac par le lisier	6
Figure 8: mécanismes émission ammoniac.....	6
Figure 9: développer des méthodes adaptées à l'utilisation des mesures, (SPACE, 2013)	11
Figure 10: Démarche expérimentale déployée au cours du stage.....	13
Figure 11: préparation des solutions de raccordement.....	14
Figure 12 : dispositif de mesure déployé à la halle expérimentale pour la mesure des émissions.....	17
Figure 13 : Zoom sur l'intérieur de la chambre ½ statique ventilée	17
Figure 14 : Spectromètre LabSpec ASD déployé, PC pour récupération des données et spectralon	18
Figure 16 : illustration du SPIR à la halle expérimentale.....	19
Figure 15: logiciel R^3-acquisition des spectres de réflectance.....	19
Figure 17 : Vue d'ensemble de la ferme expérimentale de Derval et du bâtiment vaches laitières.....	19
Figure 19: acquisition des transects SPIR en bâtiment	20
Figure 18: dispositif chambre déployé en bâtiment	20
Figure 20: concentrations en ammoniac observées et calculées à partir de différentes corrections de Ka.....	22
Figure 21: Concentration de la solution 12 au cours du temps (ventilateur 22V, 20/06 (tests 11a, 10a, 3a, 17 et 11b))	22
Figure 22: Concentration de la solution 3 au cours du temps (ventilateur 12V, prélèvement pompe C2 (tests 1 et 2))	22
Figure 23: plaque noire, ventilateur 22V (tests 3a, 7 et 14a).....	23
Figure 24: plaque noire, ventilateur 22V, prélèvement pompe C2 (tests 4, 12 et 15)	23
Figure 25: spectre des solutions de raccordement et de l'eau sans cache noir	24
Figure 26: spectres des solutions de raccordement avec cache noir	24
Figure 27: spectre solution 3 avec et sans cache	24
Figure 28: évolution des concentrations en NH ₃ dans la chambre/sol après raclage	26
Figure 29: évolution des concentrations en NH ₃ dans la chambre/sol avant raclage	26
Figure 30: évolution des concentrations en NH ₃ dans la chambre/ plaque PEHD avec solution n°11 avant raclage	26
Figure 31: évolution des concentrations en NH ₃ dans la chambre/sol avec solution 11 avant raclage	26
Figure 32: spectres moyens couloirs alimentation et logettes	27
Figure 33: ACP couloirs alimentation et logette	27

Liste des tableaux

Tableau 1: résultats d'analyses azote ammoniacal effluents prélevés dans les 6 à 12 heures après défécation, source personnelle, Lorinquer, Idele 2017	6
Tableau 2: composition du lisier bovin avant épandage, source Idele (Capdeville et al., 2015; Bodet et al., 2001; Decoopman, 2006	6
Tableau 3: débit d'air et émission ammoniacale (Dollé et al., 1998)	10
Tableau 4: concentration et flux d'ammoniac moyen par vache laitière en période hivernale dans des conditions standards pour différents modes de logement (Dollé, Capdeville, 2000)	10
Tableau 5: excrétion d'azote par catégorie de bovin (Lilong et al., 2014)	11
Tableau 6: tableau d'avancement de la réaction prépondérante.....	15
Tableau 7 : résultats de mesure des pH expérimentaux des solutions de raccordement	21
Tableau 8: transformations SNV et MSC sur les spectres des solutions de raccordement acquis avec cache noir	25

1 L'élevage de ruminants français : diversité et ancrage territorial

L'élevage bovin fait partie intégrante du paysage français (Figure 19) puisqu'il est présent dans plus de 40% des exploitations agricoles françaises (SPIE-BDNI Traitement Idele 2018). C'est un secteur créateur d'emplois avec près de 421 000 postes (GIS Elevage Demain, 2015) et qui présente une forte diversité en terme de systèmes d'élevage.

CHEPTELS HERBIVORES : RÉPARTITION ET ÉVOLUTION

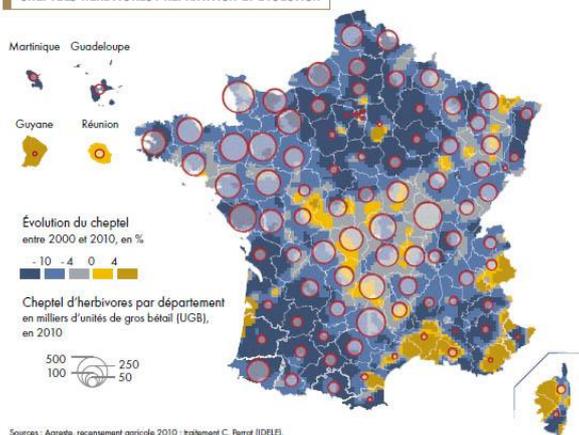


Figure 23: présence de l'élevage herbivore sur l territoire français, source Agreste, recensement agricole 2010, traitement Idele



Figure 25: Diversité des race: présent sur le territoire

En effet, les systèmes d'élevage français se distinguent par une grande diversité répondant à un contexte pédoclimatique varié contrairement aux systèmes d'Europe du Nord (Pays Bas, Suède, Norvège...) qui ont des élevages plus standardisés. Ils se caractérisent par la spécialisation ou non du système agricole, par le type de production (laitière et/ou allaitante), les races (Figure 21), les pratiques d'élevage (modes de logement, alimentation...) (Figure 20). L'observatoire de l'alimentation des vaches laitières (2015) dénombre plus de 30 classes de systèmes laitiers sans prendre en considération le mode de logement.



(A) logettes lisier sans apports de litières avec aire caillebotis (B) logettes lisier matelas + sciure avec aire caillebotis (C) logettes fumier avec aire raclée lisier (D) 100% aire paillée

Figure 24: diversité des modes de logement des bovins

Il existe de fortes interactions entre élevage bovin et environnement : les ateliers « végétal » et « animal » sont étroitement liés. L'atelier « végétal » fournit les fourrages et une partie non négligeable des aliments concentrés ingérés et les déjections issues de l'atelier « animal » sont valorisées directement lors du pâturage ou par épandage sur les parcelles cultivées. L'alimentation des bovins est ainsi très liée à la zone, au système de production et à la surface fourragère principale (SFP), contribuant à la diversité des systèmes d'élevage. L'autonomie massive en fourrage des élevages bovins est estimée à 88% pour la France (source : CIV, Alimentation des bovins : rations moyennes et niveaux d'autonomie alimentaire, 2012). Sur l'ensemble des élevages bovins français, plus de 60% des apports azotés sur les surfaces exploitées sont de nature organique et proviennent de l'exploitation elle-même (Foray et al., 2018).

Le métier d'éleveur rassemble ainsi plusieurs objectifs à savoir la production d'aliments pour les animaux selon la géolocalisation, l'élevage d'animaux pour produire une alimentation humaine (différents produits : lait/viande) et l'entretien des paysages et des terres agricoles tout en respectant l'environnement.

2 Contexte et positionnement du projet

Si l'élevage bovin contribue au maintien de la biodiversité floristique et faunistique avec une présence en pâturage de 13 des 20 espèces de bourdons présentes en France, la valorisation de surfaces peu accessibles, le maintien et la valorisation du paysage, il prend part aux émissions de certains polluants atmosphériques dont les impacts sur l'environnement constituent une préoccupation mondiale croissante.

Bien que les émissions de GES pour le secteur bovin aient diminué de 11% entre 1990 et 2010, les émissions d'ammoniac de 7% entre 1990 et 2015 et que l'utilisation d'engrais minéral ait été réduite de 30% entre 1990 et 2010, le secteur agricole reste particulièrement concerné par les enjeux environnementaux (Foray et al., 2018).

2.1 Contexte environnemental et enjeux économiques et sociétaux

2.1.1 Prise de conscience du problème environnemental avec des conséquences sur la santé et l'économie

Les émissions gazeuses sont amplifiées par l'intensification des productions animales. Il y a disproportion entre les besoins de recyclage des coproduits de l'élevage, en particulier les déjections animales, et la capacité du milieu environnant à absorber les nutriments ce qui induit un accroissement des émissions de gaz vers l'atmosphère (Hassouna et al., 2015). Ainsi, l'élevage bovin est à l'origine d'importantes émissions puisqu'en France, l'agriculture représente 17,4% des émissions de GES et 42% des émissions d'ammoniac (Figure 23) (Foray et al., 2018).

Il est intéressant de mesurer les émissions en élevage pour maîtriser les flux environnementaux, répondre aux engagements internationaux (voir 2.1.2) et identifier les systèmes les moins émetteurs (Lorinquer, 2013).

Sur l'exploitation, on peut distinguer différents postes d'émissions : bâtiment, stockage, épandage et pâturage. La chaîne de gestion des effluents (bâtiment + stockage + épandage) représente les ¾ des émissions (Figure 22).

Ce projet concernera particulièrement les émissions ammoniacales qui représentent un enjeu de santé publique, environnemental et économique. L'ammoniac est un gaz précurseur de particules dont la pollution atmosphérique résultante est responsable de 48 000 décès prématurés par an ainsi que de l'eutrophisation et de l'acidification des milieux (ADEME, 2018). Le poste bâtiment explique à lui seul 27% des émissions ammoniacales en élevage bovin (Figure 22). En tant que principal poste d'émission et premier lieu de transit des déjections, on comprend alors l'intérêt de réaliser des mesures bâtiment d'autant plus que les références internationales actuelles ne sont pas suffisamment représentatives des pratiques et des conditions pédoclimatiques françaises.

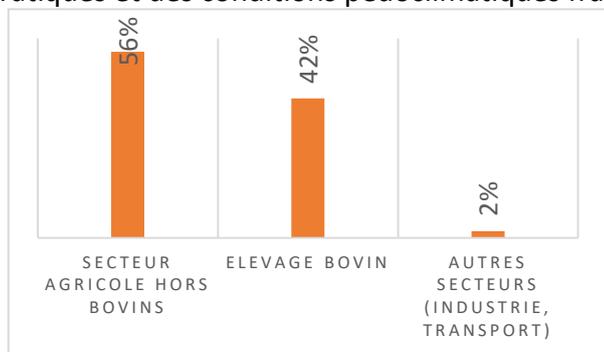


Figure 27: Emission ammoniacale par secteur en France, source CITEPA 2017, traitement Idel

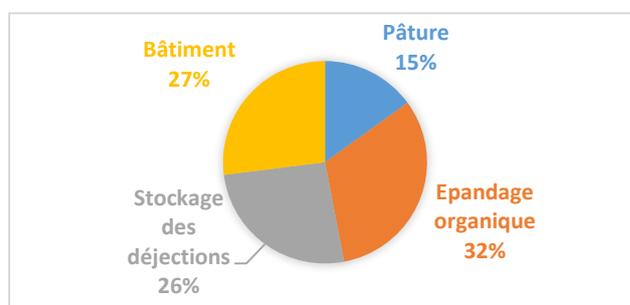


Figure 26: Emission ammoniacale en élevage bovin, source CITEPA, moyenne des inventaires 1990-2016, traitement Idel

Outre

le fait que le NH₃ soit précurseur de particules, à haute concentration il peut être nocif pour l'animal et pour l'homme (augmentation de la fréquence respiratoire, perturbation du fonctionnement du tapis muco-ciliaire des bronches). L'ammoniac est détectable par l'odeur entre 5 et 50 ppm, irritant au niveau des surfaces muco-pulmonaires à 100-150 ppm et provoque de sévères irritations au niveau des yeux, toux et salivements à 2000-3000 ppm.

L'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité) définit deux valeurs admises pour les concentrations de certaines substances sur les lieux de travail :

- VME² admise dans le temps : 25 ppm pour l'ammoniac

² Valeur Moyenne d'Exposition

- VLE³ pour une durée max de 15 minutes : 50 ppm pour l'ammoniac

Les conséquences des émissions ammoniacales sont aussi d'ordre économique : baisse des rendements, acidification des sols, forêts décimées, coût de la prise en charge des problèmes sanitaires. La Commission d'enquête sur le coût économique et financier de la pollution de l'air du Sénat estime que le coût total de la pollution de l'air s'établit entre 68 et 97 milliards d'euros par an pour la France, dont une très large part est liée aux impacts sanitaires (Qualité de l'air : Sources de pollution et effets sur la santé, 2018).

2.1.2 Action des politiques avec mise en place du cadre réglementaire

Face au problème de qualité de l'air et des enjeux d'acidification grandissants, les politiques se sont engagés à réduire les émissions de polluants atmosphériques. Ainsi des réglementations ont vu le jour dès 1979 avec notamment la convention de Genève. Depuis cette logique de réduction s'est déclinée à différentes échelles, la Figure 28 résume les différentes déclinaisons.

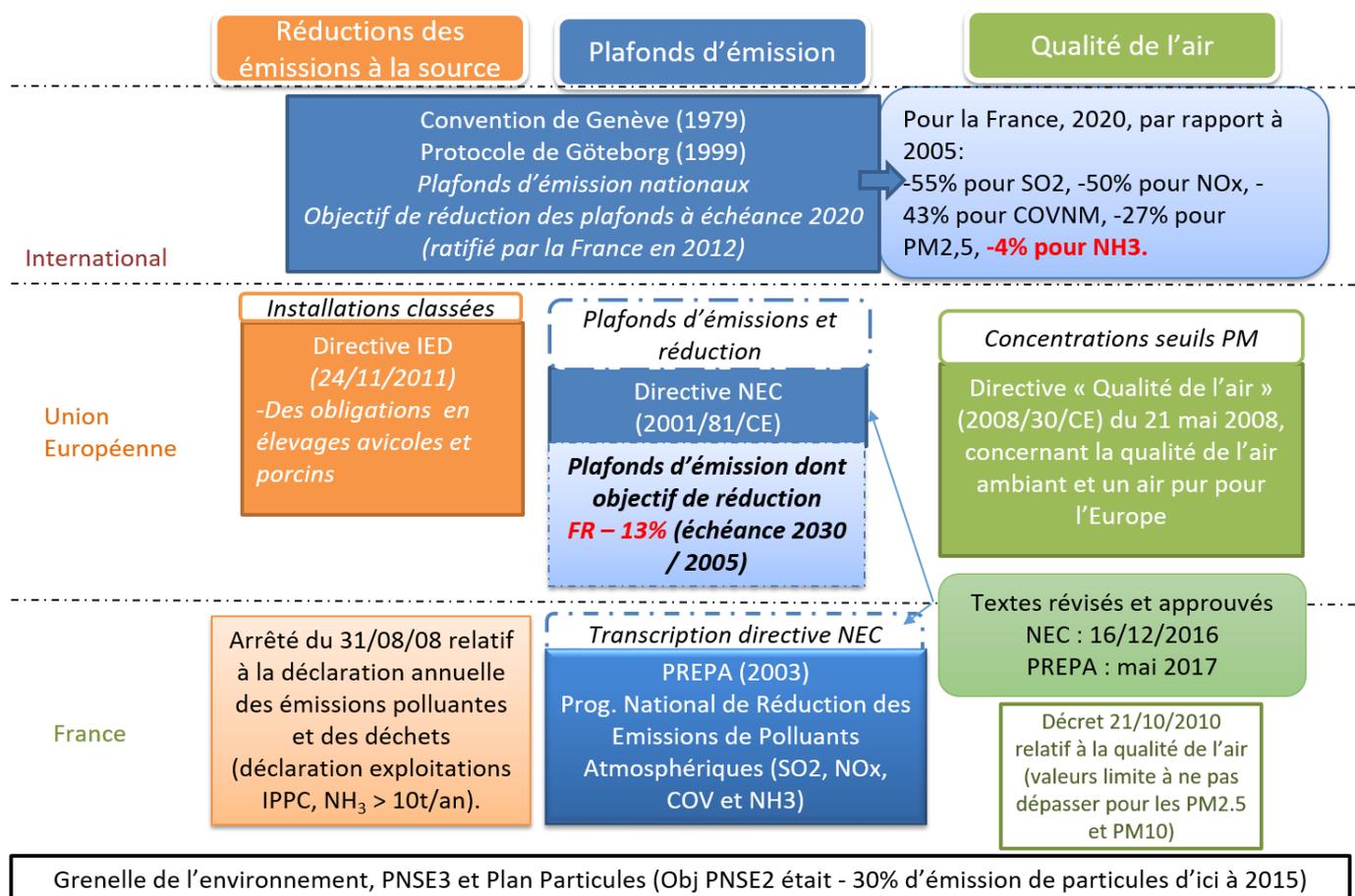


Figure 28: Cadre réglementaire sur la qualité de l'air (Lorinquer, 2016)

A l'échelle de l'Union Européenne (UE), la directive NEC (National Emission Ceiling) fixe des plafonds d'émission et des objectifs de réduction de polluants de l'air pour chaque Etat Membre à l'horizon 2030. L'objectif de réduction en 2030 pour l'ammoniac est de -19% et -13% respectivement pour l'ensemble des Etats Membres et la France par rapport aux émissions de 2005.

La directive NEC se décline au niveau français via le PREPA (Plan de Réduction des Emissions de Polluants Atmosphériques). C'est un engagement collectif pour améliorer la qualité de l'air et la santé des Français. Les actions menées pour suivre ce plan concernent l'agriculture avec un objectif de réduction des émissions d'NH₃ : engrais moins émissifs, enfouissement des effluents d'élevage... Les résultats attendus sont les suivants : forte limitation des dépassements des valeurs limites dans l'air, atteinte des objectifs de

³ Valeur Limite d'Exposition

réduction des émissions à 2020 et 2030, diminution du nombre de décès prématurés d'environ 11200 cas/an à l'horizon 2030.

2.2 Positionnement du projet

Le projet CASDAR EMISOLBV s'inscrit dans la continuité du projet CASDAR SOLVL (2014) qui a comparé différents types de sols présents sur le terrain pour pouvoir évaluer par la suite des solutions innovantes, plus respectueuses de l'environnement.

Le projet EMAFUM, EMISSIONS d'Ammoniac et de gaz à effet de serre des FUMIERS bovin, fut également initiateur du présent projet. Il visait la mise au point d'une méthode de mesure simplifiée des fumiers bovins au stockage pour pouvoir acquérir des valeurs de référence relatives aux cinétiques d'émissions. Le projet actuel est donc le CASDAR EMISOL BV : lancé en octobre 2018, il a pour ambition la mise en place d'une méthode de quantification standardisée des émissions de NH₃ et de GES des sols de bâtiments bovins.

En lien avec les nouveaux objectifs de réduction (2.1.2), il est indispensable de pouvoir quantifier l'effet des pratiques sur la réduction d'émissions. En effet, cela permettrait de juger de la nécessité d'un investissement matériel (équipement de raclage, type de sol) et serait ainsi bénéfique d'un point de vue économique tout en apportant de la crédibilité aux politiques publiques. La méthode à déployer se veut facile et rapide à mettre en place par une personne seule pour permettre de recueillir un maximum de références bâtiment en peu de temps.

2.3 Programme scientifique et technique, organisation du projet

2.3.1 Structuration du projet : description des différentes actions

Le projet EMISOL BV se décline en 4 actions, les 3 premières étant des actions techniques pour la validation scientifique de la méthode, la deuxième correspondant à sa mise en œuvre en conditions de ferme expérimentale et la dernière le transfert à des conseillers pour déploiement en ferme commerciale. L'action 4 regroupe la coordination et la diffusion des résultats du projet.

- Action 1 : Mise au point d'une méthode de quantification des émissions des sols de bâtiment bovin: EMISOLBV
- Action 2 : Mise en œuvre de la méthode EMISOLBV en ferme expérimentale
- Action 3 : Mise en œuvre de la méthode EMISOLBV par des conseillers d'élevage
- Action 4 : Coordination et diffusion des acquis du projet
-

2.3.2 Management du projet : partenaires engagés et description des organismes d'accueil

Plusieurs partenaires sont impliqués dans le projet : l'IDEELE est le chef de file, l'INRA UMR SAS ainsi que AgroCampusOuest sont les partenaires scientifiques et la Chambre Régionale d'Agriculture des Pays de Loire avec la ferme expérimentale de Derval en est le partenaire technique.

IDEELE

La vocation de l'Institut de l'Élevage est d'améliorer la compétitivité des élevages herbivores et de leurs filières, tout en apportant des éléments de réponse aux questions sociétales.

En tant qu'organisme de recherche-développement, l'institut de l'Élevage est à l'interface entre la recherche fondamentale et le conseil.

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

[Premier](#) institut de recherche agronomique en Europe, deuxième en sciences agricoles dans le monde, l'Inra mène [des recherches au service](#) d'enjeux de société majeurs. 17 centres de recherche régionaux, 13 départements scientifiques.

UMR SAS : Unité Mixte de Recherche Sol Agro et hydrosystème Spatialisation

C'est une unité de recherche regroupant l'INRA et AgroCampusOuest (Institut national supérieur des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticolaes et du paysage). Les recherches de l'UMR s'organisent en deux axes thématiques:

- Axe AGILE : Accompagner la transition agro écologique des systèmes et territoires d'élevage avec pour objectif la production de diverses ressources – connaissances, références, outils
- Axe Processus : cycles et flux des éléments chimiques dans les agroécosystèmes abordant les questions de compréhension et modélisation des processus gouvernant le cycle de l'eau et des éléments chimiques (émission, stockage, recyclage), et leurs interactions dans différents agrosystèmes

2.4 Positionnement du stage dans le projet et objectifs

Le stage s'inscrit dans les actions 1 et 2 du projet EMISOL BV de mise au point de la méthode.

2.4.1 Objectifs du stage

Il avait pour objectifs spécifiques :

- la mise au point et la validation du modèle de mesure par chambre ;
- l'exploration du potentiel de la SPIR pour faciliter les mesures d'émission en bâtiment bovin.

2.4.2 Livrables du stage

Le principal livrable du stage était la proposition d'un protocole à déployer en élevage permettant d'obtenir une valeur d'émission ammoniacale à l'échelle du bâtiment avec comme corollaire la possibilité d'utiliser les mesures pour comparer les émissions de différents bâtiments ou pour évaluer l'efficacité d'une technique de réduction des émissions d'ammoniac (par exemple avant / après raclage des déjections).

2.4.3 Questions scientifiques du stage

Les questions scientifiques étudiées spécifiquement au cours du stage étaient :

- Comment déduire l'émission d'ammoniac à partir de l'évolution des concentrations en NH_3 mesurées sous la chambre ?
- Quel protocole minimal mettre en place pour obtenir des résultats fiables ?
- La SPIR peut-elle être utilisée pour étudier l'hétérogénéité des déjections au sein du bâtiment ?
- Comment associer les observations faites avec la (les) chambre (s) et la SPIR ?

3 Synthèse bibliographique

3.1 Les effluents bovins : caractéristiques

De par la disparité des systèmes d'élevage, l'alimentation, le type de bâtiment et les pratiques de l'éleveur, la diversité des effluents produits par les bovins est décuplée. On distingue fumier et lisier, l'un produisant de l'engrais de ferme solide et l'autre liquide. Il est important de connaître la qualité de l'effluent pour pouvoir assurer l'équilibre de la fertilisation en apportant la bonne dose au bon moment.

3.1.1 Composition des effluents

Trois grands groupes de facteurs ont une incidence sur le type de déjection à la sortie du bâtiment : le mode de logement, le paillage et le type d'animal ainsi que la teneur en matière sèche de l'alimentation.

Ainsi, pour un lisier bovin en système couvert $\text{MS}^4 = 111$ et $\text{MO}^5 = 89$ et $\text{NTK}^6 = 4$ alors qu'en système non couvert $\text{MS} = 51$, $\text{MO} = 41$ et $\text{NTK} = 1,6$ (source Idele, ITP).

⁴ Matière sèche

⁵ Matière organique

⁶ Azote organique + azote ammoniacal = azote total obtenu par la méthode Kjeldhal et l'abréviation est NTK

Echantillon	% MS	sur brut (g (N)/kg d'effluent)	sur sec (g (N)/kg d'effluent)	NH ₄ ⁺ /N (%)
n°1	11,3	1,2	10,6	0,33
n°2	11,4	1,65	14,5	0,41
n°3	10,6	1,05	9,9	0,3
n°4	10,4	1,31	12,6	0,34

Tableau 1: résultats d'analyses azote ammoniacal effluents prélevés dans les 6 à 12 heures après défécation, source personnelle, Lorinquer, Idele 2017

MS	MO	Azote	N-NH ₄ ⁺	Densité
kg MS/tonne brut	kg MO/tonne brut	Kg N/tonne brut	% N total	Kg brut/m ³
30-110	30-90	1,5-5	0,4	1000-1050

Tableau 2: composition du lisier bovin avant épandage, source Idele (Capdeville et al., 2015; Bodet et al., 2001; Decoopman, 2006

Pour une tonne de lisier brut, la teneur en azote varie de 1,05 à 5 kg avec un pourcentage moyen d'azote ammoniacal compris entre 0,3 et 0,4%.

3.1.2 pH des effluents

D'après les publications (Rotz et al., 2014) (Snoek et al., 2017) (Rumburg et al., 2007) et (Somme, 2013), le pH du fumier et du lisier varie de 7 à 9,3 et le pH de l'urine de 7 à 8,5.

Remarque : dans l'article (Rotz et al., 2014), une valeur de pH de 7 correspond à un effluent ne contenant pas de solide tandis qu'une valeur de 8,5 correspond à un effluent contenant beaucoup de matières solides.

3.2 Mécanismes d'émission d'ammoniac et équilibres chimiques

Cette partie rappelle les mécanismes connus sur les processus de production du NH₃, qui permettront ensuite d'introduire les paramètres clés des variations d'émissions, en relation avec les observations de terrain. La production de NH₃ est le résultat de trois processus successifs que sont l'uréolyse, la dissociation et la volatilisation. Les phénomènes physiques et chimiques régissant ces mécanismes sont l'adsorption, l'équilibre acido-basique, l'équilibre de Henry et la diffusion. La Figure 25 schématise les mécanismes ayant lieu pour l'ammoniac dans les déjections. Ils sont simplifiés Figure 26.

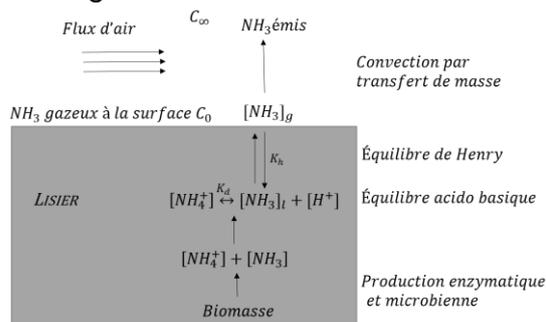


Figure 29 : modèle mécaniste du dégagement d'ammoniac par le lisier

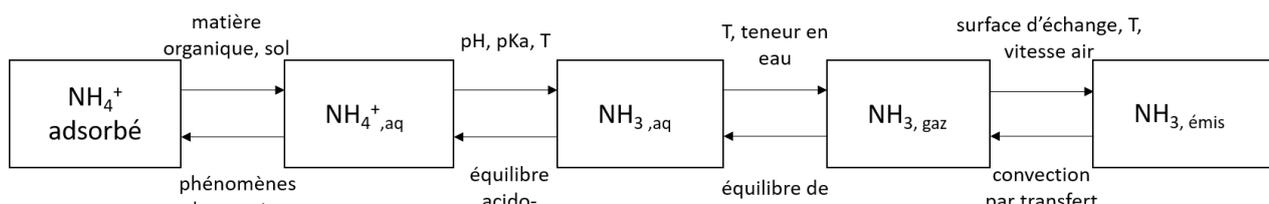


Figure 30: mécanismes émission ammoniac

3.2.1 Uréolyse et adsorption

L'uréolyse aboutit à la formation de NH_4^+ : c'est l'hydrolyse de l'urée présente dans les urines par l'uréase qui est une enzyme présente dans les fèces.



L'activité de l'uréase peut être influencée par la température, le pH, la concentration en uréase et la teneur en eau des effluents (Vigan et al., 2018).

Phénomènes d'adsorption dans les déjections

Tout l'azote ammoniacal présent dans les déjections n'est pas sous forme d'ion ammonium ou ammoniacal dissous. Une partie de l'azote ammoniacal est adsorbée sur la matière organique des effluents (Waldrip et al., 2012). Ces phénomènes de sorption de NH_4^+ et de NH_3 par les solides minéraux et organiques réduisent la proportion d'azote libre en solution aqueuse et donc le potentiel de volatilisation. Les isothermes de Langmuir ou de Freundlich peuvent être utilisés pour représenter ce phénomène. Waldrip et al. (2012) considèrent que les isothermes de Freundlich permettent un calage plus précis sur leurs observations que ceux de Langmuir. Les isothermes de Freundlich présentent l'inconvénient de ne pas avoir de maximum. Nous avons donc privilégié la représentation de Langmuir en définissant la valeur maximale d'ammoniac adsorbé en fonction de la température à partir des observations de (Waldrip et al., 2012).

3.2.2 Equilibre acido-basique : dissociation

En phase liquide, l'azote ammoniacal total (TAN) est en équilibre acido-basique entre les formes ionisée (NH_4^+) et non-ionisée (NH_3) : $\text{NH}_4^+_{\text{aq}} \leftrightarrow \text{NH}_3_{\text{aq}} + \text{H}^+$

• Solution idéale

Toutes les valeurs de constantes de dissociation sont dépendantes de la température mais aussi des concentrations en solutés puisque la formation d'ions complexes en solution empêche les ions et molécules d'intervenir dans les réactions d'équilibre thermodynamique. Ainsi, ce sont les activités des solutés qui interviennent dans l'expression des constantes d'équilibre (IAEA, 2008). Pour l'acide carbonique,

$$K_1 = \frac{\gamma_{\text{H}^+} [\text{H}^+] \gamma_{\text{HCO}_3^-} [\text{HCO}_3^-]}{\gamma_{\text{H}_2\text{CO}_3} [\text{H}_2\text{CO}_3]}$$
$$K_2 = \frac{\gamma_{\text{H}^+} [\text{H}^+] \gamma_{\text{CO}_3^{2-}} [\text{CO}_3^{2-}]}{\gamma_{\text{HCO}_3^-} [\text{HCO}_3^-]}$$

où les coefficients d'activité γ sont inférieurs à 1.

Si la solution est suffisamment diluée, l'activité des espèces peut être remplacée par leur concentration et les coefficients d'activité valent 1. C'est le cas des solutions idéales où la concentration en soluté ou la force ionique peuvent être considérées comme nulles.

La littérature donne différentes expressions des constantes d'équilibres pour les espèces chimiques auxquelles nous allons nous intéresser : CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-} , NH_4^+ , NH_3 , H_2SO_4 , HSO_4^- , SO_4^{2-} , HO^- et H^+ .

Quelques propriétés physiques de ces espèces et récapitulatif des valeurs des masses molaires (Annexe 1).

Dans les solutions idéales, les valeurs des constantes d'équilibre dépendent toujours de la température.

Dans (IAEA, 2008) on trouve les expressions suivantes :

$$pK_{\text{eau}} = -948,876 + \frac{24746,26}{T} + 405,8639 \times \log_{10}(T) - 0,48796 \times T + 0,0002371 \times T^2$$
$$pKa(\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-) = \frac{3404,71}{T} + 0,032786 \times T - 14,8435$$
$$pKa(\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}) = \frac{2902,39}{T} + 0,02379 \times T - 6,4980$$

et $pKa(\text{NH}_4^+/\text{NH}_3) = \frac{2729,92}{T} + 0,09018$ dans (Ni, 1999)

- *Solution non idéale*

CORRECTION DE L'ÉCHANGE LIQUIDE-GAZ PAR L'ACTIVITE

Dans les solutions non idéales, les coefficients d'activité interviennent dans le calcul des équilibres.

La valeur du coefficient d'activité γ_i peut être calculée pour divers gaz en fonction de la composition ionique du milieu liquide. L'équation suivante permet d'accéder au coefficient d'activité γ_i dans une solution aqueuse contenant les ions j à la concentration C_j .

$$\log \gamma_i = \sum_{j=1}^n (h_j + h_i) C_j \quad (j \neq i)$$

h_i est le terme de contribution du gaz i et h_j est celle de l'ion j . Ces valeurs sont répertoriées dans un tableau dans l'ouvrage (Roustan, 2003).

Pour prendre en compte l'écart à l'idéalité d'une solution, on peut aussi corriger les constantes d'équilibre à l'aide de la force ionique (exprimée en mol/L) ou de la salinité.

CORRECTION KA PAR LA FORCE IONIQUE (Suez, 2019)

Dans le modèle Degrémont, tous les pKa sont corrigés en fonction de la force ionique du milieu.

La force ionique s'exprime par $\mu = \frac{1}{2} \sum C_i v_i^2$ avec c_i et v_i définissant respectivement les concentrations et les valences des différents ions.

On définit ensuite le terme $\varepsilon = \frac{\sqrt{\mu}}{1+1,4\sqrt{\mu}}$ pour apporter une correction de force ionique aux différents pKa.

Ainsi,

$$\begin{aligned} pKa'(CO_2/HCO_3^-) &= pKa(CO_2/HCO_3^-) - \varepsilon \\ pKa'(HCO_3^-/CO_3^{2-}) &= pKa(HCO_3^-/CO_3^{2-}) - 2\varepsilon \\ pK'_{eau} &= pK_{eau} - \varepsilon \\ pKa'(NH_4^+/NH_3) &= pKa(NH_4^+/NH_3) - \varepsilon \end{aligned}$$

CORRECTION KA PAR LA SALINITE

Afin d'obtenir les valeurs de Ka' réelles, les valeurs de Ka peuvent être corrigées avec l'aide de la théorie de Debye-Hückel, applicable pour des eaux de faibles concentrations. Le traitement de solutions non idéales est illustré ici en considérant des eaux douces avec des concentrations en sels dissous inférieures à environ 400 mg/L. La mesure de la concentration en sels correspond à la force ionique (I) de l'eau. Elle peut être approchée par: $I \cong 2,5 \times 10^{-5} S$ où S est la concentration en sels en mg/L.

Valeurs des pKa pour l'eau de mer (corrige uniquement les valeurs de Ka pour l'acide carbonique) :

$$\begin{aligned} pKa'(CO_2/HCO_3^-) &= \frac{3670,7}{T} - 62,008 + 9,7944 \times \ln(T) - 0,0118 \times S + 0,000116 \times S^2 \\ pKa'(HCO_3^-/CO_3^{2-}) &= \frac{1394,7}{T} + 4,777 - 0,0184 \times S + 0,000118 \times S^2 \end{aligned}$$

Les valeurs de salinité S sont reliées à la chlorinité originellement utilisée, i.e. la concentration en chlorures (+bromures et iodures, également données en g/kg ou ‰), par:

$$S = 1,80655 Cl \text{ (IAEA, 2008)}$$

Ce modèle présente l'avantage d'intégrer dans une même équation les effets de la température et de la salinité sur les constantes d'acidité. Néanmoins, seules les constantes pour les couples $H_2CO_3/HCO_3^-/CO_3^{2-}$ sont disponibles.

- *Déjections et salinité*

La force ionique (IS) dans les déjections brutes a été calculée ainsi : $IS = \sum (C_i \cdot Z_i^2)$ où C_i est la concentration molaire de chaque cation (NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) et Z_i leur valence.

La conductivité électrique EC est une mesure de la force ionique effective. Les principaux facteurs qui l'influencent en solution aqueuse sont la nature et la concentration des solutés, leur degré de dissociation en ions, la charge de chaque ion, la mobilité de chaque ion et la température de la solution. Les espèces chargées positivement dans les déjections de bovins et de porcs sont

dominées par NH_4^+ et K^+ . Les espèces négatives qui servent à contre balancer n'ont pas été déterminées mais auraient été dominées par HCO_3^- , Cl^- et des anions d'acides organiques.

La relation entre IS et EC est linéaire pour chaque électrolyte.

Pour toutes les données de l'article, $\log_{10}(\text{IS}) = 1,20 + 0,95 \log_{10}(\text{EC})$. De manière plus générale, la relation $\log \text{IS} = 1,159 + 1,009 \log \text{EC}$ est appropriée pour les solutions sur sol avec des IS jusqu'à 300 mmol/L.

Pour les déjections, les valeurs de force ionique à retenir sont :

$$\text{IS}_{\text{moy}} = 402 \text{ mmol/L}$$

$$\text{IS}_{\text{min}} = 117 \text{ mmol/L}$$

$$\text{IS}_{\text{max}} = 596 \text{ mmol/L}$$

La conductivité électrique IS et la salinité S sont liées par l'équation suivante : $\text{IS} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ S}$ avec S en mg/L et IS en mol/L (IAEA, 2008). Les valeurs de la salinité pour les déjections sont donc les suivantes :

$$\text{S}_{\text{moy}} = 16 \text{ g/L}$$

$$\text{S}_{\text{min}} = 4 \text{ g/L}$$

$$\text{S}_{\text{max}} = 23 \text{ g/L}$$

Source : (Stevens et al., 1995)

3.2.3 Volatilisation : loi de Henry

Le passage de la forme liquide NH_3_{aq} à sa forme gazeuse est contrôlée par la loi de Henry et dépend principalement de la température (Figure 26). La constante de Henri peut être définie

par $K_h = \frac{P_A(\text{atm})}{[\text{NH}_3, \text{aq}]}$ avec P_A la pression partielle de NH_3 en phase gazeuse en équilibre avec la solution.

Selon (Roustan, 2003) et (Ni, 1999), les constantes de Henri pour le CO_2 et NH_3 peuvent être décrites par les équations suivantes :

$$K_h(\text{CO}_2) = P_{\text{atm}} \times e^{\frac{1713,53}{T} \times (1 - \frac{T}{T_{\text{crit.eau}}})^{1/3} + 3,878 + \frac{3680,09}{T} - \frac{1198506}{T^2}}$$

$$K_h(\text{NH}_3) = P_{\text{atm}} \times e^{160,559 - \frac{8621,06}{T} - 25,6767 \times \ln(T) + 0,035388 \times T} \times \frac{\rho_{\text{eau}} \times 1000}{M_{\text{mol}_{\text{H}_2\text{O}}}}$$

3.2.4 Diffusion par transfert de masse

Le dernier mécanisme est la convection par transfert de masse du NH_3_{gaz} disponible à la surface des déjections et qui va être émis dans l'atmosphère: $\text{NH}_3, \text{gaz} \rightarrow \text{NH}_3, \text{émis}$

Le phénomène de convection par transfert de masse se traduit avec la loi de Fick :

$$Q = A \times K_L \times \Delta C$$

Q est le débit d'ammoniac libéré en $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ avec A la surface de contact entre le liquide et l'air en m^2 , K_L le coefficient de transfert de masse en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (ou $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de renouvellement d'air par m^2 de surface émettrice).

$$\Delta C = C_0 - C_\infty = C_{\text{gaz dispo}} - C_{\text{gaz mesuré par analyseur}} \text{ (Figure 26) avec } C_0 = [\text{NH}_3, \text{gaz}] \times M.$$

3.3 Emissions gazeuses et bâtiments : facteurs influençant les émissions d'ammoniac

Les émissions d'ammoniac en élevage bovins présentent une forte variabilité en bâtiment due à de nombreux facteurs. Les valeurs d'émissions ammoniacales sont liées à la concentration en NH_3 du bâtiment ainsi qu'à la configuration de celui-ci (ventilation, température ...). D'après (Balland et al., 2001), la concentration en ammoniac des bâtiments bovins est comprise entre 0,5 et 5 ppm avec une valeur moyenne de 2 ppm. Les valeurs d'émissions issues de la bibliographie sont obtenues par des méthodes de calculs et de mesures variées (voir 3.4).

3.3.1 Facteurs climatiques

Température : Les observations menées en bâtiment vaches laitières font état d'un effet important de la température. Ce facteur semble avoir la plus forte incidence sur la concentration en ammoniac. C'est ainsi qu'un accroissement de température de 10 °C se traduit par une

augmentation de la concentration de l'ordre de 1 ppm (Balland et al., 2001). Plus récemment, (Schmithausen et al., 2018) ont montré que pour une élévation de 6°C (passe de 7,8 à 14°C), l'émission est augmentée d'un facteur 4.

Débit d'air : Dans les bâtiments à ventilation naturelle, le débit d'air est lié à la structure du bâtiment et aux conditions climatiques. Les études menées en conditions réelles montrent que le débit d'air n'a pas d'incidence notable sur la concentration en ammoniac. Ce constat est probablement lié aux concentrations faibles en bâtiment bovin et à l'équilibre de concentration qui s'instaure à l'interface déjection-atmosphère. Par contre, l'effet du débit d'air est direct sur le flux d'ammoniac (Tableau 3) ; il induit des variations importantes se traduisant par une forte augmentation des émissions lors de périodes fortement ventilées (Balland et al., 2001).

Tableau 3: débit d'air et émission ammoniacale (Dollé et al., 1998)

	Débit d'air m ³ /VL/h	Concentration en ammoniac ppm	Emission d'ammoniac kg/VL/7 mois de stabulation
Débit d'air élevé	1000-2500	0,5-1,20	6-8
Débit d'air faible	600-1000	1,00-4,00	3-6

3.3.2 Pratiques de l'éleveur

Alimentation : Le pH des urines et des fèces est déterminant au niveau des émissions ammoniacales car la répartition entre les formes NH₃ et NH₄⁺ est très sensible au pH (Vlek et al., 1978) Le pH des déjections des vaches est dépendant de l'alimentation. Quand le pH diminue, le flux moyen de NH₃ diminue aussi et quand le niveau de protéine brute diminue, le flux moyen de NH₃ diminue aussi (Rumburg et al., 2007). L'alimentation n'affecte pas uniquement le pH mais également la composition des déjections. Pour mettre en évidence le lien entre émission ammoniacale et alimentation, du tannin « Acacia mearnsii » a été ajouté à la ration de certaines vaches (voir rapport IDELE Utilisation de tanins végétaux dans l'alimentation des vaches laitières). Les résultats des valeurs d'émission montrent les effets d'atténuation de concentration en NH₃ (34,5% par rapport à la quantité de matière sèche) pour une alimentation avec 3% de tannin condensé (Schmithausen et al., 2018).

Mode de logement (configuration, ventilation, sol, gestion des effluents) : Le niveau d'émission d'ammoniac et autres gaz, comme les gaz à effet de serre, dépend du système de logement, du type de sol et du système de traitement des effluents. Des différences fortes apparaissent entre les modes de logement principalement liées aux pratiques associées au bâtiment. Ainsi, il apparaît que les systèmes lisiers sont plus émetteurs que les systèmes fumiers (Balland et al., 2001).

La valeur de concentration est liée au type de déjection : pour un système lisier les concentrations en NH₃ sont supérieures à 2 ppm tandis que les systèmes fumiers présentent des concentrations plus homogènes et plus faibles.

Tableau 4: concentration et flux d'ammoniac moyen par vache laitière en période hivernale dans des conditions standards pour différents modes de logement (Dollé, Capdeville, 2000)

Modes de logement	Type de déjection	[NH ₃] ppm	Flux d'ammoniac kg.NH ₃ /VL/6 mois
Stabulation logettes caillebotis	Lisier	2,84	9,00
Stabulation logettes raclées	Lisier	2,03	6,40
Stabulation logettes raclées	Fumier	1,40	4,40
Stabulation aire paillée couloir raclé	Fumier	1,32	4,20
Stabulation aire paillée couloir caillebotis	Lisier-fumier	1,66	5,20

Le type de sol est un facteur non négligeable dans les émissions ammoniacales. La surface du revêtement peut moduler les émissions ammoniacales. La texture et la porosité du sol influencent la quantité d'urine présente en surface après urination tandis que la surface de contact entre l'urine et l'uréase présente dans les matières fécales influence le pourcentage d'urée convertie en ammoniac (Baldini et al., 2016). Le sol fait d'asphalte n'affecte pas les valeurs de pH contrairement au béton (Snoek et al., 2017). Pour les effluents sur le sol des bâtiments, le pH de surface est fixé à 0,7 unité au-dessus du pH global du mélange (Rotz et al., 2014).

Un sol solide avec stockage de lisier sous le plancher émet la moitié de ce que dégage un sol de type caillebotis avec cependant une dépendance à la pente du sol : pour un sol plat aucun effet n'est observé mais pour une pente de 3% on observe une réduction des émissions ammoniacales de 21% comparé à un sol en caillebotis (Wu et al., 2012). En effet, la séparation partielle des urines et des matières fécales permet de réduire l'hydrolyse de l'urée en bâtiment (Rotz et al., 2014). L'efficacité du raclage n'est pas la même selon les techniques utilisées. Les émissions de NH₃ avec sol solide et racleurs sont plus élevées que dans un bâtiment avec sol caillebotis et racleurs robotisés (Wu et al., 2012). Dans les couloirs d'alimentation, les émissions de NH₃ sont plus élevées sur sol solide que sur système avec plancher perforé nettoyé à l'eau. Les racleurs laissent une fine couche de lisier dont la surface de contact avec l'air est agrandie et l'épaisseur diminuée : cela favorise la volatilisation de l'azote. Ainsi, on obtient des valeurs d'émission ammoniacale plus grandes dans les bâtiments qui ont un sol solide comparés au caillebotis (Baldini et al., 2016).

Selon le type de logement la fraction d'effluent retirée par jour par raclage varie (Rotz et al., 2014):

- 0,98 pour les stalles entravées
- 0,98 pour les stabulations libres rincées à l'eau
- 0,90 pour les stabulations libres raclées
- 0,30 pour les litières
- 0,20 pour les lots ouverts

Race et âge des animaux (Baldini et al., 2016) :

Tableau 5: excrétion d'azote par catégorie de bovin (Lilong et al., 2014)

Catégorie de bovin	Poids vif (kg)	Excrétion azotée (g.jour ⁻¹)
Vaches	600	176 ± 43
Veaux	210	92 ± 8
Taureaux	820	276 ± 30
Bouvillons	479	194 ± 13
Génisses	450	201 ± 12

3.4 Méthodes de mesure des émissions gazeuses en élevage

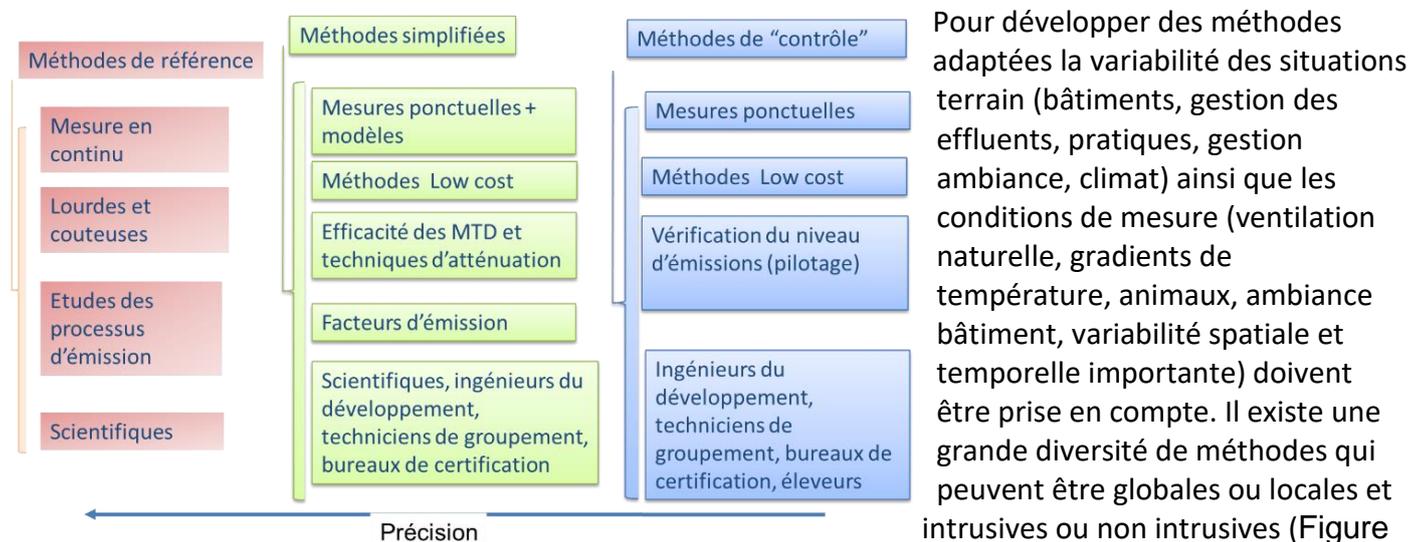


Figure 31: développer des méthodes adaptées à l'utilisation des mesures, (SPACE, 2013)

(Hassouna et al., 2015).

Bilan : Choisir la méthode adaptée à ses objectifs

La quantification des émissions gazeuses répond à des objectifs divers: comparaison du potentiel d'émissions de différents procédés ou produits, estimation de facteurs d'émissions représentatifs, suivi et

contrôle du respect de seuils d'émissions, etc. Les spécificités des objectifs de l'utilisation des mesures d'émission, la qualification des opérateurs, les moyens financiers disponibles sont des critères importants pour définir la méthode à mettre en œuvre. Les méthodes existantes ne sont pas toutes applicables en routine et nécessitent souvent une analyse labo ou des investissements importants. Ce projet cible la méthode de mesure chambre statique ventilée car elle permet d'associer : la mise en œuvre rapide par une seule personne avec un coût faible, la mesure locale permettant d'identifier l'hétérogénéité spatiale du bâtiment en cas de besoin.

3.5 Utilisation de la SPIR en élevage

3.5.1 La SPIR : méthode analytique pour caractériser les effluents d'élevage

La SPIR est une technique utilisée depuis de nombreuses années pour analyser la composition des fourrages et des semences agricoles. Plus récemment, elle a été étudiée pour prédire les composés organiques des composts et des fumiers d'élevages (Casdar « Effluents d'élevage »). Elle peut même être obtenue en conditions extérieures avec l'utilisation d'appareils portables ce qui la rend particulièrement intéressante pour les analyses en élevage. En plus des outils portables, il existe des capteurs embarqués : on parle dans ce cas d'agriculture de précision. L'objectif est de connaître la variabilité inter et intra-parcellaire pour ajuster les pratiques en fonction de cette variabilité. C'est le cas de la fertilisation avec l'épandage du lisier : on dispose d'une information sur la teneur en azote des sols et la tonne à lisier est équipée d'un capteur qui permet d'ajuster la dose d'engrais à apporter (projet Caractérisation de PRO par spectroscopie Proche Infrarouge embarquée).

La méthode SPIR ne nécessite pas ou très peu de préparation d'échantillon et peut détecter différents composés simultanément (Longjian et al., 2013). Elle peut ainsi être utilisée pour déterminer la teneur en azote total (TN), carbone total (TC) dans le fumier de bétail, le compost (Ye et al., 2005), mais aussi l'humidité, le taux de matière sèche (DM), de matière organique, de phosphore et la teneur en métaux (Longjian et al., 2013). (Reeves, 2001) indique aussi que la SPIR peut être utilisée pour déterminer la teneur en azote ammoniacal $\text{NH}_4^+\text{-N}$ dans le lisier de volaille.

La gamme de longueurs d'ondes utilisées pour les analyses est 1100-2500 nm, le pic dû à la présence de NH_4^+ étant défini à 2150 nm (Reeves, 2001).

Ces différentes études attestent de la fiabilité de la SPIR pour déterminer la composition des lisiers (Ye et al., 2005). Les résultats obtenus pour les litières de volaille dans le cadre du projet Casdar « Effluents d'élevage » montrent cependant que des problèmes de représentativité empêchent toute utilisation de la SPIR directement en bâtiment sur la surface des litières (Bazot, 2011). En revanche, l'homogénéisation manuelle semble conduire à de bons résultats pour la matière sèche, les composés organiques et l'azote ammoniacal, le phosphore, le potassium, le calcium et le magnésium.

L'application de la SPIR en ferme aux effluents d'élevage pour des mesures de routine nécessitera des développements complémentaires visant à simplifier les capteurs pour en réduire le coût et ciblant les variables utiles aux décisions en élevage. Sur la problématique des émissions ammoniacales, le pH, la teneur en matière sèche et la teneur en azote ammoniacal peuvent être des variables intéressantes. Pour la fertilisation, les teneurs totales en azote, phosphore et potassium peuvent être intéressantes. Pour le stockage en carbone dans les sols, l'indice de stabilité biologique peut être une variable utile.

3.5.2 Spectres connus de certains composés caractéristiques des lisiers

3.5.2.1 La fonction azotée

L'ammoniac est a priori détectable par la SPIR. La vibration d'élongation de la liaison NH se situe entre 3300 et 3500 cm^{-1} . La vibration de déformation de cette liaison se situe entre 1560 et 1640 cm^{-1} . La première harmonique associée aux groupements NH donne une bande d'absorption entre 1500 et 1550 nm (Bertrand et al., 2006). D'après (Reeves, 2001), l'azote ammoniacal (N-NH_4^+) présente une bande d'absorption à 2150 nm.

3.5.2.2 Effet de l'environnement sur le spectre de l'eau (Bertrand et al., 2006)

L'eau est le constituant majeur de tout produit agroalimentaire, c'est pourquoi la mesure de la teneur en eau est très fréquemment réalisée en industrie.

Le spectre proche infrarouge de l'eau liquide est identifiable grâce à 5 bandes caractéristiques que l'on trouve à 760, 970, 1190, 1450 et 1940 nm. L'environnement a une influence sur le spectre de l'eau. En effet, l'intensité de la bande d'absorption de OH diminue avec l'augmentation de la température et la position du maximum d'absorption se déplace vers les nombres d'ondes plus élevés. La présence de soluté et l'hydratation de substrats complexes perturbent également le spectre : dans le cas de solutions aqueuses avec des solutés, il ne suffit pas toujours de soustraire le spectre de l'eau pure pour isoler celui du composé d'intérêt. C'est le cas de solutions de chlorure de sodium où les ions Na^+ et Cl^- entourent les molécules d'eau et perturbent ainsi les liaisons hydrogènes : certaines bandes sont affectées (déplacement des bandes, intensité modifiée).

4 Matériel et méthodes

4.1 Démarche expérimentale

La démarche expérimentale déployée au cours du stage est résumée Figure 32. La première étape s'est déroulée en laboratoire. Elle avait pour objectif l'élaboration d'une gamme de solutions de raccordement représentatives des déjections bovines en termes de pH et de concentration en azote ammoniacal. Ces solutions étaient destinées à la fois à l'acquisition de spectres et de cinétiques d'émission dans la chambre.

La deuxième étape s'est déroulée sur la ferme expérimentale de Derval (44). Elle avait pour objectif d'associer les mesures chambre et SPIR afin d'en déduire une proposition de protocole déployable en élevage.

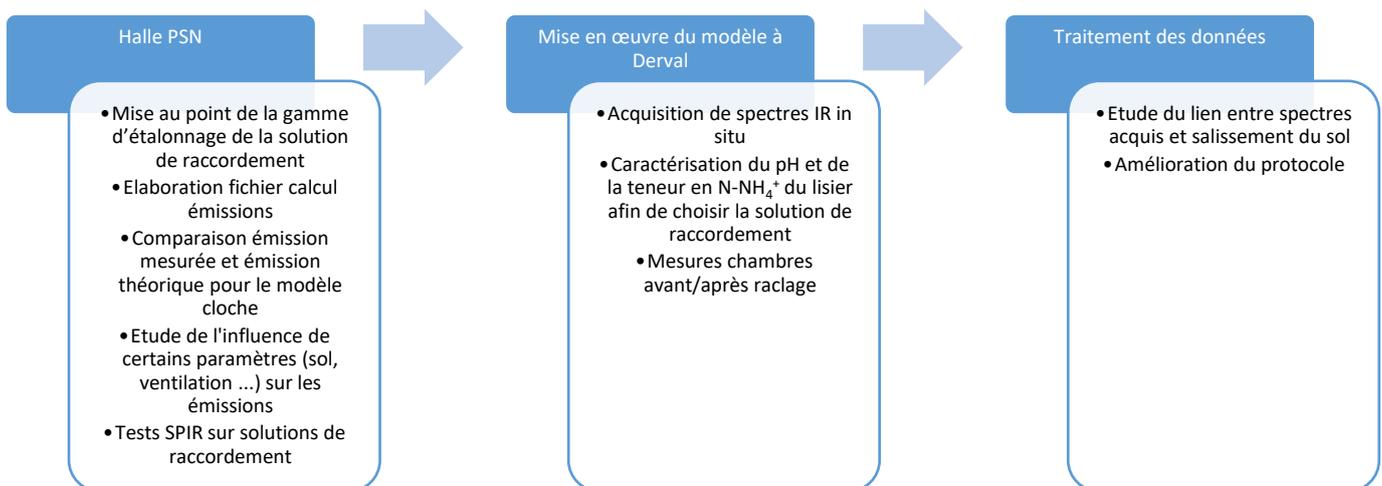


Figure 32: Démarche expérimentale déployée au cours du stage

4.2 Mise au point d'une gamme de solution de raccordement

Les solutions de raccordement ont pour objectifs :

- de raccorder les observations faites en conditions de laboratoire ou en élevage à des matériaux de référence pour lesquels la bibliographie peut fournir des valeurs de référence et des équations validées ;
- de fournir des valeurs d'émission de référence pour des conditions variables de température en élevage (mesures en toutes saisons), voire pour des chambres de mesure différentes.

La construction d'une gamme étalon à partir de composés solubles permet de s'affranchir du phénomène d'absorption de la matière organique des déjections. Tout le NH_4^+ peut devenir NH_3_{aq} puis NH_3_{g} (Figure 26).

Grâce aux calculs d'équilibres chimiques réalisés avec un fichier Excel et aux deux solutions à disposition, à savoir une solution basique et une solution ammoniacale, il est possible de

déterminer les proportions de chaque solution à mélanger pour obtenir les pH et les concentrations en NH_3 souhaitées.

Pour ce faire, il est nécessaire d'établir les réactions chimiques ayant lieu lors du mélange des deux solutions. Pour valider le calcul d'équilibre, les pH expérimentaux mesurés sont comparés aux pH théoriques.

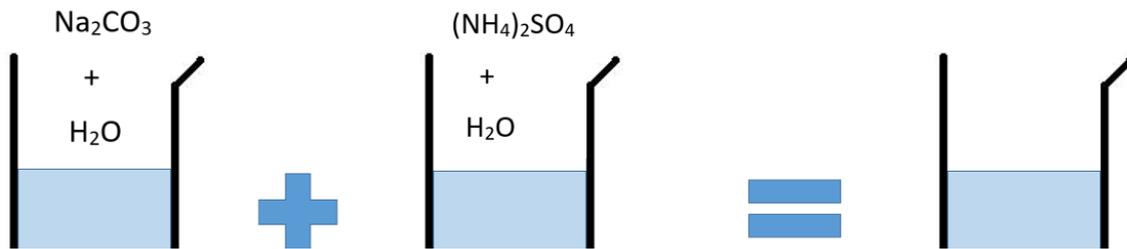


Figure 33: préparation des solutions de raccordement

La

solution qui a servi de point de départ (Figure 29) pour la gamme de solutions de raccordement a été élaborée par Fabrice Guiziou (IRSTEA Rennes) pour être représentative des lisiers de porc au niveau de la concentration en NH_4^+ ainsi que du pH pour des mesures d'émissions à l'épandage dans des tunnels ventilés.

La solution basique utilisée initialement était sursaturée en Na_2CO_3 entraînant une cristallisation rapide de celle-ci. Pour des raisons de conservation sur le long terme, nous avons choisi des concentrations en Na_2CO_3 plus faibles pour parvenir à une solution de base non saturée.

4.2.1 Calcul des concentrations initiales

La masse volumique d'un mélange de deux liquides est donnée par :

Equation 1 :

$$\rho = \frac{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2}{V_1 + V_2} = \frac{m_1 + m_2}{V_1 + V_2} = \frac{m_{tot}}{\frac{m_1}{\rho_1} + \frac{m_2}{\rho_2}} = \frac{m_{tot}}{\frac{m_1 \rho_2 + m_2 \rho_1}{\rho_1 \rho_2}} = \frac{\rho_1 \rho_2 m_{tot}}{m_{tot} w_1 \rho_2 + m_{tot} w_2 \rho_1} = \frac{\rho_1 \rho_2}{w_1 \rho_2 + w_2 \rho_1}$$

4.2.1.1 Concentration de la solution ammoniacale

La solution ammoniacale de départ résulte du mélange de 10 L d'eau pure et de 165 g de sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

$$\text{Equation 2: } n = \frac{m}{M} = C \times V$$

$$[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]_i = C_0 = \frac{m}{M \times V} \text{ comme } \frac{n(\text{NH}_4^+)}{2} = n(\text{SO}_4^{2-}) \text{ alors } [\text{NH}_4^+] = 2 C_0$$

Le volume V est calculé en considérant la variation de masse volumique entraînée par l'ajout de sulfate d'ammonium dans l'eau. On calcule la masse volumique du mélange (Equation 1) des deux composés pour en déduire la valeur de V intervenant dans le calcul des concentrations.

4.2.1.2 Concentration de la solution basique

La solution basique initiale était constituée de 225 g d'eau pure et de 80 g de carbonate de sodium Na_2CO_3 . Or dans ce volume d'eau, on peut dissoudre au maximum 49,5 g de Na_2CO_3 . La quantité de carbonate de calcium utilisée par la suite est 20 g.

$$[\text{Na}_2\text{CO}_3]_i = C_0' = \frac{m}{M \times V} \text{ donc } [\text{CO}_3^{2-}] = C_0'$$

De la même façon que pour la solution ammoniacale, on calcule la masse de base maximale pouvant être dissoute dans le volume d'eau choisi. Le volume du mélange est calculé à partir de la masse volumique du mélange résultant entre l'eau pure et le carbonate de sodium.

4.2.1.3 Concentration du mélange

Avant le mélange solution ammoniacale/solution basique, $n((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4) = C_0 \times V_{acide}$ et $n(\text{Na}_2\text{CO}_3) = C_0' \times V_{base}$. Le mélange entraîne un effet de dilution qui modifie les concentrations des solutés. Leur quantité de matière étant conservée, $[\text{Na}_2\text{CO}_3]' = \frac{n(\text{Na}_2\text{CO}_3)}{V_{tot}}$ et $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]' = \frac{n((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)}{V_{tot}}$ avec $V_{tot} = V_{acide} + V_{base}$.

4.2.2 Calcul du pH des solutions initiales

4.2.2.1 pH de la solution ammoniacale

Le pH d'une solution de sels d'acide et d'une base faible est donné par:

$$pH = \frac{1}{2}(pKa(HCO_3^-/CO_3^{2-}) + pKa(NH_4^+/NH_3))$$

4.2.2.2 pH de la solution basique

Les espèces présentes en solution sont : CO_3^{2-} , Na^+ , H_3O^+ , HO^- , HCO_3^- , H_2CO_3 . CO_3^{2-} étant l'espèce prédominante, $pH > pKa(HCO_3^-/CO_3^{2-})$. La conservation de la matière donne: $[H_2CO_3] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] = \frac{1}{2} [Na^+] = C_0$ (1) et l'électroneutralité de la solution impose $\sum_n [X^{n+}] = \sum_p [X^{p-}]$ soit $[H_3O^+] + [Na^+] = [HO^-] + [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}]$ (2).

On combine (1) et (2):

$$[H_3O^+] + [HCO_3^-] + 2[H_2CO_3] = [HO^-]$$

$$\text{Or } [HO^-] \gg [H_3O^+] \text{ et } [HCO_3^-] \gg [H_2CO_3] \text{ donc } [HO^-] \approx [HCO_3^-]$$

$$\text{Ainsi, } Ka(HCO_3^-/CO_3^{2-}) = \frac{[H_3O^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} = \frac{[H_3O^+]C_0}{[HO^-]} = \frac{[H_3O^+]^2 C_0}{K_{eau}} \text{ et } pH = \frac{1}{2}(pKe + pKa(HCO_3^-/CO_3^{2-})) + \frac{1}{2} \log C_0$$

4.2.2.3 pH du mélange

Le pH de la solution basique est proche de 12 donc CO_3^{2-} prédomine.

Le pH de la solution ammoniacale vaut 5,5 donc NH_4^+ et SO_4^{2-} prédominent.

La réaction prépondérante est : $CO_3^{2-} + NH_4^+ \rightarrow HCO_3^- + NH_3$

Tableau 6: tableau d'avancement de la réaction prépondérante

$CO_3^{2-} + NH_4^+ \rightarrow HCO_3^- + NH_3$			
C_0	C_0	0	0
C_0-x	C_0-x	x	x

$$K = \frac{Ka(NH_4^+/NH_3)}{Ka(HCO_3^-/CO_3^{2-})} = \frac{x^2}{(C_0 - x)(C_0 - x)}$$

On trouve x grâce au solveur sur Excel.

$$\text{Puis, } \frac{x[H_3O^+]}{C_0-x} = pKa_{(NH_4^+/NH_3)}$$

On trouve donc $[H_3O^+]$ puis le pH car $Ke = [H_3O^+] \times [HO^-]$.

4.2.3 Réactions dans le mélange

Les réactions qui ont lieu dans le mélange sont celles précisées ci-dessous :



(1) Le pH diminue

(2) Le pH augmente

4.3 Méthode de mesure des chambres statiques ventilées

La mise au point consiste en une comparaison des concentrations en NH_3 observées et calculées. Les phénomènes intervenant sur le terrain tels que les fuites d'air, l'adsorption sur les parois de la chambre, les variations de température doivent être représentés. Les solutions de raccordement permettent d'étudier l'influence de différents paramètres, comme la teneur en NH_3 , le type de sol, la température, la ventilation sous la chambre, ou le pH.

4.3.1 Calcul des émissions théoriques

Pour pouvoir obtenir les valeurs d'émission ammoniacales théoriques, les différents équilibres chimiques existants entre NH_4^+ , aq, NH_3 , aq et NH_3 , gaz doivent être étudiés et quantifiés (Figure 26). Les deux principaux facteurs susceptibles de déplacer ces équilibres, en dehors de la concentration en ammoniac de la source, sont la température et le pH.

Présentation du fichier de calcul d'émission

L'objet du fichier est la mise au point du calcul des émissions d'ammoniac à partir de mesures de concentrations intermittentes dans une chambre semi-statique ventilée (Figure 30 et Figure 31). La « non idéalité » de la matrice étudiée devra être prise en compte ainsi que les facteurs susceptibles de perturber les émissions (principalement la température et le pH).

Modalités :

- Élaboration de solutions de raccordement dans un onglet « solutions_ref », calculs avec valeurs Ka standards à 25°C, hypothèse solution idéale (Rumble et al., 2019)
- Mesure des concentrations de l'air dans la chambre semi-statique ventilée avec différentes configurations (nature du sol, vitesse de brassage d'air dans la chambre, composition de la solution de raccordement, température de l'air, prélèvement d'air dans la chambre) dans un onglet "obs_chambre"
- Calcul des équilibres acido-basiques et de la perte gazeuse théorique des molécules volatiles de la solution de raccordement (NH₃, H₂O, CO₂ ; comparaison d'équations de prédiction par niveau de complexité croissante dans des onglets "calc_chambre...")
- Comparaison des cinétiques de concentration calculées et mesurées
- Choix des calculs les plus appropriés ; calage des paramètres spécifiques de la chambre (débit de fuite, adsorption sur les parois, etc.)
- Estimation de la limite de détection (émission d'NH₃ minimale pouvant être détectée)

Calcul des équilibres acido-basique



La constante d'acidité Ka régit l'équilibre de la réaction. Dans le cas d'une solution non idéale, comme ce sera le cas pour les déjections, l'expression de Ka doit être corrigée par les valeurs d'activité des solutés ou par la salinité (3.2.2).

Le fichier de calcul d'émission sera organisé selon 4 onglets classés par niveau de complexité croissante.

- 1) Calcul émission chambre avec expressions de Ka issues de (IAEA, 2008) et (Ni, 1999) (solution très diluée, mélange idéal, sans correction avec activité ni salinité)
- 2) Calcul émission chambre avec Ka solution idéale corrigés par les activités (Roustan, 2003) (composition connue)
- 3) Calcul émission chambre avec Ka corrigés par salinité « océan » (cela concerne uniquement CO₂, HCO₃⁻) (IAEA, 2008) (composition connue permettant de calculer l'effet de la salinité sur les pKa associés au HCO₃)
- 4) Calcul émission chambre avec tous les Ka corrigés (Suez, 2019) (en cas de composition non connue, [cas des déjections lors de la mise en œuvre opérationnelle de la mesure des émissions] correction de tous les pKa via une valeur de la force ionique qui pourra être déduite d'une mesure rapide ou d'une estimation de la conductivité électrique)

4.3.2 Etude de l'influence de différents paramètres sur les émissions

Une fois le fichier Excel fonctionnel, il est possible de comparer émission théorique à émission expérimentale et d'étudier ensuite l'influence de différents paramètres sur les émissions.

Description du dispositif

La Figure 30 représente le dispositif mis en place. Les solutions de raccordement sont placées dans la chambre, dans une boîte de Pétri de 13 cm de diamètre. La masse de solution introduite en début d'expérience est pesée et la masse finale est aussi relevée en fin de mesure. La chambre statique ventilée est reliée à deux dispositifs : analyseur + ordinateur pour avoir les valeurs des concentrations en gaz et Crouzet avec pompes et batteries.

Le tuyau reliant chambre et Crouzet passe sous la chambre.

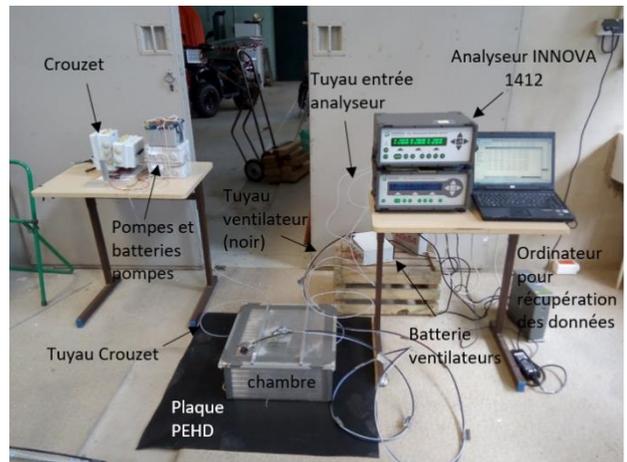


Figure 34 : dispositif de mesure déployé à la salle expérimentale pour la mesure des émissions

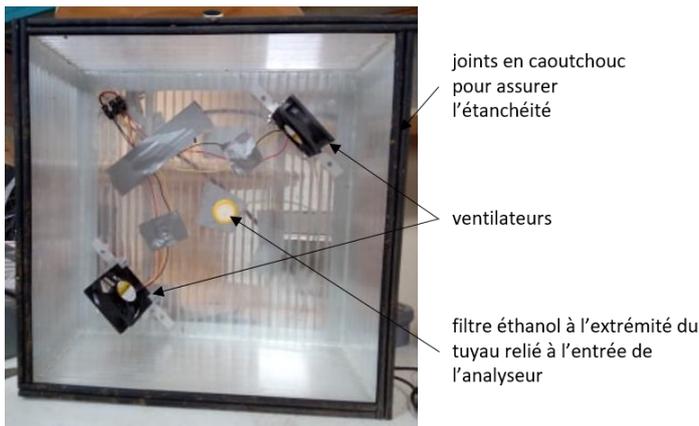


Figure 35 : Zoom sur l'intérieur de la chambre 1/2 statique ventilée

Matériel utilisé

C'est la combinaison d'un ensemble de matériel qui permet d'obtenir la concentration en gaz :

- Analyseur INNOVA 1412 fonctionnant par spectroscopie infrarouge photo acoustique → La spectroscopie infrarouge photo acoustique consiste à exciter un échantillon avec une lumière monochromatique pulsée. La sélection des longueurs d'onde spécifiques est obtenue au moyen de filtres optiques caractéristiques des gaz ciblés. Certaines molécules de l'échantillon absorbent une partie de l'énergie lumineuse qu'elles convertissent, après désexcitation, en un signal acoustique capté par un microphone (Hassouna et al., 2015).
- Outre les mesures de concentrations en NH_3 , nous avons utilisé les concentrations en CO_2 et H_2O pour comparer les valeurs observées et calculées.
- Crouzet : programmeur de prélèvement de gaz dans la chambre améliorant la répétabilité des quantités prélevées dans les poches et batteries 12 V pour alimenter le Crouzet
- Pompes et batteries 12 V pour le prélèvement du gaz au sein de la chambre 1/2 statique ventilée
- Alimentation stabilisée avec réglage de la tension pour moduler la vitesse de rotation des ventilateurs et ainsi la vitesse d'air au contact du sol dans la chambre
- Ordinateur avec programmes pour acquisition des données
- Chambre semi-statique ventilée de 40 cm de côté
- Plaque noire PEHD⁷. Le PEHD a été choisi en raison de son inertie chimique et de sa rigidité qui permet d'obtenir un meilleur contact entre les parois de la chambre et le sol
- Thermohygromètres FI 84ED⁸ à placer dans la chambre et à l'extérieur pour contrôler l'évolution de la température et de l'hygrométrie
- Tuyaux souples en PTFE⁸

⁷ Polyéthylène Haute Densité

⁸ Polytétrafluoréthylène

Les premiers tests sont effectués en conditions dites « standards » : chambre + plaque PEHD + solution de raccordement (environ 20g) dans une boîte de Pétri + ventilateurs branchés sur 22 V + prélèvement continu du gaz dans la chambre vers analyseur pour voir évolution des concentrations dans la chambre en direct. Le prélèvement en continu se fait à débit très faible grâce à un tuyau reliant chambre et entrée de l'analyseur (Figure 31).

L'influence des différents paramètres sur les émissions est étudiée avec l'emploi de différentes solutions de raccordement, plus ou moins concentrées en NH_4^+ , d'un pH plus ou moins élevé. Différents paramètres ont ensuite été modifiés : la ventilation dans la chambre, le type de sol (avec/sans plaque PEHD, plaque PEHD + récipient en béton, plaque PEHD + récipient en béton recouvert de cellophane), l'hygrométrie, et des tests ont été faits avec et sans le système de prélèvement Crouzet. Les différents essais effectués sont récapitulés Annexe 5.

4.4 Méthode de mesure SPIR

La circulation et la fréquentation des animaux dans un bâtiment varient, ce qui engendre une répartition hétérogène des déjections dans le bâtiment (quai d'attente, zone d'abreuvement ...). Cette hétérogénéité est difficile à caractériser mais nécessaire pour spatialiser les émissions mesurées avec le dispositif chambre. La SPIR paraît être un outil intéressant pour objectiver cette hétérogénéité en complément des mesures chambre. Dans un premier temps, on travaillera en réflectance sur les solutions de raccordement par analogie aux mesures in situ que l'on souhaite faire en élevage. Les spectres acquis seront traités pour étudier l'existence d'une relation réflectance- $[\text{NH}_4^+]$ et/ou pH.

4.4.1 Présentation de l'appareil utilisé



L'appareil utilisé est un spectromètre LabSpec ASD portable, composé d'une source lumineuse transportée depuis le spectromètre via une fibre optique (Figure 32).

La récupération des données se fait grâce à un PC portable et aux logiciels R³ et ViewSpecPro. Un sac à dos adapté permet le transport de l'appareil sur le terrain. Cet appareil couvre une bande de longueurs d'onde allant de 350 à 2500 nm.

Figure 36 : Spectromètre LabSpec ASD déployé, PC pour l'acquisition des données et traitement (Figure 34)

4.4.2 Présentation des mesures réalisées

Le choix de mesures en réflectance sur les solutions de raccordement se justifie par analogie avec les mesures in situ qui seront faites en bâtiment.

Plusieurs types de tests laboratoire ont été effectués mais seuls ceux sur fond de silice seront exploités dans ce rapport. Un fond de silice versé dans des boîtes de Pétri de 6 cm de diamètre a servi de support inerte pour l'acquisition des spectres des solutions de raccordement, avec et sans cache noir (Figure 33). La silice a permis de travailler uniquement en réflexion diffuse pour s'affranchir des problèmes de fond de récipient rencontrés en début d'expérimentation.

Pour chaque solution de raccordement, la manière de procéder fut la suivante :

- 12 g de silice versée au fond d'une boîte de Pétri propre de 6 cm de diamètre
- Préparation de la solution de raccordement étudiée (Annexe 4)
- A l'aide d'une pipette et d'une balance, une masse connue de solution est versée sur la silice (dans le cas des expériences, $m_1=1,5$ g, $m_2=2,0$ g et $m_3=2,5$ g)
- Acquisition du spectre de réflectance : faire 4 acquisitions pour couvrir la surface de silice humide.

Avant chaque série de mesures il est nécessaire de faire une optimisation pour corriger les détecteurs et le blanc doit être fait avant chaque mesure avec un spectralon (Figure 32).

A l'issue des mesures sur les solutions de raccordement, quelques acquisitions ont été effectuées sur fumier, lisier et sur lisier dilué.

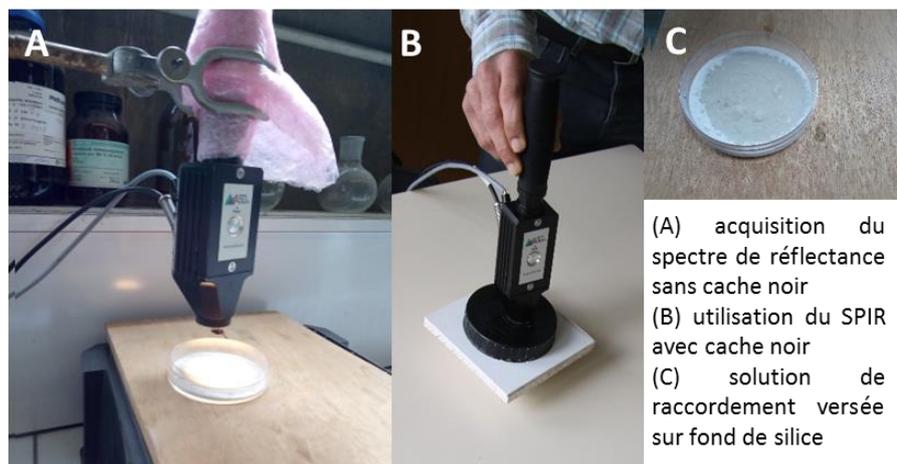


Figure 37 · illustration du SPIR à la halle

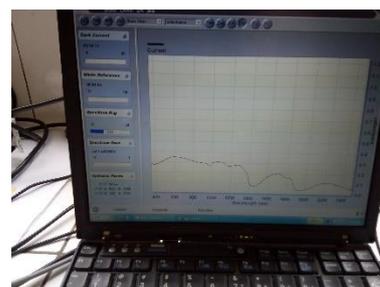


Figure 38: logiciel R³-acquisition des spectres de réflectance

4.4.3 Traitements chimiométriques appliqués

Les spectres obtenus nécessitent d'être traités pour parvenir à un modèle de prédiction du pH ou de la concentration en NH₃ qui sont les deux valeurs connues pour chaque solution de raccordement. On utilise des méthodes chimiométriques pour parvenir à prédire une information à partir d'un spectre PIR (Annexe 2).

Plusieurs traitements ont été préalablement appliqués afin de parvenir au meilleur modèle possible : transformations SNV⁹, MSC¹⁰, SG¹¹, dérivées première et seconde. Pour choisir le modèle le plus performant, la cross-validation de type leave-one-out est utilisée. Le principe de la cross validation consiste avec notre exemple avec un total de 12 échantillons, 1 échantillon est retiré à chaque itération : le modèle est calibré avec les 11 échantillons restants et les valeurs du 12^{ème} échantillon sont prédites avec le modèle ainsi obtenu. On peut ensuite comparer les valeurs réelles aux valeurs prédites. Des combinaisons des précédentes corrections avec les dérivées premières et secondes ont été testées. On considère les résultats obtenus après transformation comme bons si les valeurs du coefficient de corrélation R_{2_C} et du coefficient de corrélation issu de la cross validation R_{2_CV} sont relativement proches de 1. Il est normal d'observer une dégradation lors du passage de R_{2_C} à R_{2_CV}. Cependant, si celle-ci est trop importante, le modèle ne sera pas retenu.

4.5 Déploiement de la méthode en élevage



(A) Couloir alimentation
 (B) Ferme expérimentale de Derval vue du ciel
 (C) Logettes
 (D) Accès au robot de traite

Figure 39 : Vue d'ensemble de la ferme expérimentale de Derval et du

⁹ Standard Normal Variate transformation

¹⁰ Multiplicative Scatter Correction

¹¹ Filtration du signal

Trois journées de mesure ont été réalisées dans la ferme expérimentale de Derval (Figure 35), pilotée par la Chambre d'Agriculture de Loire-Atlantique. Le troupeau de la ferme expérimentale compte 85 vaches Prim' Holstein et 75 génisses de renouvellement (0 à 24 mois) qui produisent 719 000 litres de lait par an. Les 105 ha de SAU de l'exploitation sont majoritairement consacrés aux prairies (55 ha), à la culture de maïs ensilage (35 ha) et à la production de blé (14 ha) (Idele, 2019). Le jour des mesures, 73 vaches laitières étaient présentes dans le bâtiment. Le taux de paillage est en moyenne de 2kg par vache et par jour, la ration composée de $\frac{3}{4}$ d'ensilage d'herbe et $\frac{1}{4}$ d'ensilage de maïs (pour un apport total en matière sèche de près de 18kg/vache/jour). Le sol est raclé 5 fois par jour par un racleur automatique.

Le protocole de mesure réalisé sur place se découpe en plusieurs étapes :

- 1) Mesure de la teneur en azote ammoniacal avec le Quantofix et du pH avec le pH-mètre LAQUAtwin-pH-33 d'HORIBA → choix de la solution de raccordement à utiliser qui est la plus proche des deux valeurs mesurées (Annexe 11)
- 2) Mesures chambre (différentes configurations pour déterminer le protocole le plus approprié Figure 37)
- 3) Mesures transects SPIR (Figure 36)
- 4) Mesure méthode simplifiée (Annexe 13)



- (A) Batteries permettant l'alimentation du Crouzet®, des pompes et des ventilateurs
- (B) Poches de prélèvement de gaz (Flexfoil®)
- (C) Automate de déclenchement des pompes de prélèvement de gaz (Crouzet®)
- (D) Emplacement des pompes de prélèvement des gaz reliant chambre et poche de prélèvement de gaz
- (E) Plaques noires pour mesures du blanc
- (F) Chambres de mesure comprenant les point de prélèvement et les ventilateurs

Figure 41: dispositif chambre déployé en bâtiment



Figure 40: acquisition de transects SPIR en bâtiment

Les mesures à la ferme de Derval se sont répétées à plusieurs reprises au cours du projet afin de répondre à plusieurs objectifs. Au cours du stage il s'est agi de mettre au point le modèle de mesure chambre et de proposer une procédure déployable par des conseillers d'élevage. Nous proposons d'utiliser une solution de raccordement voisine des déjections de l'élevage et une plaque de PEHD propre pour vérifier que les concentrations en gaz prélevées dans les poches correspondent bien au modèle de mesure adapté pour la chambre. Ensuite, suivant les objectifs de l'utilisateur des mesures d'émissions, les émissions ammoniacales et l'efficacité du raclage ou d'une technique de réduction pourront être étudiées.

Pour étudier le potentiel d'utilisation de la SPIR en élevage, des transects du sol sont réalisés le long des deux couloirs du bâtiment : le couloir d'alimentation et le couloir logettes. Pour chaque acquisition spectrale, une photo du sol est prise, le but étant qu'après réalisation d'une analyse en composantes principales (ACP) et d'une classification ascendante hiérarchique (CAH) (Annexe 2) sur les valeurs spectrales on puisse définir des classes distinctes à partir de l'état visuel de salissement du sol.

5 Résultats

5.1 Gamme de solutions de raccordement

Après conversion des valeurs du Tableau 1 en mol/L pour faciliter le travail en solution aqueuse, les valeurs obtenues pour la concentration en NH_4^+ dans les déjections s'étendent de 0,043 à 0,15 mol/L. Le pH couvre une gamme allant de 7 à 9,3.

A l'aide des calculs d'équilibres établis pour la réaction prépondérante qui a lieu lors du mélange de la solution basique avec la solution acide, la gamme suivante a été retenue :

Tableau 7 : résultats de mesure des pH expérimentaux des solutions de raccordement

Solution	$[\text{NH}_4^+]$ mol/L	pH _{théo}	pH _{mesuré}	T (°C)
Solution 1	0,125	7,33	7,49	16,2
Solution 2	0,125	7,73	7,88	16,4
Solution 3	0,124	8,03	8,12	16,7
Solution 4	0,124	8,31	8,45	17,6
Solution 5	0,123	8,64	8,73	17,4
Solution 6	0,120	9,00	9,05	17,3
Solution 7	0,114	9,59	9,50	17,1
Solution 8	0,105	10,19	9,85	15,2
Solution 9	0,102	10,94	10,35	14,6
Solution 10	0,148	8,29	8,43	15,6
Solution 11	0,075	8,28	8,35	16,1
Solution 12	0,037	8,49	8,56	19,5
Solution 13	0,037	7,15	–	–

Les pH calculés sont proches des valeurs observées (écart inférieur à 0,2) à l'exception des solutions 8 et 9 pour lesquelles l'écart dépasse 0,3 unités pH. Nous considérons que cette comparaison valide les calculs d'équilibre acido-basique.

5.2 Concentrations en gaz mesurées dans la chambre

5.2.1 Concentrations en ammoniac calculées selon différents modèles

Les valeurs des concentrations en ammoniac dans l'air de la chambre calculées selon les différentes modalités du fichier de calcul ainsi que les concentrations relevées expérimentalement sont tracées Figure 42. La courbe rouge correspond aux valeurs réelles, la courbe jaune modélise l'évolution de $[\text{NH}_3]$ lorsque les pKa de l'acide carbonique sont corrigés (modèle « océan », (IAEA, 2008)). La courbe verte correspond au modèle pour lequel tous les pKa sont calculés selon le modèle Degrémont (Suez, 2019). Cette courbe est très proche de la courbe « solution idéale ». La courbe pour laquelle les valeurs les plus élevées sont obtenues renvoie au cas où les concentrations sont corrigées par un coefficient d'activité (incidence des composés en solution sur l'équilibre liquide-gaz mais pas sur les constantes d'équilibre acido-basique).

Il n'a pas été possible sur la durée du stage de représenter les processus d'adsorption/désorption sur les parois de la chambre dans le modèle de mesure. C'est pourquoi les résultats présentés ici sont limités aux observations et calculs de concentrations en NH_3 dans la chambre.

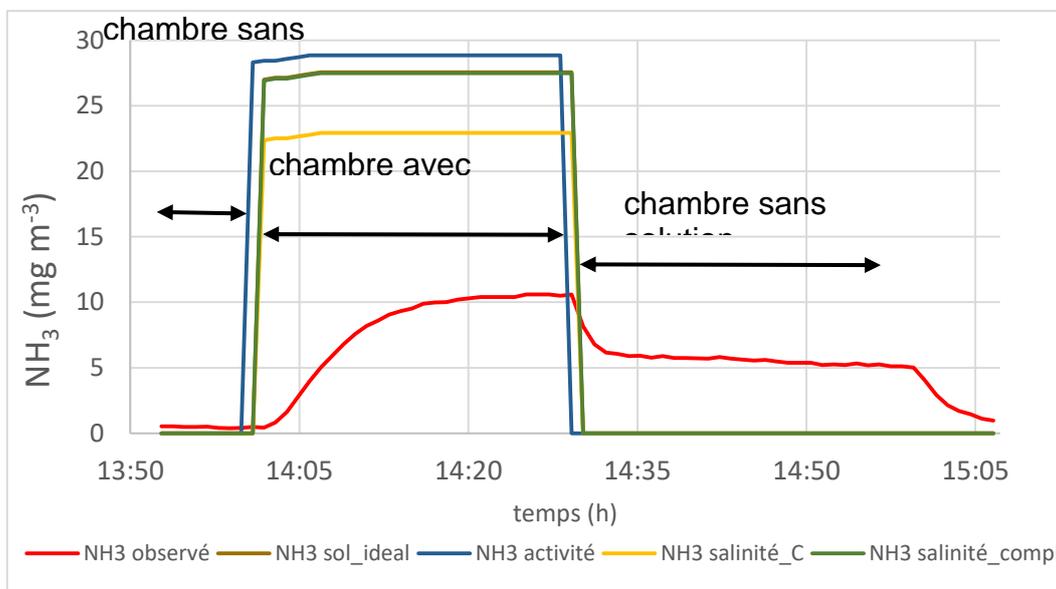


Figure 42: concentrations en ammoniac observées et calculées à partir de différentes correction de Ka
 Les concentrations calculées diffèrent des concentrations observées en cinétique et en amplitude.

5.2.2 Comparaison des cinétiques de concentrations observées en fonctions de différents paramètres

Seules trois solutions de raccordement ont été utilisées pour étudier l'évolution des concentrations. Etant donné le nombre important de paramètres à faire varier, le nombre de solutions de raccordement et le temps imparti, un compromis a été nécessaire. Ainsi, la solution 8 supposée très émettrice, la solution 13 très peu émettrice et la solution 12 intermédiaire ont été retenues.

5.2.2.1 Influence du type de sol sur les concentrations en ammoniac dans la chambre

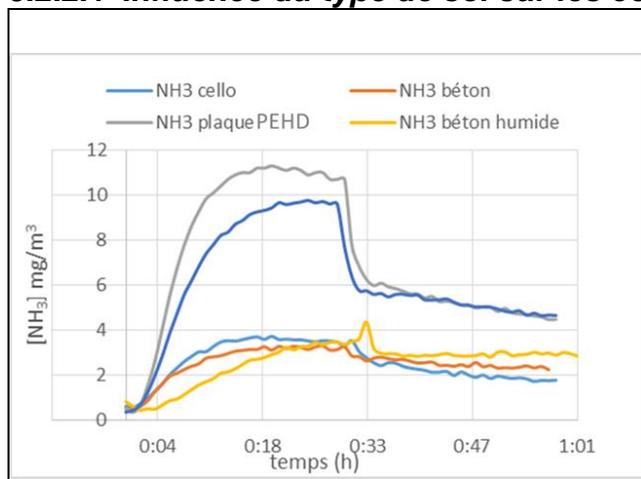


Figure 43: Concentration de la solution 12 au cours du temps (ventilateur 22V, 20/06 (tests 11a, 10a, 3a, 17 et 11b))

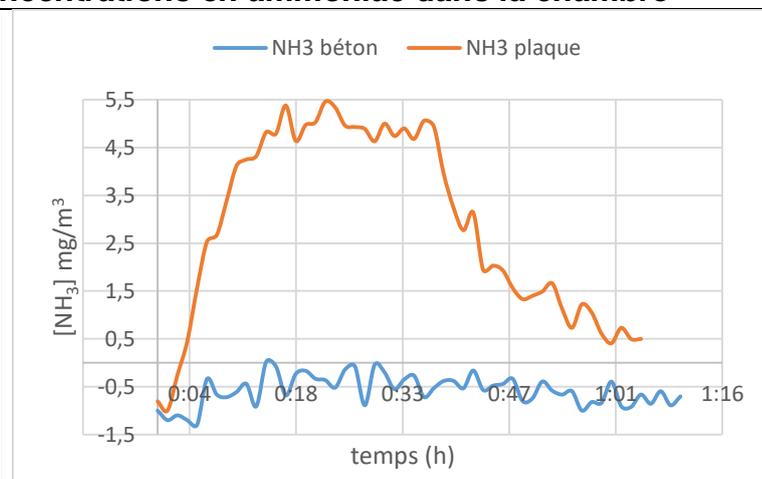


Figure 44: Concentration de la solution 3 au cours du temps (ventilateur 12V, prélèvement pompe C2 (tests 1 et 2))

Observations

C'est dans le cas où la solution est posée sur la plaque de PEHD seule que les valeurs de concentration les plus élevées sont obtenues. Dans le cas où un récipient béton est placé dans la chambre, les valeurs les plus faibles sont relevées. Lorsque le récipient en béton est entouré de cellophane, les concentrations sont intermédiaires.

5.2.2.2 Influence du pH et la concentration en NH_4^+ sur les concentrations en ammoniac dans la chambre

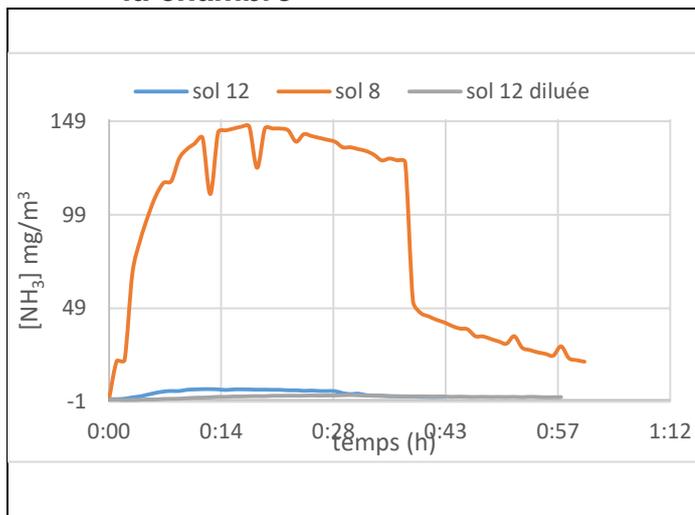


Figure 45: plaque noire, ventilateur 22V (tests 3a, 7 et 14a)

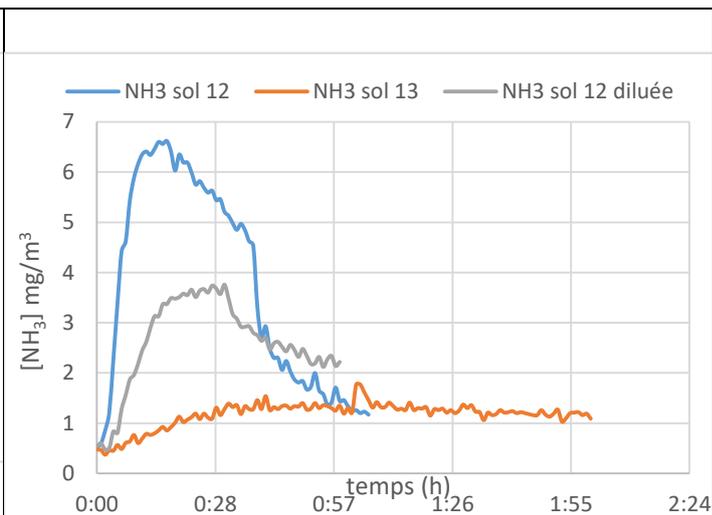


Figure 46: plaque noire, ventilateur 22V, prélèvement pompe C2 (tests 4, 12 et 15)

Observations

Pour la solution 8 (pH=10), les concentrations en ammoniac sous la cloche sont supérieures d'un facteur 10 à celles des solutions 12 et 12 diluée (pH=8,5, Figure 45).

Dans le cas où la solution 13 est présente dans la chambre, les valeurs de concentrations d'ammoniac dans l'atmosphère sont très faibles.

Entre les solutions 12 et 12 diluée, les différences entre les maximums de concentrations relevées sont de l'ordre d'un facteur 2, de même que le facteur de dilution (Figure 46).

5.3 Mesures laboratoires SPIR

5.3.1 Spectres obtenus

Les allures des courbes sont sensiblement identiques pour toutes les solutions de raccordement ainsi que pour l'eau : le spectre de l'eau domine le signal (Figure 47). Seule l'amplitude des spectres est variable d'une solution à l'autre.

Les spectres obtenus avec et sans cache noir n'ont pas la même allure (Figure 49). L'absence d'information sur cette disposition (avec ou sans cache) nuit à la reproductibilité des mesures.

Dans le cas de mesures avec cache, la reproductibilité des mesures est améliorée puisque l'éclairage artificiel est le même d'une acquisition à l'autre.

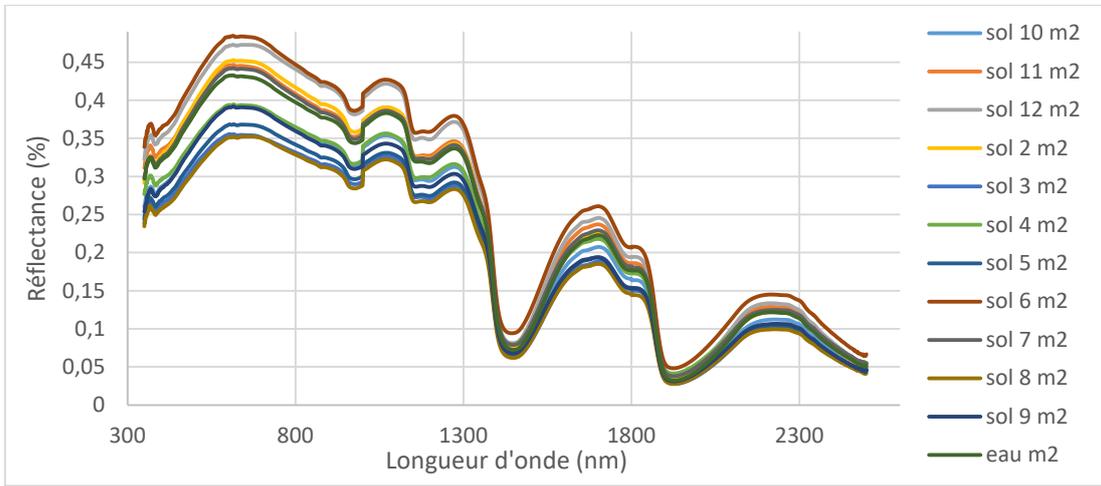


Figure 47: spectre des solutions de raccordement et de l'eau sans cache noir

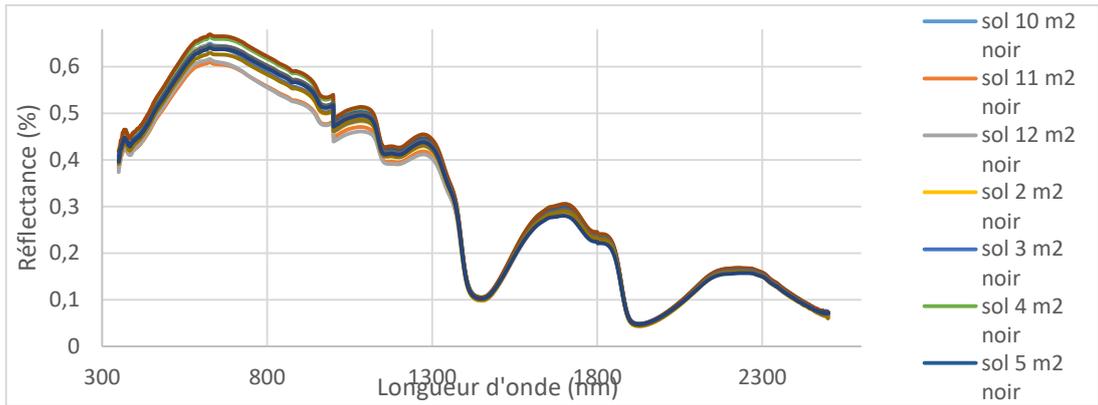


Figure 48: spectres des solutions de raccordement avec cache noir

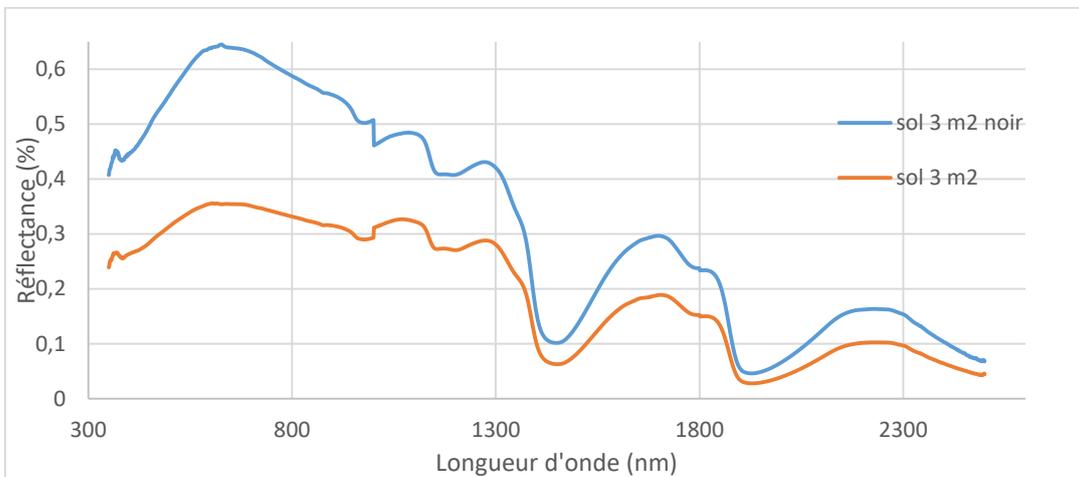


Figure 49: spectre solution 3 avec et sans cache

5.3.2 Modèles de prédiction du pH et de $[NH_4^+]$

Tableau 8: transformations SNV et MSC sur les spectres des solutions de raccordement acquis avec cache noir

	N	Mean	Sd	nb_VL opt en		
				PLS1	R2_C	R2_CV
$[NH_4^+]$ mol/L						
BRUT	11	0.11	0.030	1	0.58	0.25
pH BRUT	11	8.9	0.99	5	0.96	0.33
$[NH_4^+]$ mol/L SNV	11	0.11	0.030	2	0.58	0,00
pH SNV	11	8.9	0.99	5	0.98	0.70
$[NH_4^+]$ mol/L MSC	11	0.11	0.030	2	0.57	0,00
pH MSC	11	8.9	0.99	5	0.98	0.70

Le fichier des spectres des solutions de raccordement avec cache noir (Figure 48) est celui qui donne les meilleurs résultats. Il est le seul exploité dans ce rapport (Tableau 8). Pour le pH, les transformations SNV et MSC sont celles qui aboutissent au meilleur modèle de prédiction. Ces transformations appliquées sur les spectres permettent de lisser l'information afin de réduire les variabilités incontrôlées. La différence majeure entre ces deux méthodes est le calage des valeurs : dans le cas de la SNV, il est fait à partir du spectre brut et chaque valeur du spectre est normalisée alors que pour la MSC le calage se fait par rapport au spectre moyen. Les résultats obtenus sont cependant à confirmer sur une base de données plus conséquente.

Les équations de prédiction des modèles SNV et MSC pour le pH sont de la forme : $pH = C_0 + \sum_{\lambda=350}^{\lambda=2500} R_{\lambda} C_{\lambda}$

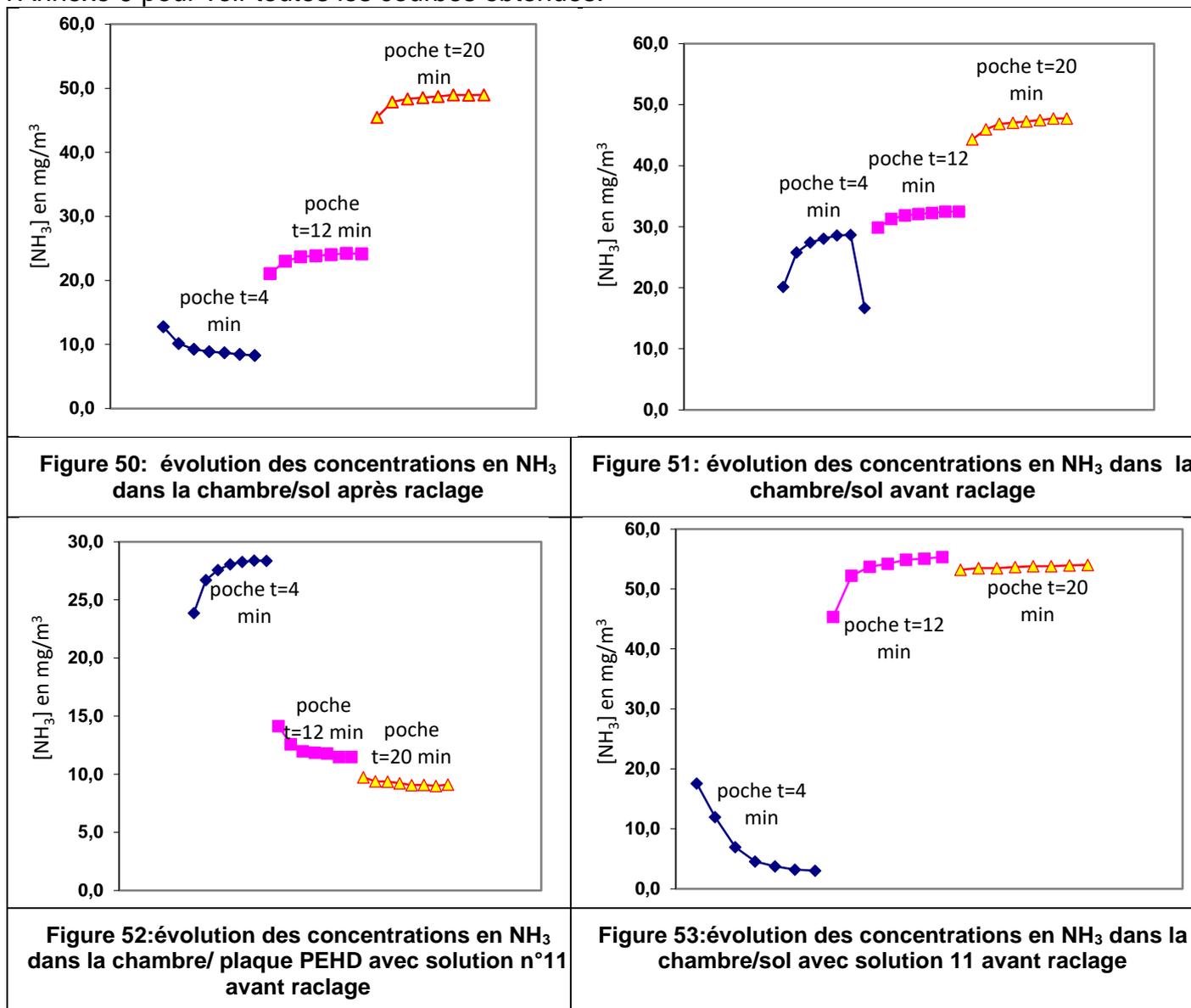
Les R_{λ} sont les valeurs de réflectance et C_{λ} les coefficients correspondants donnés par le modèle de prédiction par pas de 1 nm entre 350 et 2500 nm.

La valeur des coefficients correspondant à chaque longueur d'onde est donnée en Annexe 6.

5.4 Mesures en élevage

5.4.1 Résultats méthode chambre

Les courbes suivantes (Figure 50, Figure 51, Figure 52 et Figure 53) sont obtenues après analyse du contenu des poches de gaz prélevées dans les chambres. L'analyse est faite grâce à un échantillonneur, l'analyseur et un traitement des données sur Excel. Se référer à l'Annexe 8 et à l'Annexe 9 pour voir toutes les courbes obtenues.



Dans le cas des mesures avec plaque PEHD et solution dans la chambre, le pH final de la solution est plus faible que le pH initial alors qu'à l'issue des mesures sur le sol du bâtiment le pH est plus élevé. Pour la journée du 17 juillet, on observe une décroissance des courbes pour [NH₃] dans le cas des mesures chambre sur le sol du bâtiment avec solution.

5.4.2 Résultats SPIR

L'ACP (Figure 55) des spectres acquis dans le bâtiment révèle une discrimination spatiale des zones du bâtiment : les zones les plus souillées sont regroupées du côté gauche de l'axe horizontal, les zones les plus propres du côté droit et le milieu correspond aux zones intermédiaires. La discrimination zones souillées/ zones sèches est aussi visible au niveau de l'allure des spectres, le couloir d'alimentation étant globalement plus souillé que le couloir logette (Figure 54).

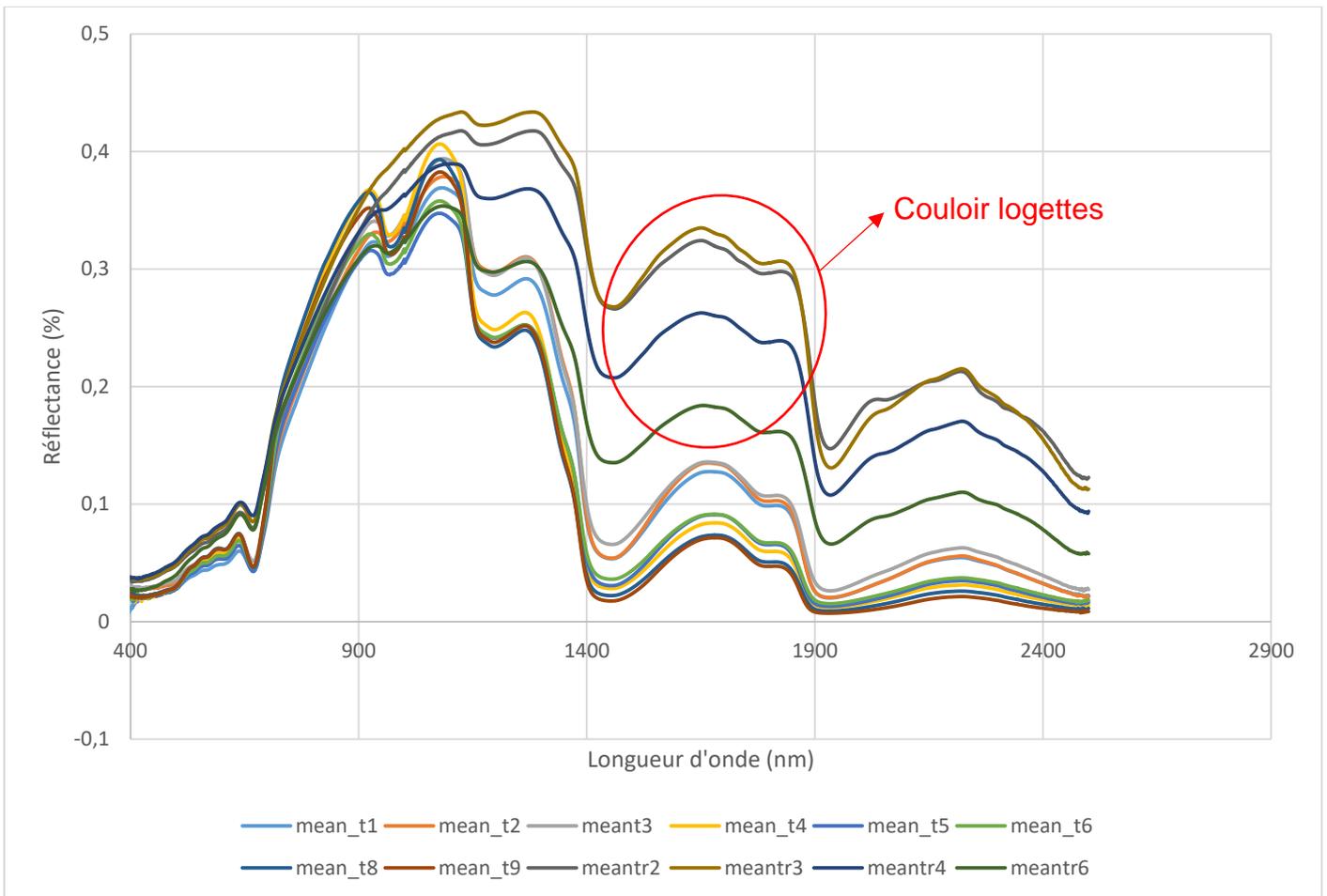


Figure 54: spectres moyens couloirs alimentation et logettes

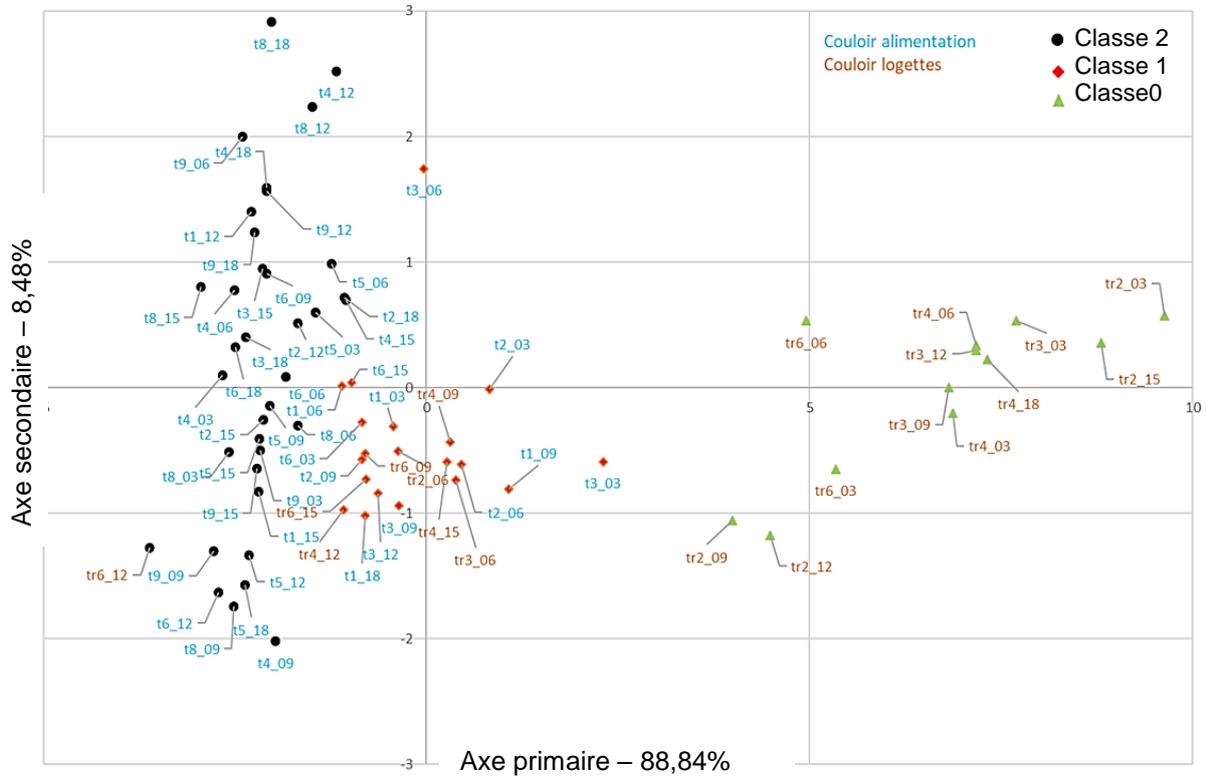


Figure 55: ACP couloirs alimentation et logette

6 Discussion

6.1 Calcul des concentrations dans la chambre

Les expressions de K_a « solution idéale » pour le CO_2 que nous avons retenues sont celles issues de (IAEA, 2008) car elles étaient plus proches des valeurs de référence indiquées par Rumble et al. (2019).

Pour prendre en compte l'écart à l'idéalité dans le cas des déjections, les corrections de pK_a appliquées sont celles de (Suez, 2019). En effet, dans la Figure 42 nous attribuons la surestimation de la concentration en NH_3 des équations « activité » à l'absence de prise en compte de la force ionique sur les équilibres acido-basiques. Pour le modèle où seuls les pK_a de l'acide carbonique sont corrigés par la salinité (modèle « océans »), nous considérons que la prise en compte d'un effet acido-basique sur les couples $\text{H}_2\text{CO}_3/\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ et non sur le couple $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ conduit à surestimer la teneur en NH_4^+ : la diminution des pK_a associés à HCO_3^- sans modification de ceux associés à NH_4^+ et aux autres couples acide/base donne une sous-estimation du pH d'équilibre et en conséquence de la teneur en NH_3 .

Degrémont (Suez, 2019) est le seul modèle qui déplace l'ensemble des équilibres chimiques. La correction de pK_a par la force ionique est appliquée à tous les solutés. Ainsi, on minimise le risque de biais induit par la correction d'une partie seulement des constantes d'équilibre.

L'écart d'amplitude entre les courbes observées et calculées (Figure 42) peut être expliqué par l'adsorption d'une part importante de l'ammoniac émis sur les parois de la chambre. Ce stock adsorbé peut ensuite expliquer la concentration en NH_3 importante dans la chambre après avoir retiré la solution.

La cinétique rapide d'augmentation de concentration calculée est due à l'hypothèse d'échange rapide à l'interface liquide-gaz en raison de la ventilation dans la chambre. La cinétique d'émission devrait ainsi être calculée avec un échange plus lent dans le fichier permettant de déduire l'émission du sol à partir des mesures de concentration des poches de gaz.

6.2 Méthode chambre

6.2.1 Conditions de validité de la méthode chambre

La solution de raccordement n°13 a été réalisée pour les mesures chambre dans le but d'avoir une solution minimisant le pH et la concentration en NH_4^+ . Ainsi, pour une solution de $\text{pH} = 7,15$ et de $[\text{NH}_4^+] = 0,037 \text{ mol/L}$, une surface émettrice de $0,013 \text{ m}^2$ et une température avoisinant les 20°C , on atteint les conditions limites à la détection des concentrations en gaz dans la chambre par l'analyseur (Figure 46). Lors de l'usage en élevage, les utilisateurs devront s'assurer avant de déployer le dispositif de mesure que le pH et la concentration en azote ammoniacal des déjections de l'élevage sont supérieurs à ces valeurs. Cette solution combinant à la fois un pH faible et une teneur en azote faible par rapport à la gamme de valeurs habituellement rencontrées (cf. Figure 46), il est probable que cette situation soit peu fréquente.

On choisit de travailler avec deux chambres en parallèle, de mêmes modalités, de manière à disposer des mesures en cas d'éventuels problèmes techniques avec les matériels utilisés : en effet, les phénomènes d'adsorption ou les problèmes techniques de fuite, de pompage, de connexion des tuyaux d'échantillonnage ne seront jamais identiques avec chaque chambre. Une seule poche est nécessaire pour faire « le blanc » à condition d'avoir laissé l'atmosphère dans la chambre se stabiliser pendant 10 minutes. Le choix d'un intervalle de 8 minutes entre poches et d'une durée de remplissage de 90 secondes des poches de prélèvement de gaz est déduit des cinétiques de concentration en NH_3 obtenues en halle expérimentale avec les trois solutions types (solutions 8, 12 et 13) et les différentes configurations. En effet, les trois prélèvements poches doivent se situer dans la phase de croissance de la concentration, avec la dernière poche coïncidant avec le palier de concentration.

6.2.2 Paramètres influençant les valeurs de concentration dans la chambre

Les différences de concentrations en ammoniac observées dans la chambre dans l'étude des différents types de sol mettent en évidence l'adsorption liée à la présence du récipient en béton. Placer du cellophane autour du récipient en béton ne suffit pas à annuler cet effet adsorption

puisque les concentrations relevées restent tout de même inférieures au cas où seule la plaque de PEHD et la solution sont présentes sous la chambre (Figure 43 et Figure 44).

La Figure 42 illustre aussi l'importance du phénomène d'adsorption dans la chambre de par la différence des valeurs de concentrations entre les modèles théoriques et les observations expérimentales.

Diluer une solution de raccordement permet de modifier seulement sa valeur de concentration et non son pH : les différences de concentrations en gaz dans la chambre entre les solutions 12 et 12 diluée démontrent donc l'importance de la concentration initiale en ammoniac de la solution. Lorsque deux solutions de raccordement diffèrent par le pH (8,5 et 10) et leur teneur ammoniacale (0,037 et 0,105 mol/L), les valeurs de concentrations en gaz dans la chambre peuvent varier beaucoup : la concentration maximale atteinte pour la solution 12 dans la chambre est 1,47 mg/m³ et 146 mg/m³ pour la solution 8 (Figure 45). Ainsi les solutions de raccordement proposées, basées sur une analyse bibliographique de la composition des lisiers, permettent probablement de couvrir la grande majorité des configurations d'élevages bovins.

6.2.3 Validation sur le terrain de certaines hypothèses

Durant les journées d'expérimentation à Derval, des variations de pH de la solution de raccordement ont été mesurées pour différents tests (Annexe 9 et Annexe 9).

Si le sol est plus émetteur que la solution de raccordement utilisée alors dans le cas d'une mesure chambre sur sol avec solution, l'ammoniac émis par le sol va venir se dissoudre dans la solution qui va jouer le rôle de puit : le pH de la solution va augmenter car il y aura plus de NH₃ dissous.

Dans le cas d'une mesure chambre avec plaque PEHD et solution, celle-ci va pouvoir émettre car l'air dans la chambre est pauvre en NH₃ : le pH final de la solution sera plus faible en raison de la perte de NH₃.

6.3 Modèle de prédiction SPIR du pH et de [NH₄⁺]

Les résultats obtenus pour la prédiction du pH à partir des spectres SPIR restent à confirmer sur un plus grand nombre d'observations. Au vu des valeurs obtenues, on ne peut espérer un modèle stable pour la prédiction des concentrations en ammoniac. Cette piste mérite cependant d'être approfondie sur une plage de variabilité plus étendue pour deux raisons principalement : (Reeves, 2001) a observé une zone d'absorption de l'ammonium ; les résultats préliminaires du Casdar « effluents » étaient encourageants pour la prédiction de la teneur en azote ammoniacal.

Ces résultats sont encourageants en terme de potentiel, il faut garder à l'esprit que l'élaboration d'un modèle de prédiction avec aussi peu d'échantillons ne peut être exploitée ni pour une publication scientifique ni pour le développement d'une application opérationnelle.

6.4 Intérêt de la SPIR en élevage

L'ACP réalisée ainsi que la classification ascendance hiérarchique mettent en évidence l'existence d'une relation entre spectres acquis in situ et état du sol en terme de propreté. On distingue ainsi 3 classes de « saleté » : une classe non émissive pour les zones propres et les zones où les déjections sont sèches, une classe moyennement émissive et une classe fortement émissive correspondant aux zones les plus humides et les plus souillées.

Pour l'extrapolation spatiale des mesures d'émission par la chambre, nous proposons l'hypothèse qu'à chaque classe correspond une gamme d'émission ammoniacale : pour une mesure cloche effectuée en bâtiment sur zone souillée, la classe 2 émettra 100% de la valeur obtenue, la classe 1, 50% et la classe 0 sera considérée comme non émettrice. Cette hypothèse devra être validée en comparant l'estimation ainsi obtenue à une mesure sur l'ensemble du bâtiment par la « méthode simplifiée ».

L'extrapolation de l'émission ammoniacale au bâtiment se fait donc à partir de la répartition des zones du bâtiment dans les trois classes et d'une valeur d'émission obtenue par mesure chambre sur zone souillée. Le pourcentage de 50% d'émission attribué à la classe 1 (voire à la classe 0 si des mesures chambre confirment une émission significative) pourra être modulé si l'émission ainsi calculée est très éloignée de la valeur bâtiment obtenue avec la méthode simplifiée (écart supérieur à 50% de la mesure bâtiment ; cf. discussion de l'incertitude par Lorinquer et al., 2015, Robin et al., 2017).

6.5 Protocole chambre à déployer en élevage

Deux protocoles à déployer en élevage ont été proposés correspondant à deux objectifs envisagés : étude de l'efficacité du raclage ou simple évaluation de l'émission d'un bâtiment (Annexe 12). Durant les journées de mesure terrain du stage, plusieurs améliorations ont été apportées en terme de logistique pour faciliter le transport du matériel par une personne seule ou en terme de séquençage des opérations pour améliorer la fiabilité des résultats et faciliter l'exploitation des mesures de concentrations en gaz.

7 Conclusion et perspectives

7.1 Protocole complet à déployer en élevage

Le principal livrable du stage était la proposition d'un protocole à déployer en élevage permettant d'obtenir une valeur d'émission ammoniacale fiable et caractéristique des sols du bâtiment.

La liste suivante reprend les principales étapes du protocole que nous proposons, sur la base des deux méthodes de mesure que nous avons mises en œuvre, la chambre semi-statique ventilée et la SPIR :

- Mesure de la teneur en ammonium (Quantofix) et du pH des déjections ;
- Choix d'une solution de raccordement proche des deux valeurs mesurées ;
- Déploiement du dispositif chambre selon l'objectif de la mesure ; acquisition des poches ;
- Caractérisation spatiale de l'état de salissement du bâtiment (surface de chacune des 3 classes)
- Analyse des poches et mobilisation du fichier de calcul pour obtenir la valeur d'émission de la zone souillée
- Extrapolation spatiale à l'ensemble du bâtiment selon les 3 classes définies par la SPIR

Au stade actuel, il reste néanmoins nécessaire de finaliser le calcul de l'émission à partir des mesures de concentration dans les poches de gaz et de valider l'extrapolation à l'ensemble du bâtiment.

7.2 Valorisation du protocole à l'issue du projet

COURT TERME :

A court terme, la mise en œuvre des prélèvements de gaz, le choix de la solution de raccordement, la mise en œuvre du calcul des émissions constituent des opérations assez techniques. Le déploiement de la méthode EMISOL BV devrait donc être d'abord proposée à un public averti. Actuellement, la réduction des émissions d'ammoniac ne représente pas un centre de profit pour les filières d'élevage. C'est pourquoi il paraît préférable de former des personnes suffisamment motivées par la problématique des pertes gazeuses d'ammoniac.

MOYEN TERME :

Dans l'optique d'élargir la méthode à un plus grand nombre d'utilisateurs, la SPIR pourrait s'avérer suffisante à l'obtention d'une valeur d'émission. La calibration d'un modèle nécessiterait d'associer à une valeur locale d'émission (mesure chambre) la mesure spectrale de la zone correspondante, jusqu'à l'obtention d'une base de données de plusieurs centaines de valeurs. Pour atteindre cet objectif, la mise en œuvre de plusieurs dispositif « chambre », de plusieurs spectromètres SPIR, ainsi que la proposition d'un protocole d'acquisition des spectres avant la mesure de l'émission sont nécessaires.

LONG TERME :

Une fois le modèle SPIR calibré, la méthode chambre ne sera plus nécessaire qu'en complément et pour s'assurer de l'absence de dérive du modèle SPIR (évolution des systèmes d'élevage). Cela simplifiera le protocole à déployer en élevage en allégeant la partie logistique et le traitement de données en aval : la mesure spectroscopique in situ donnerait une catégorie d'émission ammoniacale.

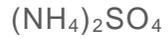
8 Bibliographie

- ADEME. (2018). *La pollution de l'air en 10 questions*. Récupéré sur ademe.fr: <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-pollution-air-en-10-questions.pdf>
- Baldini et al. (2016). Comparison among NH₃ and GHGs emissive patterns from different housing solutions of dairy farms. *Elsevier*.
- Balland et al. (2001). *CORPEN*.
- Bazot. (2011). *Caractérisation du potentiel agronomique des litières de volaille par la spectrométrie proche-infrarouge*.
- Bertrand et al. (2006). *La spectroscopie infrarouge et ses applications analytiques*. Paris: Lavoisier.
- Dandan et al. (2017). Diurnal and seasonal variations of odour and gas emissions from a naturally ventilated free-stall dairy barn on the Canadian prairies. *Journal of the Air & Waste Management Association*.
- Dollé et al. (1998). *Emission d'ammoniac dans les bâtiments vaches laitières à ventilation naturelle*.
- Foray et al. (2018). *Elevage bovin et environnement: les chiffres clés*. Paris: Institut de l'élevage.
- Hassouna et al. (2015). *Mesurer les émissions gazeuses en élevage*. A4 Editions Angers.
- IAEA. (2008). *Isotopes de l'environnement dans le cycle hydrologique*. Vienne.
- Idele. (2019). *Derval*. Récupéré sur Idele: <http://idele.fr/linstitut-de-lelevage/implantations/unites-experimentales/derval.html>
- Ni J. (1999). Mechanistic Models of Ammonia Release from Liquid Manure: a Review. *Journal of Agricultural Engineering Research*.
- Lilong et al. (2014). A regional mass balance model based on total ammoniacal nitrogen for estimating ammonia emissions from beef cattle in Alberta Canada. *Elsevier*.
- Longjian et al. (2013). Review of the Application of Near-Infrared Spectroscopy Technology to Determine the Chemical Composition of Animal Manure. *Journal of Environmental Quality*.
- Lorinquer. (2013). Présentation SPACE.
- Qualité de l'air : Sources de pollution et effets sur la santé*. (2018, Décembre 26). Récupéré sur solidarites-sante.gouv: <https://solidarites-sante.gouv.fr/sante-et-environnement/air-exterieur/qualite-de-l-air-exterieur-10984/article/sources-de-pollution-et-effets-sur-la-sante>
- Reeves. (2001). Near-Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy for the Analysis of Poultry Manures. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*.
- Rotz et al. (2014). Ammonia Emission Model for Whole Farm Evaluation of Dairy Production Systems. *Journal of Environmental Quality*.
- Roustan. (2003). *Transferts gaz-liquide dans les procédés de traitement des eaux et des effluents gazeux*. Lavoisier.
- Rumble et al. (2019-2020). *Handbook of chemistry and physics*. CRC Press.
- Rumburg et al. (2007). Measurement and modeling of atmospheric flux of ammonia from dairy milking cow housing. *Elsevier*.
- Schmithausen et al. (2018). Quantification of Methane and Ammonia Emissions in a Naturally Ventilated Barn by Using Defined Criteria to Calculate Emission Rates. *mdpi*.
- Snoek et al. (2017). Assessing fresh urine puddle chemistry in commercial dairy cow houses. *Elsevier*.
- Somme, C. d.-P. (2013, juin). *Les effluents d'élevage: mieux les connaître pour bien les valoriser*. Récupéré sur Chambre d'agriculture Nord-Pas de Calais: https://nord-pas-de-calais.chambre-agriculture.fr/pratique/recherche/?id=2844118&tx_news_pi1%5Bnews%5D=8979&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=732a2c25d87b3214487e37742d1d0911
- Stevens et al. (1995). Estimating nutrient content of animal slurries using electrical conductivity. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*.
- Suez. (2019). *Memento Degremont*. Consulté le Juin 27, 2019, sur Suez: <https://www.suezwaterhandbook.fr/>

- Vigan et al. (2018). *Contribution de ELFE à l'établissement de facteurs d'émission d'ammoniac par les bâtiments et le stockage en élevage porcin*. Récupéré sur ifip: <https://www.ifip.asso.fr/sites/default/files/pdf-documentations/env03.pdf>
- Vlek et al. (1978). Effects of solution chemistry and environmental conditions on ammonia volatilization losses from aqueous systems.
- Waldrip et al. (2012). Characterization of ammonium sorption by beef cattle feedyard manure. *ASABE*, 1609-1619.
- Wu et al. (2012). Ammonia and methane emissions from two naturally ventilated dairy cattle buildings and the influence of climatic factors on ammonia emissions. *Elsevier*.
- Ye et al. (2005). APPLICATION OF NEAR-INFRARED REFLECTANCE SPECTROSCOPY FOR DETERMINATION OF NUTRIENT CONTENTS IN LIQUID AND SOLID MANURES. *Iowa State University*.

ANNEXES

Annexe 1 Données physico-chimiques des composés des solutions de raccordement (Rumble et al., 2019)



M= 132,141 g/mol ; d= 1,77 g/cm³ ; S= 76,4 g/100 g d'eau à 25°C



M= 105,989 g/mol ; d= 2,54 g/cm³ ; S= 30,7 g/100 g d'eau à 25°C



M= 17,031 g/mol ; d= 0,696 g/L

Masses molaires de quelques atomes

$M_{\text{H}}= 1,00 \text{ g/mol}$

$M_{\text{C}}= 12,00 \text{ g/mol}$

$M_{\text{N}}= 14,00 \text{ g/mol}$

$M_{\text{O}}= 15,99 \text{ g/mol}$

$M_{\text{S}}= 31,97 \text{ g/mol}$

$M_{\text{Na}}= 22,99 \text{ g/mol}$

Valeurs des pKa à pression atmosphériques et à 25°C

$\text{Ka}(\text{H}^+/\text{HO}^-) = 13,995$

$\text{Ka}(\text{CO}_2/\text{HCO}_3^-) = 6,35$

$\text{Ka}(\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}) = 10,33$

$\text{Ka}(\text{HSO}_4^-/\text{SO}_4^{2-}) = 1,99$

$\text{Ka}(\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HSO}_4^-) = -3$

$\text{Ka}(\text{NH}_4^+/\text{NH}_3) = 9,25$

Annexe 2 La spectrométrie proche infrarouge (SPIR)

Principe général



Figure 1 Annexe 2 : Les différentes zones du spectre lumineux (Bertrand et Dufour 2000)

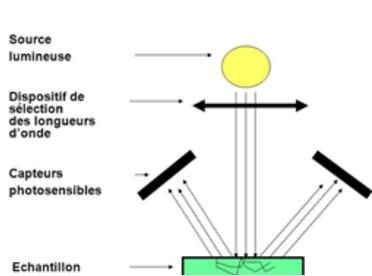


Figure 2 Annexe 2 : principe de la SPIR (Thuriès 2008)

Le principe de la SPIR repose sur les propriétés vibrationnelles des molécules et leurs interactions avec la lumière. Un échantillon soumis à la lumière IR (comprise entre 800 et 2500 nm) réagit différemment selon les liaisons chimiques et physico-chimiques qui le composent. Excitées par le rayonnement, les liaisons chimiques se comportent comme des oscillateurs vibrants à des fréquences dépendant de leur nature. A noter que les vibrations sont divisées en deux groupes : élongation et déformation. Il y a absorption de l'énergie lumineuse lorsque la fréquence de la radiation qui vient frapper la liaison est égale à la fréquence de vibration de cette liaison. Le spectre IR est donc constitué de bandes appelées bandes d'absorption et chaque longueur d'onde correspond à une liaison donnée. On peut alors quantifier le nombre de liaisons chimiques spécifiques du constituant. Ainsi, le spectre IR obtenu est lié à la composition de l'échantillon.

Il existe de nombreuses applications dans le domaine de l'agroalimentaire au niveau du contrôle qualité des denrées.

Transmission, absorption, loi de Beer-Lambert

Selon la nature de l'échantillon, l'acquisition du spectre lumineux peut se faire selon différents modes :

- en transmission : mesure de la lumière traversant un échantillon fin, on parle de transmittance (T) avec $T = I_t/I_0$ (I_t est l'intensité transmise et I_0 est l'intensité réfléchie par un matériau non absorbant pris comme référence)
- en réflexion : mesure de la lumière réfléchie par un échantillon épais, on parle de réflectance (R) avec $R = I_r/I_0$ (I_r : intensité réfléchie)

La mesure de l'intensité transmise (I_t) ou de l'intensité réfléchie (I_r) permet de calculer l'absorbance (A) (cf loi de Beer-Lambert).

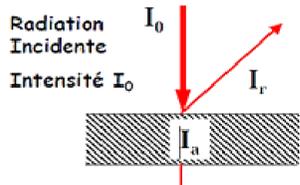


Figure 3 Annexe 2 : principe de la transmission et de la réflexion

Réflexion diffuse et réflexion spéculaire

Dans le cas d'une mesure en réflexion sur un échantillon solide, il peut arriver qu'une partie de l'énergie mesurée provienne d'une réflexion immédiate en surface. Cette composante n'ayant pas pénétré l'intérieur de l'échantillon est appelée réflexion. L'autre composante, la réflexion diffuse, correspond quant à elle à la lumière pénétrant à l'intérieur de l'échantillon. Elle est représentative des absorptions moléculaires et donc la seule permettant de renseigner sur la composition chimique de l'échantillon.

La chimiométrie : outil pour le traitement des données spectrales

La chimiométrie- généralités

La chimiométrie désigne l'ensemble des méthodes statistiques, graphiques ou symboliques permettant d'améliorer la compréhension d'information obtenues dans le domaine de la chimie. (Définition livre Bertrand Dufour)

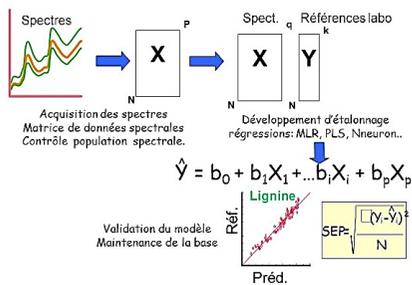


Figure 4 Annexe 2: Principes de développement d'un modèle SPII (Thuriès 2008)

Les spectres PIR contiennent de nombreuses informations donc l'extraction demande un traitement mathématique assez complexe. En effet, les spectres sont le résultat d'une interaction de la lumière avec la matière que l'on ne sait pas complètement décrire sur le plan théorique. Pour tenir compte de ces variations incontrôlées, il est nécessaire d'accumuler les spectres de nombreux échantillons (phase d'étalonnage ou calibration qui se base sur des mesures laboratoires de référence), et de traiter la collection spectrale ainsi obtenue par des méthodes chimiométriques. Les équations de calibration MLR (régression linéaire multiple) et PLS (régression des moindres carrés partiels) permettent par exemple de relier le spectre IR aux résultats de ces mesures.

Analyse en composantes principales ACP

L'ACP est une méthode permettant d'explorer les liaisons entre variables et les ressemblances entre individus en donnant une représentation visuelle des similitudes entre spectres sous forme de cartes factorielles ou cartes de ressemblance. Ainsi, deux spectres qui se ressemblent auront des positions voisines sur ces cartes. Comme son nom l'indique, l'ACP fait ressortir les composantes principales des spectres : parmi la collection spectrale, seules quelques composantes sont en

général suffisantes pour résumer l'information utile.

Classification ascendante hiérarchique CAH

La classification (ou Clustering) s'applique à des tableaux individus*variables quantitatives et a pour objectif la production d'une structure arborée selon des critères de ressemblance entre individus (distance euclidienne, indice de similarité) et ressemblance entre groupes d'individus. L'arbre hiérarchique obtenu permet de définir des classes (ou groupes), consolidées par un algorithme de partitionnement : K-means. Une bonne méthode de regroupement permet de garantir une grande similarité intra-groupe et une faible similarité intergroupe. La qualité d'un regroupement dépend donc de la mesure de similarité utilisée par la méthode et de son implémentation.

Les méthodes prédictives

La construction des modèles de régression linéaire multiple (MLR) pour les données spectrales de terrain

La régression MLR est une méthode statistique qui considère les données spectrales comme des variables prédictives. Elle prédit une variable « y » à partir des variables x_1, x_2, \dots, x_p qui sont des variables spectrales prises à différentes longueurs d'onde couramment regroupées sous une forme matricielle (X). La variable indépendante « y » correspond aux analyses de références. Le modèle de régression linéaire multiple s'écrit :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + e \text{ ou } y = X\beta + e$$

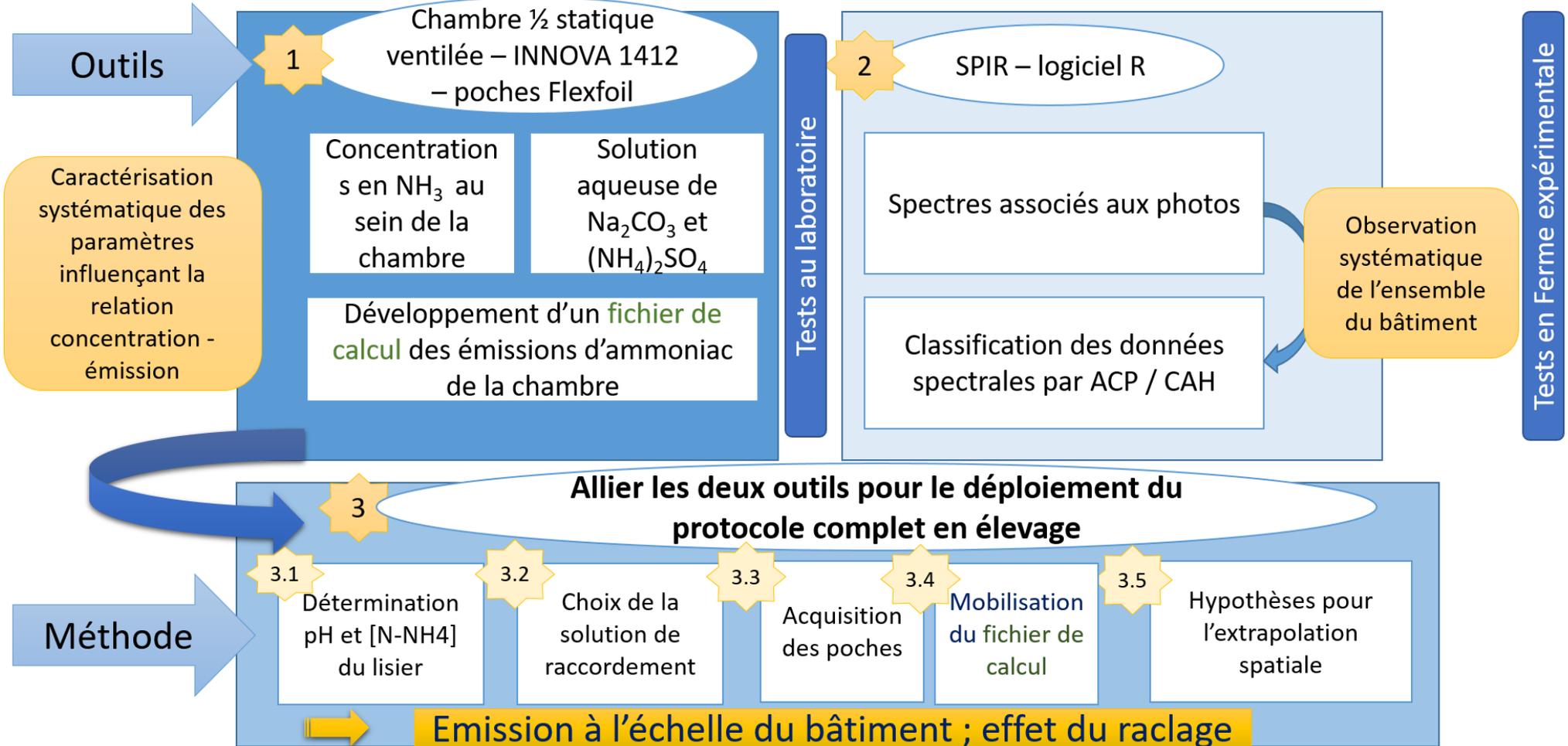
β_p : paramètres à estimer à partir des observations, e : erreur, X : tableau des variables explicatives x_1, x_2, \dots, x_p et β est le vecteur dont les composantes sont constituées par les paramètres inconnus du modèle $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$.

La construction des modèles de régression des moindres carrés partiels (PLS) pour les données spectrales de laboratoire

La régression PLS est une technique quantitative de décomposition spectrale. C'est la méthode la plus utilisée dans de nombreux domaines de la spectroscopie proche infrarouge.

La méthode PLS consiste à effectuer une régression de la variable à prédire y sur des variables explicatives latentes (x_1, x_2, \dots, x_p) d'une matrice X. N'ayant pas de relations connues entre x et y, il est nécessaire de prendre en considération les données de référence et les données spectrales. Pour ce faire, la méthode PLS combine les caractéristiques de l'analyse en composantes principales (ACP) et de la régression linéaire multiple (MLR). L'information spectrale de tous les échantillons est réduite en un nombre de composantes limitées expliquant le plus de variabilité spectrale possible. La matrice spectrale X est alors remplacée par une matrice réduite T sur laquelle une régression linéaire multiple est appliquée. Ainsi, on ne crée pas une régression sur Y à partir des variables indépendantes mais à partir de variables tenant compte de l'information contenue dans cette même matrice Y (Bertrand et Dufour 2000).

Objectif : mesurer rapidement les émissions ammoniacales en bâtiment d'élevage



Annexe 4 Protocole d'élaboration de la gamme de solutions de raccordement

Les calculs d'équilibres chimiques de la réaction prépondérante entre solution basique et solution acide permettent d'obtenir la composition de chaque solution de la gamme de raccordement selon la concentration en NH_4^+ et le pH souhaités.

Pour obtenir les concentrations et les pH voulus, ces deux grandeurs étant liées, on utilise de l'eau pure pour jouer sur la valeur de la concentration sans influencer de manière significative sur le pH.

Matériel

- Eau pure
- Bécher de 250 mL
- Spatule
- Coupelle
- Na_2CO_3
- $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
- Balance d'au moins 0,1 g de précision
- Agitateur magnétique
- Barreau aimanté
- Flacons en PEHD de 250 mL et 1L
- Bidon de 10 L
- Pipette de 1 mL
- Pipettes pasteur

Na_2CO_3 et $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ sont sous forme de poudre.

Solution basique

20 g de Na_2CO_3 dans 225 mL d'eau pure

- Peser 20 g de Na_2CO_3 dans une coupelle à l'aide d'une spatule
- Dans un bécher, peser 225 g d'eau pure
- Y ajouter un barreau aimanté et poser le bécher sur l'agitateur magnétique
- Commencer l'agitation et ajouter la poudre de Na_2CO_3 au fur et à mesure
- Maintenir l'agitation jusqu'à complète dissolution de la poudre
- Retirer le barreau aimanté et verser la solution basique obtenu dans un bidon de 250 mL et fermer le récipient

Solution ammoniacale

165 g de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ dans 10 L d'eau pure

Solutions de raccordement

Ci-dessous le tableau obtenu pour parvenir aux solutions de raccordement aux pH et concentrations souhaités.

Solution	$[\text{NH}_4^+]$ mol/L	pH	Solution basique (g)	Solution ammoniacale (mL)	Eau pure (mL)	Volume total max (mL)
1	0,125	7,33	0,6	300	300	610
2	0,125	7,73	0,5	100	100	210

3	0,124	8,03	0,5	50	50	110
4	0,124	8,31	1	50	50	110
5	0,123	8,64	2	50	50	110
6	0,12	9	4	50	50	110
7	0,114	9,59	10	50	50	110
8	0,105	10,19	20	50	50	120
9	0,102	10,94	100	80	20	210
10	0,148	8,29	1	60	40	110
11	0,075	8,28	0,5	30	70	110
12	0,037	8,49	0,5	15	85	110
13	0,037	7,15	0,2	120	700	830

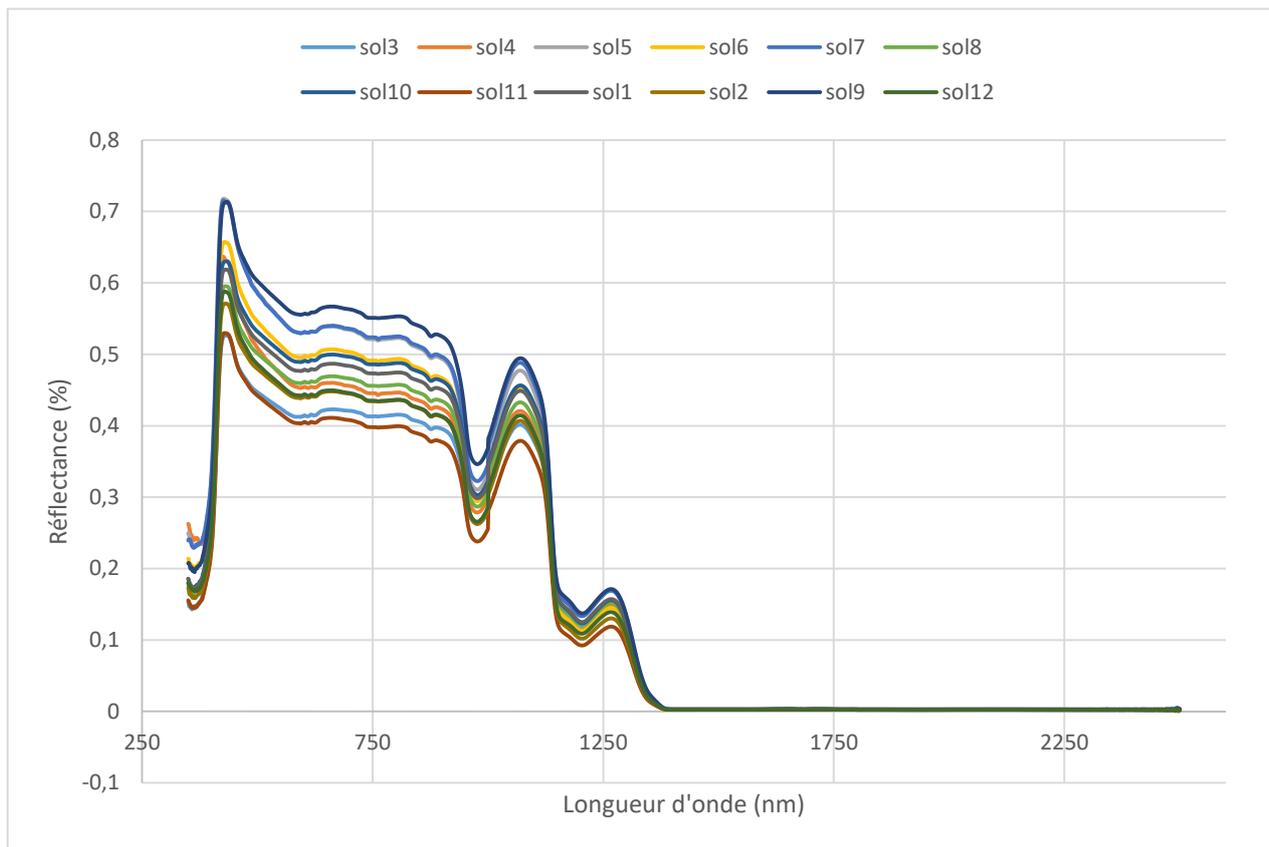
La densité de la solution ammoniacale étant proche de celle de l'eau, on utilisera une balance pour faire les mélanges : en faisant l'hypothèse que 300 mL de solution ammoniacale équivaut à 300 g.

- Dans un flacon de contenance adaptée (selon le volume total de la solution obtenu après mélange), peser la masse de solution ammoniacale nécessaire. On peut utiliser une pipette pasteur à l'approche de la masse souhaitée.
- Ajouter l'eau pure
- A l'aide d'une pipette de 1 mL dans le cas d'ajout de très faible quantité de solution, ajouter la masse de solution basique au mélange
- Agiter et fermer rapidement le flacon pour éviter tout dégagement d'ammoniac

Annexe 5 Bilan des tests avec chambre ½ statique ventilée à la halle expérimentale PSN

TEST	duree	T_moy_ext	T_moy_cloche	solution	dilution	ventilateur_V	pompage_continu	pompage_discontinu	nbre_prelevement	pompe	sol_beton	plaque_noire	recipient_beton	cellophane	beton_humide	concentration_max_NH3	perte_g
test 1	01:21:03	16,2	16,5	3	1	12 non		1 min 30		3 C2	oui	non	non	non	non		0,7
test 2	01:14:10	16,3	16,8	3	1	12 non		1 min 30		3 C2	non	oui	non	non	non	3,867	0,4
test 3a	00:53:15	15,8	17	12	1	22 non			0	0	non	oui	non	non	non	5,83	0,5
test 3b	01:24:58	18,3	18,5	12	1	22 non			0	0	non	oui	non	non	non	7,76	0,5
test 3c	01:12:59	20	19,1	12	1	22 non			0	0	non	oui	non	non	non	10,6	0,3
test 3d	01:10:01	19,3	18,7	12	1	22 non			0	0	non	oui	non	non	non	11,3	0,4
test 4	01:09:31	15,7	17	12	1	22 non		1 min 30		3 C2	non	oui	non	non	non	6,62	0,5
test 5	02:22:37	16,1	16,8	12	1	0 non			0	0	non	oui	non	non	non	8,76	0,1
test 6	01:18:05	16,8	16,8	12	1	0 non		1 min 30		3 C2	non	oui	non	non	non	6,42	0
test 7	01:40:31	17,2	17,3	8	1	22 non			0	0	non	oui	non	non	non	146	0,5
test 8	02:35:57	18,6	17,7	8	1	22 non			0	0	oui	non	non	non	non	29,7	0,6
test 9	00:57:58	15,8	17	12	1	22 non			0	0	oui	non	non	non	non	0,83	0,5
test 10a	01:13:59	18,8	18,6	12	1	22 non			0	0	non	oui	oui	non	non	1,47	0,7
test 10b	01:09:01	18,9	18,5	12	1	22 non			0	0	non	oui	oui	non	non	3,29	0,5
test 11a	01:10:58	19,5	19	12	1	22 non			0	0	non	oui	oui	oui	non	8,55	0,3
test 11b	01:12:58	18,5	18,3	12	1	22 non			0	0	non	oui	oui	oui	non	3,71	0,4
test 11c	01:14:00	20	18,9	12	1	22 non			0	0	non	oui	oui	oui	non	9,76	0,3
test 12	02:10:55	20,8	19,4	13	1	22 non		1 min 30		3 C2	non	oui	non	non	non	1,77	0,6
test 13	01:45:58	19,4	19,5	13	1	22 non		1 min 30		2 C1 et C2	non	oui	non	non	non	0,498	0,8
test 14a	01:14:00	19,6	19,3	12	0,5	22 non			0	0	non	oui	non	non	non	2,57	0,3
test 14b	01:07:57	21,5	20,2	12	0,5	22 non			0	0	non	oui	non	non	non	4,67	0,3
test 15	01:07:57	20,2	19,5	12	0,5	22 non		1 min 30		3 C2	non	oui	non	non	non	3,76	0,3
test 16	01:10:58	20,8	20,1	12	0,5	22 non		1 min 30		3 C1 et C2	non	oui	non	non	non	3,93	0,3
test 17	01:16:00	19,7	18,8	12	1	22 non			0	0	non	oui	oui	non	oui	3,6	0,1
test 18	01:04:00	20,3	19,2	12	1	22 oui			0	0 C2	non	oui	non	non	non	6,41	0,7

Tableau 1 Annexe 5: tableau bilan des tests chambre à la halle expérimentale



Fond noir et fond blanc

Figure 1 Annexe 6: spectres des solutions de raccordement sur fond blanc

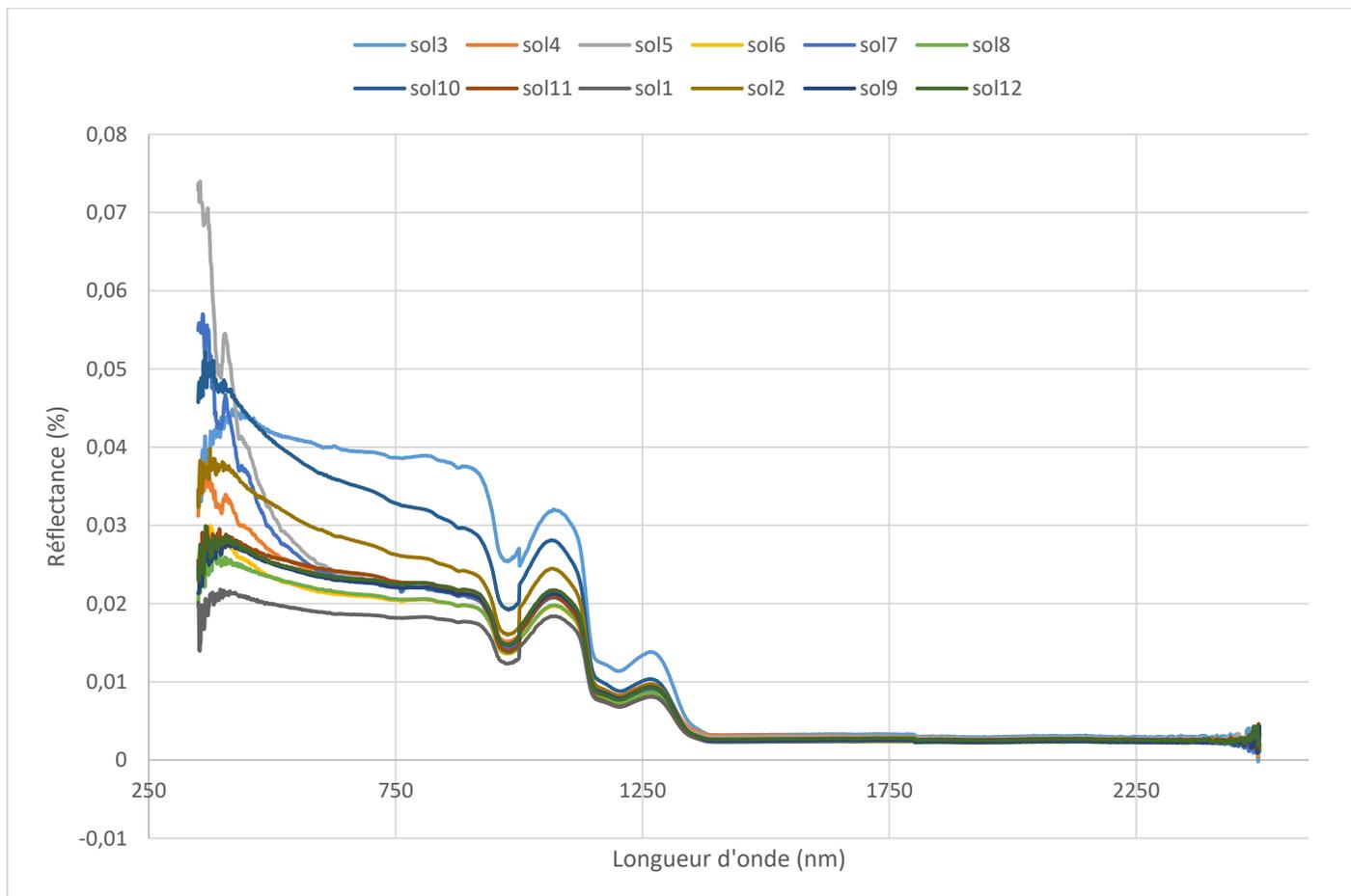


Figure 2 Annexe 6: spectres des solutions de raccordement sur fond noir

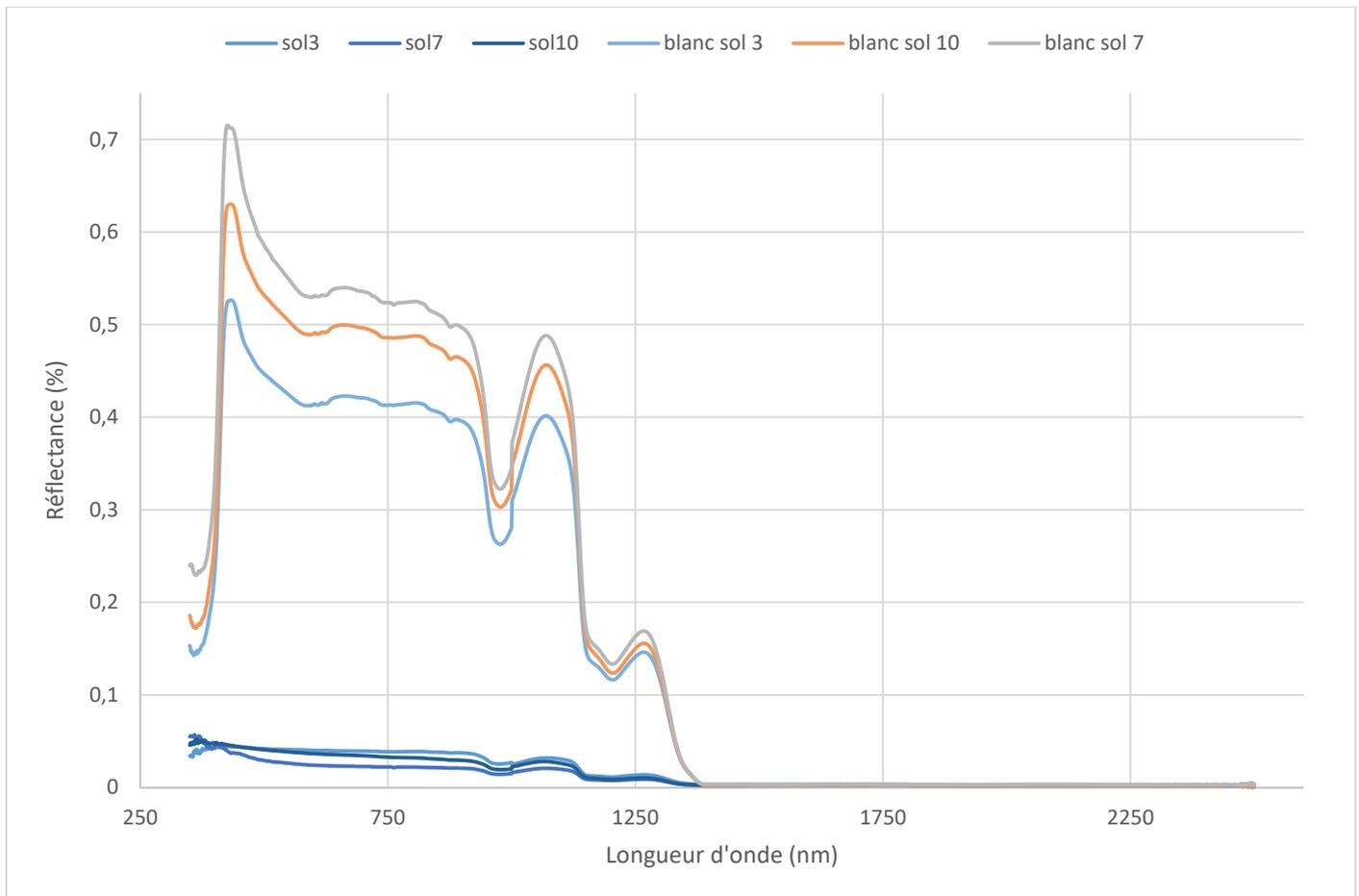


Figure 3 Annexe 6: comparaison de quelques spectres fond noir et fond blanc

L'allure du spectre obtenu est fortement dépendante du type de fond utilisé : la réflectance est très faible sur fond noir et beaucoup plus importante sur fond blanc.

Pour s'affranchir des problèmes de fond, les tests suivants ont été effectués sur fond de silice qui est un support inerte permettant de travailler uniquement en réflexion diffuse : le milieu granulaire va allonger le chemin optique ce qui va permettre d'obtenir un signal.

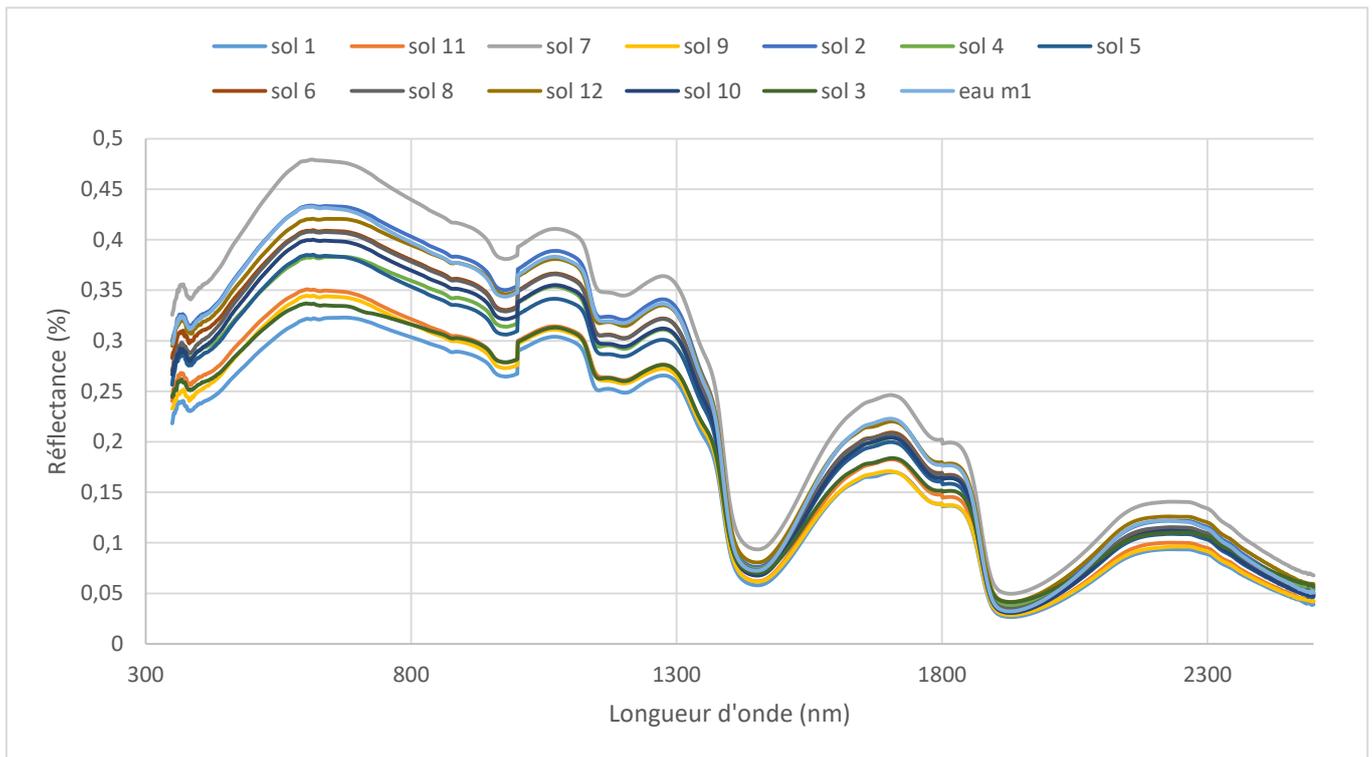
Silice

m1 : correspond à une masse de liquide de 1,5 g versée sur la silice

m2 : correspond à une masse de liquide de 2,0 g versée sur la silice

m3 : correspond à une masse de liquide de 2,5 g versée sur la silice

Spectres à la lumière ambiante



Première série

Figure 4 Annexe 6: spectres solutions de raccordement m1 lumière extérieure

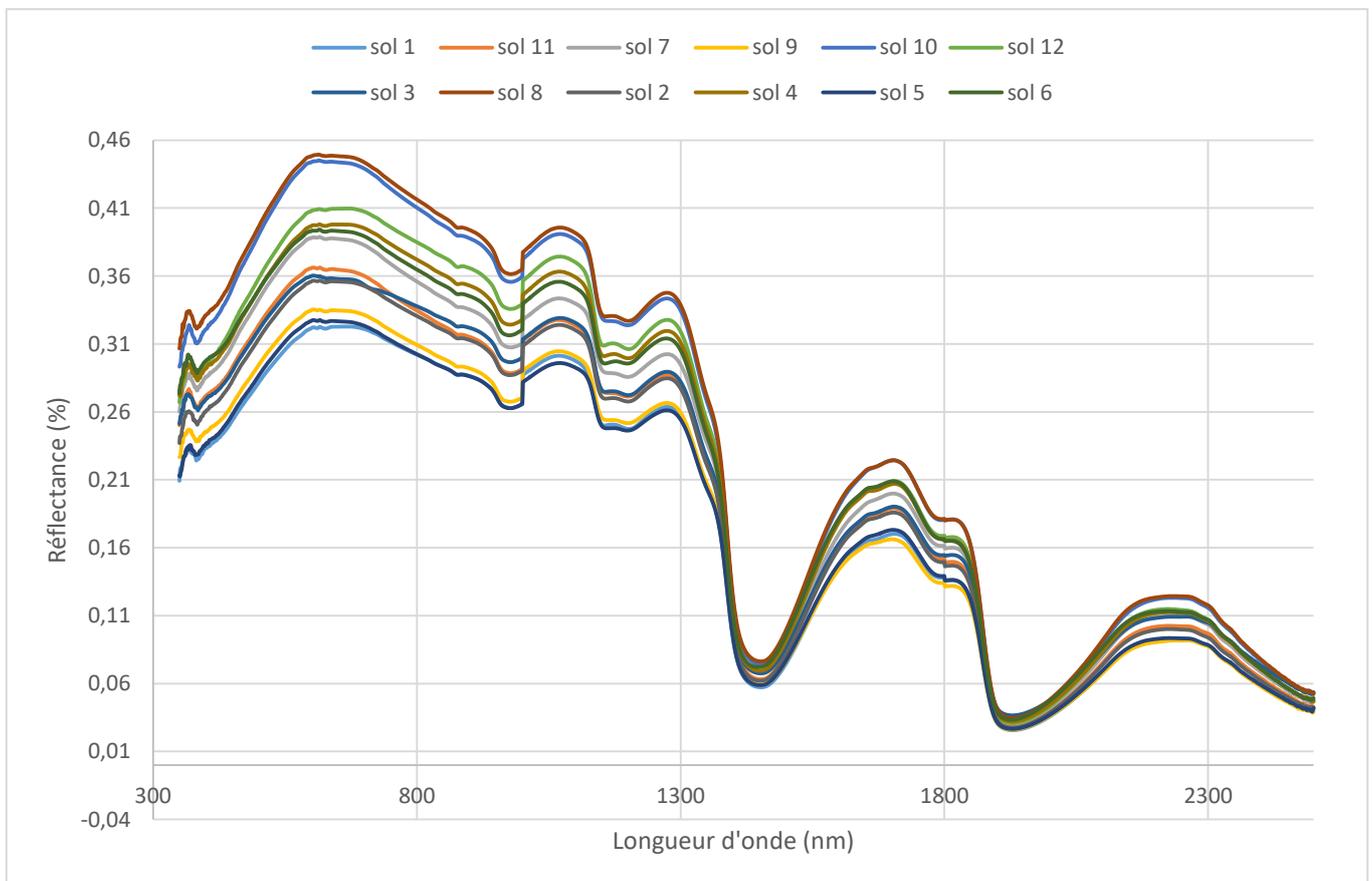


Figure 5 Annexe 6: spectres solutions de raccordement m2 lumière extérieure

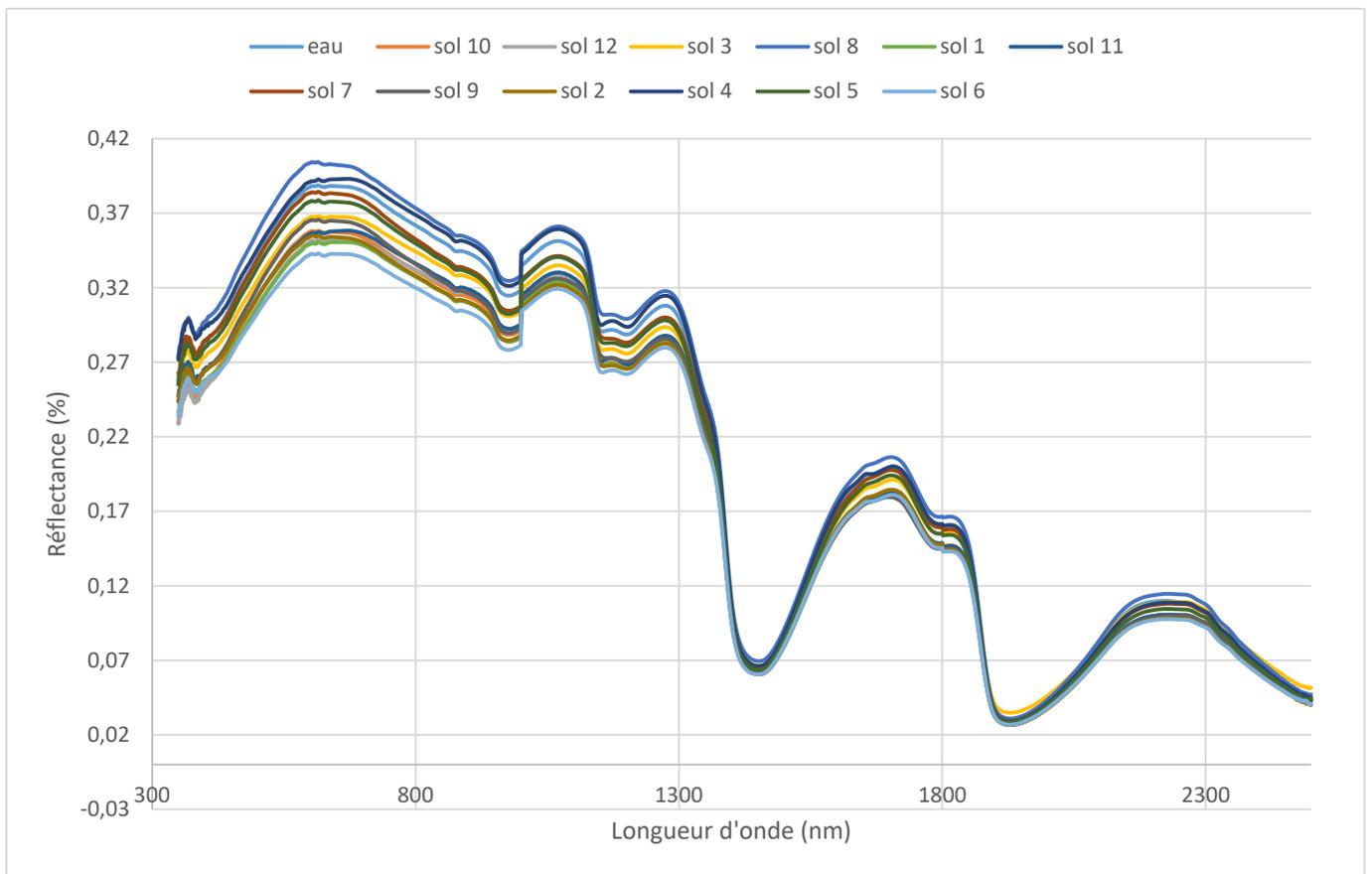


Figure 6 Annexe 6: spectres solutions de raccordement m3 lumière extérieure

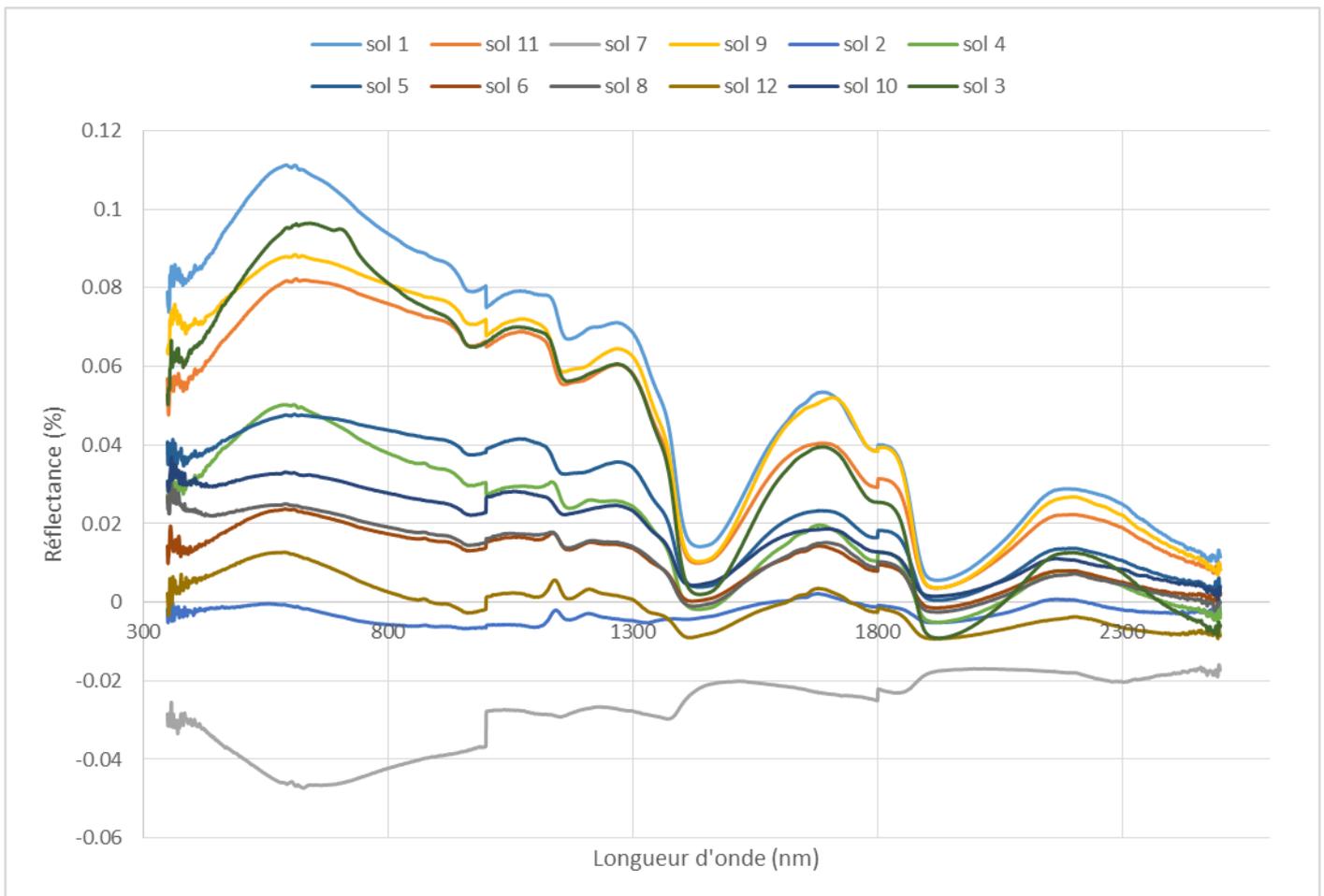


Figure 7 Annexe 6: spectres solutions de raccordement m1 auxquels le spectre de l'eau a été soustrait- lumière extérieure

Deuxième série

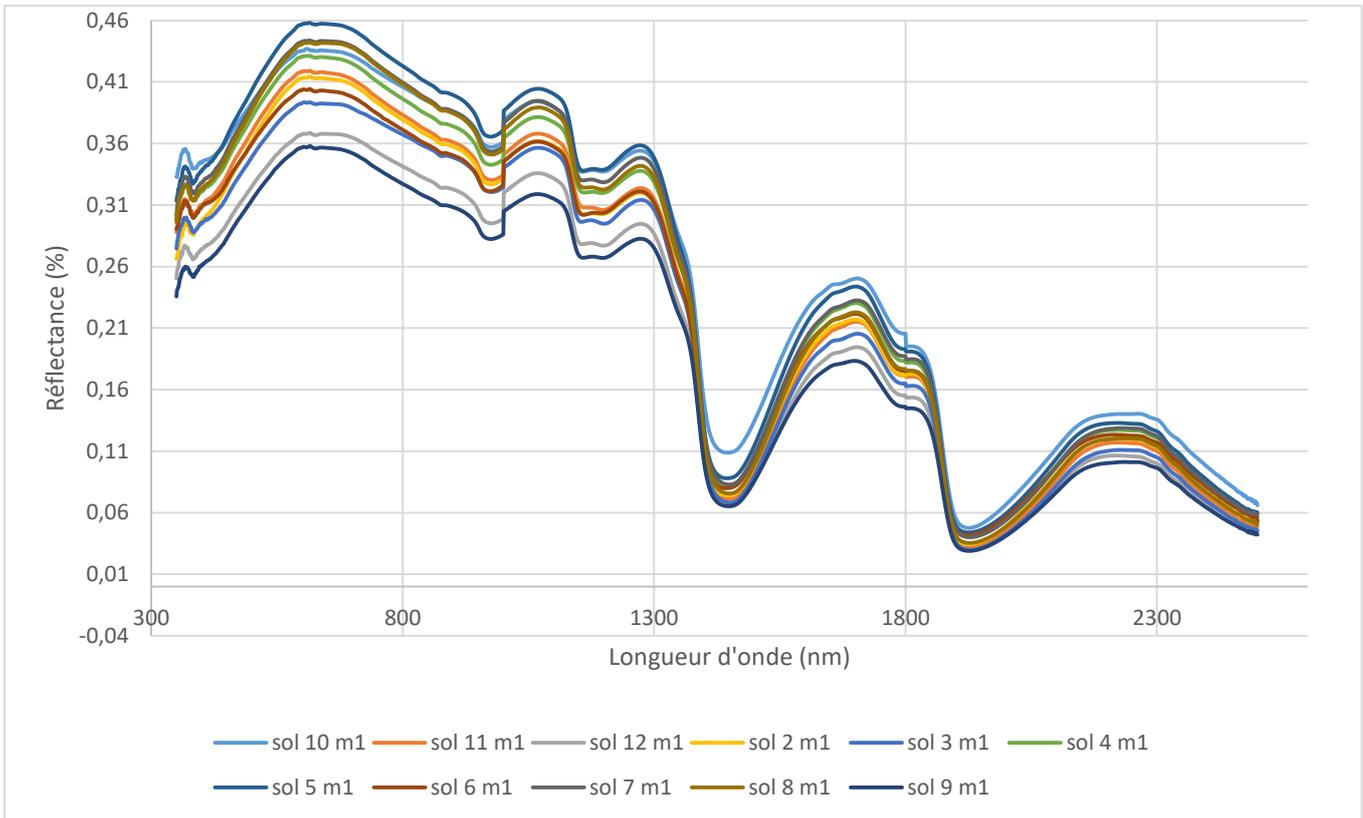


Figure 8 Annexe 6: spectres solutions de raccordement m1 lumière extérieure bis

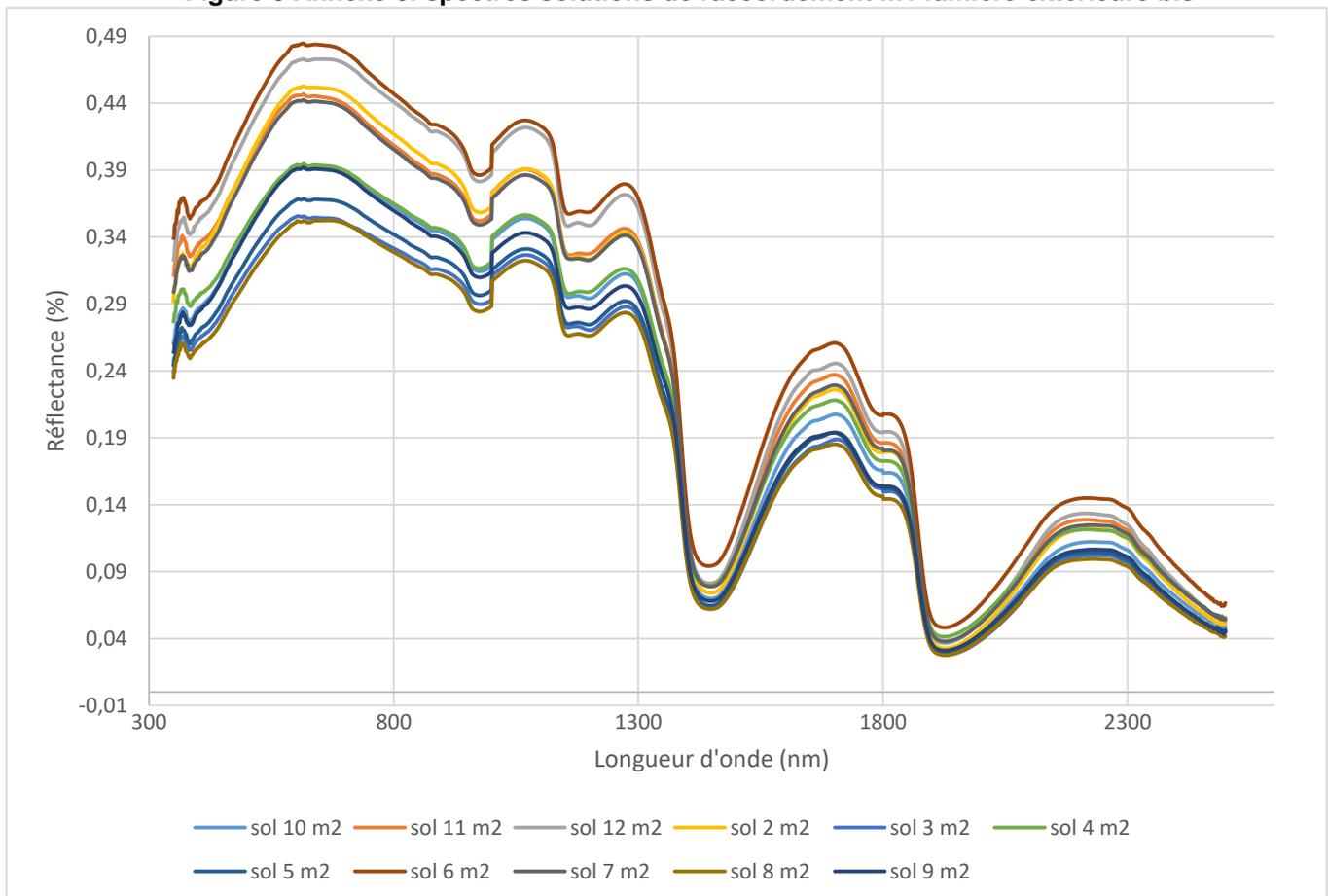


Figure 9 Annexe 6: spectres solutions de raccordement m2 lumière extérieure bis

Spectres avec cache noir

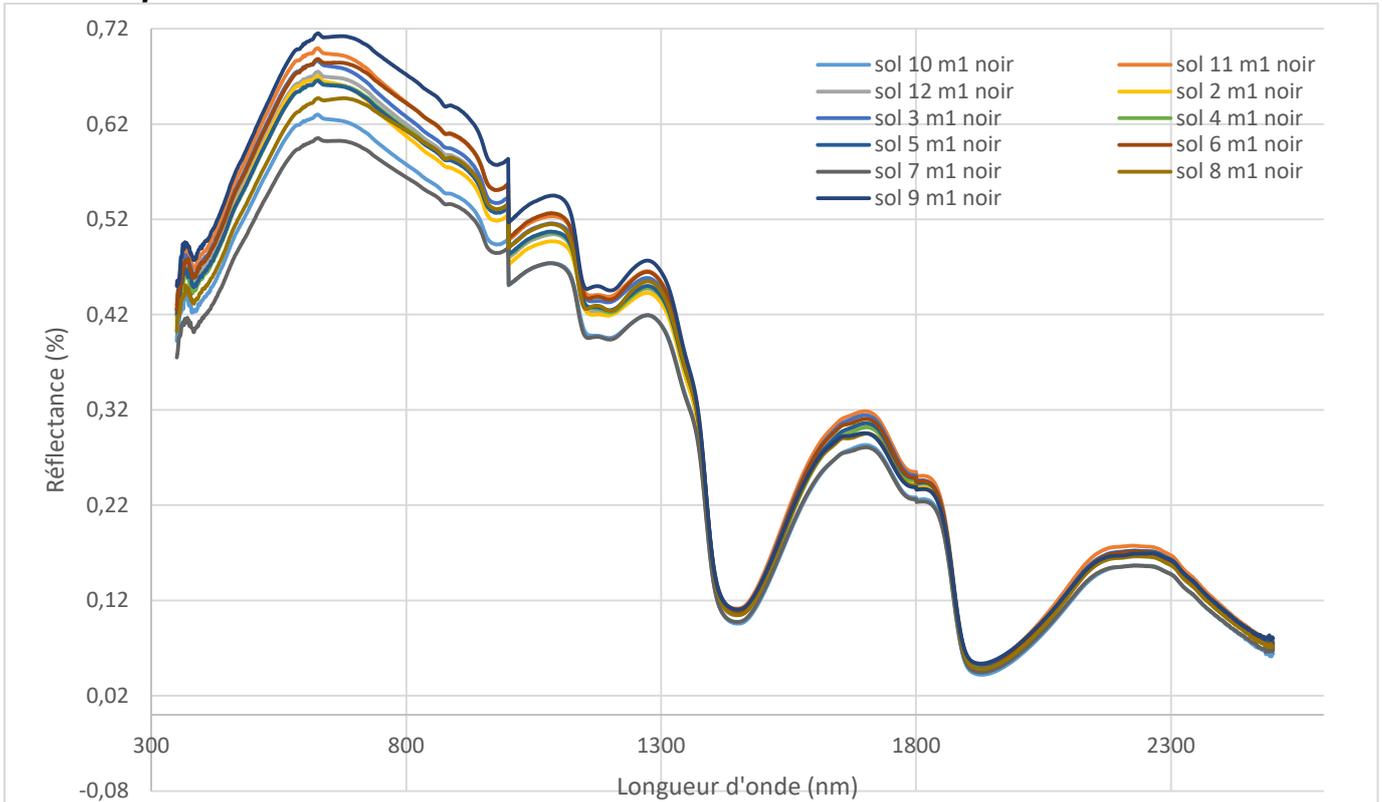


Figure 10 Annexe 6: spectres solutions de raccordement m1 cache noir

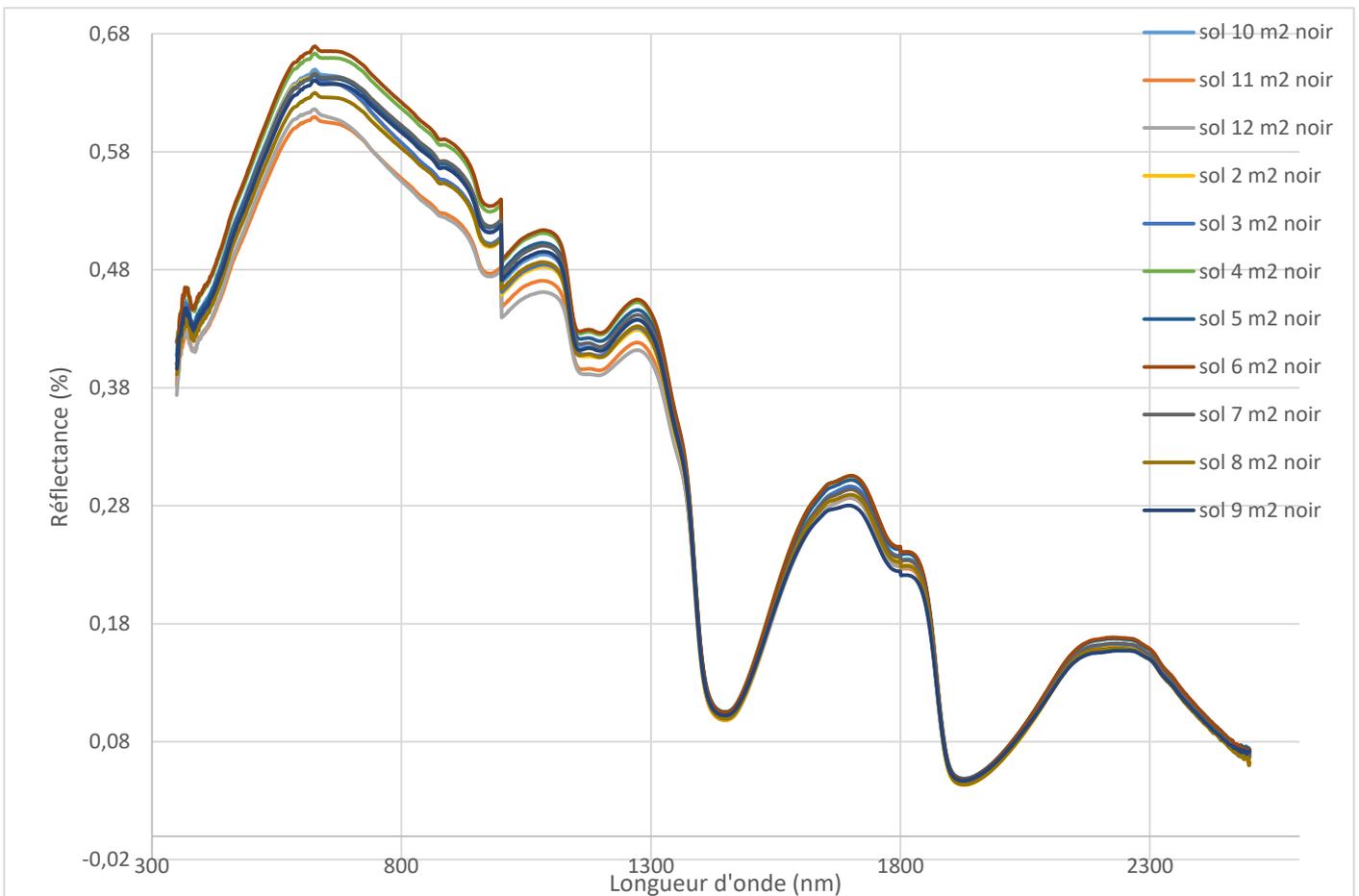


Figure 11 Annexe 6: spectres solutions de raccordement m2 cache noir

Comparaison

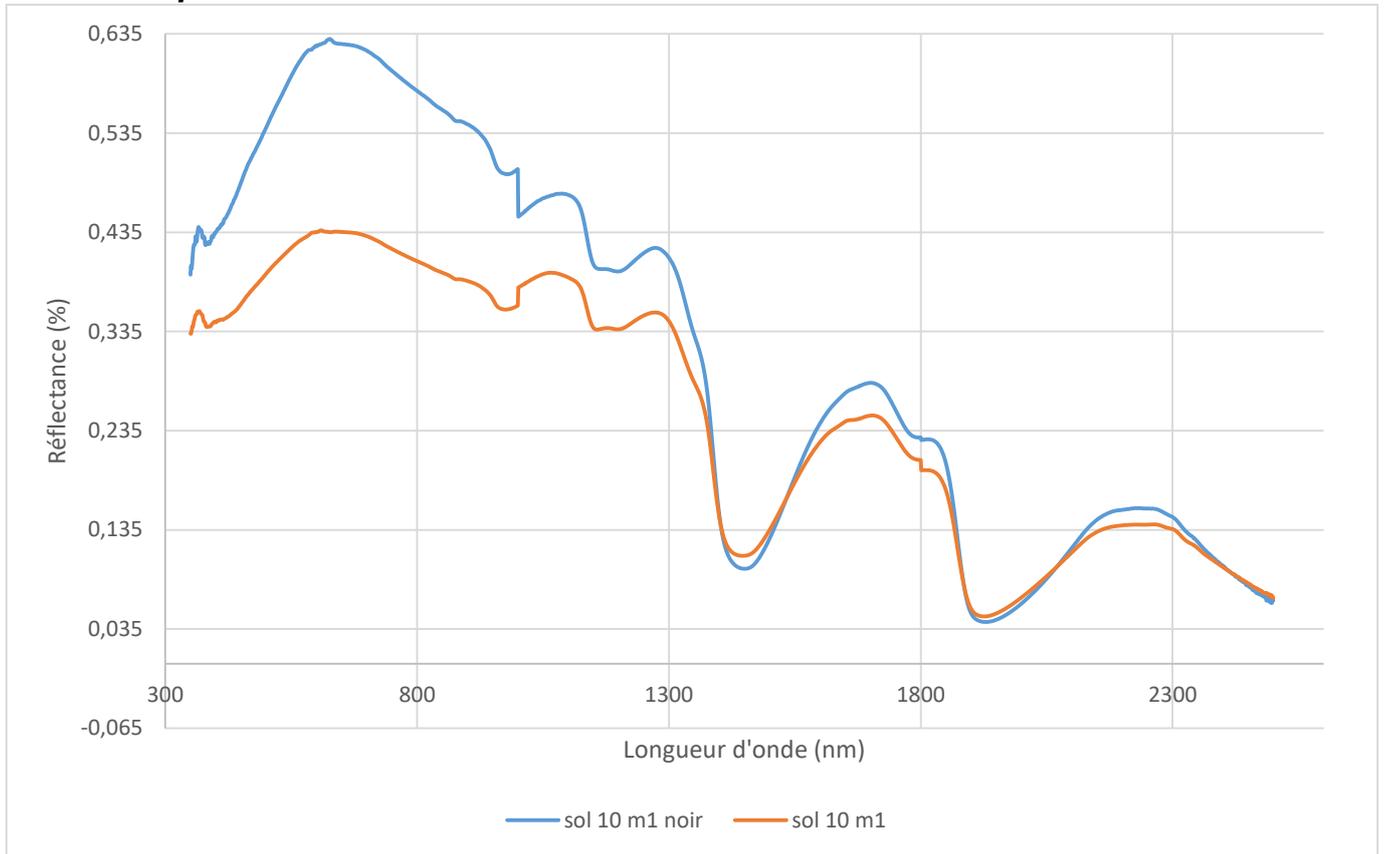


Figure 12 Annexe 6: spectres solution 10 m1

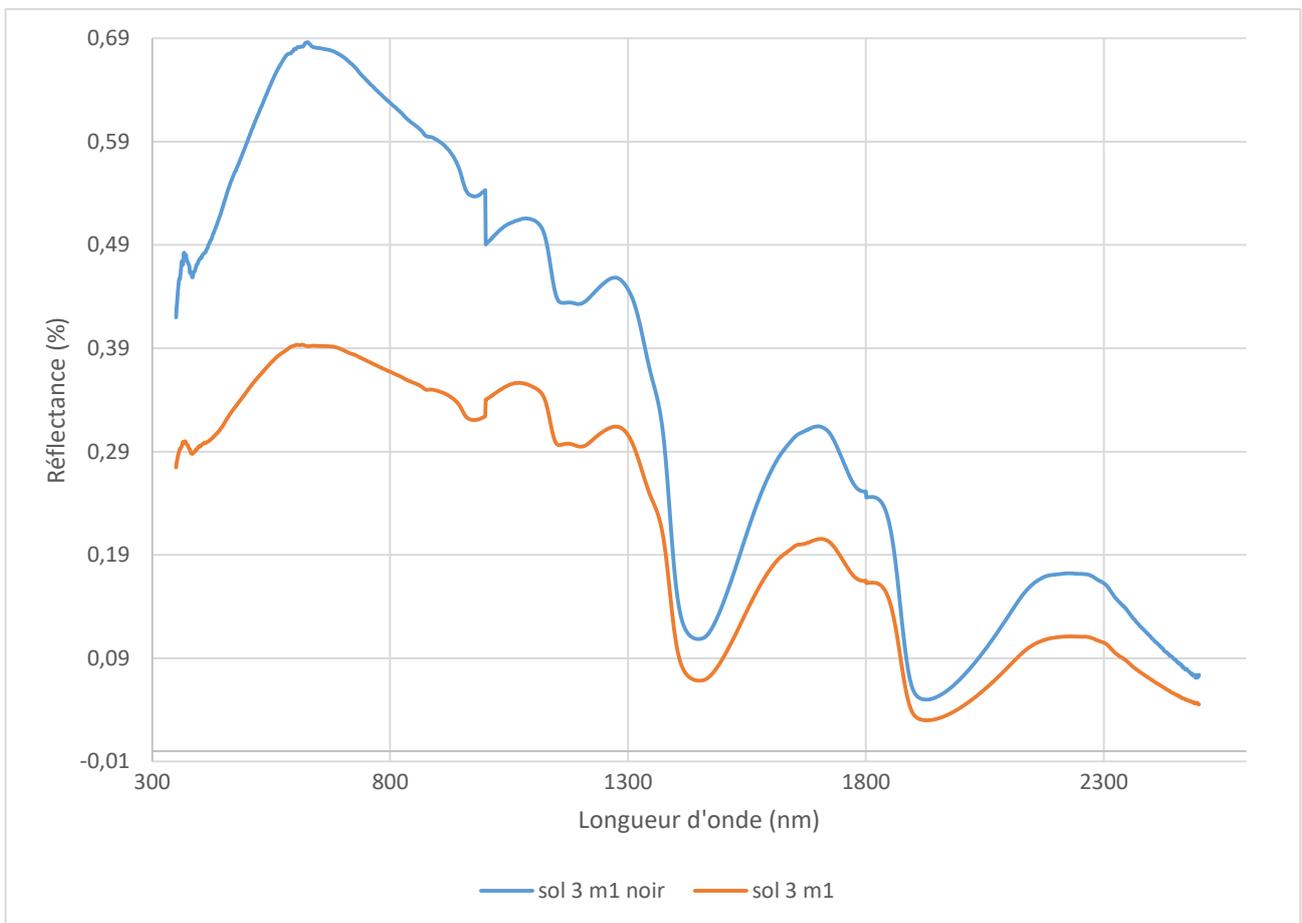


Figure 13 Annexe 6: spectres solution 3 m1

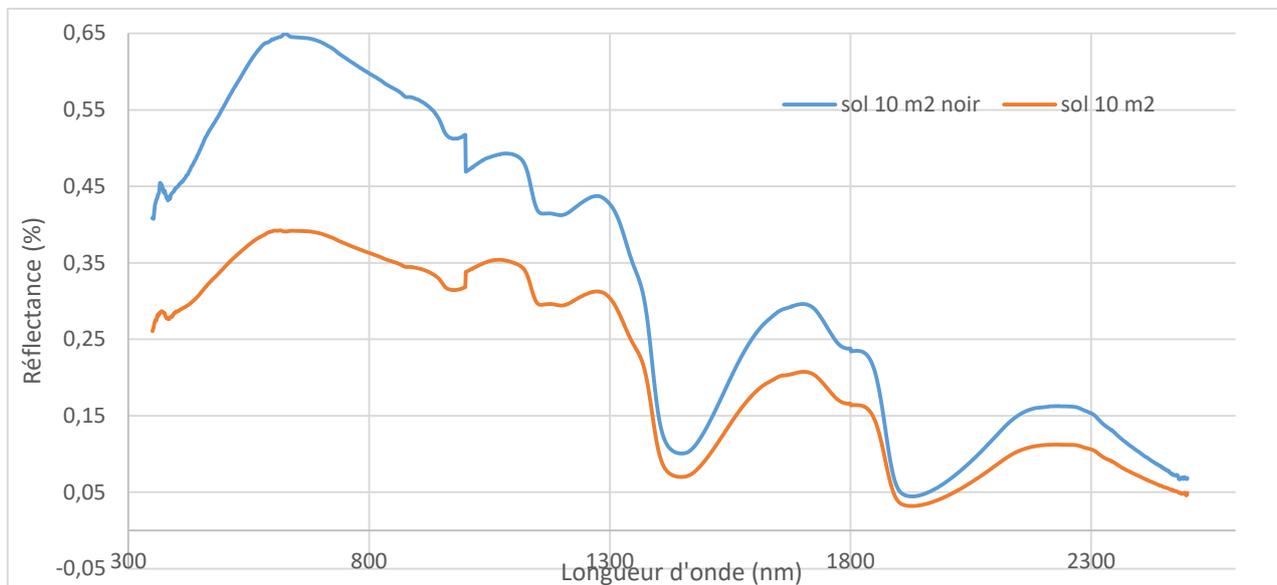


Figure 14 Annexe 6: spectres solution 10 m2

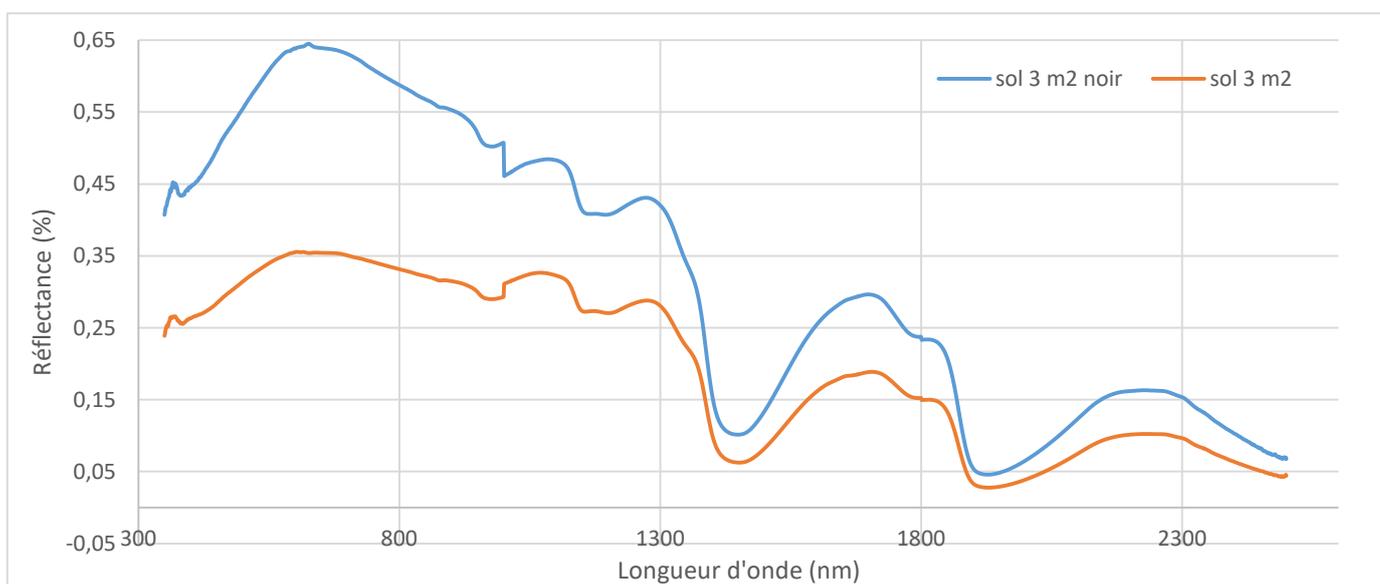


Figure 15 Annexe 6: spectres solution 3 m2

Traitements chimiométriques : équation de prédiction SNV et MSC du pH

λ (nm)	SNV	MSC	λ (nm)	SNV	MSC	λ (nm)	SNV	MSC
Co			Co			Co		
	11.9139	8.8669		11.9139	8.8669		11.9139	8.8669
C λ			C λ			C λ		
350	-0.6455	-3.2863	361	0.745	3.7969	372	-1.1221	-5.7069
351	-1.0894	-5.5447	362	0.0843	0.4345	373	-0.7169	-3.6443
352	-1.1208	-5.7022	363	-0.4857	-2.4664	374	0.1432	0.7334
353	-1.0084	-5.1299	364	-0.8433	-4.2872	375	0.4936	2.5162
354	-0.6134	-3.1203	365	-0.9687	-4.9281	376	0.3406	1.7374
355	0.1232	0.629	366	-0.4973	-2.5289	377	0.209	1.0676
356	0.3009	1.5346	367	0.0407	0.2103	378	0.0679	0.35
357	0.2491	1.2711	368	0.3499	1.7858	379	-0.5001	-2.5415
358	0.1423	0.7269	369	0.3902	1.9898	380	-0.6568	-3.3398
359	-0.3712	-1.884	370	0.4232	2.1579			
360	0.0748	0.3864	371	0.0177	0.0941			

Figure 16 Annexe 6: coefficients C_λ et C_0 à appliquer aux valeurs de réflectance R_λ du spectre acquis pour obtenir le pH

Annexe 7 Tests laboratoires SPIR sur lisier et fumier

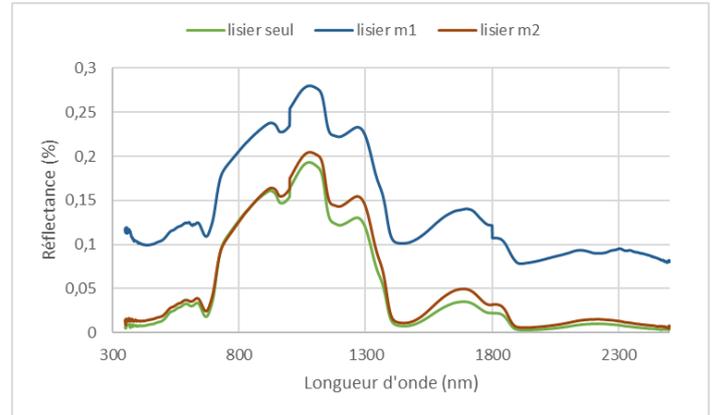
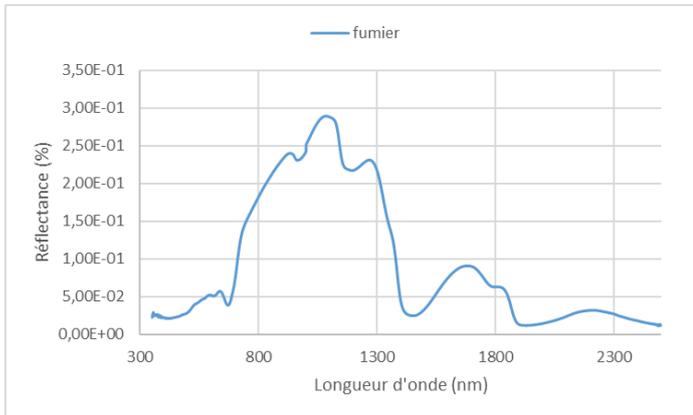


Figure 1 Annexe 7: spectre fumier - ferme expérimentale INRA Le Rheu

Figure 2 Annexe 7: spectres lisier - ferme expérimentale INRA Le Rheu

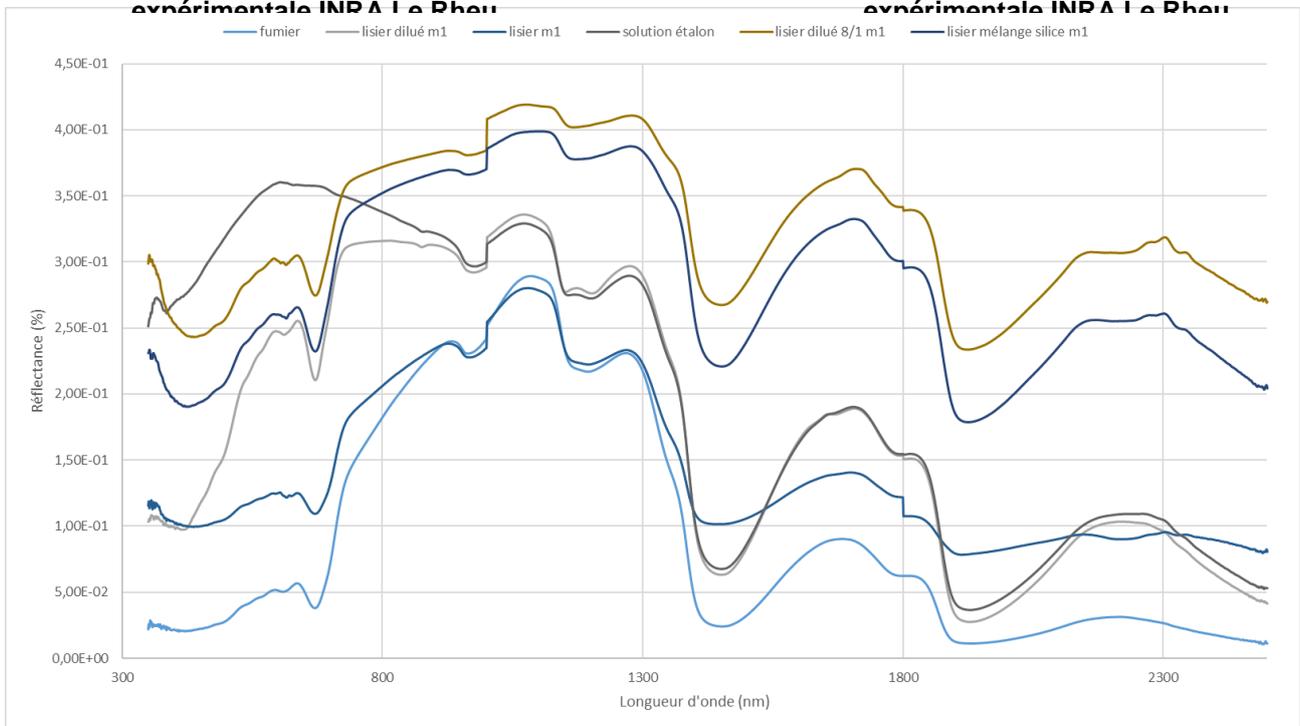


Figure 3 Annexe 7: spectres lisier

Protocole

- 1) Schéma du bâtiment
- 2) Identification des parties émettrices : couloir logette et aire d'exercice

L'aire d'exercice étant plus souillée que le couloir logette, on définit cette zone comme très émettrice et on qualifie le couloir logette de moyennement émetteur.

- 3) Acquisition de spectres sur aire d'exercice le matin + photos qui correspondent aux zones mesurées
- 4) Installation des chambres dans couloir logette le matin :
 - Plaque noire + solution 12 → 6 poches (20 min de croissance avec 3 poches et 20 min de décroissance avec 2 poches + 1 poche air extérieur)
 - Sol → 3 poches pendant 20 min puis on décale la chambre et encore 3 poches pendant 20 min
 - Sol + solution 12 → 3 poches pendant 20 min
- 5) Acquisition des spectres sur couloir logette l'après-midi + photos qui correspondent aux zones mesurées
- 6) Installation des chambres dans aire d'exercice l'après-midi, même mesures que le matin (faite sur sol juste après raclage)

Rappel de la composition de la solution 12 :

0,5 g de base + 15 mL solution bidon ammoniac + 85 mL d'eau

$[\text{NH}_4^+] = 0,037$ et $\text{pH} = 8,47$

La solution 12 utilisée a été faite le matin, c'est la même pour tous les tests.

Description protocole mesure chambres :

- 1) Installation du dispositif (deux chambres de mesure côte à côte)
 - plaque noire propre sous une chambre
 - rien sous l'autre

Ventilateur 24V branché sur deux batteries de 12V en série, Crouzet prélevant durant 1'30" toutes les 8' et qui pompe 4' après le lancement du programme. Les chambres sont initialement relevées.

- 2) Mettre en marche les ventilateurs des chambres
- 3) Fixer les premières poches de prélèvement préalablement étiquetées sur les pompes
- 4) Placer un thermo hygromètre sous la cloche avec la plaque et un autre à l'extérieur, les déclencher en même temps
- 5) Préparer la solution de raccordement choisie, faire le mélange base/acide au dernier moment et mettre la solution sous la chambre dans une boîte de Pétri avec la plaque en ayant pesé la masse de liquide au préalable et mesuré le pH
- 6) Fermer les deux chambres et lancer le Crouzet
- 7) Attendre 3 prélèvements, arrêter le Crouzet
- 8) Soulever les deux chambres, retirer la solution, peser le restant de liquide et mesurer son pH final
- 9) Déplacer la chambre de mesure sol (mais ne pas toucher à la chambre plaque), refermer les deux chambres et lancer de nouveau le Crouzet pour 3 cycles de prélèvement.
- 10) Arrêter le Crouzet, soulever les chambres
- 11) On effectue une dernière série de mesures avec la chambre ayant servi à mesurer les émissions du sol :
 - Préparation d'une nouvelle « dose » de solution de raccordement
 - Ventilateurs toujours à 24V + chambre relevée
 - On pèse et on mesure au préalable la masse de liquide ainsi que son pH
 - On place la solution sous la chambre dans une boîte de Pétri
- 12) Fermer la chambre et lancer le Crouzet pour un cycle de prélèvement de 3 poches
- 13) A la fin des prélèvements, peser le restant de liquide et mesurer son pH final.
- 14) A la fin des mesures chambres, analyser les poches de gaz prélevées à l'aide de l'échantillonneur couplé avec l'analyseur et récupérer les données des thermohygromètres

Résultats méthode chambres

Couloir alimentation plaque + solution 12

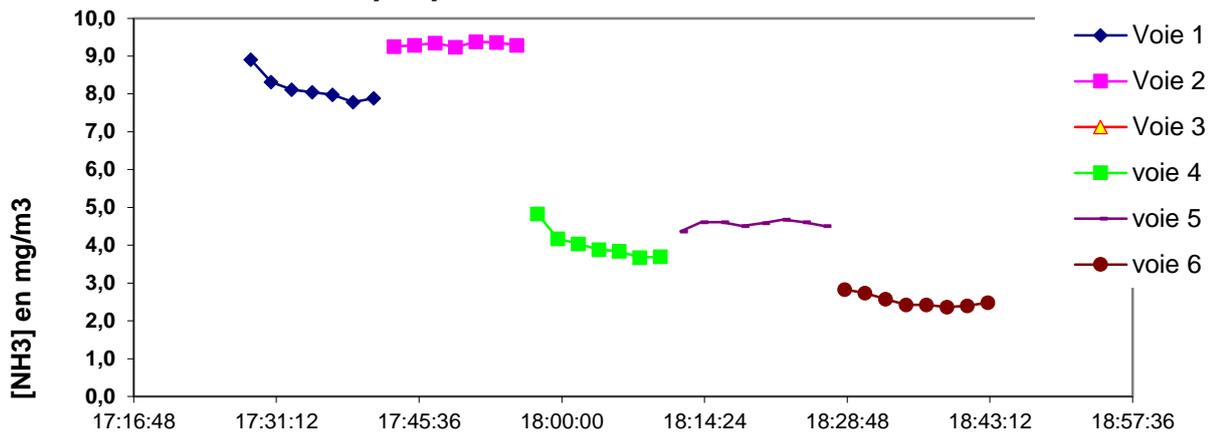


Figure 1 Annexe 8

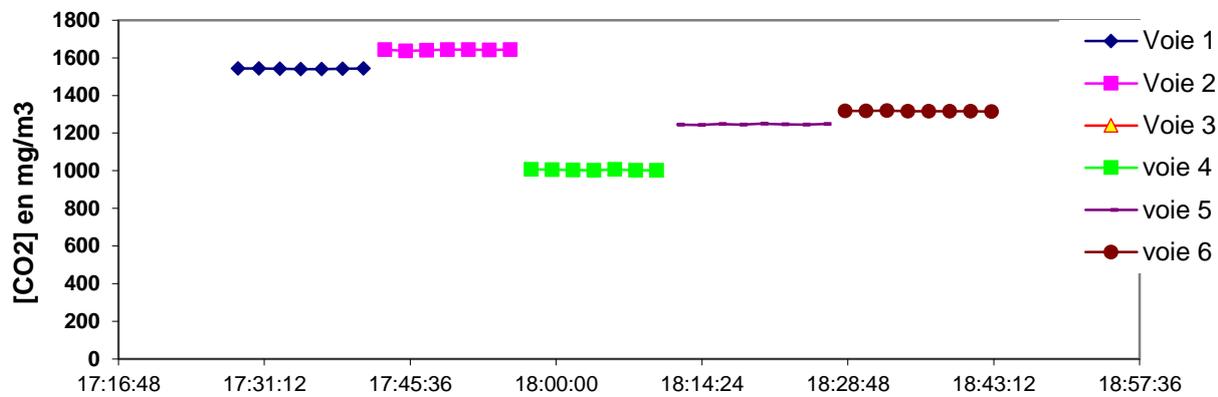


Figure 2 Annexe 8

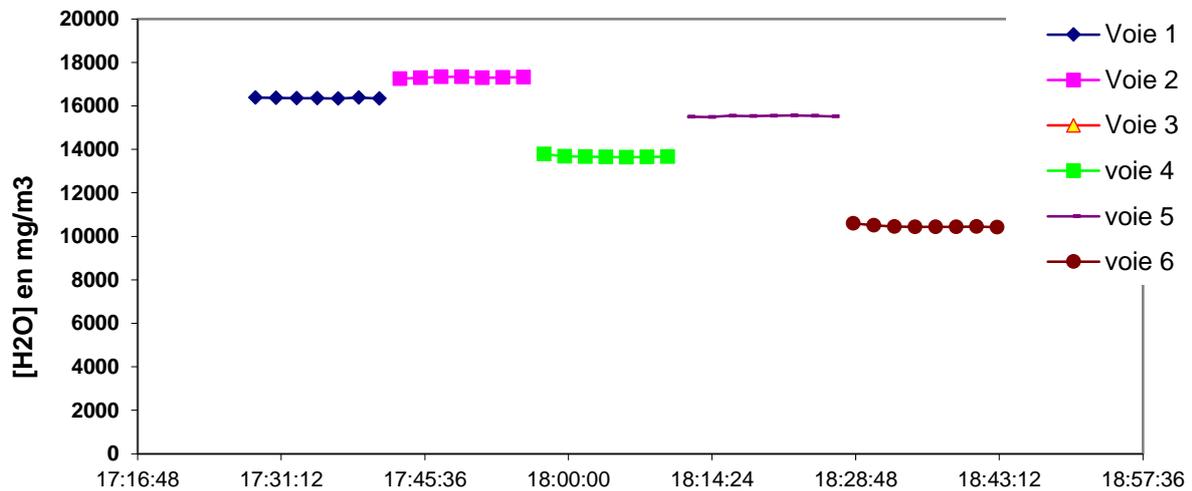


Figure 3

Annexe 8

Couloir alimentation sol

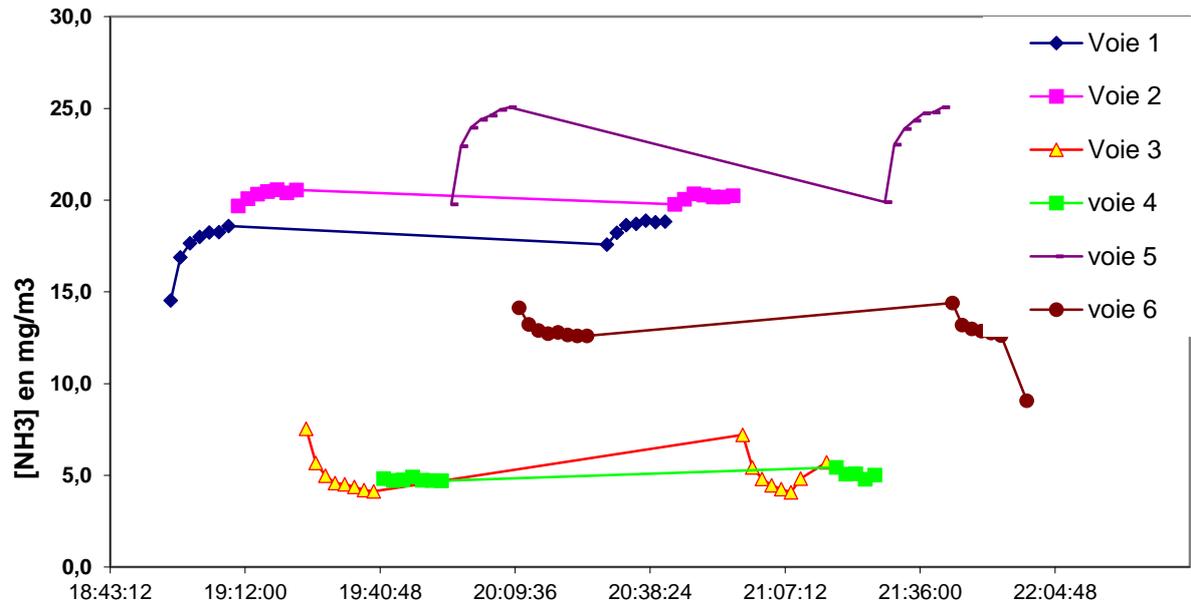


Figure 4 Annexe 8

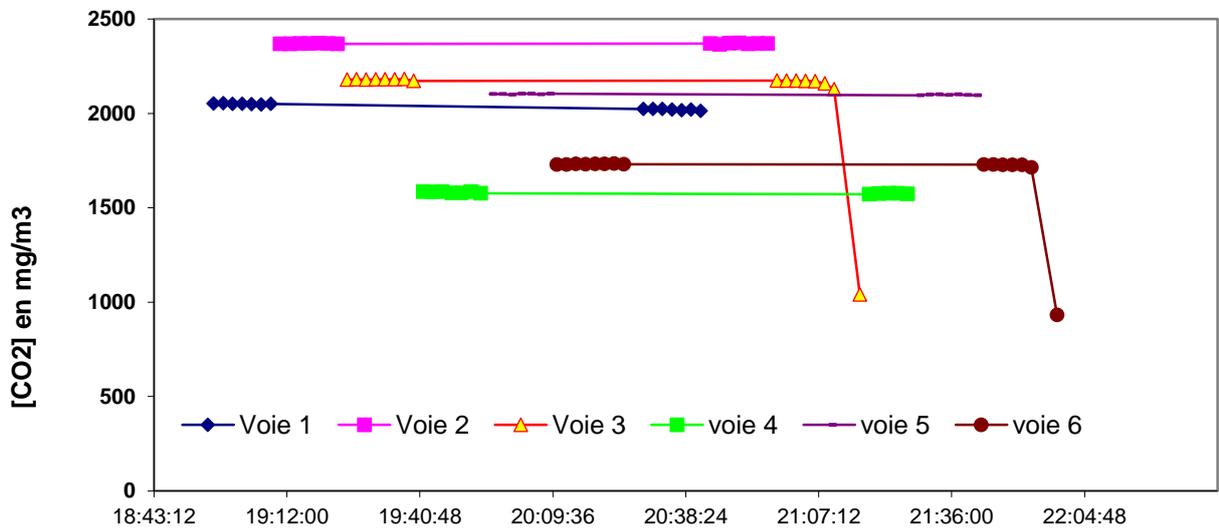


Figure 5 Annexe 8

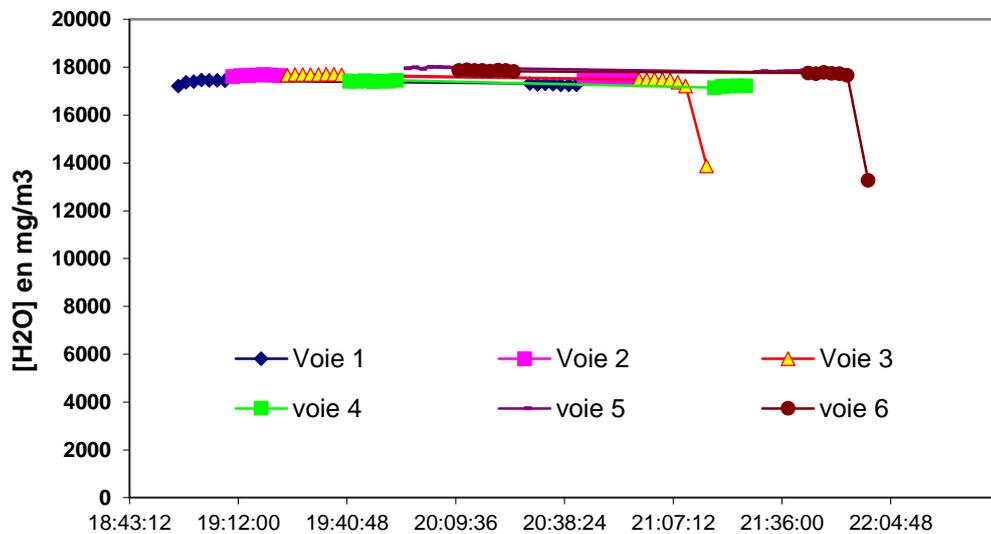


Figure 6 Annexe 8

Couloir logettes plaque + solution 12

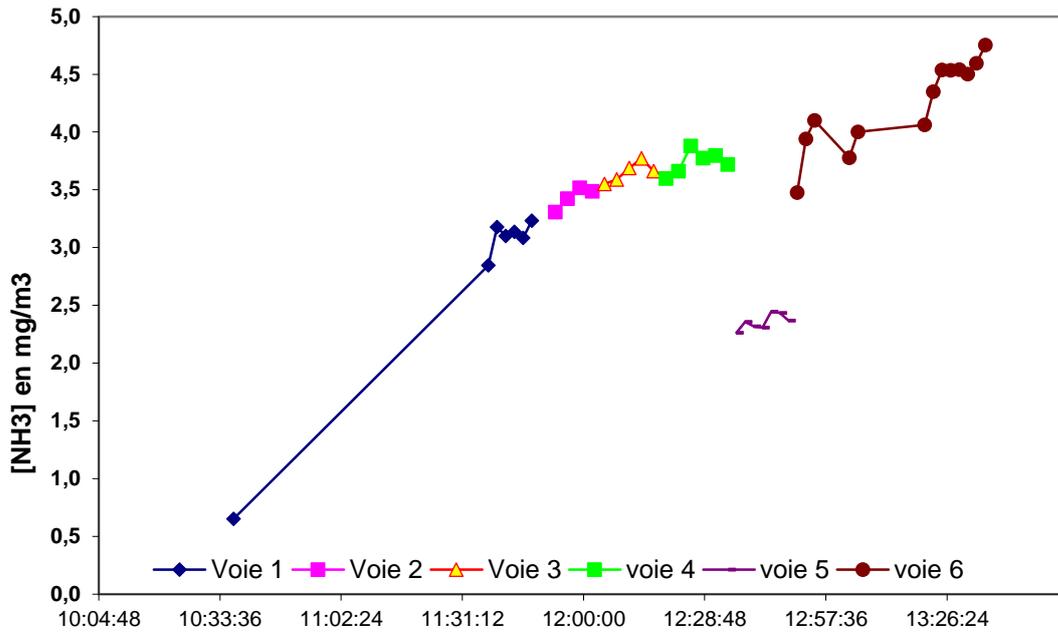


Figure 7 Annexe 8

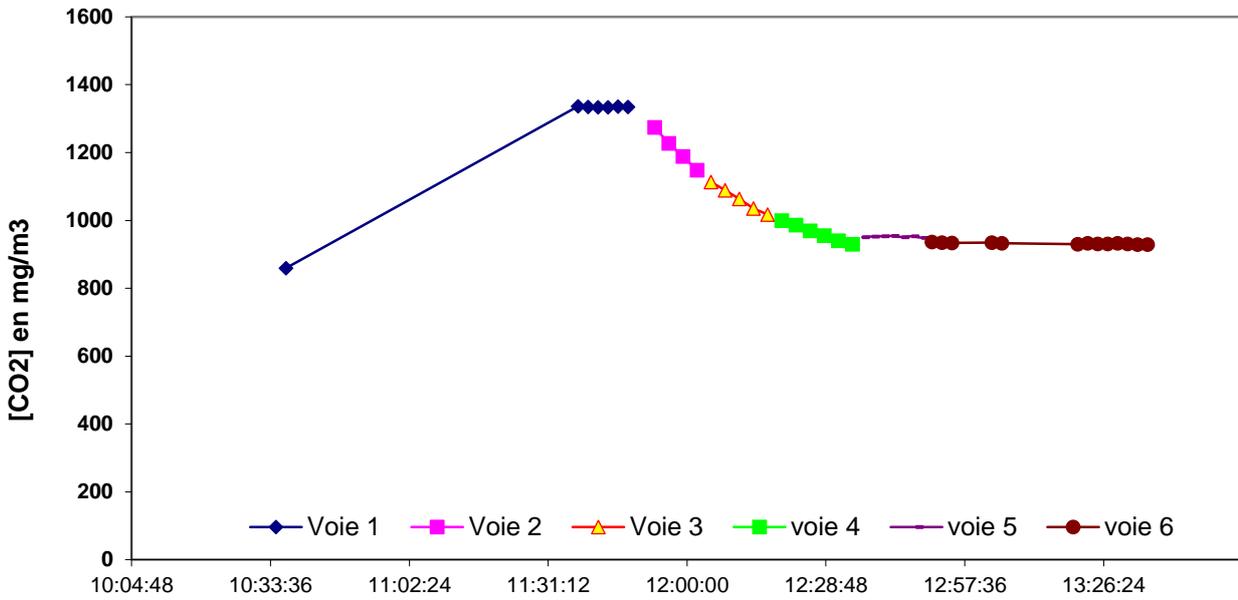


Figure 8 Annexe 8

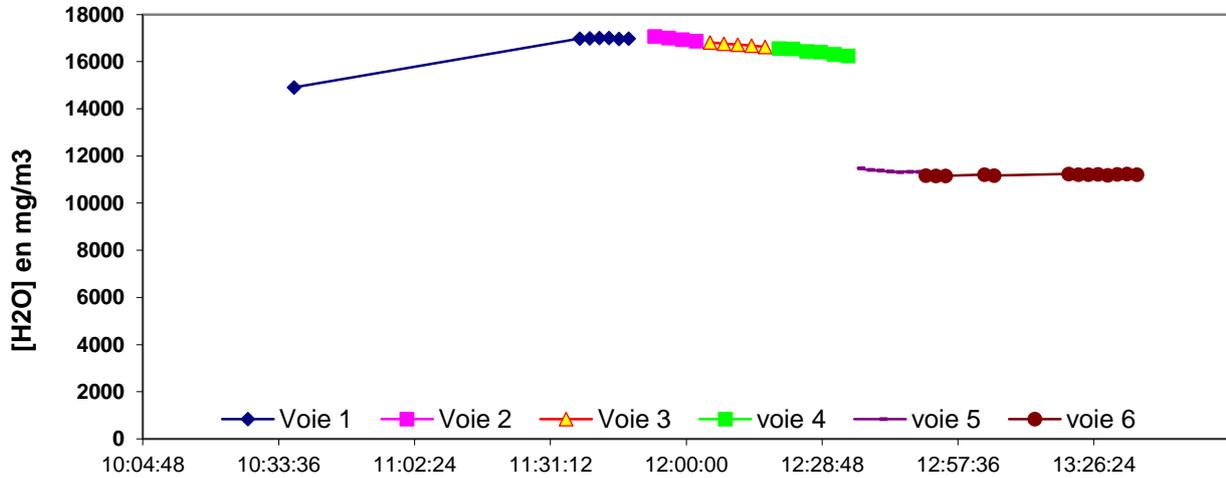


Figure 9 Annexe 8

Couloir logettes sol

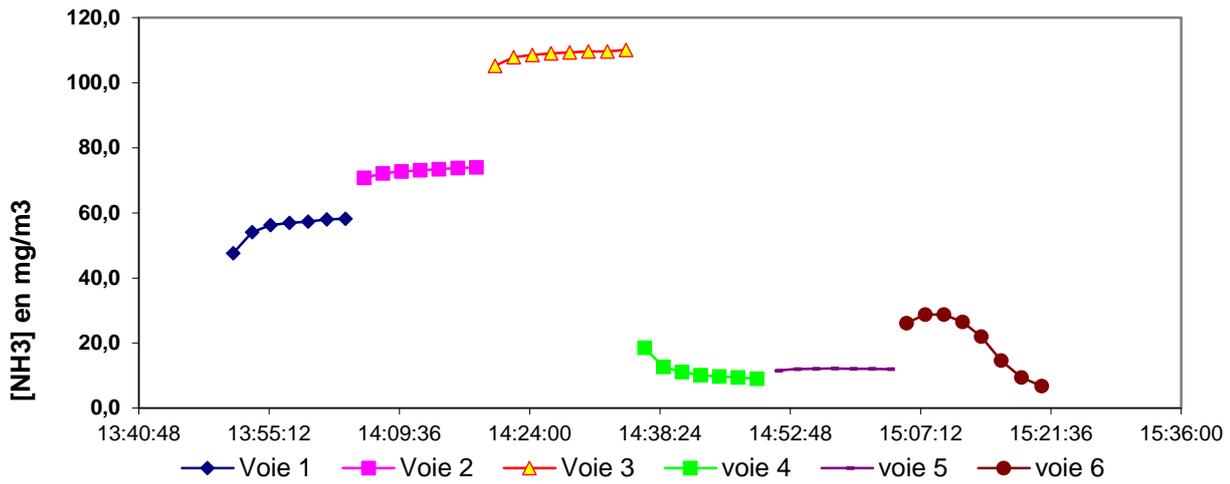


Figure 10 Annexe 8

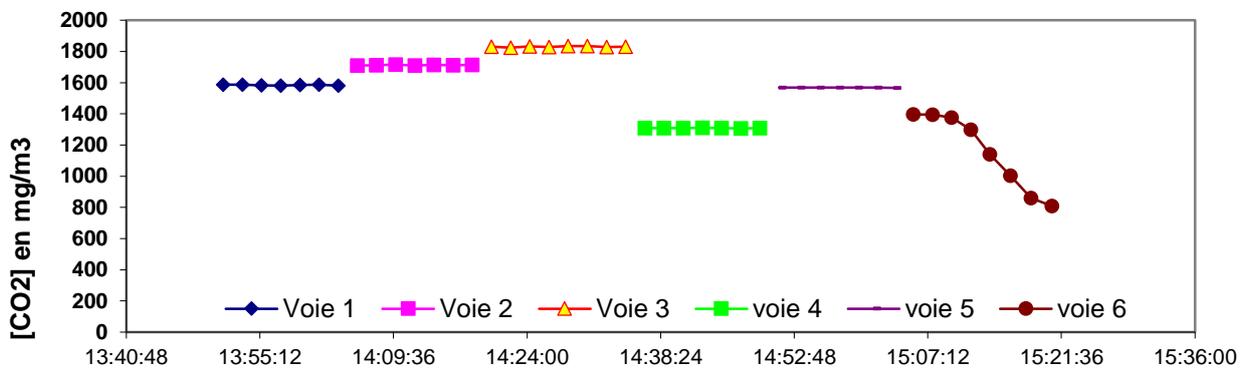


Figure 11 Annexe 8

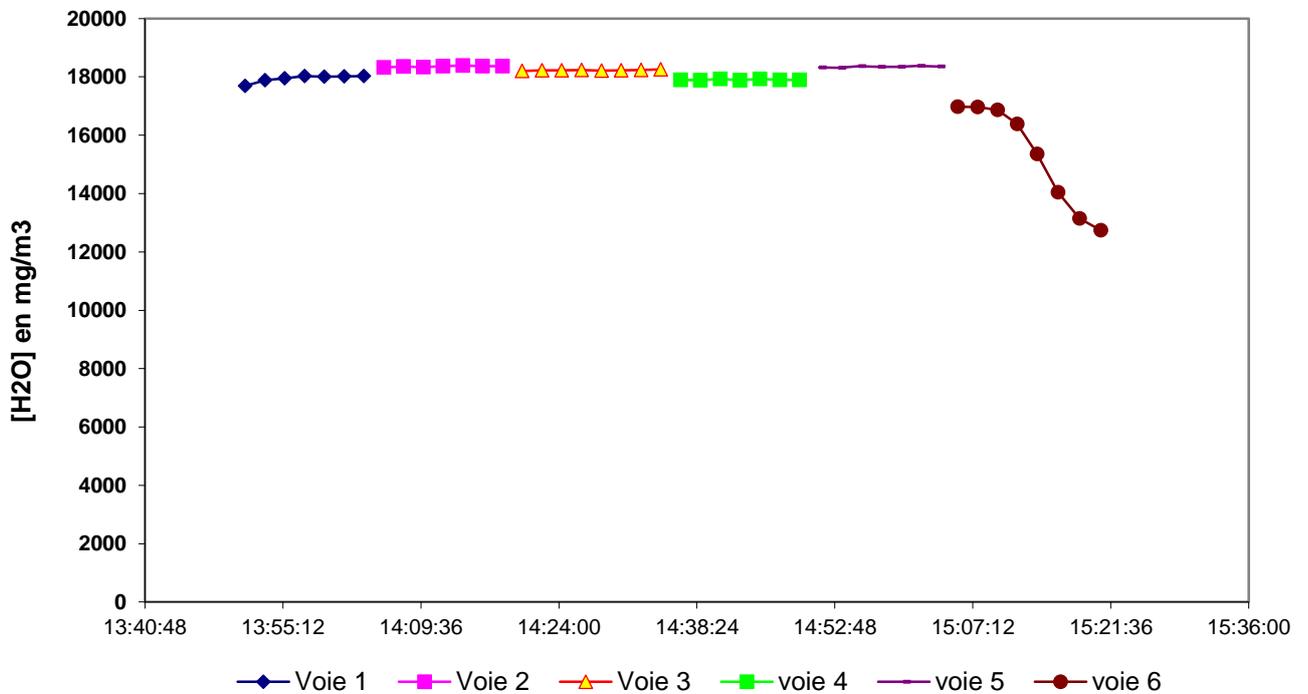


Figure 12 Annexe 8

Sol + solution 12 couloirs logettes et alimentation

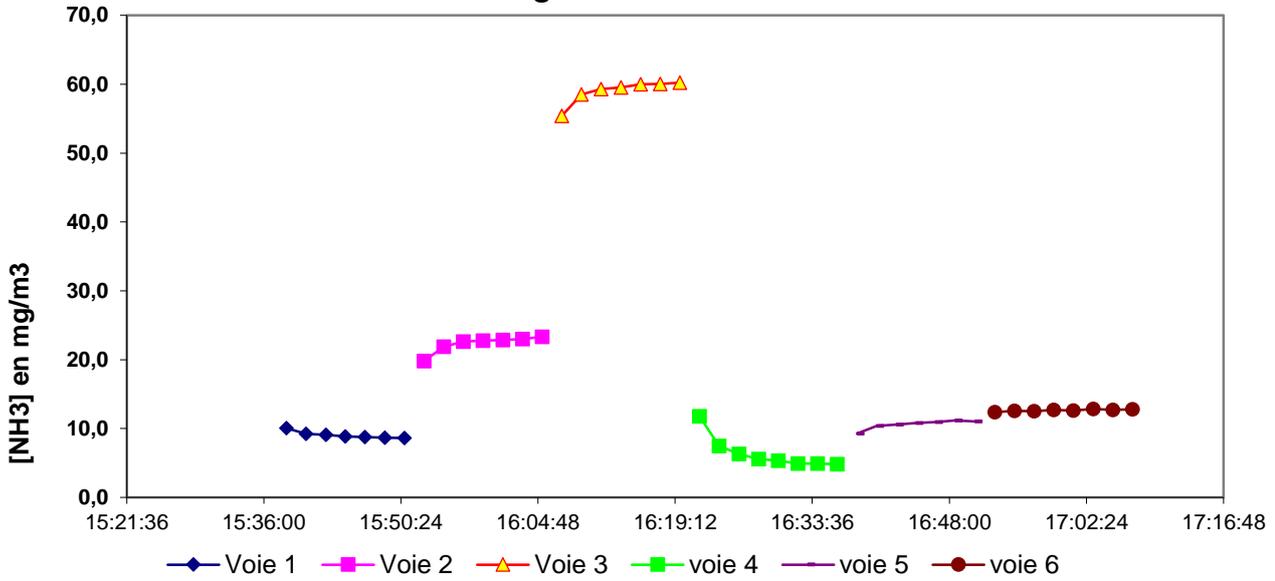


Figure 13 Annexe 8

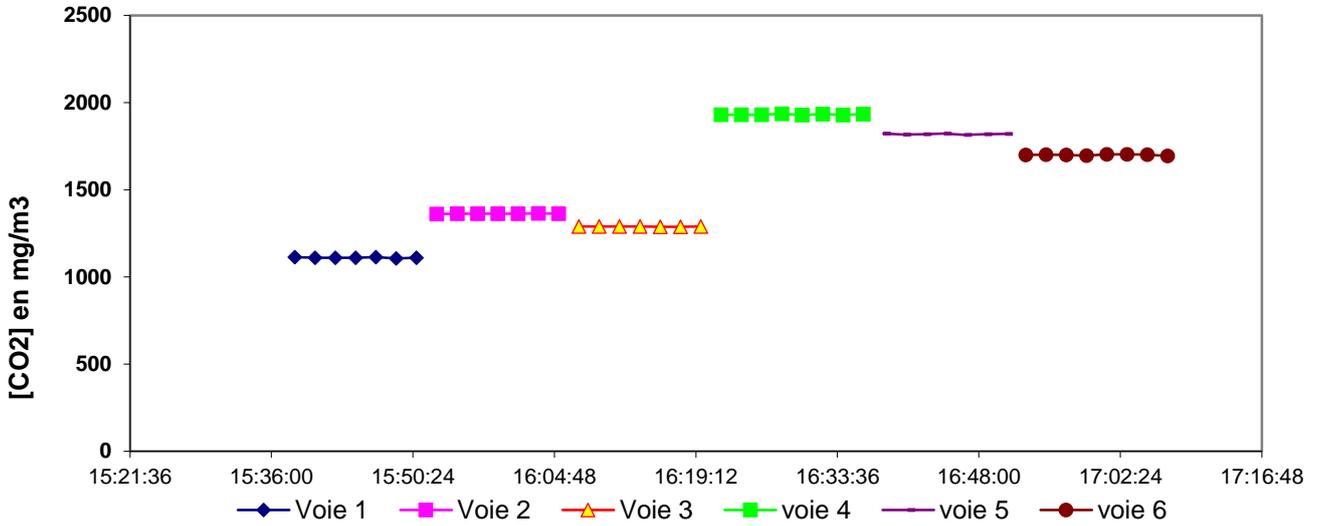


Figure 14 Annexe 8

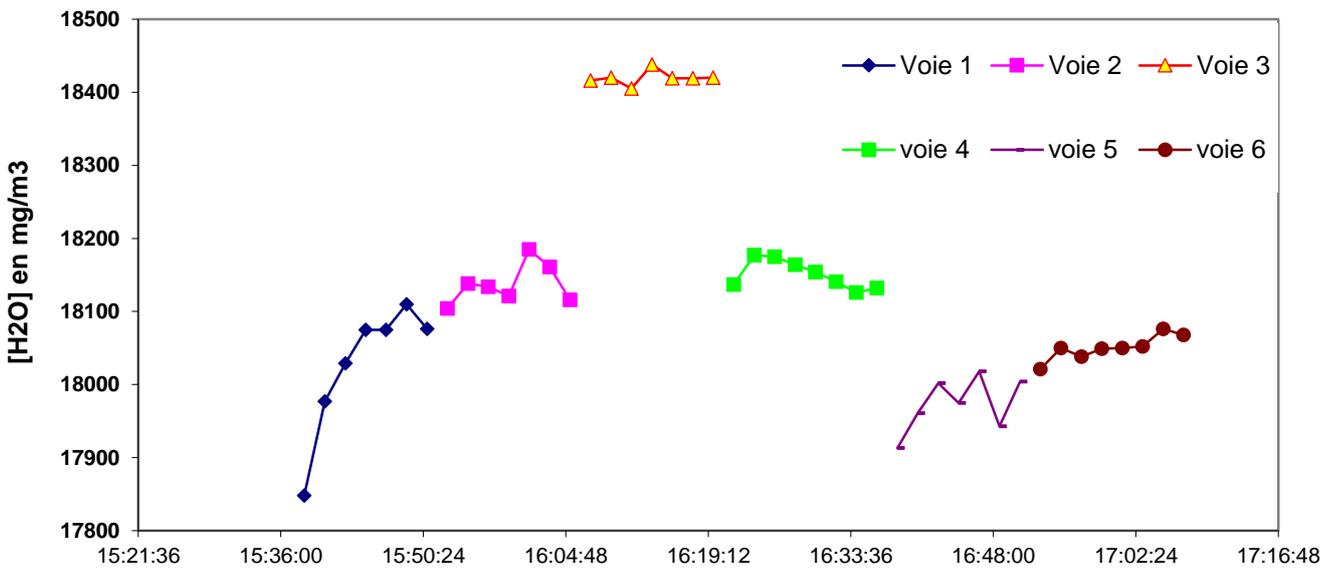


Figure 15 Annexe 8

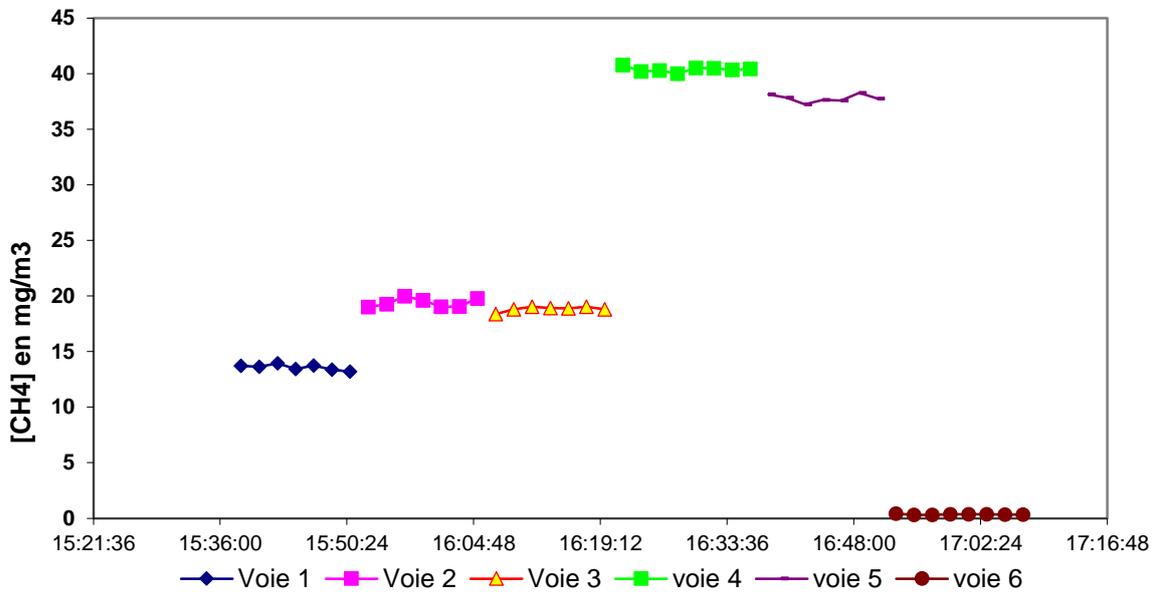


Figure 16 Annexe 8

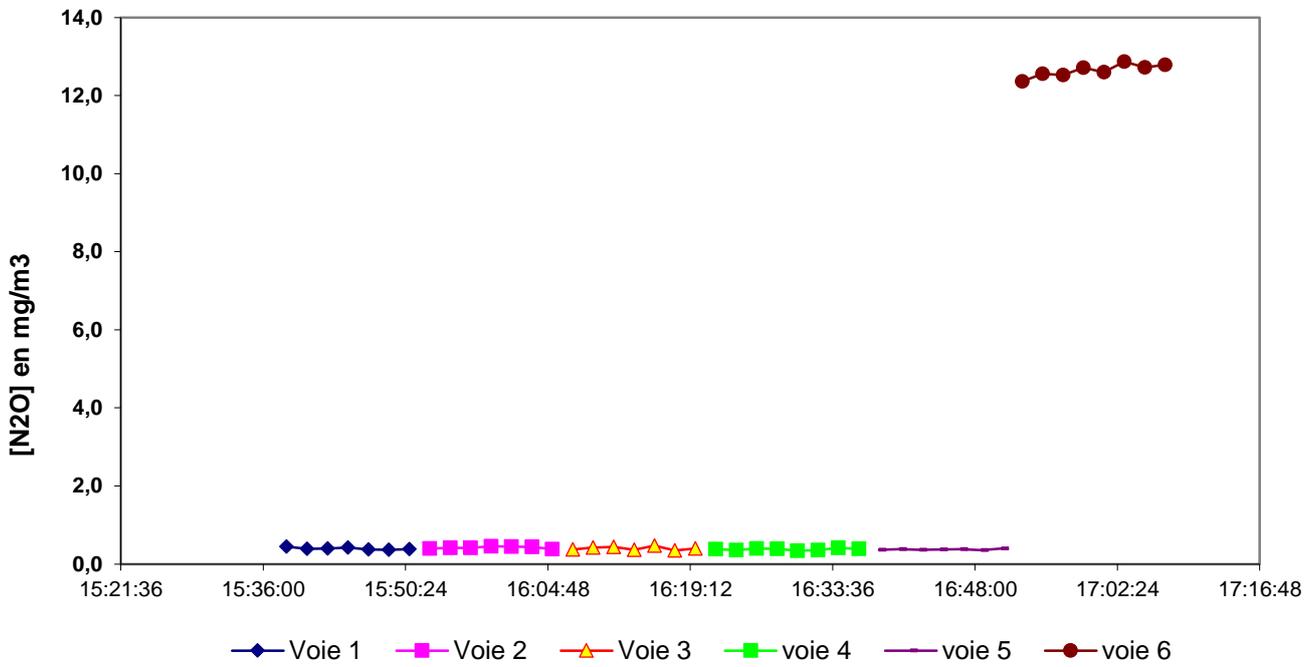


Figure 17 Annexe 8

Observations

Mesures chambres le matin :

Attention ! Le premier remplissage des poches ne s'est fait qu'après 6 min (et non après 4, problème de branchement des batteries du Crouzet) + thermohygromètre n'était pas sous la cloche

Plaque + solution 12 : pour la phase de décroissance sous la cloche, seulement 2 poches (celle à 4 min et celle à 12 min car celle à 20 min → air extérieur)

pHi= 8,01

pHf= 7,66

mi=20,22 g

mf= 19,63 g

Sol + solution 12 :

pHf= 8,15

mi= 20,8 g

mf= 19,84 g

Lisier : mesure du pH à 3 endroits (8,18 / 8,25 et 8,24)

Mesures chambres l'après-midi :

Installation des chambres sur une zone juste après raclage, la zone mesurée est au même niveau que la zone couloir logette.

Plaque + solution 12 : pour la phase de décroissance sous la cloche, 2 poches (celle à 4 min et celle à 20 min car celle à 12 min → air extérieur) / thermohygromètre sous cette cloche

pHi= 8,16

pHf= 7,81

mi= 20,28 g

mf= 19,11 g

Sol + solution 12 :

mi= 20,48 g

mf= 19,38 g

pHf= 7,98

Déjections : mesure du pH à 3 endroits (8,34 / 8,19 / 8,18)

Observations résultats

- Couloir logette sol 1 et sol 2 : grosse différence de concentration en NH₃ entre les deux (sol 1 max : 110 mg/m³ et sol 2 max : 30 mg/m³), d'autant plus que mesures sol 2 viennent après sol 1 (donc déjà accumulation de gaz sous la cloche)
- Couloir logette sol + solution 12 : max 65 mg/m³ → plus faible que le sol tout seul donc solution sert de puit d'ammoniac
- Couloir logette plaque + solution 12 : 4 mg/m³ (valeur halle PSN de 5 mg/m³)
- Aire exercice plaque + solution 12 : 10 mg/m³ (mais déjà accumulation des gaz avec les mesures du matin)
- Aire exercice sol 1 + sol 2 : max 25 mg/m³ donc beaucoup plus faible que pour le couloir logette du matin

Problème de valeurs en méthane et N₂O au niveau de toutes les voies 6 → problème au niveau de l'échantillonneur, vérifier les interférences (faire tourner les 6 voies sur l'air ambiant)

Protocole

- Mesure Quantofix va donner la concentration en azote ammoniacal des déjections : connaissant déjà le pH, on pourra choisir la solution de raccordement la plus représentative du lisier étudié
- On laisse tomber l'observation de la phase de décroissance de gaz sous la cloche quand on retire la solution de raccordement (cas où il y a la plaque noire). En effet, on n'observe rien d'exploitable → économie de poches de prélèvement
- Tests dans l'aire d'exercice avant et après le raclage (il y a un raclage vers 12h)
- Faire mesures SPIR déjections + silice
- Valise de prélèvement pour faire mesures air extérieur
- Penser à prendre grand sac pour mettre les poches de gaz
- Modification du protocole de mesure :

2 chambres + plaque sous chaque chambre → 1 poche par chambre

Chambre sol 1 + Chambre sol 2 → 3 poches par chambre

Chambre sol 1 et solution + Chambre sol 2 et solution et plaque → 3 poches par chambre

Une poche pour l'air extérieur et une poche pour l'air du bâtiment → 16 poches de gaz par test

Arrivée sur place à 9h00

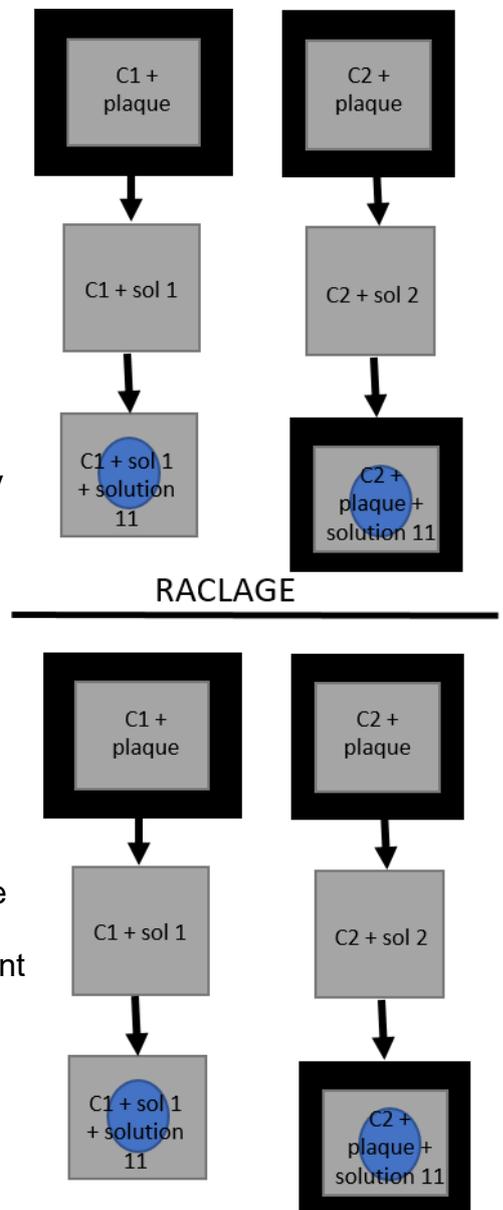
A l'aide du Quantofix, détermination de la teneur en azote ammoniacal des déjections (récolte des déjections le long du couloir d'alimentation juste avant la mesure).

Quantofix : deux flacons + colonne graduée

- Remplir la colonne graduée jusqu'à atteindre le niveau 0
- Dans le grand flacon faire le mélange 100 mL de déjections + 200 mL d'eau
- Dans le petit flacon : réactif pour Quantofix (1L de Javel + 200 mL de lessive de soude) → en mettre 150 mL
- Fermer le petit flacon
- Lever le petit flacon contenant le réactif pour le faire s'écouler dans les déjections
- La réaction se produit et le gaz formé (azote) fait monter la colonne d'eau
- Attendre que la colonne d'eau se stabilise et lire le résultat indiqué par les graduations : **0,9 kg d'azote ammoniacal / m3** de déjections

Une fois la teneur en azote ammoniacal déterminée, on peut choisir la solution de raccordement dont la concentration est la plus proche de celle des déjections. On convertit donc les valeurs de concentrations en mol/L en g/L d'azote ammoniacal : $[NH_4^+] * M_{molN}$

C'est la solution de raccordement 11 qui est la plus proche, aussi bien pour la teneur en azote ammoniacal que pour le pH.



Résultats méthode chambres

Plaques et air extérieur avant raclage

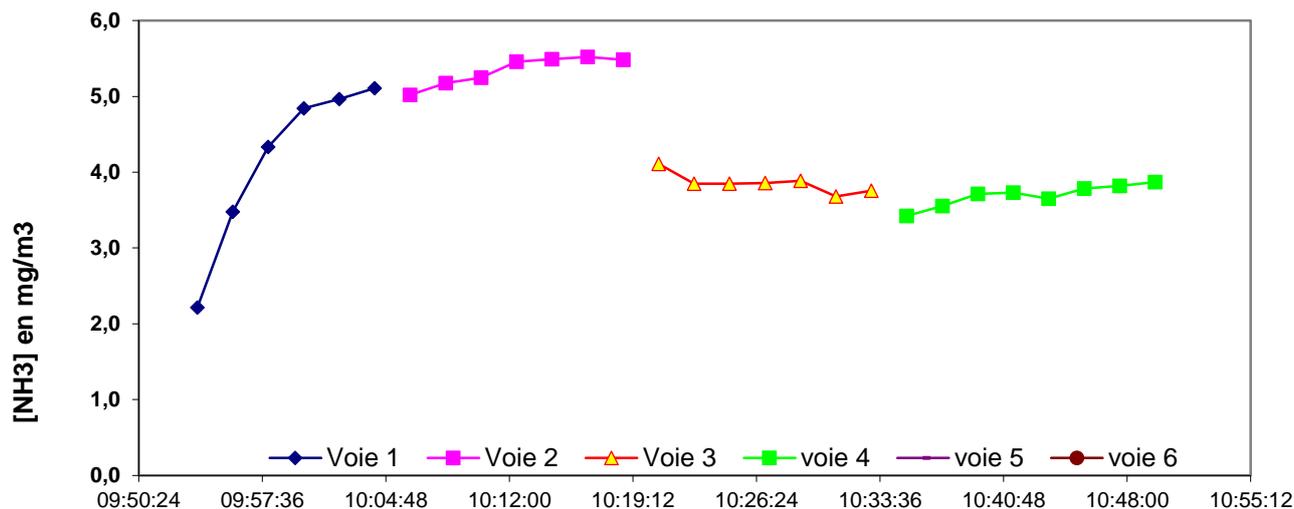


Figure 1 Annexe 9

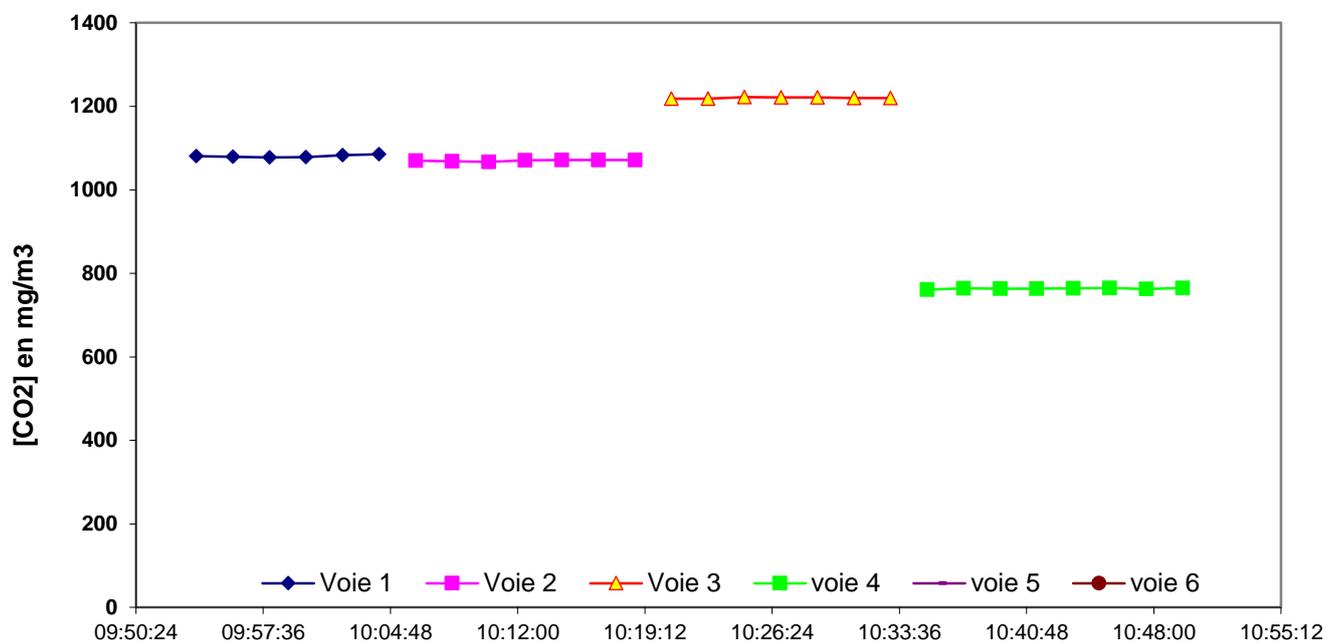


Figure 2 Annexe 9

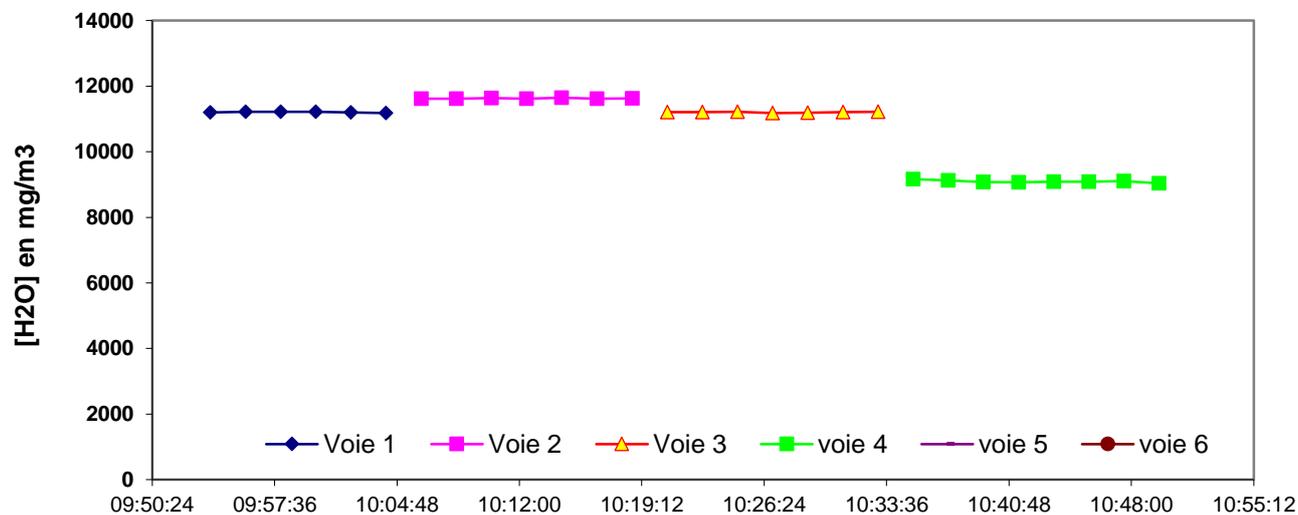


Figure 3 Annexe 9

Plaques et air extérieur après raclage

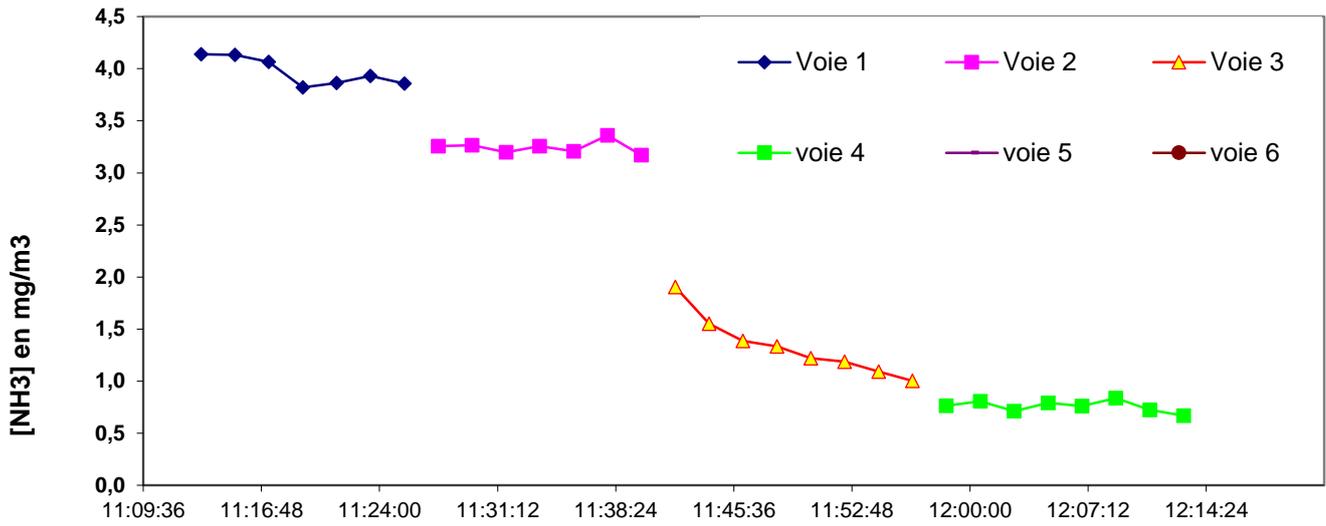


Figure 4 Annexe 9

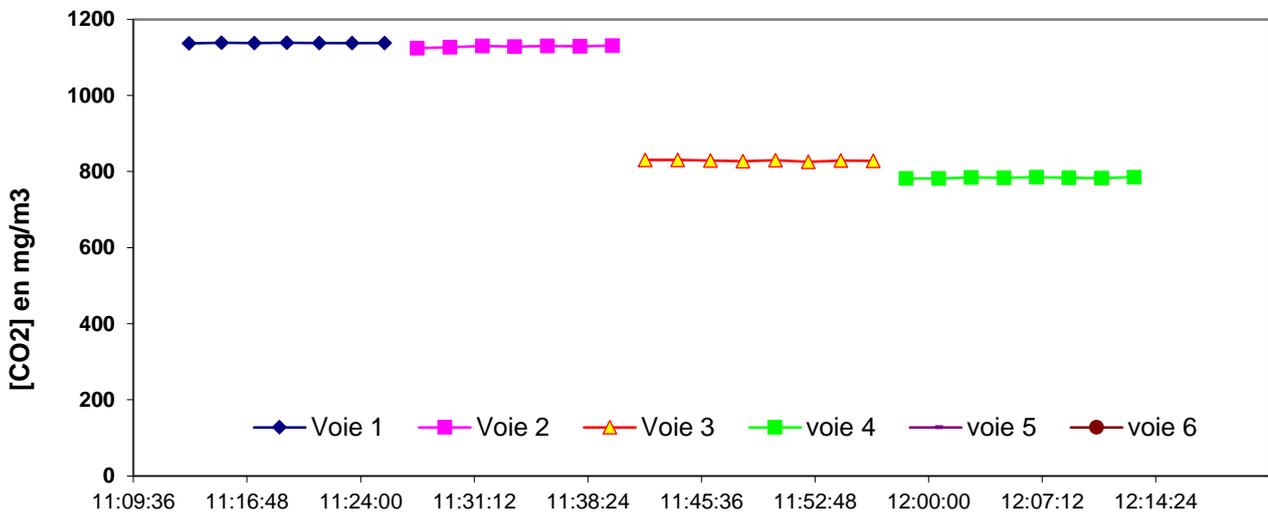


Figure 5 Annexe 9

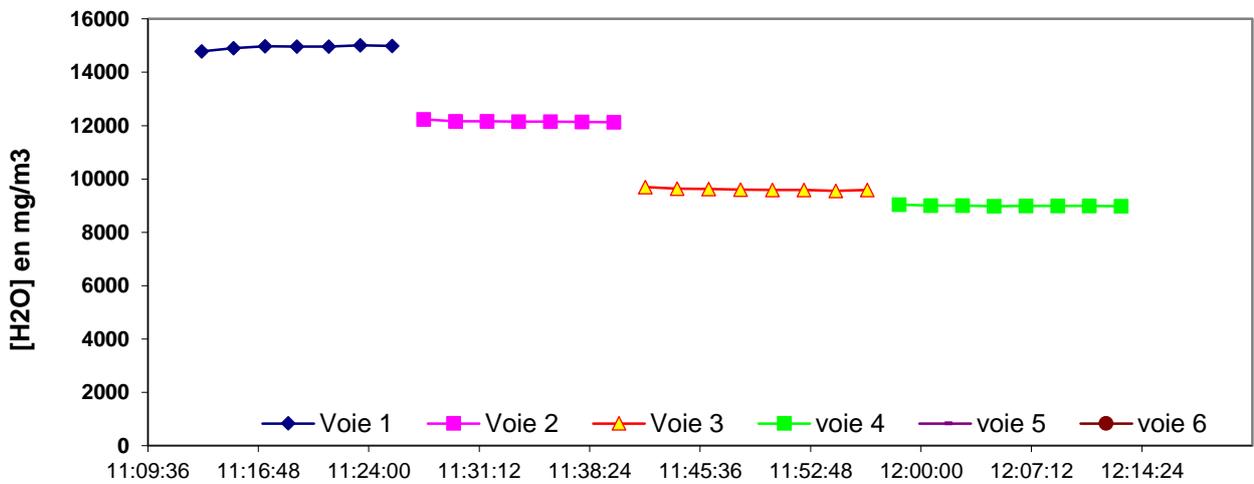


Figure 6 Annexe 9

Sol C1 avant raclage

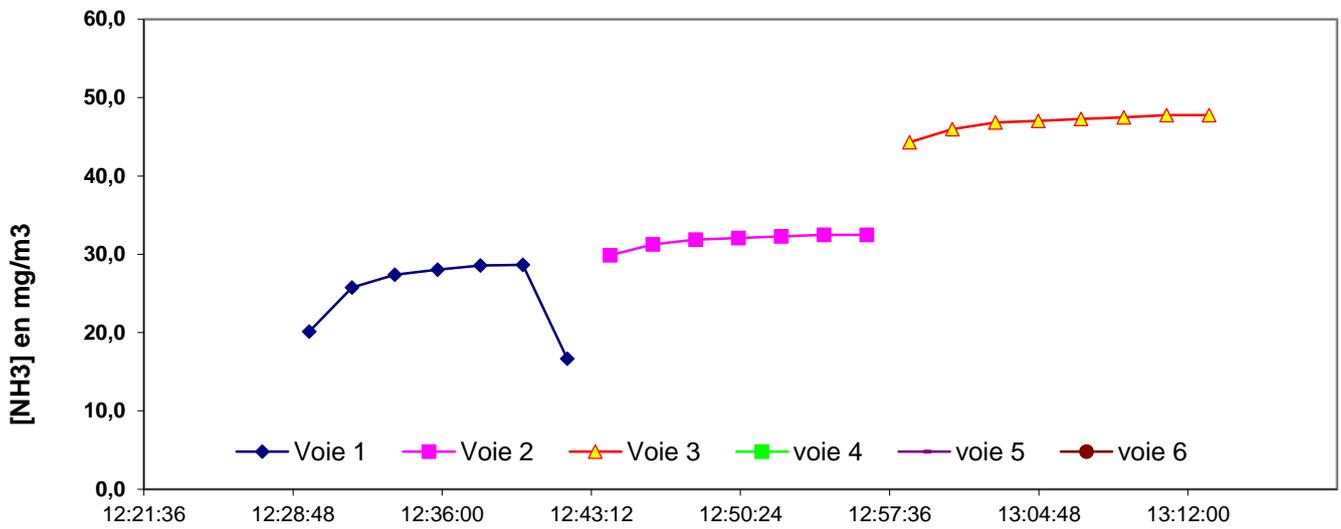


Figure 7 Annexe 9

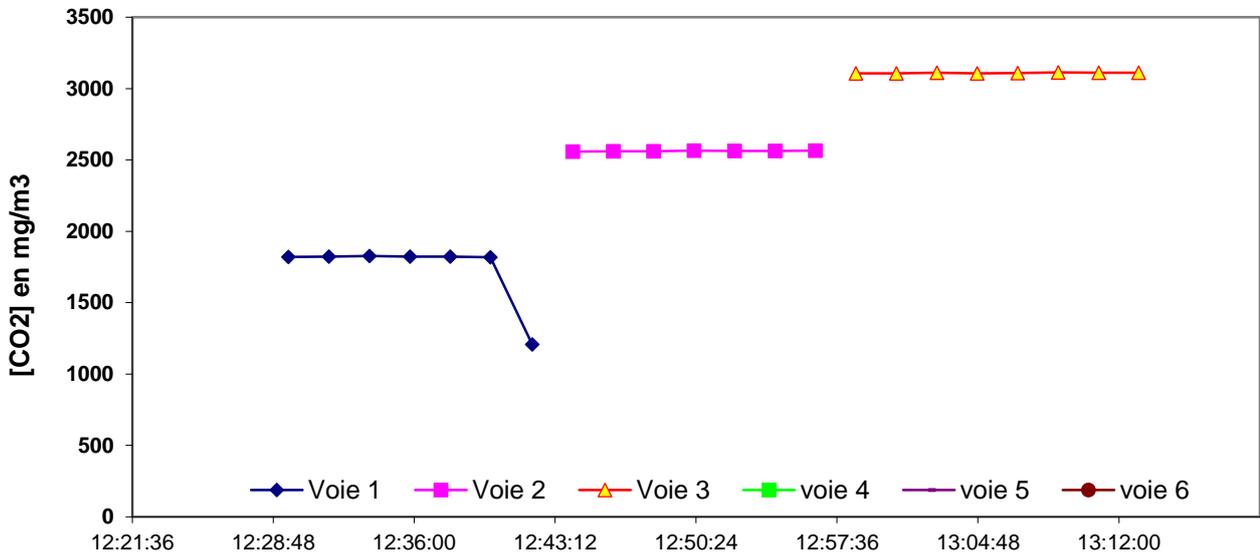


Figure 8 Annexe 9

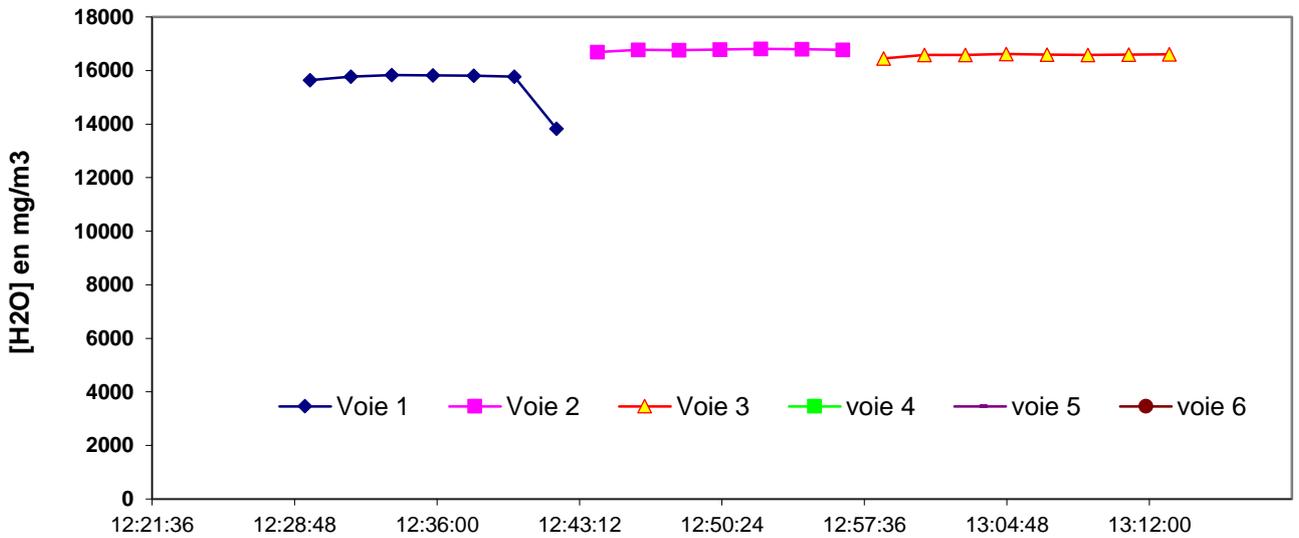


Figure 9 Annexe 9

Sol C1 après raclage

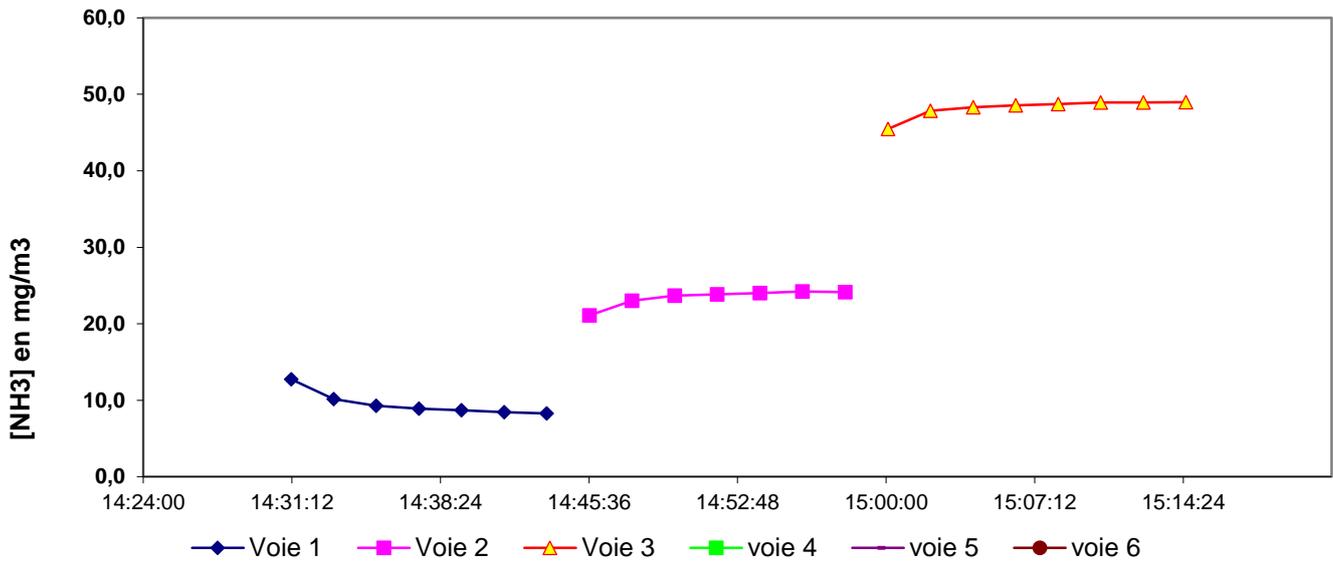


Figure 10 Annexe 9

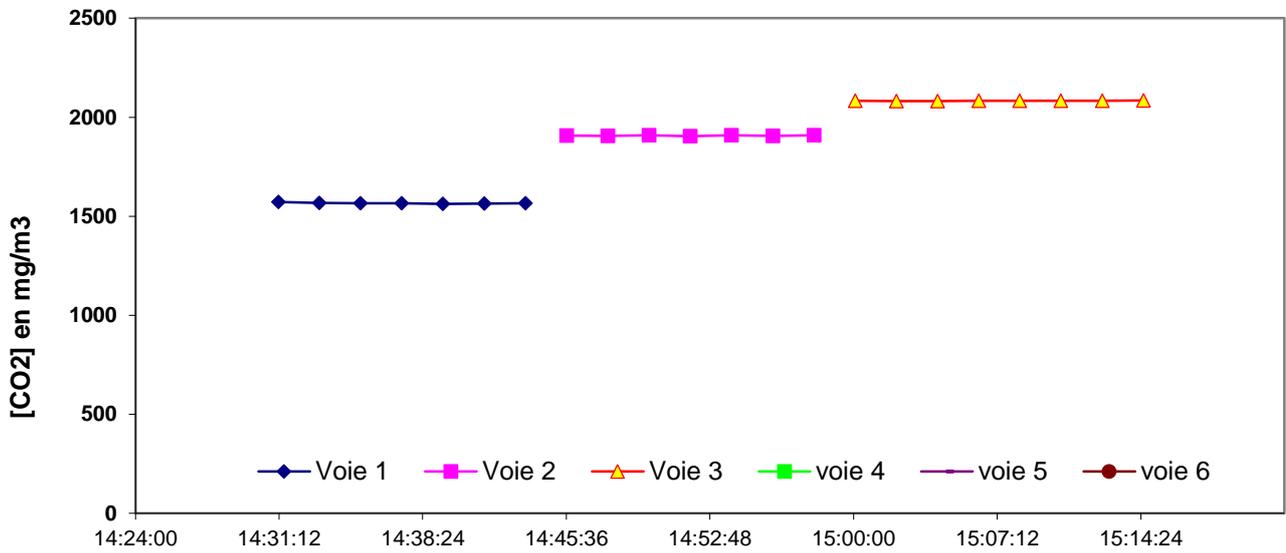


Figure 11 Annexe 9

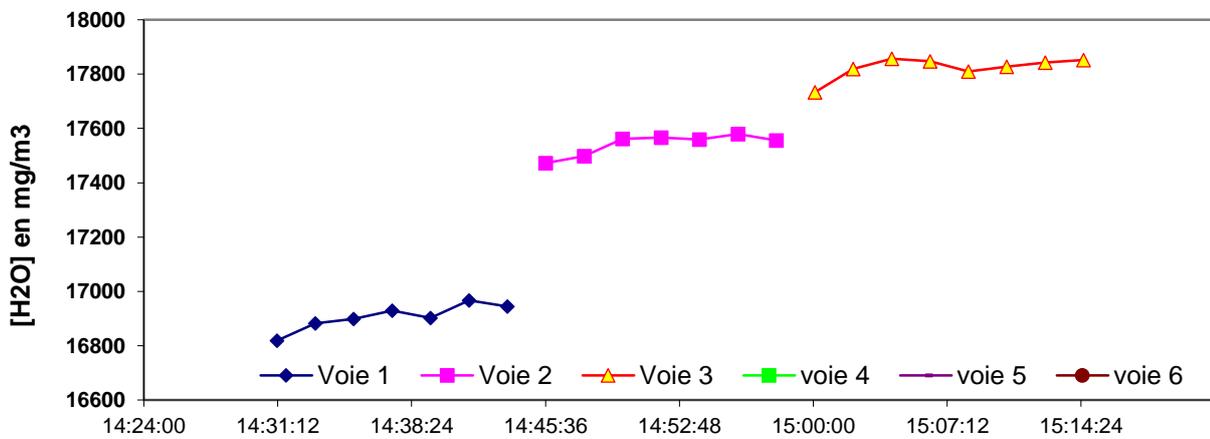


Figure 12 Annexe 9

Sol C2 avant raclage

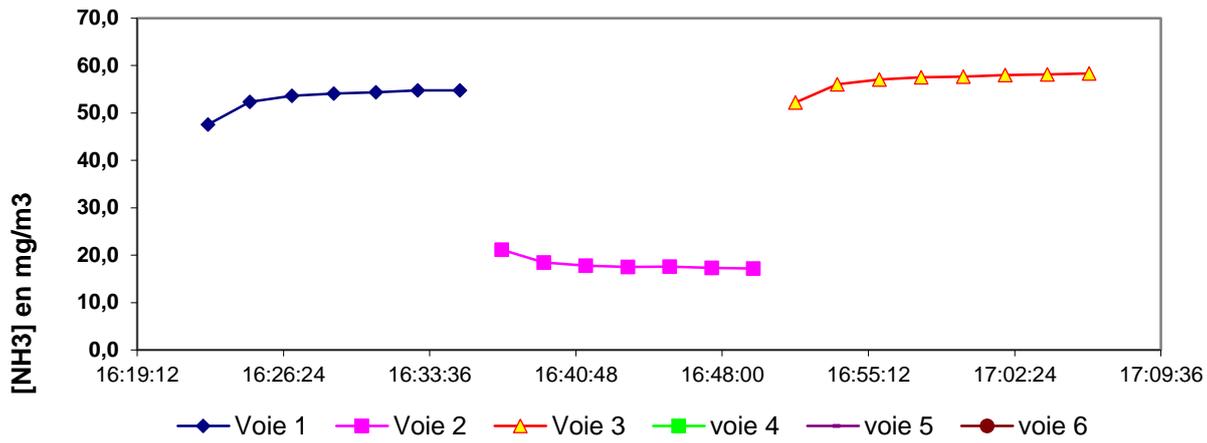


Figure 13 Annexe 9

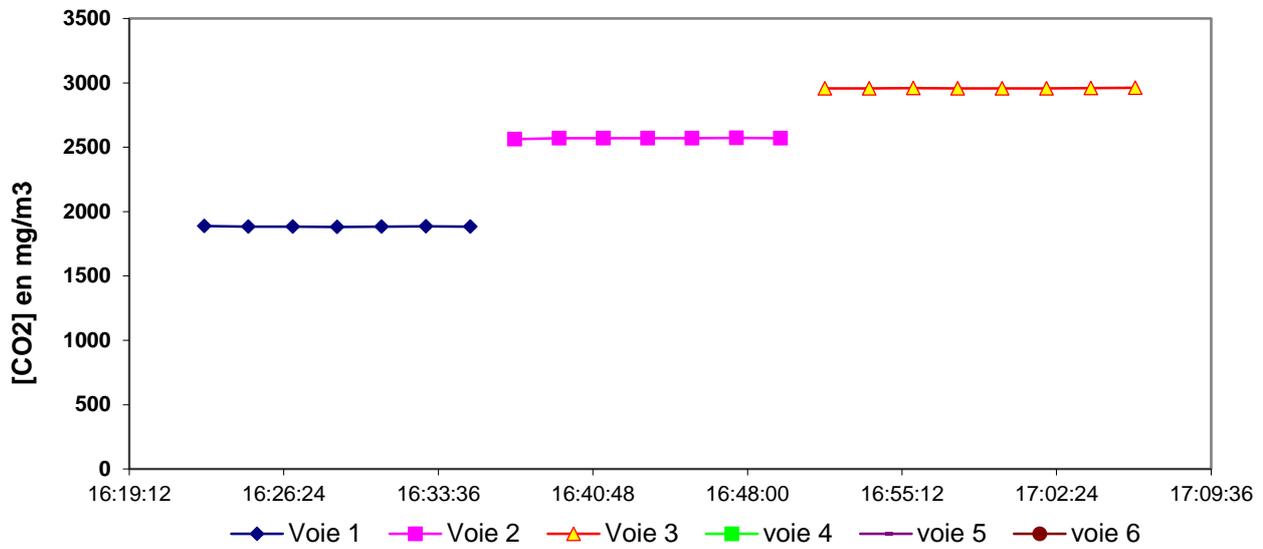


Figure 14 Annexe 9

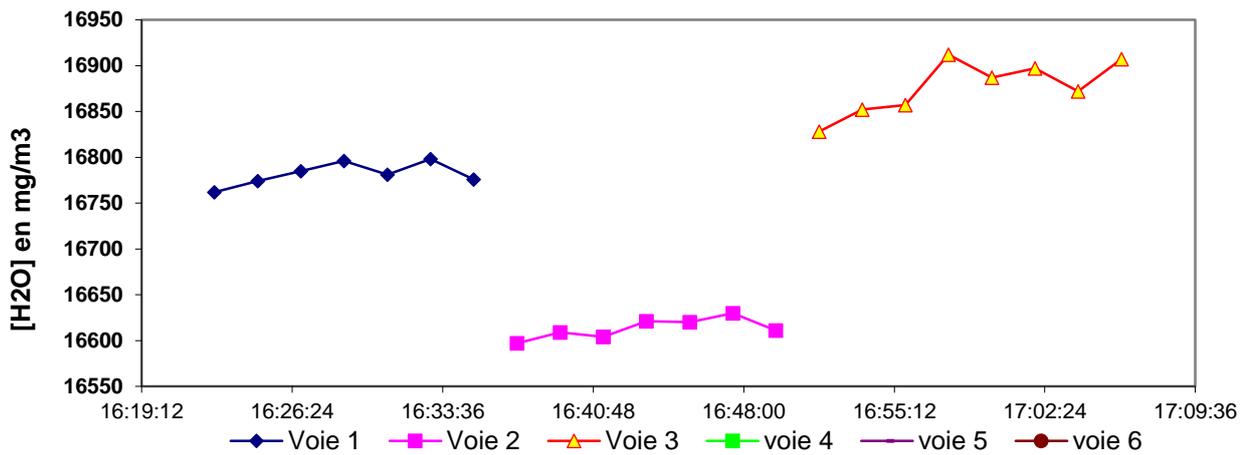


Figure 15 Annexe 9

Sol C2 après raclage

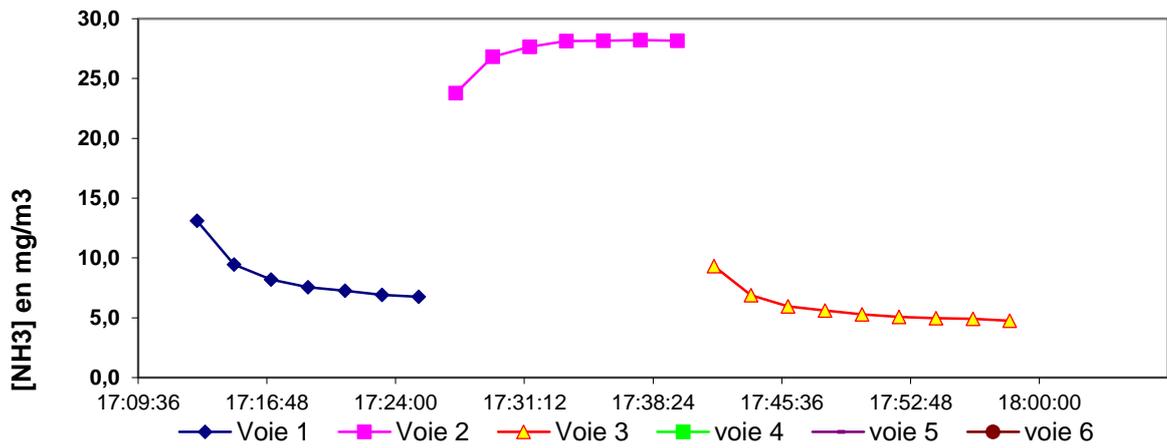


Figure 16 Annexe 9

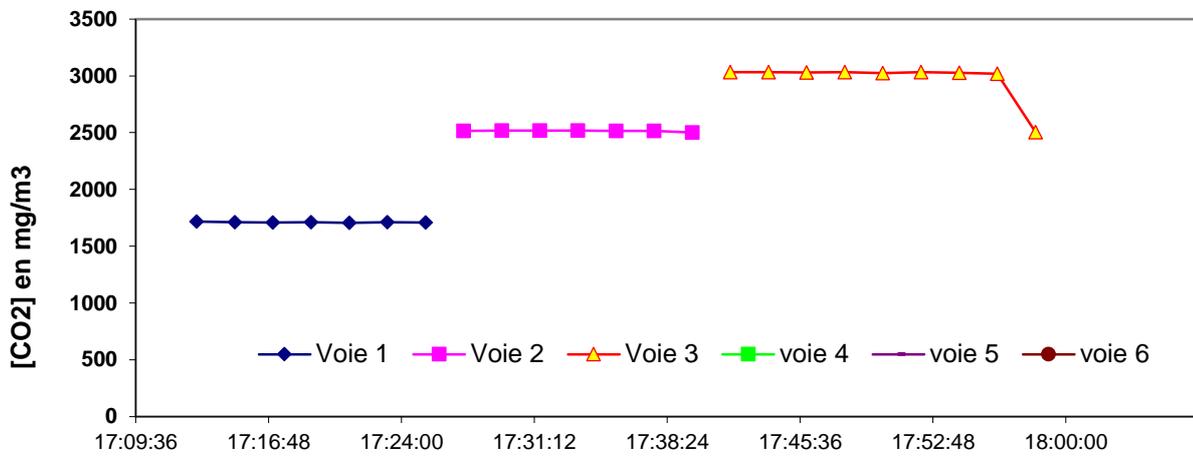


Figure 17 Annexe 9

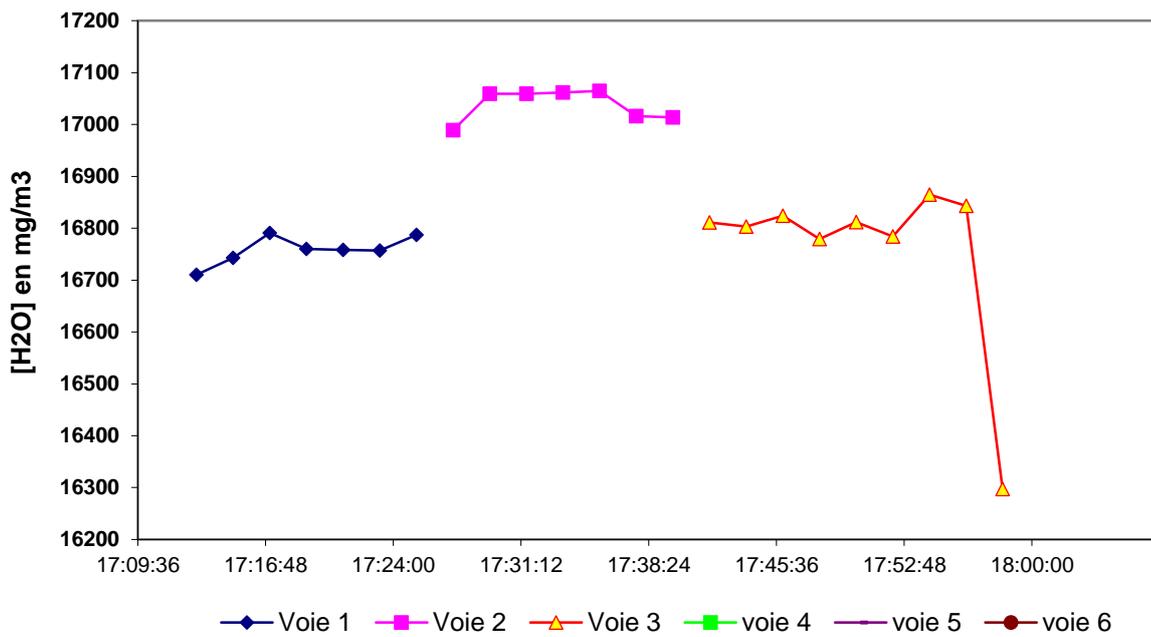


Figure 18 Annexe 9

Sol + solution 11 C1 avant raclage

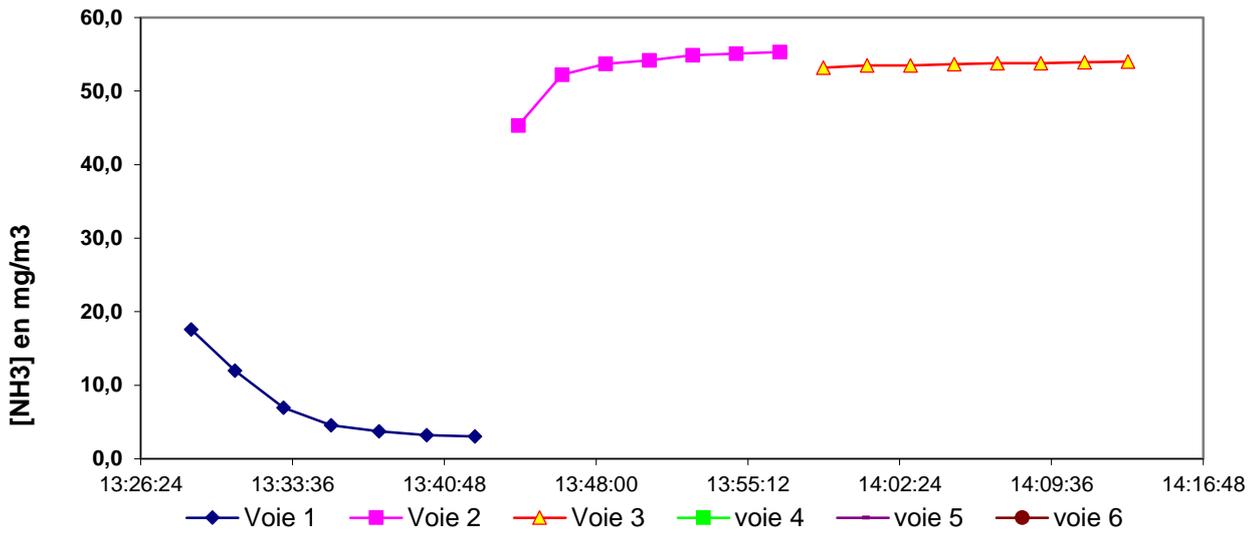


Figure 19 Annexe 9

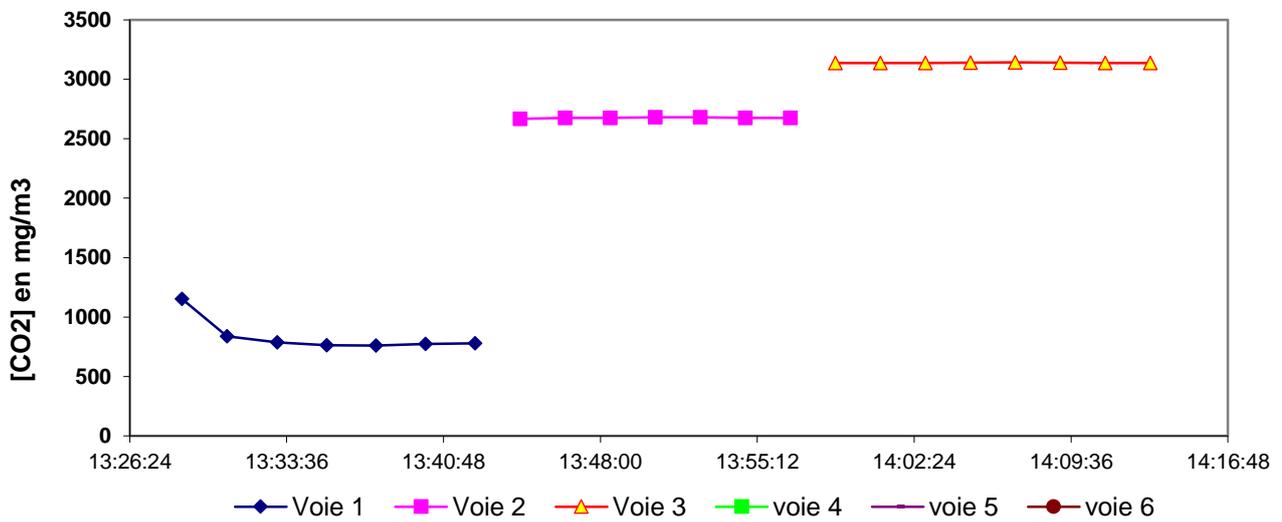


Figure 20 Annexe 9

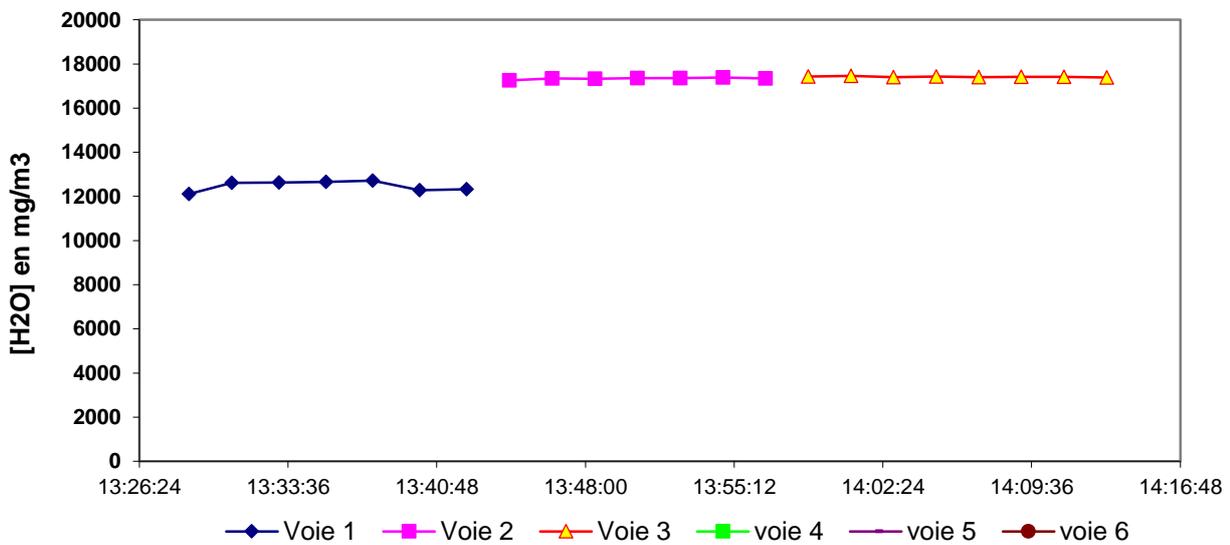


Figure 21 Annexe 9

Sol + solution 11 C1 après raclage

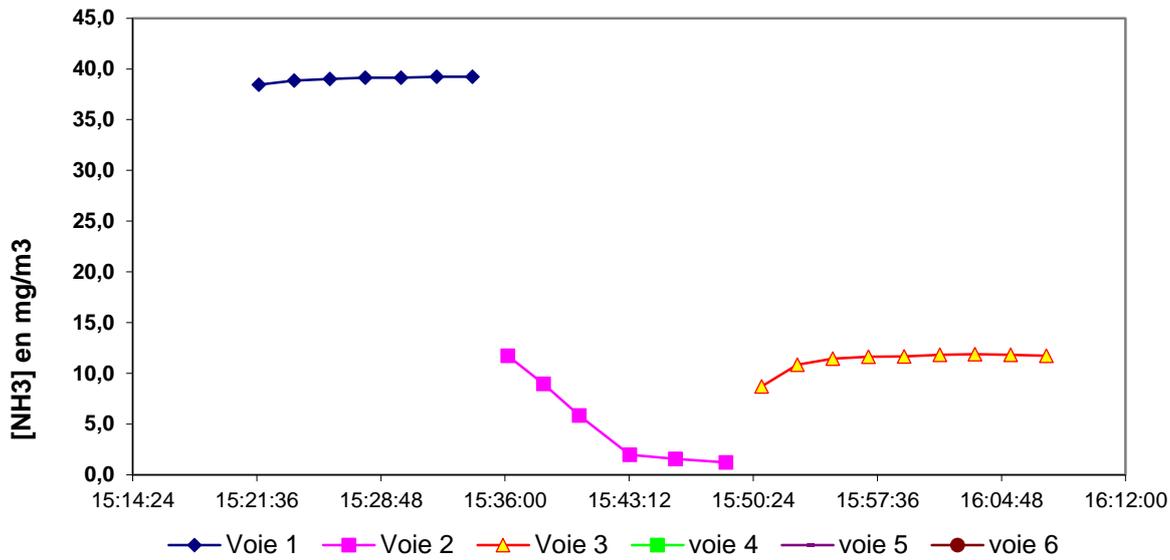


Figure 22 Annexe 9

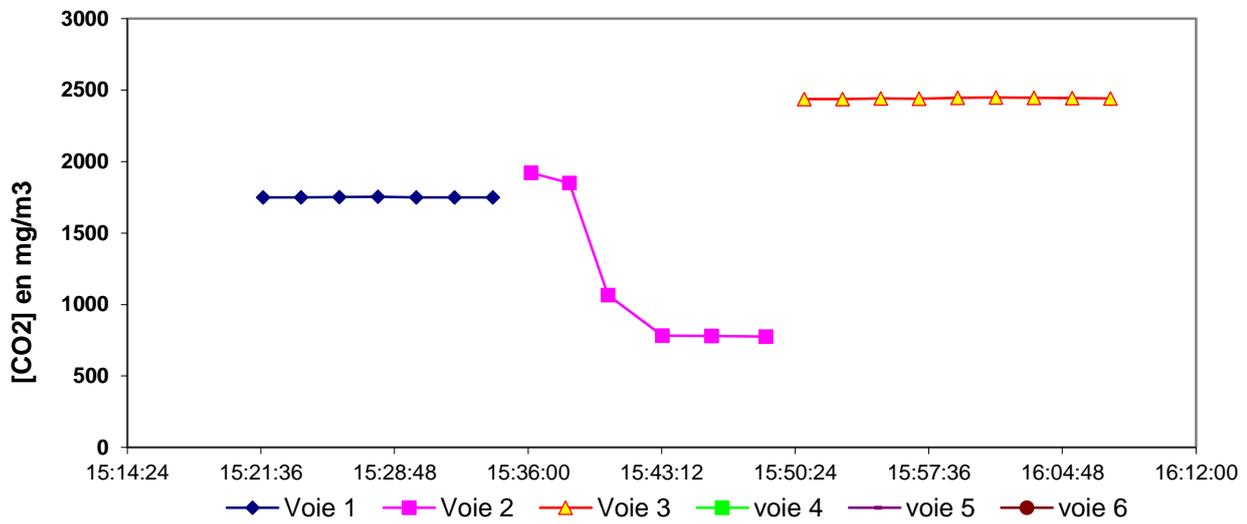


Figure 23 Annexe 9

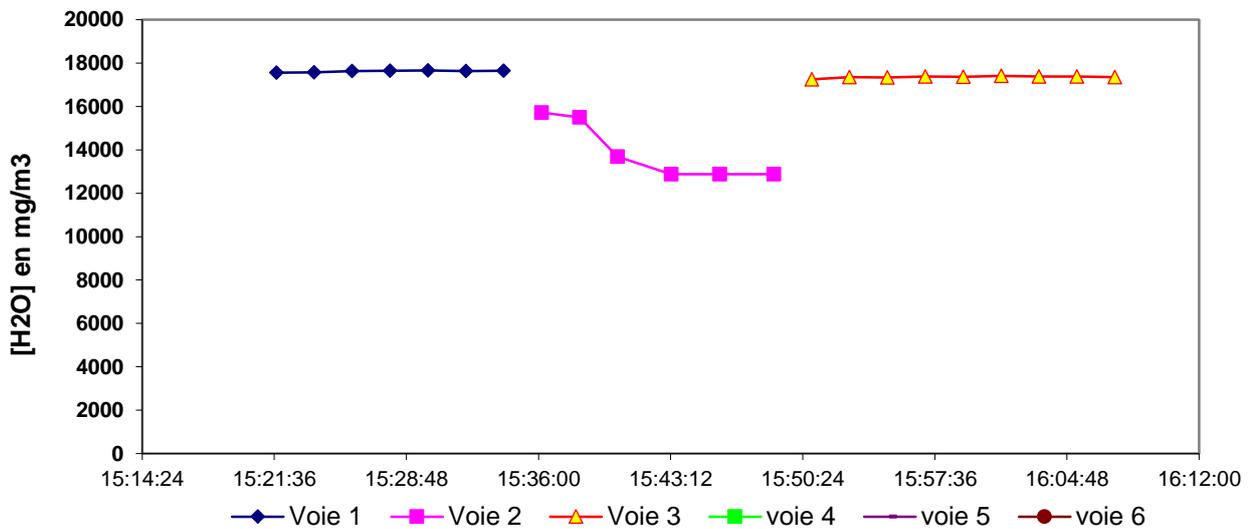


Figure 24 Annexe 9

Plaque + solution 11 C2 avant raclage

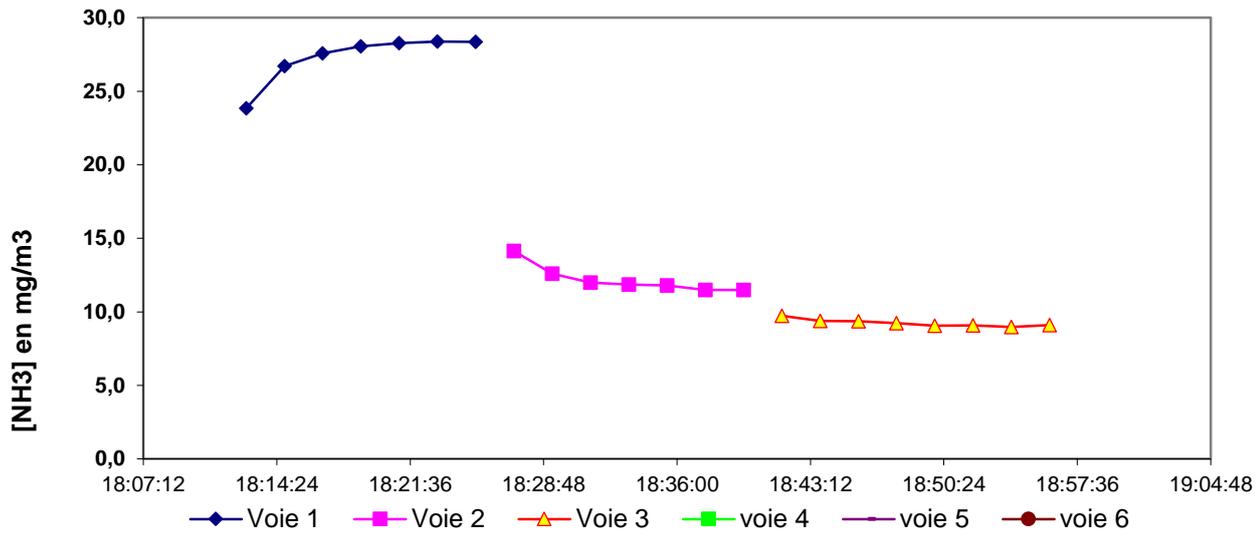


Figure 25 Annexe 9

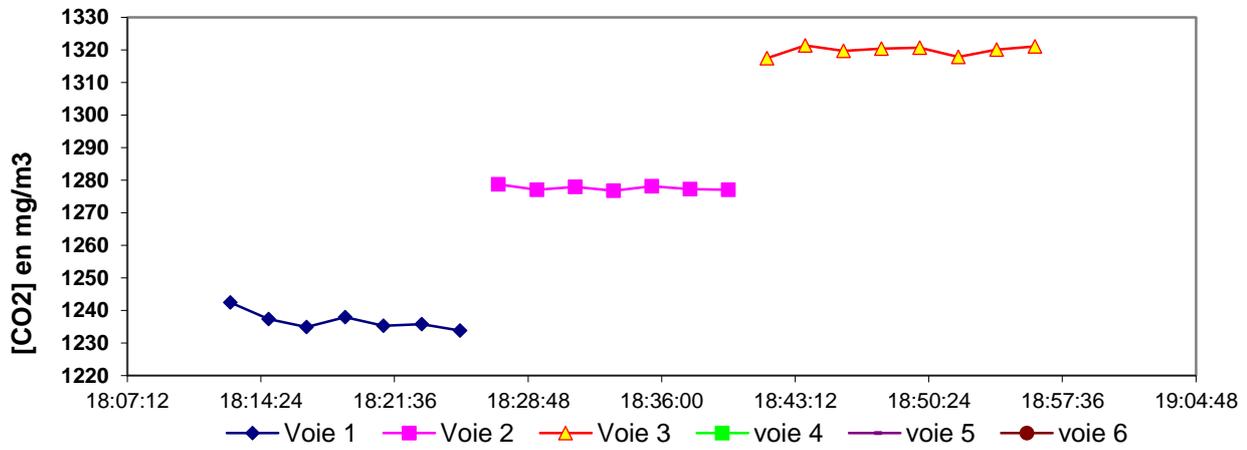


Figure 26 Annexe 9

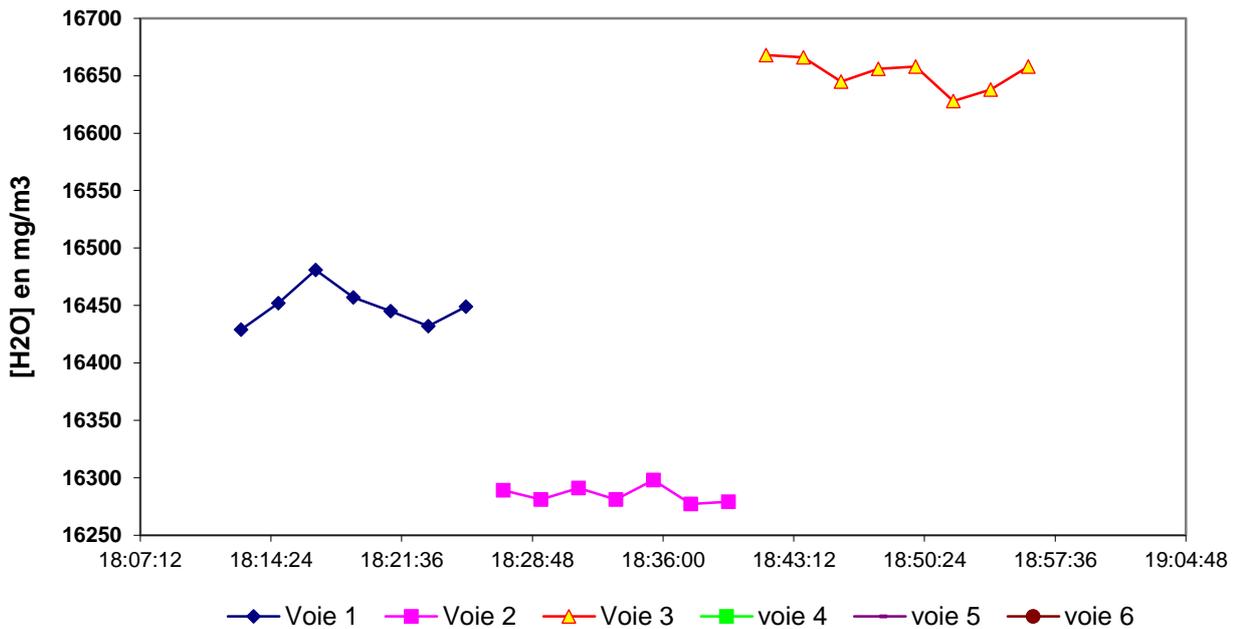


Figure 27 Annexe 9

Plaque + solution 11 C2 après raclage

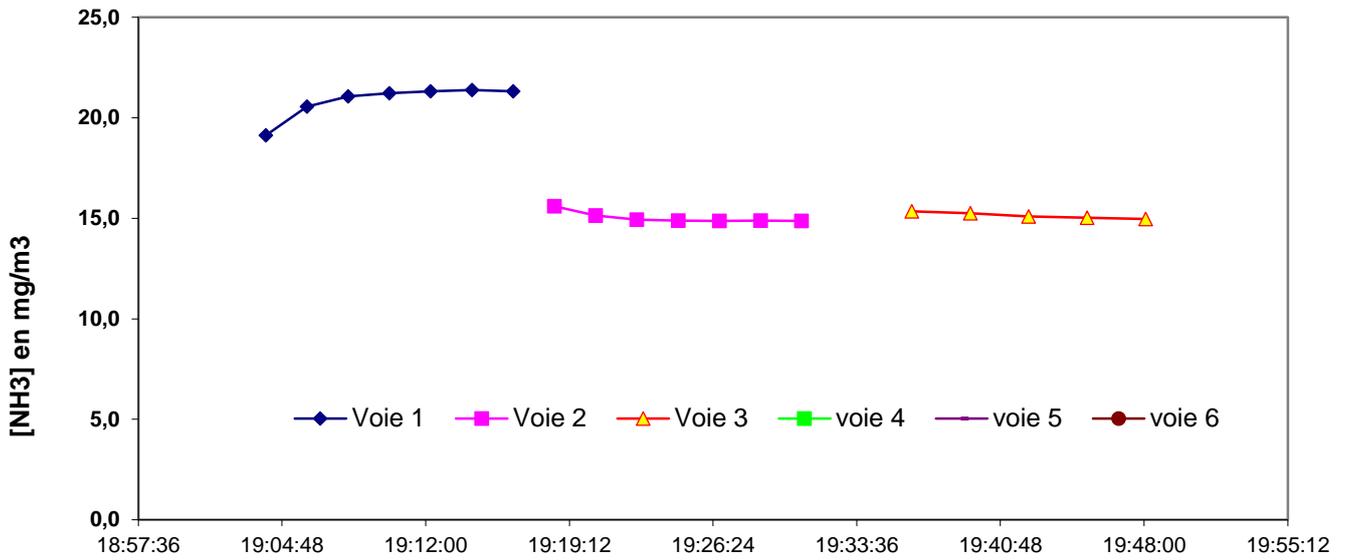


Figure 28 Annexe 9

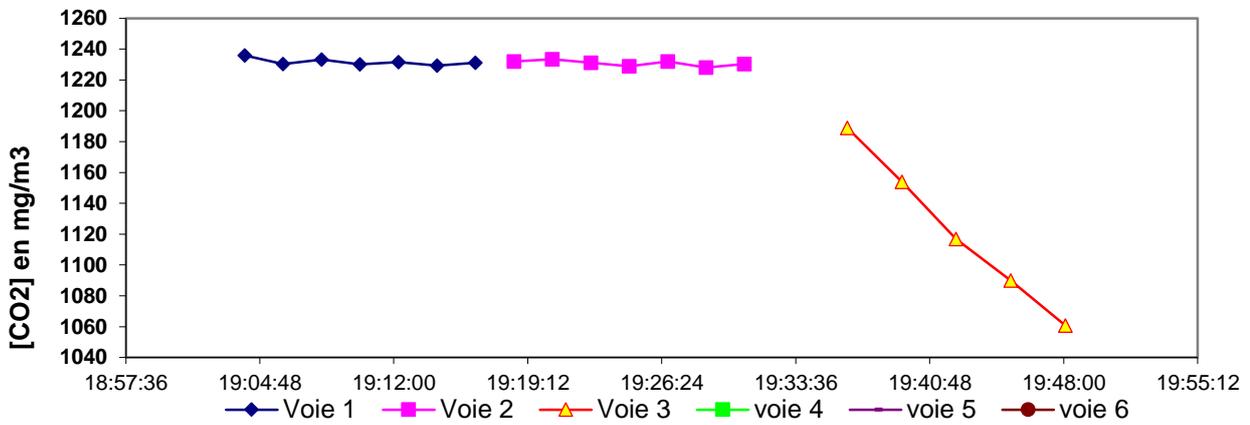


Figure 29 Annexe 9

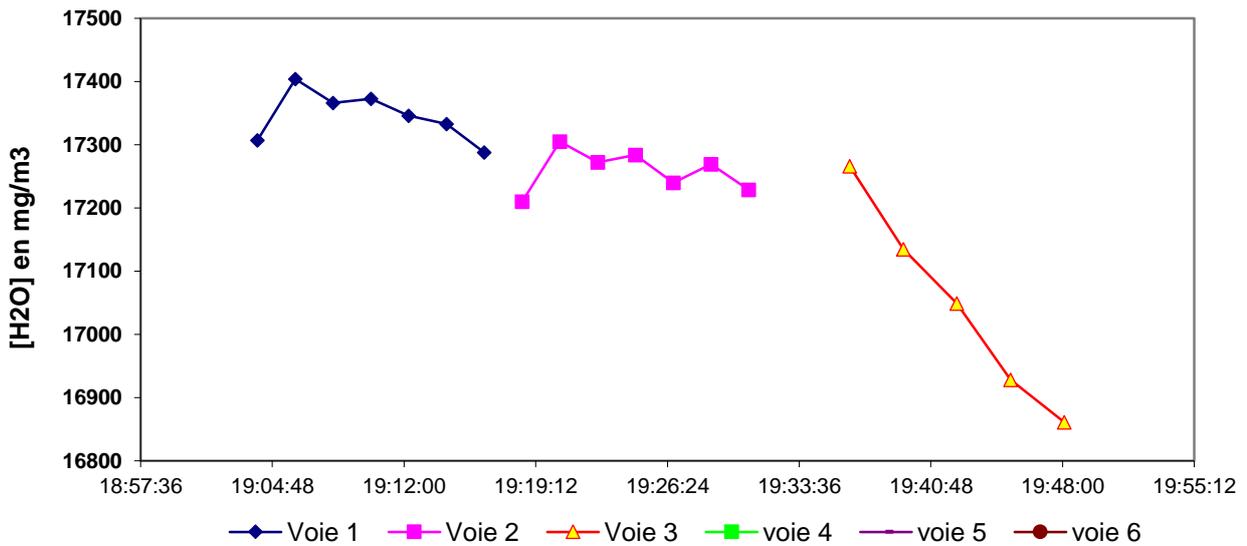


Figure 30 Annexe 9

Observations

Mesures avant raclage couloir alimentation :

- C1 + plaque et C2 + plaque (11h00)
- C1 + sol 1 et C2 + sol 2 (11h25)
- C1 + sol 1 + solution 11 et C2 + plaque + solution 11 (12h05)

C1+ sol 1 + solution 11 :

Mi= 21,36 g

Mf= 19,98 g

pHi= 8,17

pHf= 8,41

C2 + plaque + solution 11 :

Mi= 20,26 g

Mf= 19,93

pHi= 8,17

pHf= 8,06

- Poche air bâtiment (12h10)
- Poche air extérieur (12h40)
- Mesure pH des déjections : 8,36 / 8,21
- Mesure pH urine : 7,85

Mesures après raclage couloir alimentation:

- C1 + plaque et C2 + plaque (14h37)
- C1 + sol 1 et C2 + sol 2 (14h45)
- C1 + sol 1 + solution 11 et C2 + plaque + solution 11 (15h10)

C1+ sol 1 + solution 11 :

Mi= 20,25 g

Mf= 19,77 g

pHi= 8,16

pHf= 8,25

C2 + plaque + solution 11 :

Mi= 20,94 g

Mf= 20,58 g

pHi= 8,16

pHf= 8,07

- Poche air bâtiment (15h00)
- Poche air extérieur (15h30)
- Mesure pH des déjections : 8,31

Mesures avec le SPIR :

Mesures silice + échantillons des déjections, des déjections diluées, urine, eau ...

Remarques :

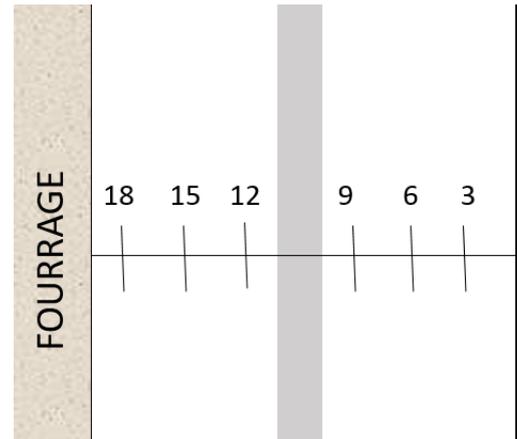
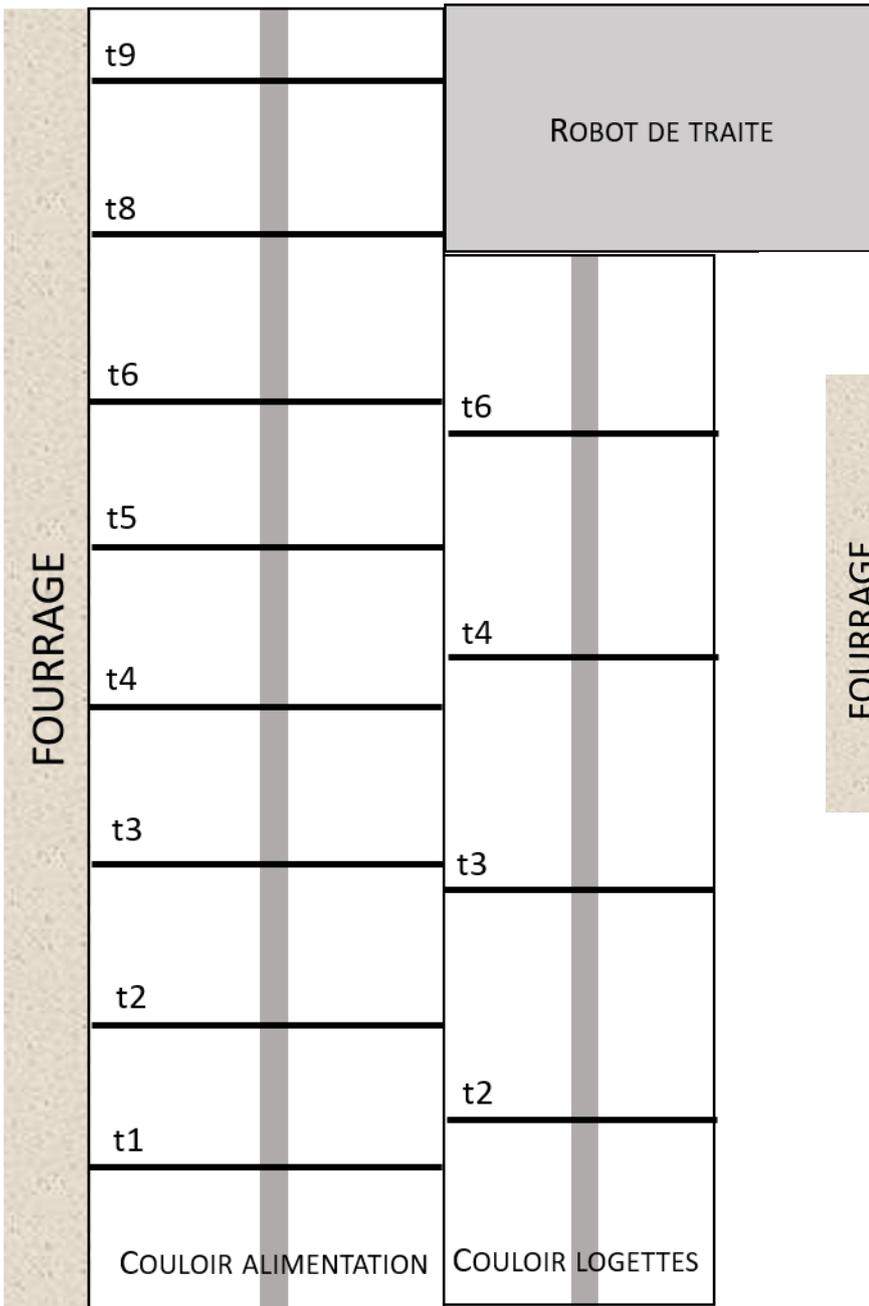
Cas où plaque + solution, le pH final est plus faible que le pH initial alors que sol + solution le pH final est plus élevé que le pH initial.

Ce qu'on observe pour la journée du 17 juillet : décroissance des courbes pour NH₃ dans le cas sol + solution. Explication possible : émissions sol plus importantes que solution, au début NH₃ du sol est mesuré → valeurs élevées puis équilibre entre sol et solution avec dissolution du NH₃ dans la solution → diminution des valeurs de [NH₃] sous la chambre → à la fin le pH est plus élevé

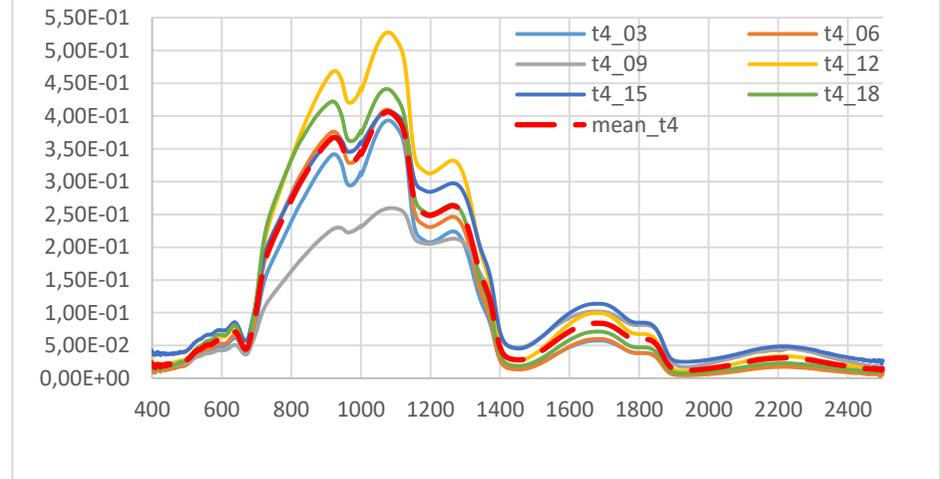
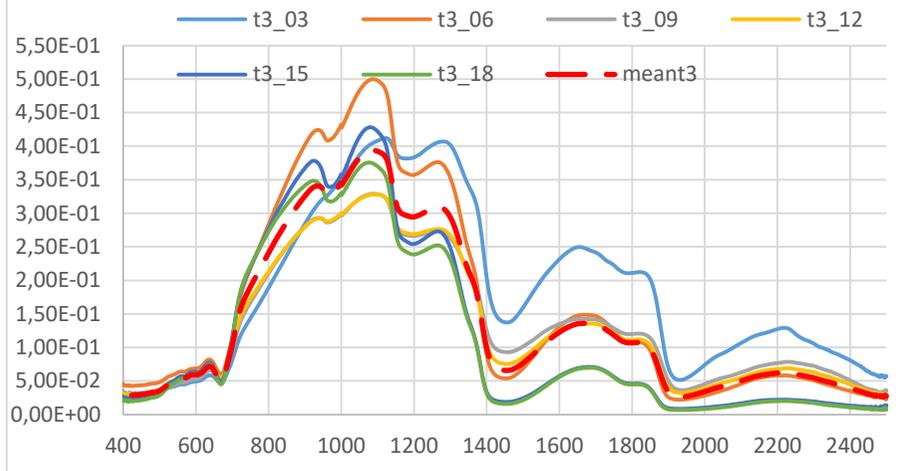
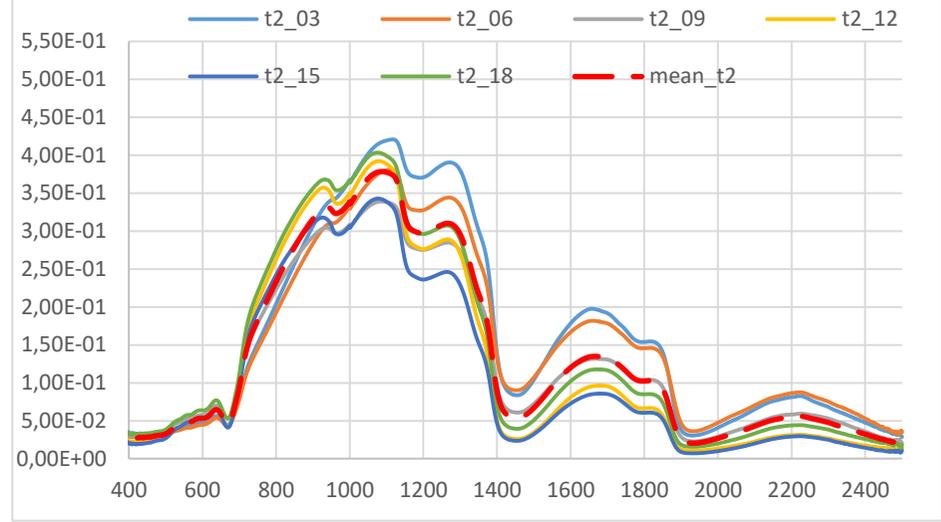
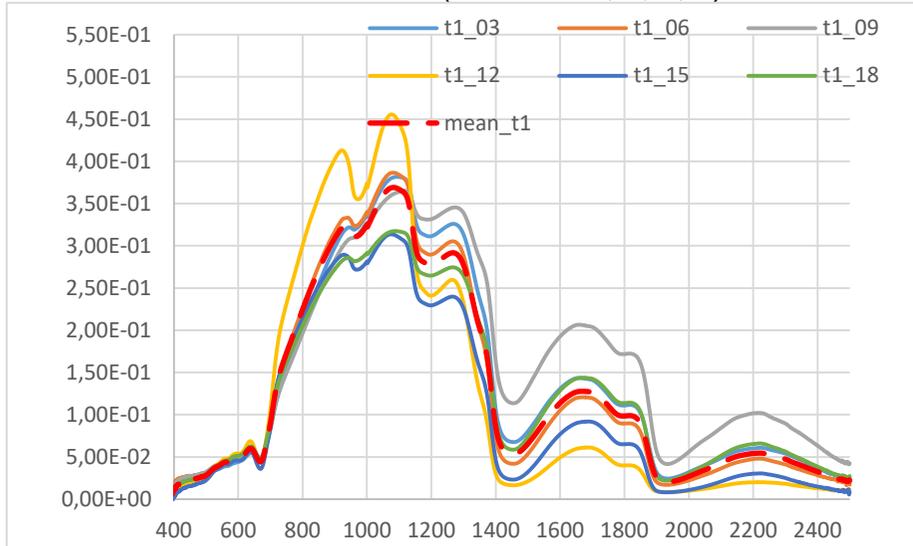
Schéma des transects Derval
11/07/19

Figure 1 annexe 10: transects dans le bâtiment

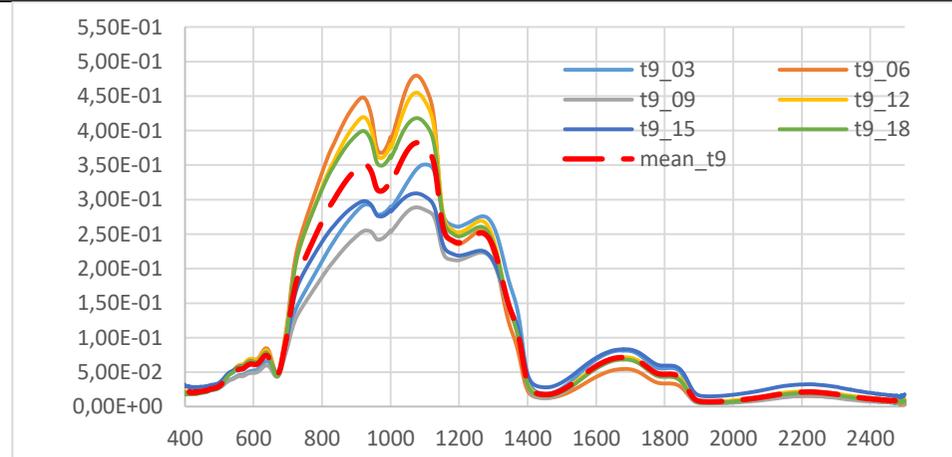
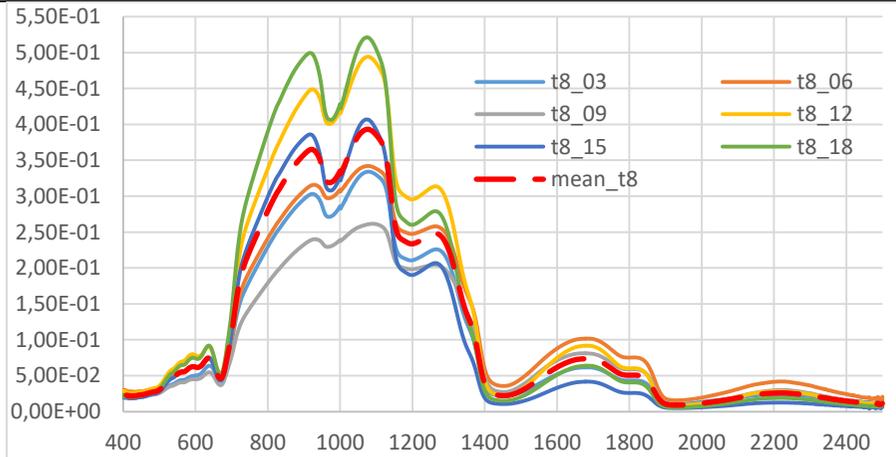
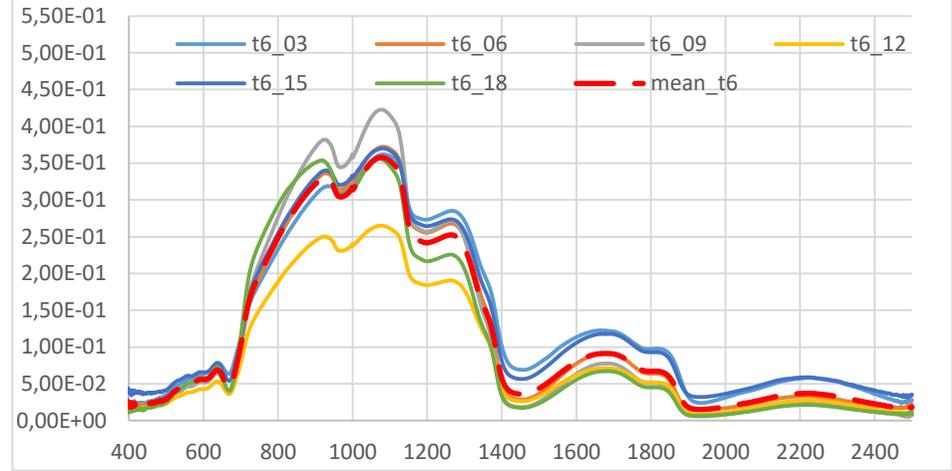
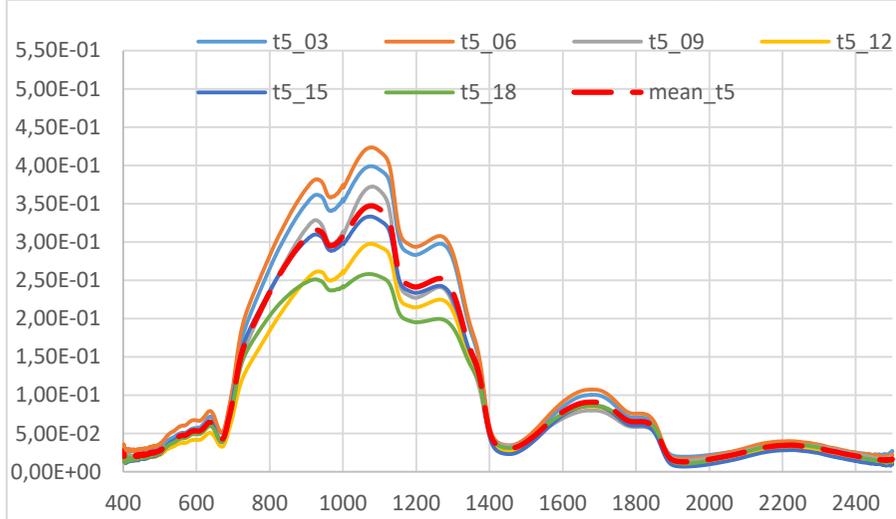
Figure 2 annexe 10: détail d'un transect



Transects couloir alimentation (transects 1, 2, 3, 4)



Transects couloir alimentation (transects 5, 6, 8, 9)



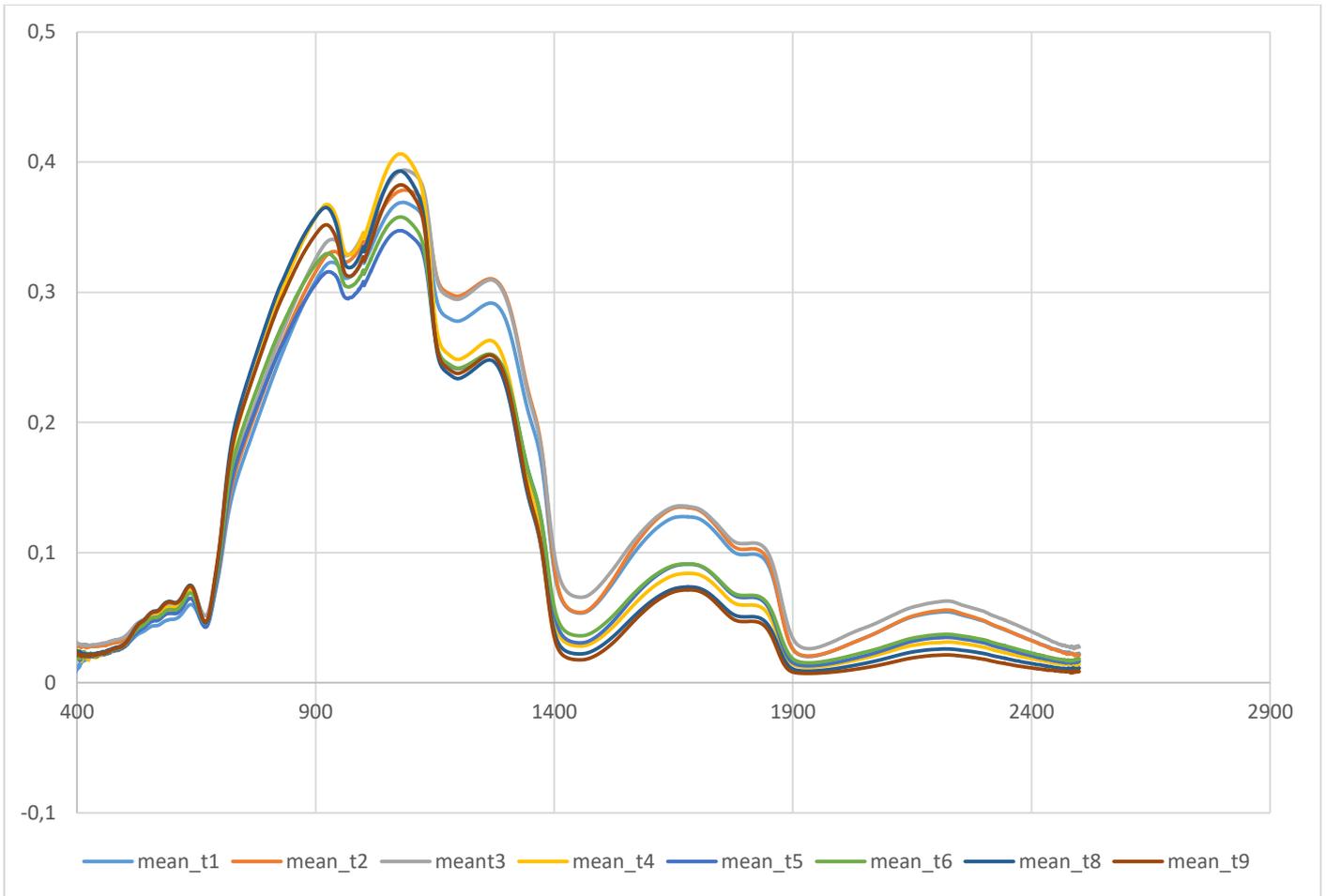
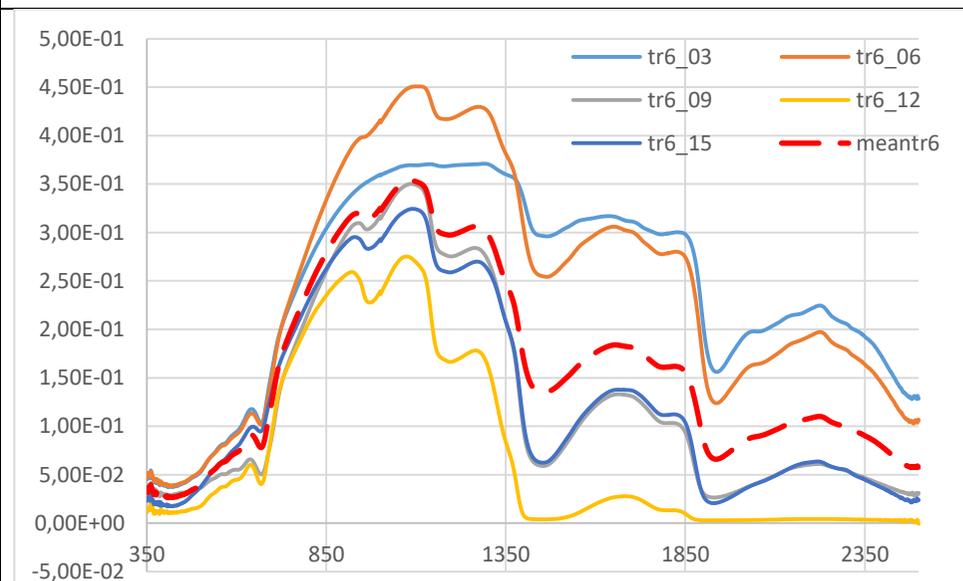
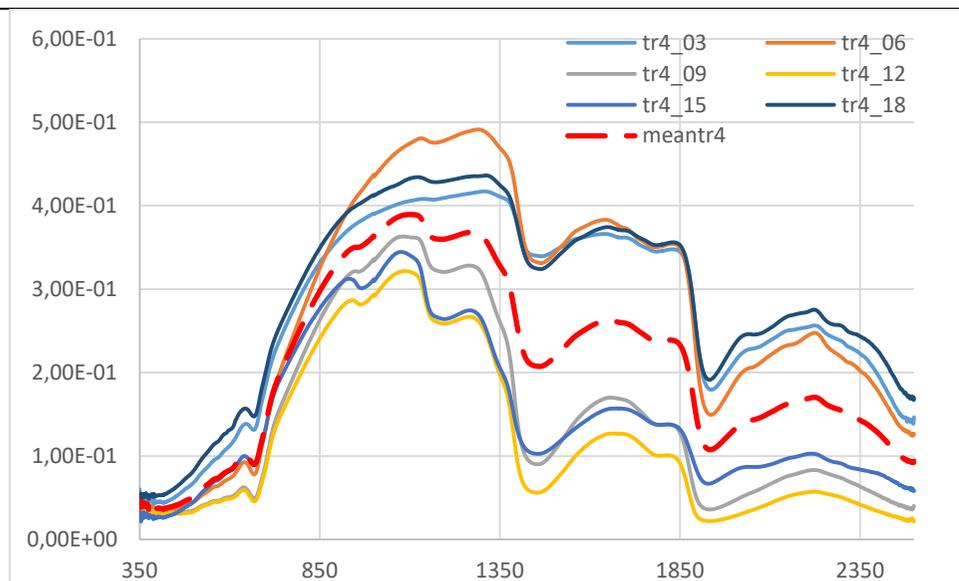
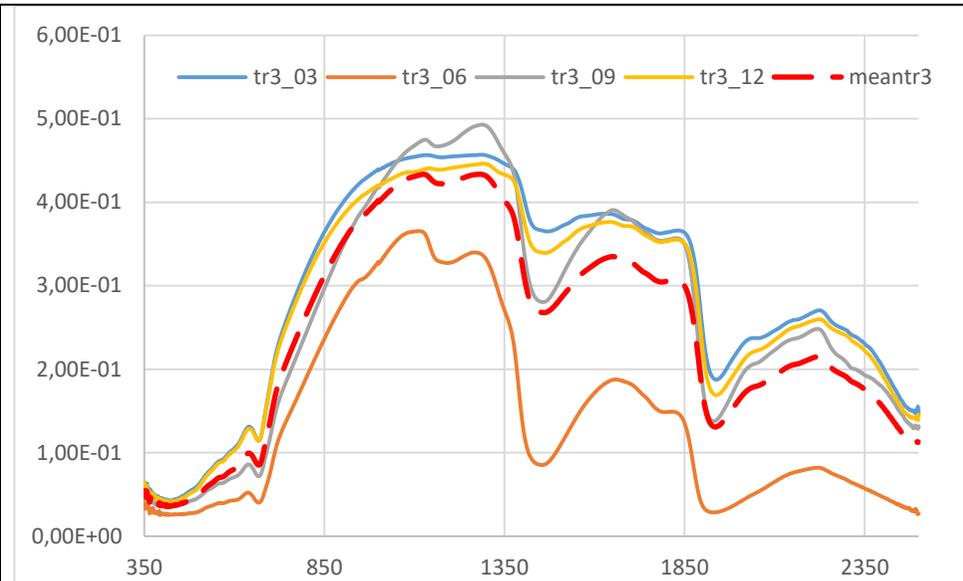
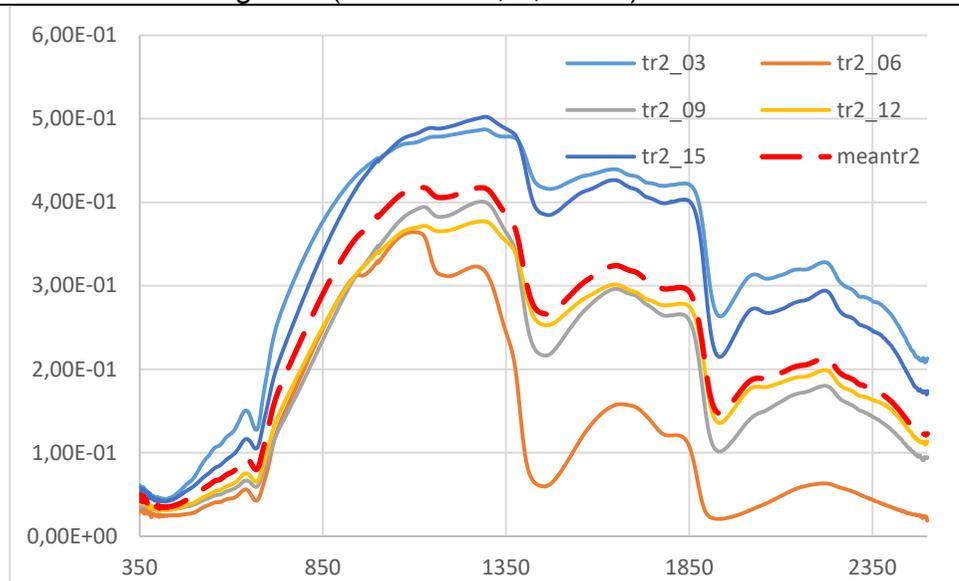


Figure 3 Annexe 10: spectres moyens couloir alimentation

Transects couloir logettes (transects 2, 3, 4 et 6)



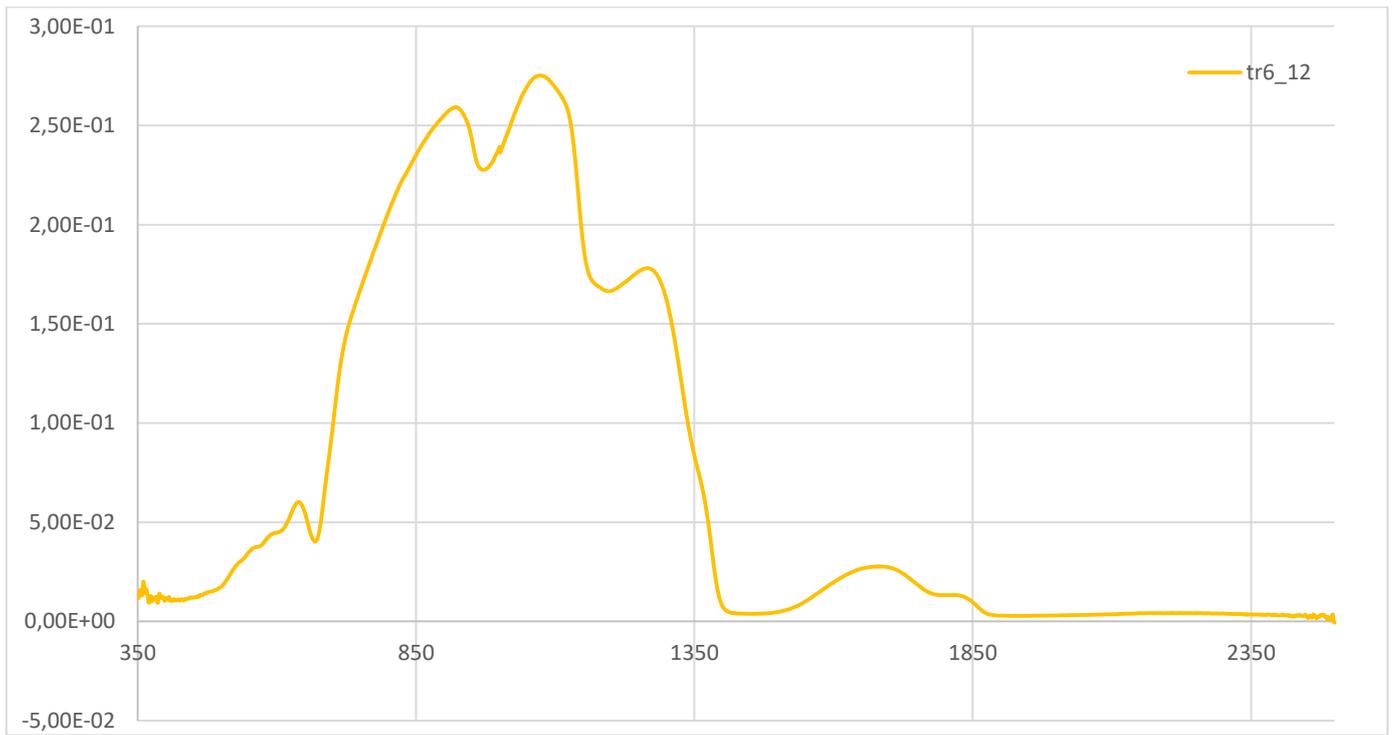


Figure 4 Annexe 10: point 12 du transect 6 couloir logettes

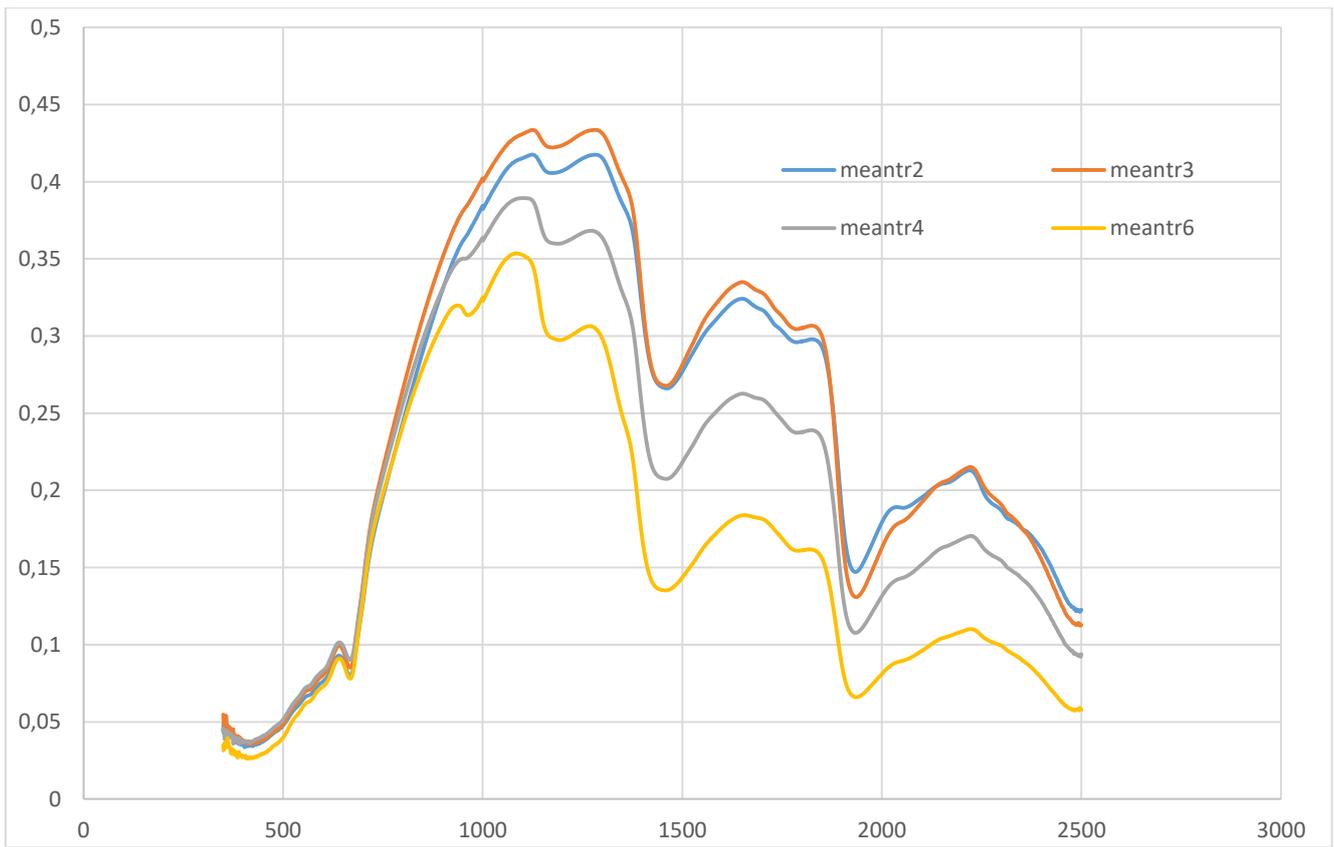


Figure 5 Annexe 10: spectres moyens couloir logettes

ACP et cluster issus des transects

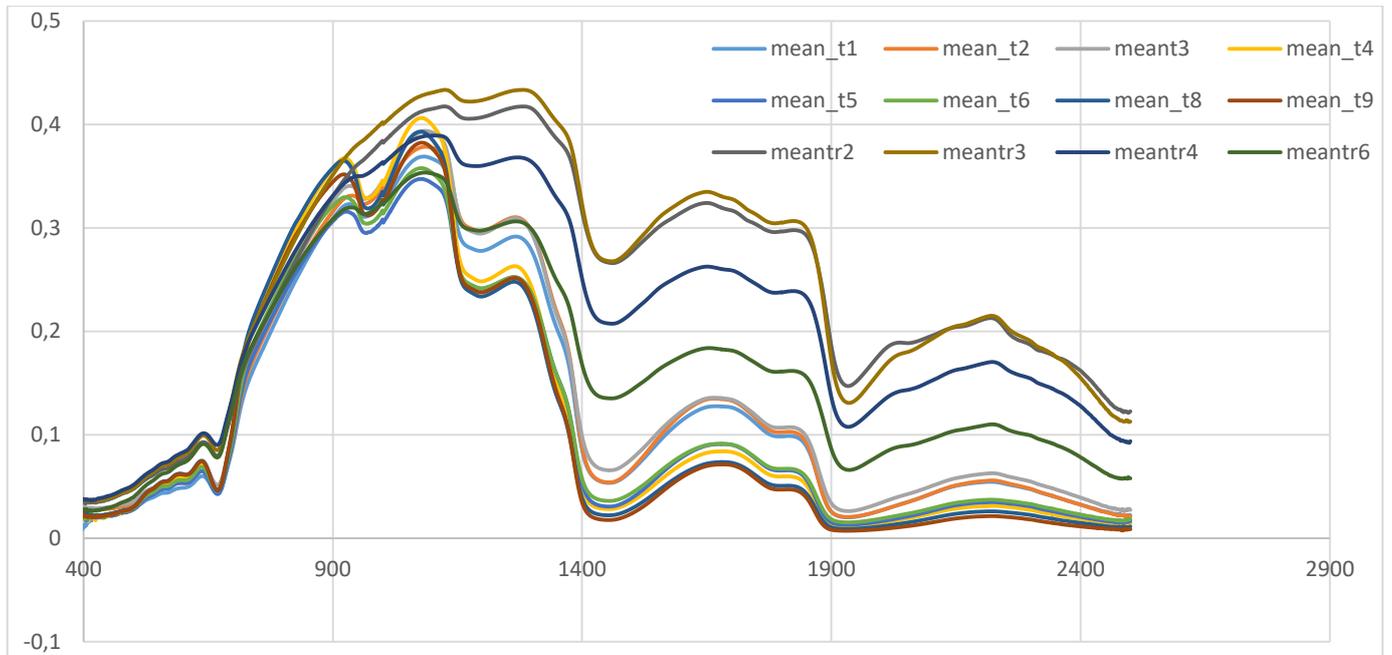


Figure 6 Annexe 10: spectres moyens couloirs alimentation et logettes

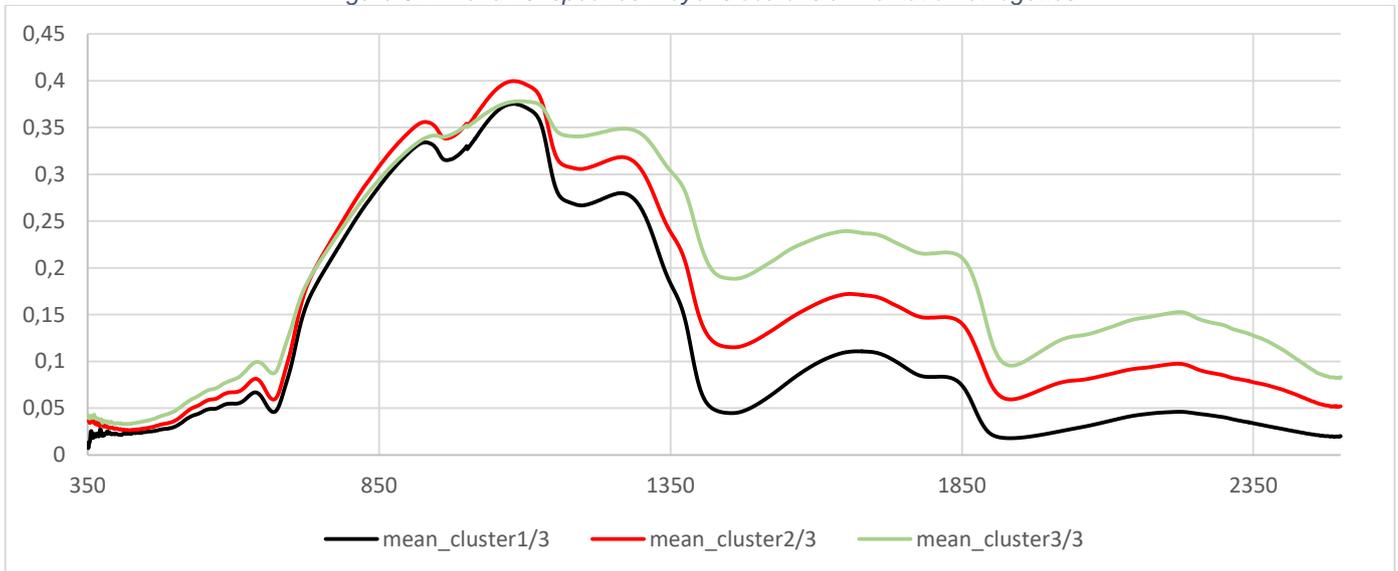


Figure 7 Annexe 10: spectres moyens de réflectance des 3 clusters

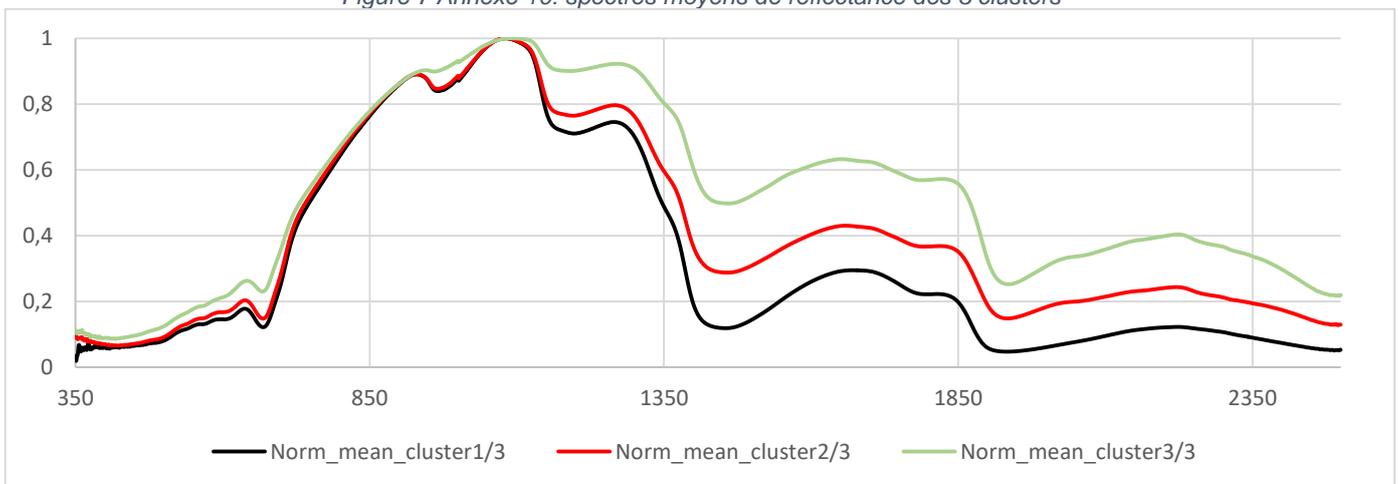


Figure 8 annexe 10: spectres moyens normalisés des 3 clusters

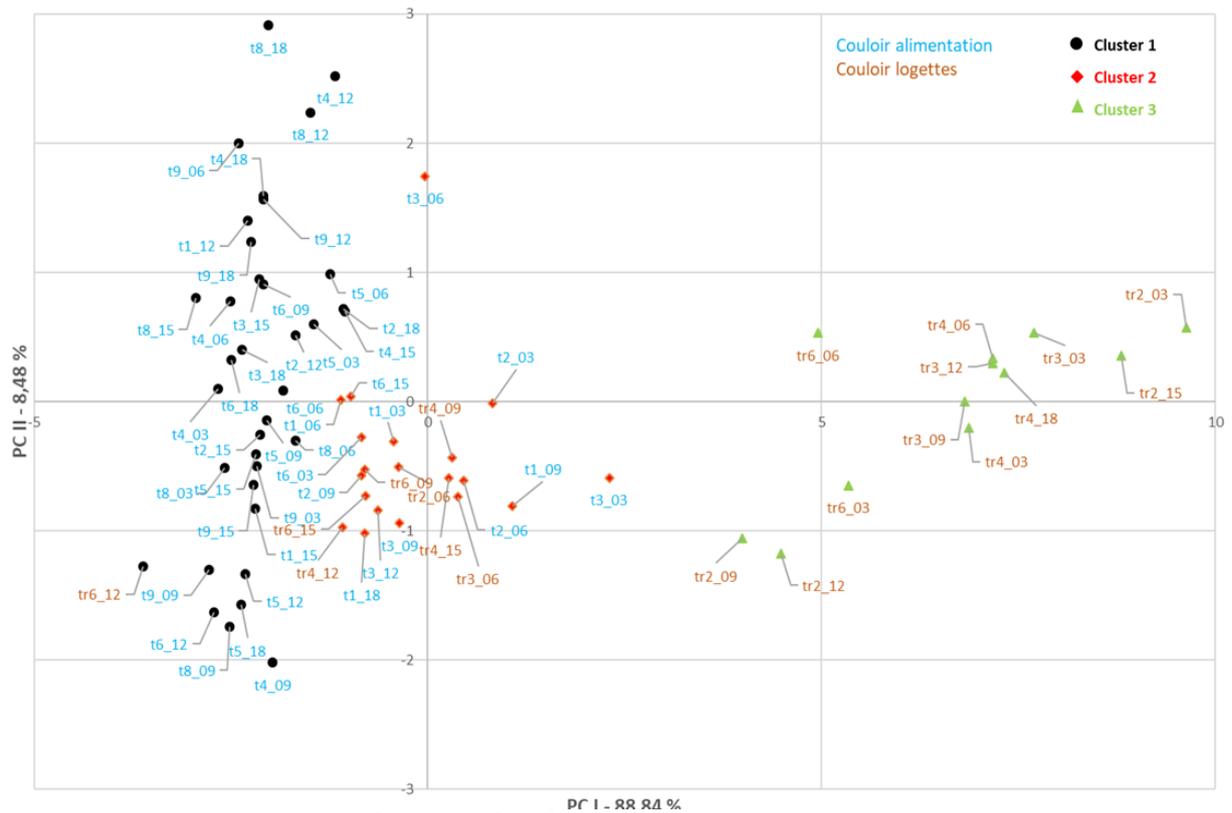


Figure 9 annexe 10 : ACP couloirs alimentation et logettes

- Cluster 1 : classe 2, la plus émettrice
- Cluster 2 : classe 1, intermédiaire
- Cluster 3 : classe 0, non émettrice

Photos correspondant aux transects et répartition dans les différentes classes

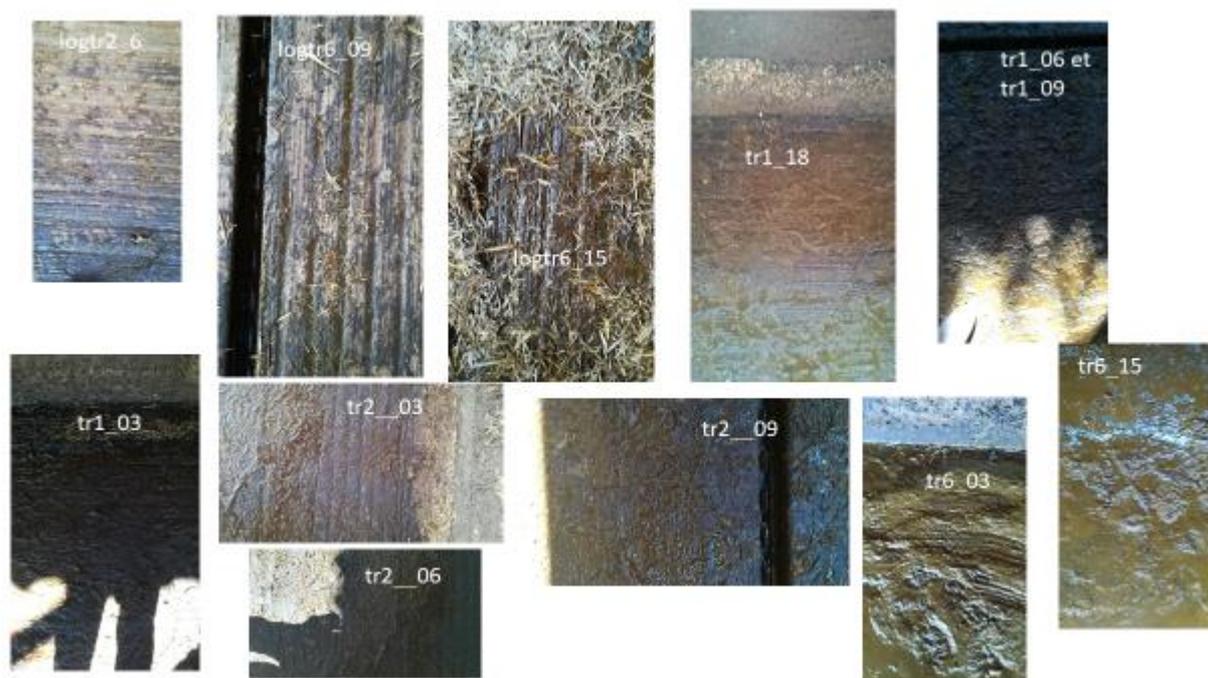
logtr : transect couloir logette

tr : transect couloir alimentation

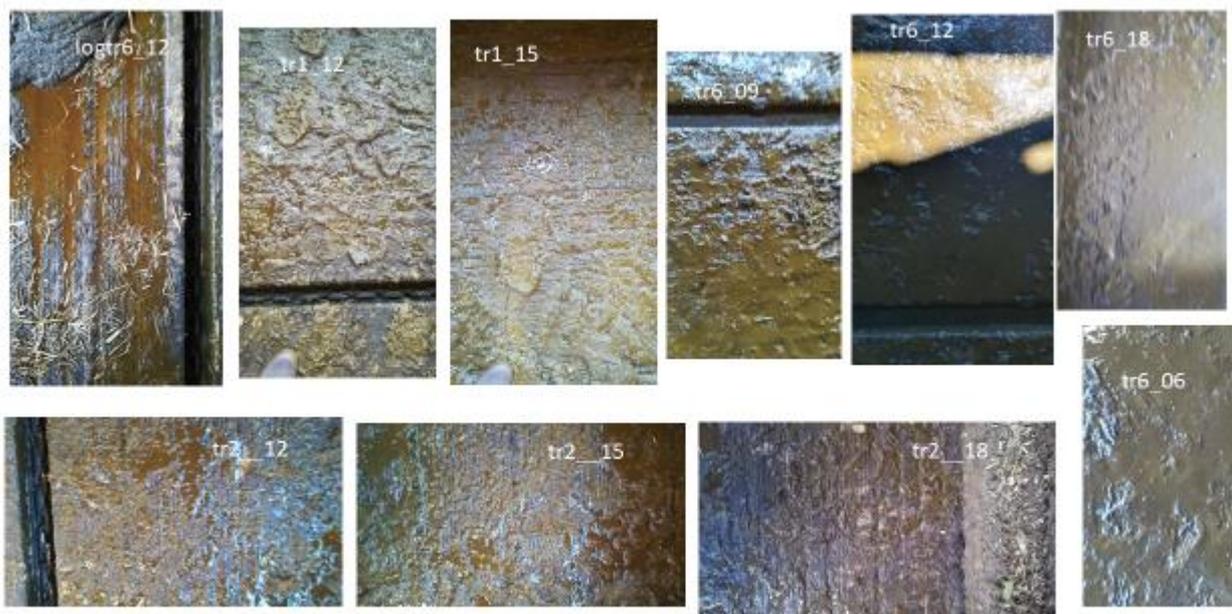
CLASSE 0 : peu souillé – peu émettrice



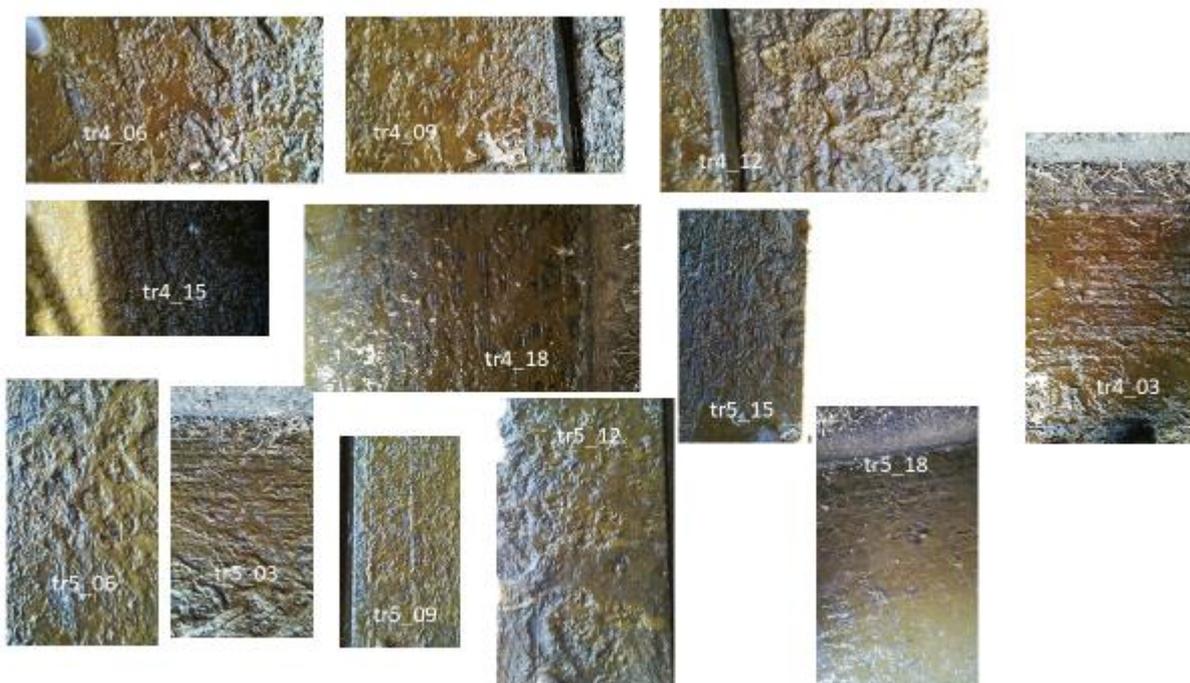
CLASSE 1 : classe intermédiaire en salissement et en émissions

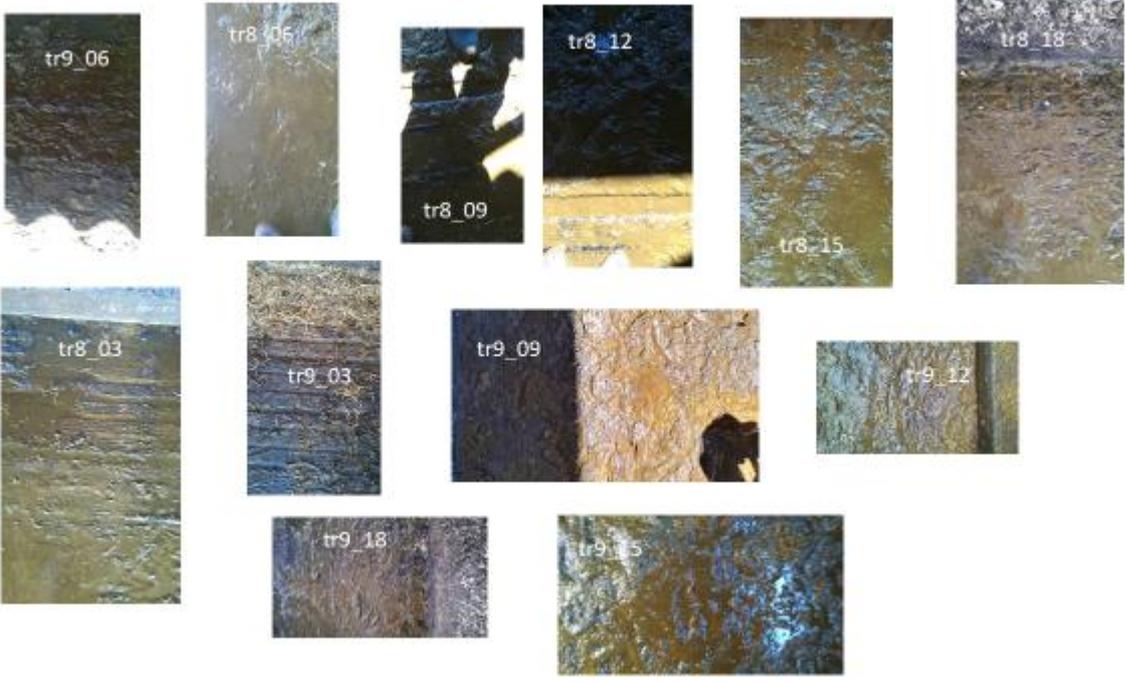


CLASSE 2 (1/2) : classe souillée en salissement et fortement émettrice



CLASSE 2 (2/2) : classe souillée en salissement et fortement émettrice





Annexe 11 Protocole choix de la solution de raccordement à utiliser en élevage

1^{ère} étape : Mesure de $[\text{NH}_4^+]$ des déjections à l'aide du Quantofix

Matériel :

- Quantofix (description du dispositif en *Figure annexe 1*)
- Eau
- Javel
- Lessive de soude
- Lisier prélevé sur place

- A Eprouvette graduée.
Lecture directe $\text{kg/m}^3 \text{ N-NH}_4$.
- B. Base de l'appareil (remplie d'eau)
- C. Flacon recevant le lisier. Flacon siège de la réaction
- D. Flacon à réactif
- E. Tubes destinés à verser le réactif fixé sur le bouchon du flacon
- F. Tube de réception du réactif et tube de liaison au plan d'eau de la base, fixés sur le bouchon du flacon siège de la réaction
- G. Zéro de l'éprouvette de mesure du volume déplacé
- H. Tube de prise d'air pour l'écoulement du réactif
- I. Liaison en plan d'eau du socle.

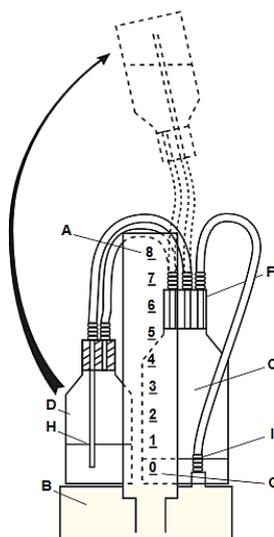


Figure annexe 1: Quantofix-description de l'appareil et schéma de la vidange du réactif dans le flacon à réaction- source site de de l'IFIP

Etapas à suivre :

- Remplir la colonne graduée jusqu'à atteindre le niveau 0
- Dans le grand flacon faire le mélange 100 mL de des déjections + 200 mL d'eau
- Dans le petit flacon : réactif pour Quantofix (1L de Javel + 200 mL de lessive de soude) en mettre 150 mL
- Fermer le petit flacon
- Lever le petit flacon contenant le réactif pour le faire s'écouler dans les déjections
- La réaction se produit et le gaz formé (azote) fait monter la colonne d'eau
- Attendre que la colonne d'eau se stabilise et lire le résultat indiqué par les graduations : 0,9 $\text{kg N-NH}_4^+ / \text{m}^3$ des déjections

On convertit la valeur de concentration en mol/L: $[\text{NH}_4^+] \text{g N-NH}_4 / \text{L des déjections} / 14 (M_{\text{molN}})$

2^{ème} étape : Mesure du pH du des déjections

Matériel :

- pH mètre
- eau distillée
- pipette pasteur

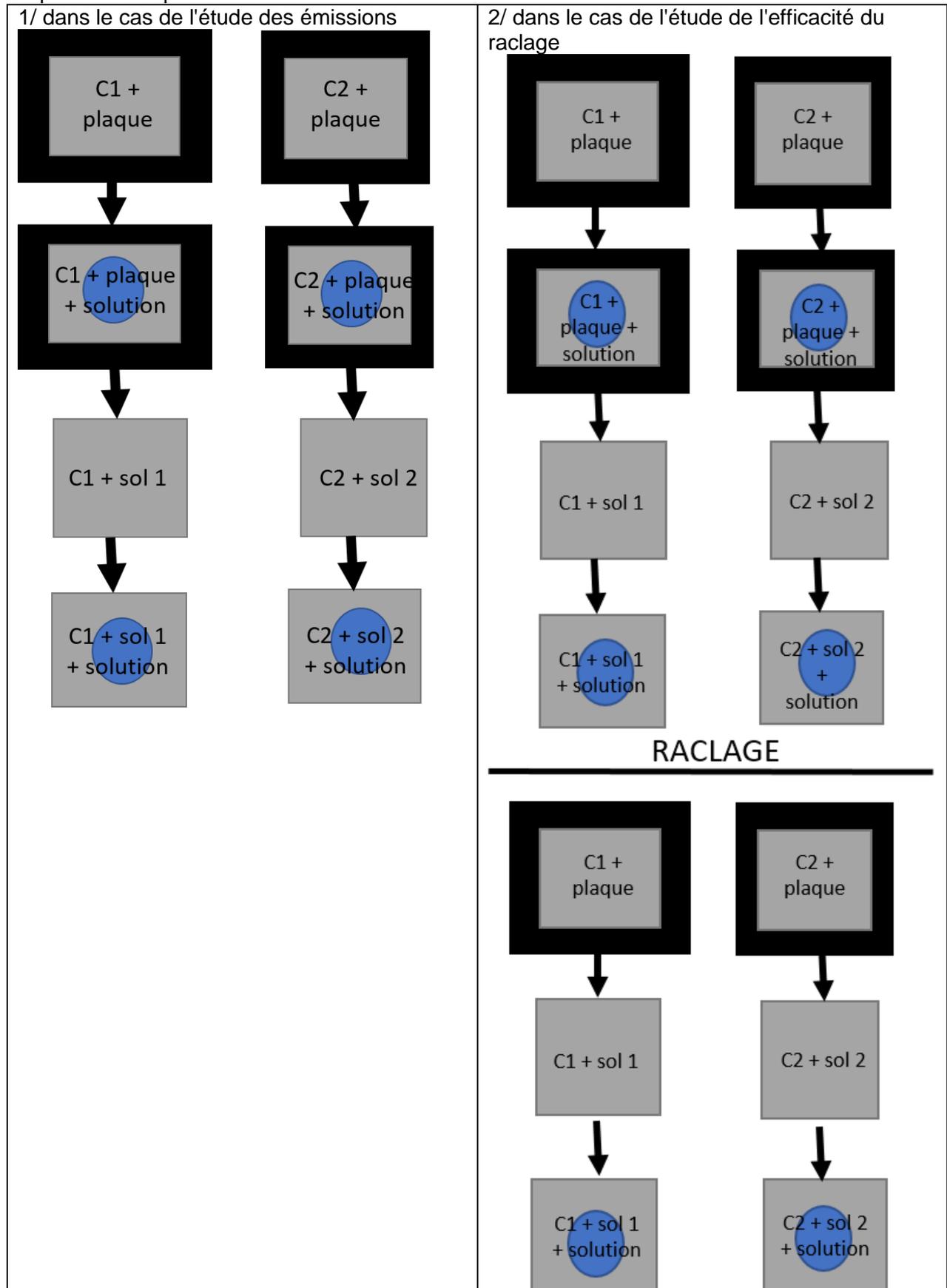
Etapas à suivre :

- Etalonnage du pH-mètre
- Prélever des déjections à l'aide d'une pipette et en verser suffisamment sur la cellule du pH mètre pour qu'elle soit entièrement couverte
- Attendre la stabilisation du pH mètre et relever le pH affiché
- Rincer le pH-mètre à l'eau distillée

Une fois la teneur en azote ammoniacal et le pH déterminés, on choisit la solution de raccordement de la gamme la plus proche de ces deux valeurs.

Annexe 12 Dispositif chambre à déployer selon l'objectif de la mesure

Etapes à suivre pour les mesures chambres :



Matériel :

- boîtes de Pétri (13 cm de diamètre)
- 3 thermohygromètres
- pH-mètre + essuie tout
- pissette eau pure
- petit bidon base
- petit bidon ammoniac
- petit bidon vide + bouchon pour faire mélange
- balance, seringue, pipettes Pasteur
- boîte/ récipient servant de poubelle
- plaque noire
- 2 chambres
- poches/ Crouzet /batterie de 22V pour ventilateur/ chargeur de batterie
- analyseur INNOVA 1412
- échantillonneur
- ordinateur + câbles pour récupérer les données
- gants

Distinguer deux protocoles en fonction de l'objectif :

- Efficacité de raclage
- Emissions gazeuses

Description protocole :

- a) Installation du dispositif initial : deux chambres de mesure côte à côte, plaque noire PEHD propre sous les deux chambres, ventilateurs branchés sur deux batteries de 12V en série, Crouzet prélevant durant 1'30" toutes les 8' et qui pompe 4' après le lancement du programme
- b) Les deux chambres sont initialement relevées
- c) Mettre en marche les ventilateurs
- d) Fixer les premières poches de prélèvement préalablement étiquetées sur les pompes
- e) Placer un thermo hygromètre sous chaque cloche et un autre à l'extérieur, les déclencher en même temps
- f) Fermer les deux chambres et attendre 6 minutes avant de lancer le Crouzet
- g) Attendre 1 prélèvement, arrêter le Crouzet
- h) Soulever les deux chambres et préparer la solution de raccordement choisie, faire le mélange base/acide au dernier moment et mettre les solutions sous les chambre dans une boîte de Pétri en ayant pesé les masses de liquide au préalable (environ 20 g) et mesuré le pH
- i) Fermer les deux chambres et lancer le Crouzet
- j) Attendre 3 prélèvements, arrêter le Crouzet et soulever les deux chambres
- k) Retirer les solutions, peser le restant de liquide et mesurer leur pH final
- l) Retirer les plaques et reposer les chambres sur le sol du bâtiment, un peu plus loin du premier endroit de mesure (pour éviter de poser le dispositif sur la zone « polluée » par la présence des plaques)
- m) Fermer les deux chambres et lancer le Crouzet
- n) Attendre 3 prélèvements, arrêter le Crouzet et soulever les deux chambres en les laissant au même endroit
- o) Utiliser la même solution de raccordement, en placer 20 g sous chaque chambre dans une boîte de Pétri en ayant pesé les masses de liquide au préalable et mesuré le pH
- p) Fermer les deux chambres et lancer le Crouzet
- q) Attendre 3 prélèvements, arrêter le Crouzet et soulever les deux chambres
- r) Retirer les solutions, peser le restant de liquide et mesurer leur pH final
- s) Répéter le même protocole après le raclage si besoin, en ignorant l'étape de mesure plaques PEHD + solution de raccordement
- t) A la fin des mesures chambres, analyser les poches de gaz prélevées à l'aide de l'échantillonneur couplé avec l'analyseur et récupérer les données des thermo hygromètres

Annexe 13 Protocole méthode simplifiée et questionnaire éleveurs

Fiche 22 Mesure des émissions gazeuses par méthode simplifiée en bâtiment

d'élevage (Hassouna et al., 2015)

Domaine d'application

La méthode de mesures simplifiée des émissions est une méthode, non intrusive et locale, de mesures des émissions gazeuses dans les bâtiments d'élevage (alimentation + bâtiments). Elle permet d'obtenir des valeurs ponctuelles d'émission pour le CO₂, le CH₄, le N₂O, la vapeur d'eau et le NH₃. Elle peut s'appliquer aux bâtiments à ventilation naturelle ou dynamique des élevages avicoles, bovins et porcins, à condition que les intrants (aliments, litières, ...) et sortants (effluents, viande, lait, ...) puissent être clairement quantifiés et caractérisés chimiquement. Dans le cas des élevages avicoles et porcins, cette méthode permet de mesurer les émissions d'un lot d'animaux.

Principe

La méthode simplifiée est basée sur le couplage entre le calcul des pertes de carbone au bâtiment par bilan de masse (Figure M22.1 et Fiche 21) et la mesure des gradients de concentrations entre l'intérieur et l'extérieur des bâtiments pour chaque gaz d'intérêt (NH₃, N₂O, CH₄, CO₂, H₂O).

Cette méthode est basée sur deux hypothèses:

- la majorité du carbone volatilisé est du CO₂
les émissions d'ammoniac et des gaz à effet de serre sont proportionnelles aux émissions de CO₂ lorsque les conditions d'élevage ou de stockage des effluents sont stables.

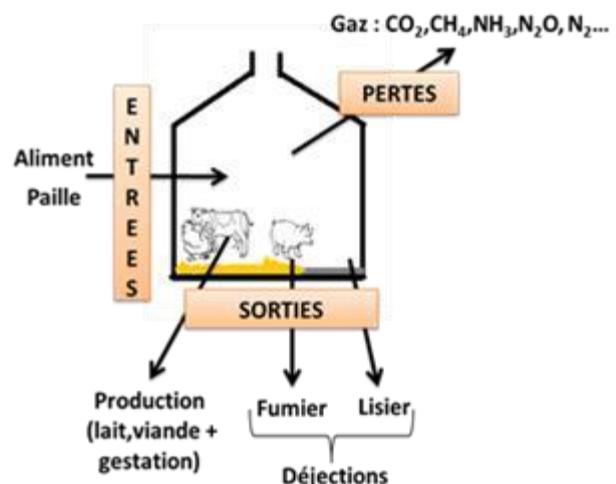
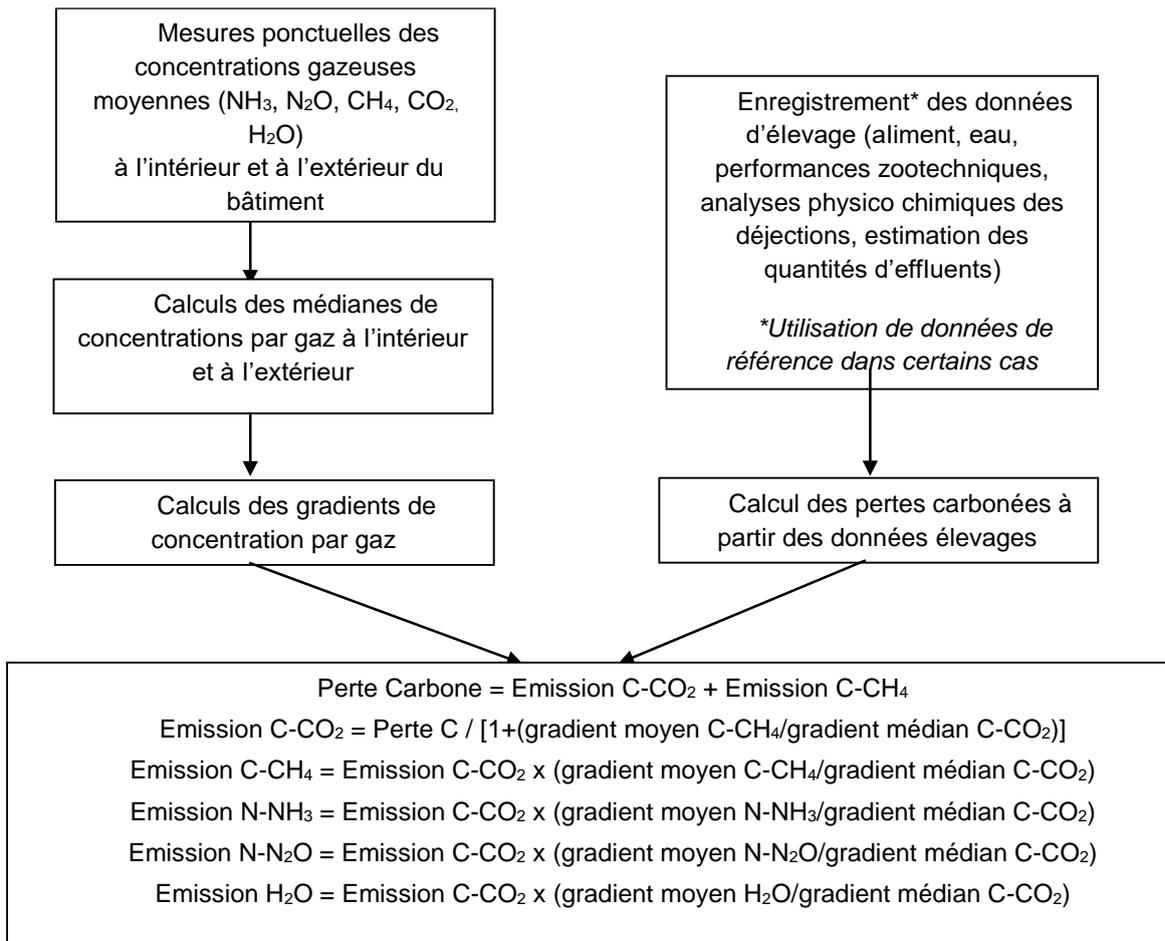


Figure M22.1. Bilan des entrées et des sorties au niveau du bâtiment d'élevage

L'utilisation du bilan de masse sur les éléments N, C, P, K et l'eau permet de s'assurer de la cohérence des résultats: le bilan de masse (H₂O) permet de vérifier la représentativité de l'échantillonnage de l'air et la validité des données d'entrée du bilan de masse. Les bilans sur Phosphore (P) et potassium (K) permettent de vérifier la qualité des bilans de masse et les bilans sur N et C les ordres de grandeurs des émissions gazeuses calculées pour les gaz azotés (N₂O et NH₃) et carbonés (CH₄ et CO₂).

La figure suivante présente le principe général de la méthode qui permet d'aboutir à la quantification des émissions.



Principe du calcul des émissions à partir des concentrations gazeuses et des données d'élevage

Matériel nécessaire

- Mesure des concentrations :
 - Analyseur de gaz CO₂, N₂O, CH₄, NH₃ et H₂O (ex: spectroscopie d'absorption infrarouge)
- Echantillonnage en élevage bovins et avicoles:
 - Sacs de prélèvement d'air étanches dans un matériau limitant l'adsorption du NH₃ sur les parois (ex : sac FlexFoil)
 - Pompe à air
 - Filtres à l'entrée du système d'échantillonnage (ex: 0,45 µm)
 - Tube PTFE (Polytétrafluorethylène) pour raccorder système d'échantillonnage et analyseur
- Echantillonnage en élevage porcins :
 - Tube PTFE (Polytétrafluorethylène) pour les prélèvements d'air par l'analyseur
- Thermo-hygromètre pour caractériser les conditions de température et d'hygrométrie à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment

Mise en œuvre

En bâtiments bovins et avicoles, la mesure ponctuelle des concentrations sur l'élevage est réalisée grâce à plusieurs échantillons d'air conditionnés dans des sacs. Dans le but d'avoir des échantillons d'air intérieur et d'air extérieur homogènes et représentatifs, deux circuits sont réalisés, un au sein du bâtiment et le deuxième à l'extérieur (Hassouna *et al.*, 2010; Ponchant *et al.*, 2009). Le prélèvement se fait à l'aide d'une pompe à air dans l'ambiance ou d'un contenant étanche pouvant être mis sous dépression au moyen d'une pompe (Fiche 5). Les échantillons sont ensuite analysés soit sur site soit de manière différée avec un analyseur de gaz.

En bâtiment porcin à ventilation dynamique, l'air est échantillonné et analysé directement par un analyseur de gaz, toutes les 2 minutes dans les cheminées d'extraction d'air sur une durée de 4 heures (Guinand *et al.*, 2010) et une concentration moyenne est ensuite calculée à partir des concentrations enregistrées.

Etant donné la réalisation de mesures ponctuelles dans cette méthode, les prélèvements doivent se faire de manière à éviter d'autres sources ponctuelles et temporaires d'émissions comme les véhicules en fonctionnement et des feux pour les prélèvements extérieurs. Lors du prélèvement à l'intérieur du bâtiment, il s'agit de surveiller plus particulièrement l'activité des animaux. Par exemple, en élevage bovin, il est nécessaire de passer dans le bâtiment une fois que les animaux ont mangé et ne sont plus couchés sur la litière. Si cette condition n'est pas respectée, l'aération de la litière lors du levé et de l'activité des animaux peuvent élever temporairement le niveau de concentrations en gaz et en poussière dans le bâtiment.

Pour caractériser les émissions d'un lot ou d'une période, plusieurs mesures ponctuelles sont nécessaires car les rapports de concentrations entre gaz peuvent évoluer dans le temps. Le nombre et les dates d'échantillonnage nécessaires dépendent de la production étudiée et ont été calibrés lors d'expérimentations dédiées au calage de la méthodologie. Par exemple, en élevage de porcs en maternité, les travaux de l'IFIP ont montré que 3 jours de prélèvement (à 6-9 jours, 18-22 jours et 30-34 jours de présence) étaient suffisants pour obtenir la meilleure représentation de la dynamique des concentrations pendant la présence des animaux.

Intérêts et limites

Intérêts : cette méthode a pour avantage d'être adaptable dans chaque type d'élevage (quel que soit la typologie de bâtiment, d'espèces, de pratiques d'élevage,...) et facile à mettre en œuvre. Pour les bâtiments d'élevage bovins, la méthode est toujours en cours d'amélioration (bilan C, type d'alimentation, prise en compte de stades physiologiques différents, ...). Cette méthode permet d'avoir rapidement accès à un niveau d'émission mais afin de pouvoir évaluer la qualité des mesures, une évaluation de l'incertitude doit être entreprise.

Limites : d'un point de vue qualitatif, étant donné que cette méthode est basée sur des mesures ponctuelles, on pourra considérer que les résultats obtenus sont associés à une incertitude plus élevée que ceux qui seraient obtenus à partir de mesures en continu. La méthode est très sensible à la qualité du bilan de masse. L'utilisation de données de références est pertinente dans le cas des élevages standardisés (porcins et avicoles) pour lesquelles des références nationales fiables existent, en particulier sur les quantités et les compositions des effluents. Pour des élevages non standards, des analyses *in situ* d'effluents et une estimation des quantités d'effluents produites sont nécessaires.

Coûts : C'est une méthode peu coûteuse, variant de 100 à environ 200 € d'équipement et d'analyse pour un élevage (hors coût de l'analyseur de gaz).

Questionnaire Eleveurs – Mesures simplifiées de GES en bâtiment

Région : _____	Adresse : _____
Département : _____	_____
Nom et prénom : _____	_____
Téléphone : _____	_____
e-mail : _____	_____

Date des mesures en été : / /	Date des mesures en hiver : / /
Heure des mesures en été :	Heure des mesures en hiver :

Conditions météorologiques :

I- L'exploitation en général

1) Combien de bâtiments avez-vous pour les bovins et avec quels modes de logement ?

Bâtiment	Mode de logement
1	
2	
3	
4	
5	

2) Combien d'animaux avez-vous au total ? (au jour de la mesure)

Catégories d'animaux	Nombre	Bâtiment (n°)
VL en production		
VL tarées/réformes		
Génisses 2-3 ans		
Génisses 1-2 ans		
Génisses 6 mois – 1 an		
Génisses <6 mois		
Veaux mâles < 6 mois		
Bœufs		
Taurillons		
Vaches allaitantes		
Mâles reproducteurs		

3) Quelle est la SAU de l'exploitation ? _____

4) Quelles sont les cultures principales ? (Description de la SAU : SFP, PP, PT, maïs etc...)

5) Quel est le mode de logement des vaches ? (cocher la case à droite)

ETABLE ENTRAVEE	Système Lisier	<input type="checkbox"/>
	Système Fumier	<input type="checkbox"/>
PENTE PAILLEE	Exercice couvert	<input type="checkbox"/>
	Exercice non couvert	<input type="checkbox"/>
AIRE PAILLEE	Intégrale	<input type="checkbox"/>
	Couloir Caillebottis	<input type="checkbox"/>
	Couloir raclé lisier	<input type="checkbox"/>
	Couloir raclé fumier	<input type="checkbox"/>
LOGETTES	Exercice non couvert	<input type="checkbox"/>
	Caillebottis	<input type="checkbox"/>
	Couloir raclé lisier	<input type="checkbox"/>
	Couloir raclé lisier exercice non couvert	<input type="checkbox"/>
	Couloir raclé fumier	<input type="checkbox"/>
	Couloir raclé fumier exercice non couvert	<input type="checkbox"/>

6) Quelle surface occupent les différentes zones dans le bâtiment ?

(A ne remplir que si les plans ne permettent pas de les calculer)

	Surface en m ²
Aire de couchage	
Aire d'exercice	
Couloir d'alimentation	
Aire d'attente	

II- Le bâtiment où sont effectuées les mesures

(Faire une copie des plans des bâtiments)

7) **Vue en plan** (hauteur, longueur, largeur du bâtiment et de chaque aire de vie)

8) **Vue en coupe** (préciser les ouvertures et leurs dimensions)

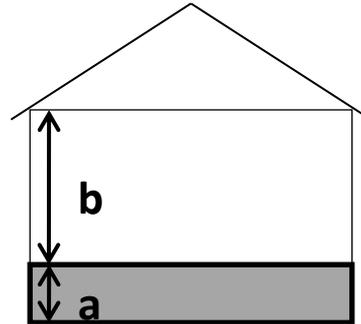
9) **D'où viennent les vents dominants ?**

10) **Y-a-t-il d'autres bâtiments à proximité de celui-ci ? Sont-ils dans le vent par rapport au bâtiment où sont effectuées les mesures ?**

11) Quels sont les types de couverture ?

Toiture

- Faîtière fermée
- Faîtière ouverte sans brise-vents
- Faîtière ouverte avec brise-vents
- Toiture avec écailles
- Toiture en shed (en toit d'usine)
- Autre _____



Murs

- Hauteur de murs pleins (a) : _____
- Hauteur de bardage (b) : _____
- Type de bardage (préciser les dimensions en mètre si plusieurs types sont utilisés) :
 - Bardage claire-voie en bois /dimensions : ___x___/espacement : ___
 - Bardage en tôle perforée /dimensions : ___x___/perforation : ___
 - Bardage en tôle à ventelles /dimensions : ___x___/perforation : ___
 - Filet ou grille brise-vent en plastique /dimensions : ___x___/perforation : ___
 - Autre _____ / dimensions : ___x___/perforation : ___

12) Qu'est-ce que vous obtenez comme type de déjections pour ce bâtiment ?

(Cocher les cases correspondantes)

Type de déjection	Provenance		
	Aire de couchage	Aire d'exercice ou couloir	Aire d'alimentation
Fumier			
Lisier			
.....			

13) Pour les bâtiments en litière accumulée, quelle est le type de paille (longue ou hachée) ?

14) Pour les bâtiments en litière accumulée, quelle est le mode de paillage (manuel, pailleuse)?

15) Pour les bâtiments en litière accumulée, quelle est la fréquence de curage de la litière ?

_____ jours / semaines / mois

16) Quel est l'âge de la litière au moment des mesures ?

ETE _____

HIVER _____

17) Quel est le matériau de litière utilisé ? (paille de blé, d'orge, sciure, etc...)

18) Quelle est la quantité de matériau de litière apportée dans ce bâtiment en kg/vache/jour ?

19) Utilisez-vous un produit de type « asséchant » en bâtiment ? Si oui, de quel produit s'agit-il et en quelle quantité ?

20) Quel type d'abreuvoir utilisez-vous (automatique, rempli manuellement...) ? Est-ce qu'il existe des fuites (au niveau de ces points d'eau ou dans le reste du bâtiment) qui peuvent souiller la litière ?

21) Les bétons ont-ils été traités (rainurage, brûlage) ? Si oui, quel type de traitement ?

22) Quel est la pente du sol pour les couloirs?

23) Quel type de raclage utilisez-vous ? (Précisez le type de rabot en V ou en U si nécessaire)

24) Pour les aires de raclage, quelle est la fréquence des raclages ? tous les _____ jours / semaines / mois

25) Comment stockez-vous les déjections issues du bâtiment étudié ?

Type de déjection	Ouvrages de stockage
Lisier	<input type="checkbox"/> Fosse sous caillebotis <input type="checkbox"/> Fosse extérieure non couverte <input type="checkbox"/> Fosse totalement couverte <input type="checkbox"/> Autre _____
Fumier	<input type="checkbox"/> Accumulation sur aire de vie <input type="checkbox"/> Stockage sur parcelle d'épandage <input type="checkbox"/> Fumière avec 0 ou 1 mur <input type="checkbox"/> Fumière avec 2 murs <input type="checkbox"/> Fumière avec 3 murs <input type="checkbox"/> Fosse universelle avec séparation fumier/purin <input type="checkbox"/> Autre _____
.....	

26) Combien de vaches et autres animaux le bâtiment accueille-t-il ?

(« En général » : à remplir si la situation « en général » est différente de celle du jour de la mesure)

	En général		Au maximum	
	Nombre	Surface occupée	Nombre de places	Surface occupée
Vaches				
Génisses				
Veaux				
Mâles reproducteurs				
Bœufs				
.....				

27) Quand les vaches sont-elles présentes dans ce bâtiment ?

	Stabulation permanente	Stabulation partielle
HIVER	<input type="checkbox"/>	Du ___/___/___ au ___/___/___ De ___ h à ___ h (et de ___ h à ___ h)
ETE	<input type="checkbox"/>	Du ___/___/___ au ___/___/___ De ___ h à ___ h (et de ___ h à ___ h)
Lors des mesures en ETE	<input type="checkbox"/>	De ___ h à ___ h (et de ___ h à ___ h) Leur dernier passage remonte à ___ h
Lors des mesures en HIVER	<input type="checkbox"/>	De ___ h à ___ h (et de ___ h à ___ h) Leur dernier passage remonte à ___ h

28) Quel est le stade de lactation des vaches ? (stade de lactation moyen des VL)

	Stade de lactation des vaches
Lors des mesures en ETE	
Lors des mesures en HIVER	

29) Quelle est la production moyenne et les taux (TB, TP) des vaches résidant dans ce bâtiment ?

	Production moyenne des vaches	TB moyen	TP moyen	Urée
unités				
Lors des mesures en ETE				
Lors des mesures en HIVER				

30) Quel est le poids moyen des vaches résidant dans ce bâtiment ?

	Poids moyen des vaches
Lors des mesures en ETE	
Lors des mesures en HIVER	

31) A quelle heure a été distribuée l'alimentation dans le bâtiment ? (le jour de la mesure)

32) Quel est le type d'aliment distribué, et les changements d'alimentation au cours de l'année pour les vaches résidant dans ce bâtiment ?

(préciser kg MS ou kg brut)

		Alimentation		
		Fourrages	Concentrés	Minéraux
HIVER	Du Au.....			
ETE	Du Au.....			
.....	Du Au.....			
Lors des mesures en ETE				
Lors des mesures en HIVER				

Annexe 14 Projet de communication aux Rencontres Recherches Ruminants
Mesure locale de l'émission d'ammoniac d'un sol souillé et extrapolation spatiale au bâtiment bovin

ROZE M.-H. (1), FOUAD Y. (2), ROBIN P. (3), FOUGERE M. (4), LORINQUER E. (1)

- (1) Idele, Monvoisin BP 67, 35652 Le Rheu Cedex, France
- (2) INRA AgroCampus Ouest UMR SAS, 65 rue de St Briec, 35000 Rennes, France
- (3) AgroCampus Ouest UMR SAS, 65 rue de St Briec, 35000 Rennes, France
- (4) Ferme expérimentale de Derval, La Touche, 44590 Derval, France

RESUME

Le secteur de l'élevage est confronté à une demande croissante de produits animaux à laquelle il doit répondre en limitant au maximum ses impacts environnementaux et en assurant sa durabilité. La mesure des émissions d'ammoniac des sols de bâtiment bovin est nécessaire à la mise en place de bonnes pratiques adaptées à chaque élevage. La méthode EMISOL BV associe des mesures au sol par une chambre semi-statique ventilée et une extrapolation de cette mesure à l'ensemble du bâtiment. Pour développer cette méthode, nous avons associé des solutions de raccordement (Na_2CO_3 et $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ en solution aqueuse), la comparaison de l'émission théorique de ces solutions à l'émission mesurée par la chambre et des mesures SPIR en ferme expérimentale. La limite de détection correspond à des bâtiments où les déjections ont un pH supérieur à 7,2 et une teneur en azote ammoniacal supérieure à 0,52 kg N- NH_4^+ /m³ de déjection. La classification des spectres SPIR acquis en élevage a permis de proposer 3 classes de salissement pour l'extrapolation spatiale de la mesure d'émission effectuée sur le sol souillé. A court terme, la méthode peut être déployée par un public dûment formé. A plus long terme, l'association des mesures SPIR aux mesures d'émissions permettrait de calibrer un modèle visant à proposer à un public élargi une méthode s'affranchissant des mesures chambres.

Local measurement of ammonia emission of a soiled soil and spatial extrapolation to the cattle house

ROZE M.-H. (1), FOUAD Y. (2), ROBIN P. (3), FOUGERE M. (4), LORINQUER E. (1)

- (1) Idele, Monvoisin BP 67, 35652 Le Rheu Cedex, France

SUMMARY

The livestock sector is facing a growing demand for animal products, which it must meet by minimizing its environmental impacts and ensuring its sustainability. The measurement of ammonia emissions from cattle house soils is necessary to adapt good practices to each farm. The EMISOL BV method combines ground measurements using a ventilated semi-static chamber and extrapolation of this measurement to the entire house. To develop this method, we combined connecting solutions (Na_2CO_3 and $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ in aqueous solution), comparison of the theoretical emission of these solutions with the emission measured by the chamber and NIRS measurements on an experimental farm. The detection limit corresponds to houses where the manure pH is above 7.2 and ammoniacal nitrogen content above 0.52 kg N- NH_4^+ /m³ of manure. The classification of the NIRS spectra acquired on the farm made it possible to propose three classes of soiling for the spatial extrapolation of the emission measurement carried out on soiled soil. In the short term, trained people can deploy the method. In the longer term, associating NIRS measurements with the chamber measurements would enable calibration of a model so that a wider public could implement emission estimates without the chamber measurements.

INTRODUCTION

Face aux conséquences des émissions ammoniacales sur la qualité de l'air, les politiques se sont engagés à réduire ces émissions (ADEME, 2019). A l'échelle de l'UE, la directive NEC¹ fixe des plafonds d'émission et des objectifs de réduction de polluants de l'air pour chaque Etat Membre à l'horizon 2030. Pour la France, l'objectif de réduction en 2030 pour l'ammoniac est de -13% par rapport aux émissions de 2005. Si les émissions d'ammoniac ont été réduites de 7% entre 1990 et 2015, le secteur agricole reste particulièrement concerné puisque l'agriculture en est la principale source.

Sur l'exploitation d'élevage, la chaîne de gestion des effluents (bâtiment + stockage + épandage) représente les trois quarts des émissions.

Le poste bâtiment explique à lui seul 27% des émissions ammoniacales en élevage bovin (Foray & Gac 2018). La mesure des émissions d'ammoniac du principal poste d'émission et du premier lieu de transit des déjections, apparaît comme une condition nécessaire pour concilier la grande diversité de pratiques adaptées aux conditions pédoclimatiques françaises et les enjeux de réductions vérifiables des émissions ammoniacales.

¹ National Emission Ceiling

Les éleveurs ont intégré ces enjeux. Le développement de méthodes de mesure utilisables par les conseillers d'élevage permettrait de juger de l'intérêt d'un investissement matériel (équipement de raclage, type de sol) ou d'une évolution des pratiques en fonction de perspectives spécifiques de l'élevage.

Les objectifs du projet peuvent ainsi être résumés :

- proposer une méthode de mesure des émissions ammoniacales rapide à mettre en place par une personne seule ;
- exploiter le potentiel de la SPIR pour des mesures in situ en élevage ;
- cibler des caractéristiques de bâtiment et de pratiques permettant une réduction des émissions.

La connaissance des mécanismes physico-chimiques d'émission (Ni, 1999) facilite la prise en compte des paramètres clés des variations d'émission ammoniacale dans la mesure et l'extrapolation des résultats.

La variabilité des émissions en élevage bovin est due à la configuration du bâtiment, aux pratiques de l'éleveur et aux facteurs climatiques (ventilation, température, type de sol, alimentation, fréquence de raclage, etc. ; Rotz et al., 2014 ; Balland et al., 2001).

Parmi les méthodes de mesure des émissions ammoniacales existantes (Hassouna et al., 2015) aucune ne permet à la fois de cibler le sol, une mise en œuvre rapide, un investissement supportable dans les équipements. C'est pourquoi le projet a retenu une mesure basée sur une chambre semi-statique ventilée. En complément des mesures chambre, la technique SPIR permettant de caractériser la variabilité spatiale des déjections dans le bâtiment. Cette technique est employée depuis de nombreuses années pour analyser en routine la composition des fourrages et des semences agricoles. Plus récemment, elle a montré son potentiel pour prédire la teneur en fertilisant des fumiers et composts d'élevages (Ye et al. 2005). L'utilisation d'appareils portables la rend utilisable pour des analyses en temps réel en élevage. Les spectres acquis doivent toutefois subir des traitements chimiométriques. Dans la phase de mise au point, l'ACP² combinée à la CAH³, sur des spectres bruts ou transformés, conduit à des modèles de prédiction (Bertrand et al., 2006).

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. SITES EXPERIMENTAUX

La première partie des expérimentations s'est déroulée en conditions de laboratoire, dans les installations AgroCampus Ouest de l'UMR SAS.

Les tests en bâtiment de vaches laitières ont été conduits dans la ferme expérimentale de Derval. Le bâtiment abrite un troupeau de 85 vaches Prim'Holstein. Il est équipé d'un robot de traite, de logettes paillées et d'un racler. Les déjections sont plus abondantes à proximité du robot.

1.2. CALCUL DES EMISSIONS ET MOYENS DE RACCORDEMENT AUX ETALONS NATIONAUX

Pour raccorder les valeurs d'émissions à des valeurs de référence et pour faciliter les comparaisons entre des mesures réalisées par des personnes différentes, dans des lieux et à des dates variées, une gamme de solutions de raccordement a été développée suivant les conseils de F. Guiziou (IRSTEA ; cf. Générmon et al., 2013). Des proportions variables de Na₂CO₃, (NH₄)₂SO₄ et d'eau permettent de couvrir la gamme de teneur en azote ammoniacal et de pH observée en élevage. Les équilibres chimiques déterminant les émissions de NH₃, CO₂ et H₂O de cette solution, en fonction des concentrations, du pH et de la température, ont été représentés dans un fichier de calcul. Pour s'adapter au cas du lisier où l'ammoniac est en

partie adsorbé sur la fraction solide, les isothermes d'adsorption ont également été ajoutés (Waldrup et al., 2012).

1.3. METHODES DE MESURE

1.3.1 Chambres semi-statiques ventilées

Dans le cas de mesures en élevage, une adsorption significative sur les parois de la chambre ne peut être exclue. De même, les conditions de contact entre la chambre et le sol peuvent conduire à des échanges gazeux variables selon le bâtiment et l'emplacement considéré.

Les mesures en laboratoire avaient pour objectif d'évaluer ces processus, de choisir des modalités permettant de les calibrer et d'étudier l'influence de divers paramètres : type de sol, ventilation dans la chambre, température, intensité du prélèvement gazeux. La solution la plus émettrice et celle la moins émettrice avaient respectivement un pH de 10 et de 7,2 et une concentration en azote ammoniacal de 0,105 et 0,037 mol/L.

Le matériel mis en œuvre comportait (Figure 1) :

- un analyseur INNOVA 1412
- une chambre semi-statique ventilée avec une plaque de PEHD
- un automate Crouzet pour programmer les prélèvements gazeux.

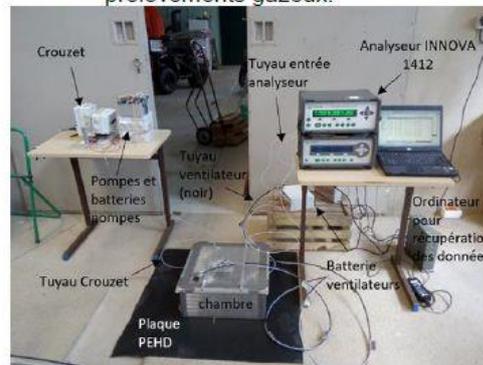


Figure 1: dispositif chambre halle PSN

1.3.2 Méthode de mesure SPIR

Le matériel utilisé pour la SPIR est un spectromètre de terrain LabSpec ASD (Figure 2). Le cache noir permet de mesurer la réflectance due uniquement à la source lumineuse de l'appareil. Un ordinateur portable était dédié à l'acquisition des spectres en temps réel et à leur prétraitement à l'aide des logiciels R³ et ViewSpecPro.

La variabilité spatiale du bâtiment a été quantifiée en répétant les mesures selon des transects effectués le long des travées du couloir d'alimentation et du couloir logettes (Figure 3). Des photos de chaque emplacement ont été prises.

Une ACP et une CAH ont été appliquées à l'ensemble des spectres pour identifier différentes classes d'émissions selon le critère « salissement » du sol.



Figure 3: acquisition des transects SPIR



Figure 2: spectromètre LabSpec ASD

² Analyse en composantes principales

³ Classification ascendante hiérarchique

1.4 PROTOCOLE MIS EN ŒUVRE EN ELEVAGE



- (A) Batteries permettant l'alimentation du Crouzet*, des pompes et des ventilateurs
- (B) Poches de prélèvement de gaz (Flexfoil®)
- (C) Automate de déclenchement des pompes de prélèvement de gaz (Crouzet*)
- (D) Emplacement des pompes de prélèvement de gaz reliant chambre et poche de prélèvement de gaz
- (E) Plaques noires pour mesures du bilan
- (F) Chambres de mesure comprenant les point de prélèvement et les ventilateurs

Figure 4: méthode chambre déployée en élevage

Le protocole de mesure mis en œuvre en élevage comportait les étapes suivantes :

- 1) mesure de la teneur en azote ammoniacal du lisier (Quantofix) et du pH : choix d'une solution de caractéristiques proches pour raccorder les mesures de concentration en gaz
- 2) prélèvements d'air de la chambre dans des sacs Flexfoil® à 4, 12 et 20 min (Figure 4)
- 3) acquisition des transects SPIR (Figure 3)
- 4) mesure de l'émission d'ammoniac du bâtiment par la méthode simplifiée (Hassouna et al. 2015).

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. METHODE CHAMBRES SEMI-STATIQUES VENTILEES

Le lisier n'est pas une solution idéale puisque sa valeur de salinité varie entre 4 et 26 g/L.

La non idéalité influe sur la valeur des constantes d'équilibre. La correction la plus appropriée est un modèle utilisé en traitement des eaux usées (Suez, 2019). Dans ce cas toutes les constantes d'acidité sont corrigées en fonction de la force ionique de la solution. Les autres corrections testées (activité, effet combiné de la température et de la salinité sur l'équilibres associés au CO₂) entraînent un biais.

La limite de détection de la chambre a été déterminée en recherchant la solution d'émission la plus faible permettant de détecter une augmentation de concentration en NH₃.

Ainsi les matériels que nous avons testé peuvent être mis en œuvre dans les bâtiments où les déjections ont une teneur en azote supérieure à 0,518 kg N-NH₄⁺/m³ et un pH supérieur à 7,15.

2.2. SPIR EN ELEVAGE

L'ACP (Erreur ! Source du renvoi introuvable.) des spectre: acquis dans le bâtiment révèle une discrimination spatiale de: zones du bâtiment : les zones les plus souillées son regroupées du côté gauche de l'axe principal, les zones le: plus propres du côté droit et le milieu correspond aux zone: intermédiaires. Ainsi, la CAH réalisée permet de différencier trois classes selon l'aspect du sol : la classe 0, la plus propre la classe 1 intermédiaire et la classe 2, la plus souillée. Nous proposons d'affecter à chaque classe une fraction du l'émission ammoniacale mesurée par la chambre : 100% pou la classe 2, 50% pour la classe 1, la classe 0 sera considéré comme non émettrice (Figure 5).

L'extrapolation de l'émission ammoniacale au bâtiment se fai donc à partir de la répartition de la surface du bâtiment dan: les trois classes et d'une valeur d'émission obtenue pa mesure chambre sur zone souillée. La fraction attribuée à chaque classe pourra être amendée si la valeur obtenue es systématiquement biaisée par rapport à l'évaluation par la méthode simplifiée.

Classe	Photos				Caractéristiques
0					Zones majoritairement sèches ou propres
1					Mosaïques des classes 0 et 2
2					Zones globalement très humides : flaques d'urine ou lisier liquide

Figure 5: classes d'émission selon le niveau de "salissement" du sol

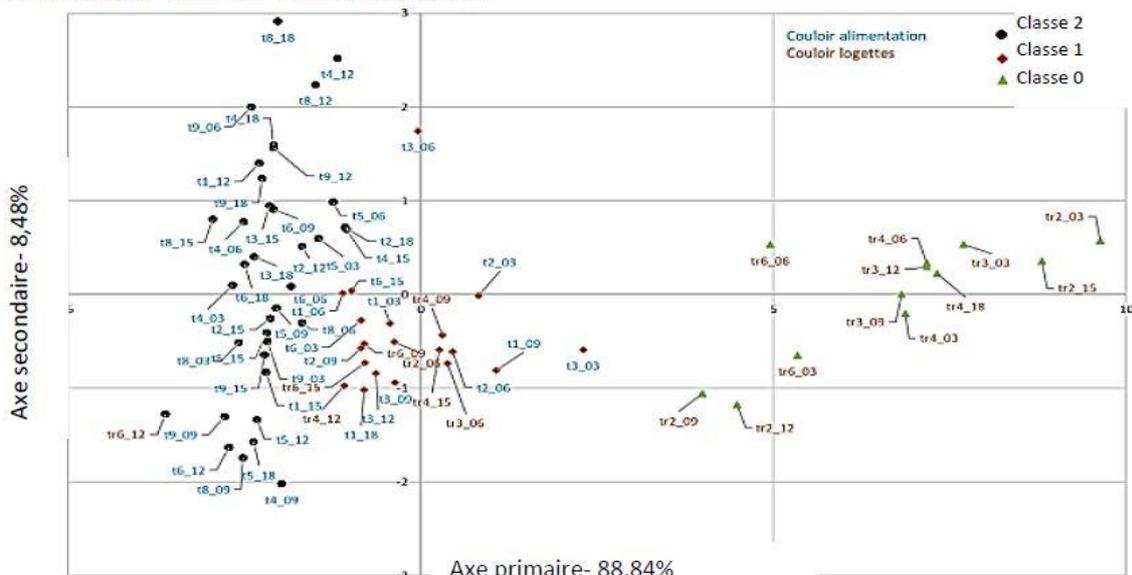


Figure 6: ACP des spectres acquis le long des transects

2.3. PROTOCOLE A DEPLOYER EN ELEVAGE

En conséquence, le protocole préconisé pour le déploiement en élevage dépend de l'objectif poursuivi : étude de l'efficacité du raclage ou évaluation de l'émission dans le bâtiment (Figure 8 et Figure 7).

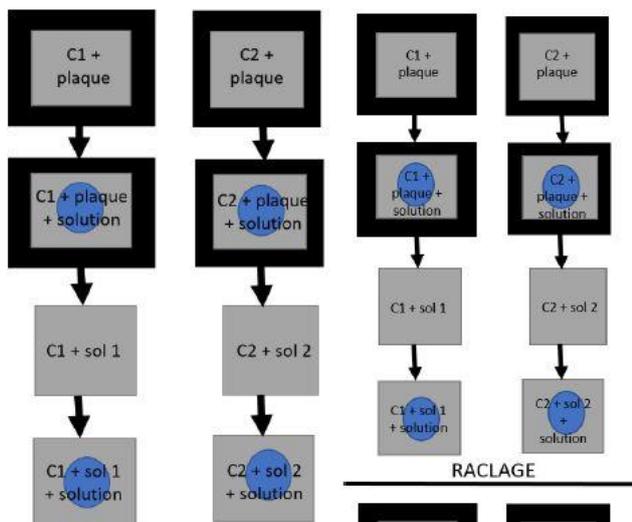


Figure 7: protocole chambre pour l'étude des émissions ammoniacales du sol

Dans les deux cas, deux chambres identiques sont conduites en parallèle, d'abord sur une plaque de PEHD (vérification de l'absence d'une contamination initiale de la chambre), puis avec la solution de raccordement (vérification du fonctionnement normal du dispositif). Ensuite la cinétique d'évolution des concentrations en gaz permet de quantifier l'émission du sol et de la comparer à celle de la solution de raccordement de teneur en azote ammoniacal et pH voisins. Enfin, l'évolution des concentrations en gaz dans la chambre, au-dessus du sol souillé et en présence de la solution de raccordement permet de confirmer si le niveau d'émission du sol est supérieur ou inférieur à celui de la solution de raccordement. Si le niveau est supérieur, la concentration en NH_3 devrait diminuer par rapport au niveau obtenu sans la solution et le pH de la solution devrait augmenter (dépôt d'ammoniac émis par le sol dans la solution).

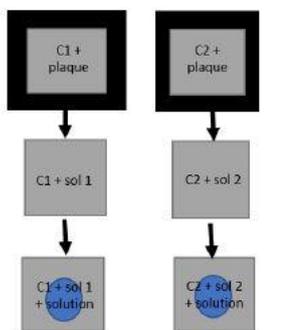


Figure 8: protocole chambre pour l'étude de l'efficacité du raclage sur les émissions ammoniacales

L'extrapolation temporelle des mesures, prévue pour la suite du projet, est destinée à d'obtenir une valeur d'émission annuelle en intégrant des informations complémentaires sur le climat de l'année, l'effectif des animaux en bâtiment ou au pâturage, les régimes alimentaires au cours de l'année. En vue d'élargir les mesures d'émission à un plus grand nombre d'utilisateurs et de s'affranchir du dispositif chambre nous envisageons la calibration d'un modèle SPIR. Pour mettre au point ce modèle, il faudrait associer a minima une valeur d'émission ammoniacale et une mesure spectral jusqu'à l'obtention d'une base de données suffisante.

BIBLIOGRAPHIE

ADEME (2019) *Rapport d'étude « Guide des bonnes pratiques agricoles pour l'amélioration de la qualité de l'air »*

Balland et al. (2001) *CORPEN*. 2001.

Bertrand et al. (2006) *La spectroscopie infrarouge et ses applications analytiques*. Paris: Lavoisier, 2006.

Foray S. et Gac A. (2018) *Elevage bovin et environnement: les chiffres clés*. Paris: Institut de l'élevage, 2018.

Générmont S. et al. (2013) *Prédiction de la volatilisation d'ammoniac au champ après épandage de produits résiduels organiques et d'engrais minéraux : résolutions des questions scientifiques et techniques*. rapport ADEME

Hassouna M. et al. (2015) *Mesurer les émissions gazeuses en élevage*. ADEME-INRA Editions, 2015.

Ni J. (1999) *Mechanistic Models of Ammonia Release from Liquid Manure: Review*. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1999.

Rotz et al. (2014) *Ammonia Emission Model for Whole Farm Evaluation of Dairy Production Systems*. *Journal of Environmental Quality*, 2014.

Roustan M. (2003) *Transferts gaz-liquide dans les procédés de traitement des eaux et des effluents gazeux*. Lavoisier, 2003.

Suez (2019) *Memento Degremont*. <https://www.suezwaterhandbook.fr/> (accès le Juin 27, 2019).

Waldrup et al. (2012) *Characterization of Ammonium Sorption by Beef Cattle Feedyard Manure*. *Transactions of the ASABE*. Vol. 55(4)

Ye et al. (2005) *Application of near-infrared reflectance spectroscopy for determination of nutrient contents in liquid and solid manures*. *low State University*, 2005.

CONCLUSION

Un protocole de mesure adapté à la caractérisation des émissions d'ammoniac des sols des bâtiments d'élevage bovin a été adapté en s'inspirant des mesures par chambres statiques. Il mobilise deux chambres semi-statiques ventilées, des solutions de raccordement, un automate de remplissage et des sacs de prélèvement inertes, une caractérisation de la variabilité spatiale du bâtiment en 3 classes de salissement. Le déploiement envisagé pour cette méthode comporte plusieurs étapes. A court terme, le protocole décrit ici est adapté à un public averti en raison du nombre d'opérations techniques requises : mesure de la teneur en azote ammoniacal et du pH, prélèvements de poches, interprétation des mesures de concentration en gaz, etc.

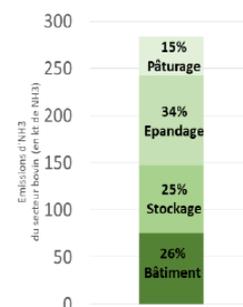
METHODE « EMISOLBV »

Méthode de quantification standardisée des émissions d'ammoniac et de gaz à effet de serre des sols de bâtiments bovins

Contexte

L'ammoniac a des impacts divers importants : formation de particules fines, eutrophisation des eaux de surface, gaz irritant et même toxique. Il provient quasi exclusivement des activités agricoles (98% environ dont 42% du secteur bovin). Le poste "Bâtiments" représente 26% du total des émissions (Fig. 1). La méthode EMISOLBV a été développée pour vérifier l'effet des équipements et des pratiques d'élevage sur les émissions des sols et le cas échéant pour en localiser les principales sources.

Fig. 1: Contribution des différents postes aux émissions d'ammoniac



Méthode

Elle combine des mesures ponctuelles avec des chambres semi-statiques ventilées et des calculs pour estimer les émissions pour l'ensemble du bâtiment et pour l'année. Deux chambres (cf. Fig. 2) sont posées sur le sol du bâtiment. L'air de ces chambres est collecté dans des poches (sac Flexfoil®) de 10 litres. Les concentrations de gaz sont ensuite mesurées avec l'analyseur INNOVA. Une solution de raccordement (émission d'ammoniac connue) est utilisée pour vérifier les mesures.

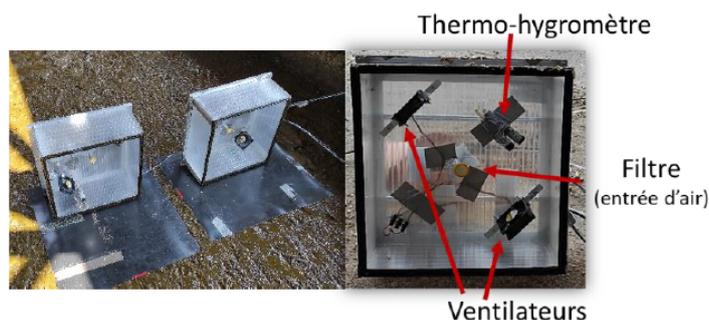


Fig. 2 : Chambres Statiques Ventilées

L'hétérogénéité des zones émettrices est appréciée qualitativement en attendant des outils quantitatifs plus précis (spectrométrie proche infra-rouge) afin d'extrapoler la mesure ponctuelle à l'ensemble du bâtiment. L'extrapolation temporelle se base sur des données climatiques, l'évolution de l'effectif, de l'alimentation et du temps de présence des animaux (pâturage).

Principe

Les échantillonnages, étagés durant la phase d'augmentation des concentrations d'ammoniac (cf. Fig. 3) permettent de déterminer les émissions.

La solution de raccordement est choisie en fonction des caractéristiques du lisier (pH et teneur en ammoniac). Le changement du pH de la solution installée sous la chambre est utilisé comme indicateur du seuil d'émission de NH₃ du sol souillé.

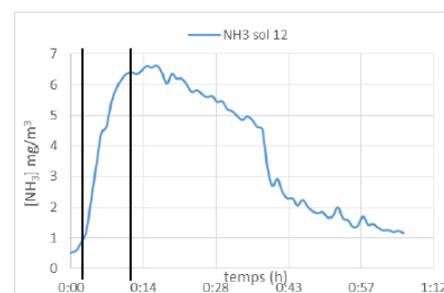


Fig. 3 : Evolution de la concentration de NH₃

Liste du matériel utilisé

- 2 chambres ventilées – avec tuyaux d'échantillonnage et câble électrique pour les ventilateurs
- Thermo-hygromètres – placés dans la chambre
- Système automatique d'échantillonnage (cf. Fig. 4) composé de deux pompes et d'un automate Crouzet qui contrôle la mise en marche des ventilateurs et des pompes.

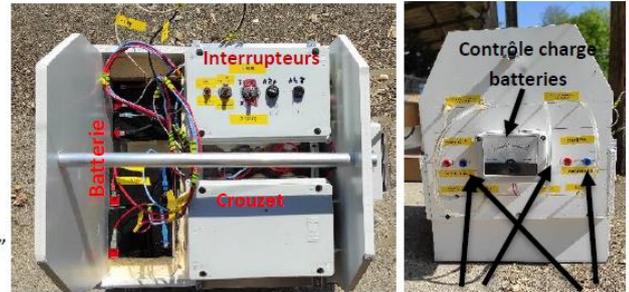


Fig. 4 : Automate d'échantillonnage "Crouzet"

- 14 poches d'échantillonnage Flexfoil® (Fig. 5)
- 2 plaques de plastique inerte (PEHD 2mm)
- Solution de raccordement¹ – « recette » (Derval) :
 $85\text{ml eau distillée} + 15\text{ml } (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + 0,5\text{ml Na}_2\text{CO}_3$
- 4 seringues (une pour chaque produit + une supplémentaire pour prélever la solution et la placer dans les boîtes de Pétri)
- 2 boîtes de Pétri
- pH mètre
- Large plastique (ou carton) pour installer l'automate et les poches à remplir.



Fig. 5 : Matériel d'échantillonnage

Protocole

Avant l'installation des chambres, observation de la zone étudiée et sélection d'un emplacement représentatif des zones souillées. La surface du bâtiment est répartie en trois classes de sol (cf. Fig. 6) :

- 0- majoritairement sèche ou propres,
- 1- partiellement souillée,
- 2- intégralement souillées.

Les mesures sont ensuite faites en 3 séquences (cf. Fig. 7) :

- 1- Mesure des concentrations de références (le zéro ou "blanc")
- 2- Mesure des concentrations sur zone souillée
- 3- Vérification des émissions avec mesure du pH de la solution de raccordement après les échantillonnages

Pour la première séquence 1 seule poche est utilisée par chambre et pour les deux autres, 3 poches.

Donc il faut : $(2 \times 1) + (2 \times 3) + (2 \times 3) = 14$ poches

Séq. I Séq. II Séq. III

Classe	Photo	Caractéristiques	%émission chambre
0		Zones majoritairement sèches ou propres	0%
1		Mosaïques des classes 0 et 2	50%
2		Zones globalement très humides : flaques d'urine ou déjections liquides	100%

Fig. 6 : Illustration des trois classes de sol

¹ Solutions de « raccordement » : solutions ammoniacales composées de telle manière que les émissions d' NH_3 qu'elles produisent soient comparables à celles observées sur différents types de lisier et pour des pH comparables également. Pour cela les pH et concentrations d' NH_4^- du lisier sont, si possible, mesurées en amont ou estimées à partir de références.

Préparation

- 1- Si l'analyseur INNOVA est sur le terrain alors le démarrer pour qu'il se mette en température.
- 2- Préparer la solution de raccordement (cf. « recette » plus haut).
- 3- Mesurer le pH de cette solution.
- 4- Etiqueter les 14 poches :
Les stocker et organiser par chambre et dans l'ordre d'échantillonnage de telle manière qu'elles soient facilement accessibles sans trop de vérifications.
- 5- Démarrer les thermo-hygromètres, mettre le n° de la chambre où chacun sera et les placer dans les chambres. Noter l'heure d'installation.
- 6- Marquer au dessous des boîtes de Pétri : "PEHD" sur l'une et "Lisier" sur l'autre.

NOTER:

- Date :
- Nom de la Ferme :
- Chambre n° : (I ou 2)
- Séquence n° : (I, II ou III)
- Poche n° : (de 1 à 14)

Échantillonnage

- 1- Amener sur site:
 - ✓ les 2 plastiques PEHD
 - ✓ les 2 chambres
 - ✓ l'automate
 - ✓ les 14 poches étiquetées
 - ✓ le flacon avec la solution de raccordement
 - ✓ la seringue et les boîtes de Pétri
 - ✓ le pHmètre
 - ✓ l'eau distillée
 - ✓ le rouleau "essuie tout"
- 2- Observer l'allée où seront posées les chambres et choisir un emplacement représentatif moyen de la classe « intégralement souillée » (cf. classe 2, Fig. 6).
- 3- Installer les plaques PEHD et poser dessus les chambres en position relevée.
- 4- Faire les branchements : 1- électriques (ventilateurs) 2- poches 3- chambres (aspiration)
- 5- Démarrer les échantillonnages : 1- choix d'une batterie 2- démarrer le programme

SEQUENCE I

- Vérifier que les ventilateurs fonctionnent (5sec après démarrage du programme).
- Reposer les chambres sur le PEHD.
- Après homogénéisation des atmosphères (pendant 4min) départ des échantillonnages (pendant 2min).
- A la fin du remplissage des deux poches (n°1 et 2) déplacer les deux chambres sur la zone souillée.

SEQUENCE II

- Retirer les poches encore attachées et placer les poches suivantes (n°3 et 4).
- Trois séries d'échantillonnage vont être réalisées (poches n°3 à 8).

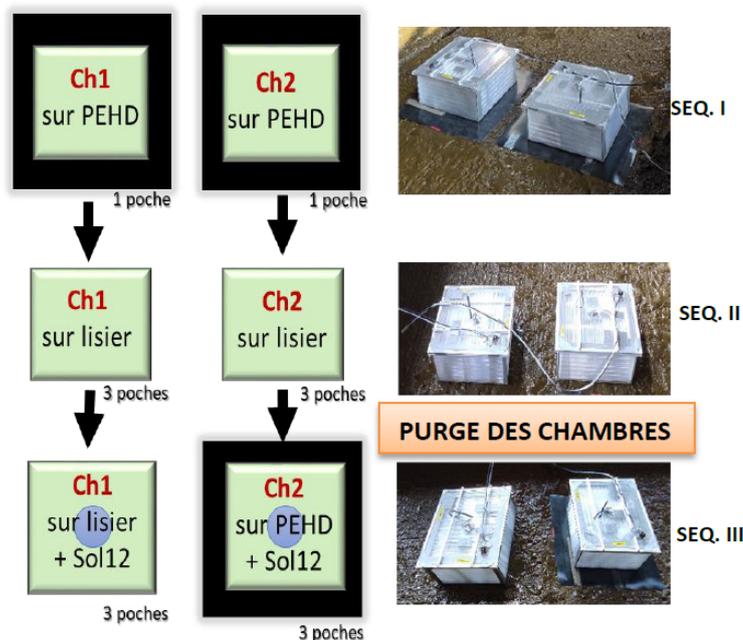


Fig. 7 : Présentation schématiques des 3 séquences d'échantillonnage

SEQUENCE III

Après la dernière série :

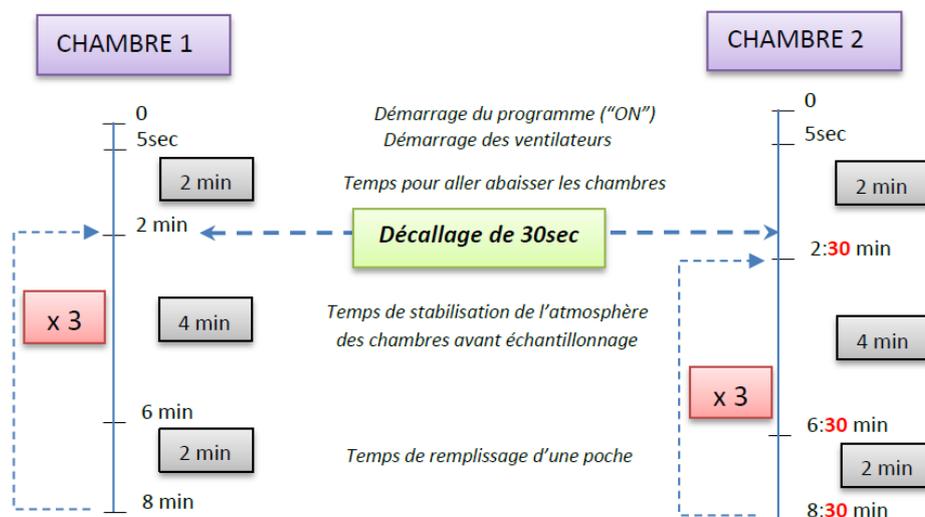
- Retirer les poches.
- Prendre les boîtes de Pétri et la solution de raccordement avec la seringue, relever les chambres, les laisser en position verticale pour le renouvellement de l'air (purge des chambres), installer les boîtes de Pétri marquées sur leur support respectif ("Lisier" et "PEHD"), y verser la solution de raccordement.
- Il va y avoir un pompage à vide (mise en marche des pompes chambres relevées et absence de poche).
- Quand les pompes s'arrêtent reposer les chambres (une sur le PEHD et l'autre sur le lisier – bien noter quelle chambre est sur le PEHD et laquelle est sur le lisier) et placer les poches suivantes (n°9 et 10).
- Trois séries d'échantillonnage sont alors de nouveau réalisées (poches n°9 à 14).

PURGE DES
CHAMBRES

FINALE

- Quand les dernières poches sont remplies (n°13 et 14) l'échantillonnage est terminé.
- Soulever les chambres et mesurer le pH de chaque solution (bien noter à quelle chambre se reporte chaque pH).
- Mesurer le pH du lisier également.
- Récupérer les chambres et les plastiques PEHD et ramener tout le matériel.

Séquence d'échantillonnages – Programme de l'automate "Crouzet"



Analyses

- Récupérations des données des thermos-hygromètres
- Analyse des 14 poches sur l'INNOVA
- Calcul des émissions sous les chambres (fichier de calculs)
- Extrapolation spatiale à la totalité du bâtiment par évaluation qualitative préalable de la surface de chaque classe souillée :
 - . Classe 0 Emissions négligeables
 - . Classe 1 Emissions 50% de la mesure par chambre
 - . Classe 2 Emissions de la chambre (100%)
- Extrapolation temporelle à l'année (fichier de calculs)



METHODE EMISOLBV

Retour sur la mise en œuvre en ferme

Derval, le 28 avril 2021

Trévarez, les 6 et 7 mai 2021

Réalisé par Solenne Dupré et Tanguy Bodin, Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne

1. Points à clarifier dans la notice

Branchement de l'appareil : photo plus grande et plus claire avec branchements notés

Mise en route des thermo-hygromètres : 2 options + noter heure de début et fin de mesures avec méthode « après configuration »

Utilisation de l'analyseur et des outils informatiques en lien avec l'analyseur (fichier préalable avec définition des temps, règles de stockage des fichiers avec alerte sur les noms des fichiers identiques par séries d'analyses etc.)

Précisions : éviter de mettre les chambres au soleil pour les mesures car risque de fausser les mesures.

Replacer du scotch sur les embouts pour conserver la propreté du matériel et éviter les « contaminations » et indiquer les embouts concernés.

Liste des informations à récupérer :

- sur les données météo (vent, température),
- le niveau de « salissement » du bâtiment : proportions 100% souillé, 50/50, propre.
- auprès de l'agriculteur (calendrier fourrager VL, temps en bâtiment et au pâturage etc.).

2. Retour sur la mise en œuvre en ferme de la méthode EMISOLBV

Solution de raccordement : donner une solution standard plutôt qu'une solution à adapter en fonction de la teneur en ammoniac du lisier. Cela évitera les risques d'erreur au niveau du choix de la solution et de la préparation de la solution. Ceci permettra aussi de simplifier le protocole et de gagner du temps car peu d'agriculteurs connaissent la teneur réelle en ammoniac de leur lisier (lié à la réglementation).

La méthode semble difficile à mettre en œuvre seul. Une fois rôdé, c'est peut-être possible mais dans un premier temps, cette méthode nécessite une préparation importante et une connaissance fine du protocole pour éviter les erreurs s'il faut le mettre en œuvre seul (temps d'attente, de remplissage etc.)

Temps de mise en œuvre, à deux :

- 1h de mise en place
- 1h de mesures dans le bâtiment
- 30 min de paramétrage et mise en route des analyses + 30 min pour mise en place de l'analyseur s'il n'est pas dans une salle dédiée
- 7h d'analyses avec l'analyseur
- 1h de gonflage/dégonflage des poches pour les « laver » (avec nouveau système de Xavier avec moteur, 7 poches à la fois).

N.B. : Il manque la prise en compte du temps de route et des échanges avec l'agriculteur (données à récupérer).

Exemple de Trévarez : les vaches étant au pâturage jour et nuit, les racleurs ont été arrêtés avant notre test pour être sûr d'avoir du sol souillé pour les mesures. Les mesures ne sont pas donc pas représentatives de la pratique actuelle de la ferme. Si cette méthode sert à mesurer les émissions d'ammoniac en bâtiment en ferme, comment utiliser cette mesure sans fausser le résultat par rapport aux pratiques réelles ? Est-ce qu'il faudrait passer à plusieurs périodes de l'année, noter les proportions de sol souillé/50-50/propre suivant les temps en intérieur/extérieur ? A quelles périodes passer ? Avant/après raclage ? S'il faut passer plusieurs fois, il faudra bien caler le temps nécessaire à l'ensemble de ces mesures.

Pour les systèmes fumier ou mixtes (lisier/fumier), comment adapter la méthode pour faire les mesures ? Il serait intéressant de pouvoir suivre un panel représentatif de bâtiments avec différentes déjections en croisant le secteur climatique, le type de bâtiment, le type de déjections produites, différents système d'alimentation et proportions de temps passé en intérieur et en extérieur avec la méthode EMISOLBV. Ceci permettrait d'avoir des références précises des émissions d'ammoniac en bâtiment suivant les systèmes rencontrés en ferme.

La méthode mesure l'ammoniac : serait-il possible de mesurer en même temps l'ensemble des GES pouvant être émis en élevage ? Même remarque que ci-dessus pour les autres GES que l'ammoniac.



Local measurements of ammonia emissions of soiled soils and spatial extrapolation to the cattle building

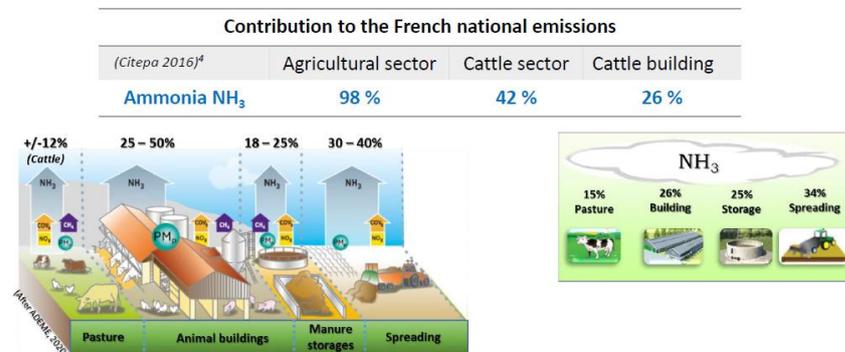
X. Vergé, M.-H. Rozé, Y. Fouad, P. Robin, M. Fougère and E. Lorinquer



Local measurements of ammonia emissions of soiled soils and spatial extrapolation to the cattle building



- Focusing on ammonia (NH₃) emissions
- Ammonia has health¹ and environmental² impacts
- In France agriculture is the main contributor



¹: Donham et al, 2002;

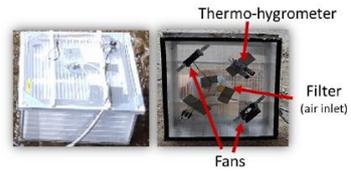
²: Ademe and MEDDTL, 2012



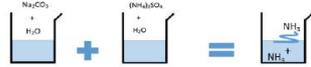
The "EMISOLBV" project
Developed for setting up a field method to:

- being able to verify the emission reductions of equipment or practices
- assess the contribution of hotspots in cattle buildings

I. Use of **ventilated semi-static chambers** for ammonia emission assessments



II. Use of **traceable solutions**
(Na_2CO_3 and $(NH_4)_2SO_4$ in aqueous solution)



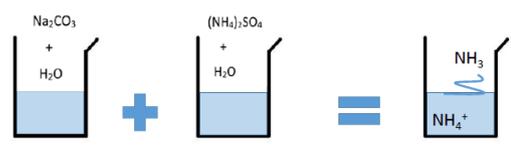
III. Use of the **Near Infra-Red Spectroscopy (NIRS)** for soiled soil characterisation and spatial extrapolation



• Use of traceable solutions (Na_2CO_3 and $(NH_4)_2SO_4$ in aqueous solution)

ISSUE

Chamber measurements must deal with potential variabilities in pumping, ventilation, adsorption, etc.
Effect on emission calculations



OBJECTIVES

- Verify the relationship between the observed concentrations and the calculated emissions from on-site measurements
- the reliability of these measurements

CONSTRAINT

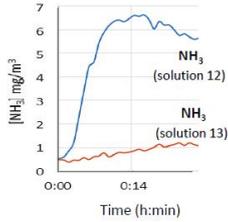
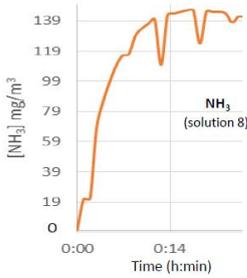
- They must be comparable to the slurry characteristics:
- observed NH_4^+ in slurry in the range of 0,043 to 0,15 mol/l
 - observed pH between 7 and 9.3

Solution	$[NH_4^+]$ mol/L	pH
Solution 1	0,125	7,49
Solution 2	0,125	7,88
Solution 3	0,124	8,12
Solution 4	0,124	8,45
Solution 5	0,123	8,73
Solution 6	0,120	9,05
Solution 7	0,114	9,50
Solution 8	0,105	9,85
Solution 9	0,102	10,35
Solution 10	0,148	8,43
Solution 11	0,075	8,35
Solution 12	0,037	8,56
Solution 13	0,037	7,15

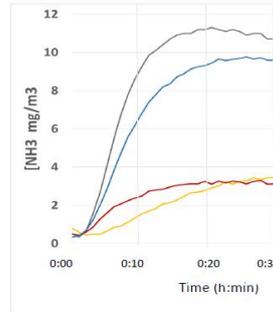


Traceable solutions - Measurements

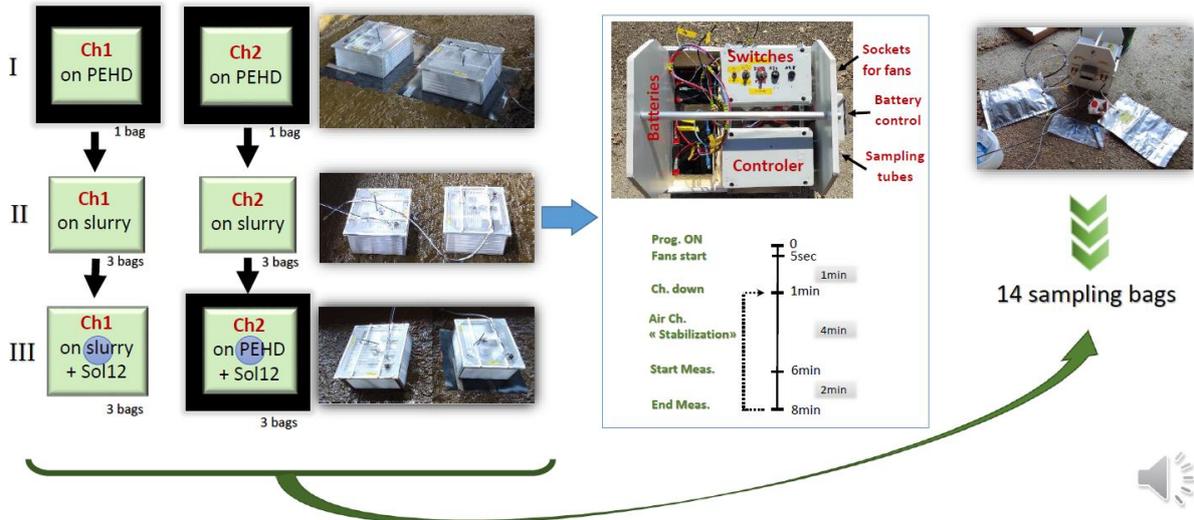
3 aqueous solutions kept for on-farm measurements



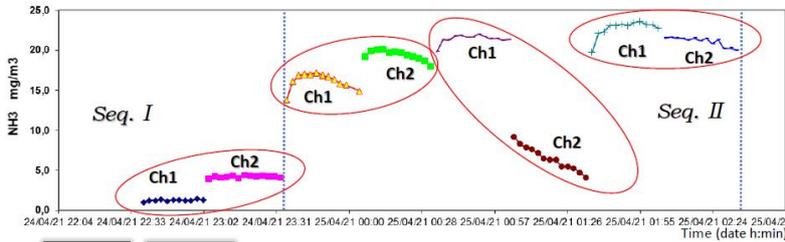
Adsorption effect



On-site measurements



Measured NH₃ concentrations



- Chamber variability
- Need of replicates

- Increase in concentrations and then plateau
- First measurements to be left

Finally:

Measured concentrations, + Air temperature monitored in the chamber + Corrections based on the lab and field measurements

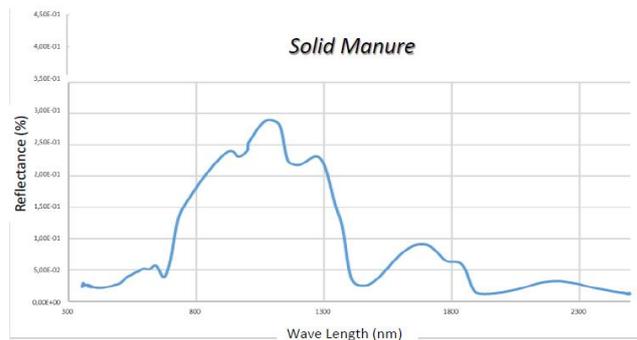
↓

Calculation of the NH₃ emissions from each chamber

Use of the Near Infra Red Spectroscopy (NIRS)

NIRS is known to help characterizing the animal manure

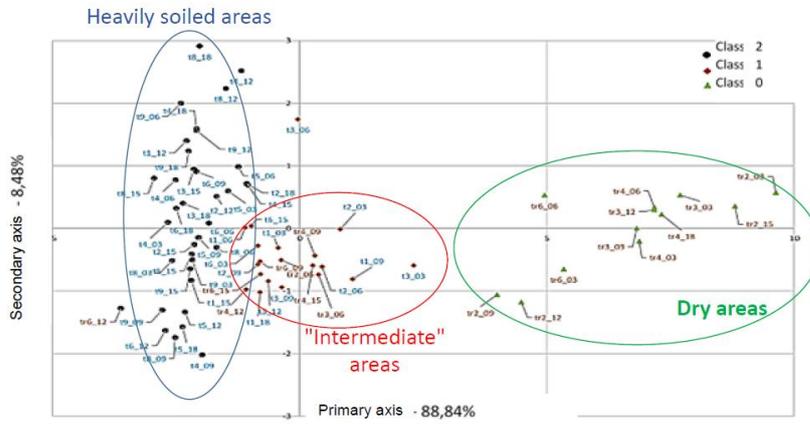
Simultaneous spectra and pictures have been collected in the walking areas



Spatializing the heterogeneity of manure deposits



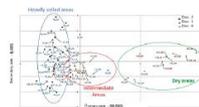
All spectra have been analyzed (PCA¹) and classified (HCA²)



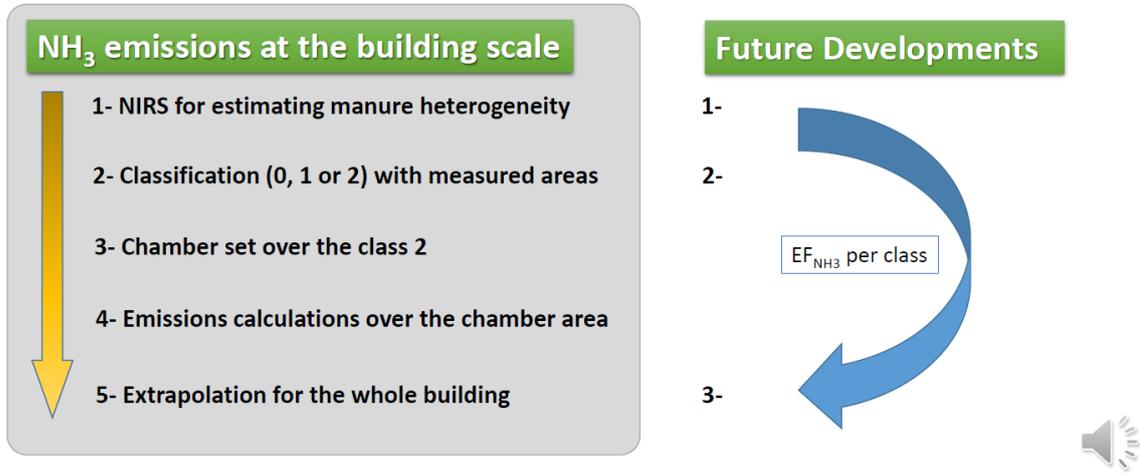
1 : Principal Component Analysis
2 : Hierarchical Cluster Analysis

Use of NIRS for spatial extrapolation at the whole building

Class	Picture	Characteristics	% emissions
0		Mainly dry and clean areas	0%
1		Between classes 0 and 2	50%
2		Areas generally wet with urine and feces	100%



Use of NIRS for spatial extrapolation at the whole building



Thank you

Aknnowledgment

The authors want to thank the Food and Agriculture French Department for supporting this project throught the Rural and Agricultural Development (CASDAR) fundings.

References

1. Donham, K.J, Cumro, D., Reynolds, S. —Synergistic effects of dust and ammonia on the occupational health effects of poultry production workers||. J Agromedicine. 2002 ; 8(2) : 57-76.
2. Ademe et MEDDTL. 2012. Les émissions agricoles de particules dans l'air. Etats des lieux et leviers d'action. Editions Ademe, 36 p.
3. Ademe, 2020. Guide des bonnes pratiques agricoles pour l'amélioration de la qualité de l'air. Editions Ademe, 43 p.
4. CITEPA, 2016. CITEPA, édition mars 2016. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France métropolitaine, format CEE-NU

Communication Conférence CIGR 2021 : « Développement d'une méthode pour évaluer les émissions d'ammoniac des sols de bâtiments d'élevage bovins ». (traduction française)

CIGR Conference – « Local measurements of ammonia emissions of soiled soils and spatial extrapolation to the cattle building » (11-14 mai 2021)



Développement d'une méthode pour évaluer les émissions d'ammoniac des sols de bâtiments d'élevage bovins.

X. Vergé, M.-H. Rozé, Y. Fouad, P. Robin, M. Fougère and E. Lorinquer



Développement d'une méthode pour évaluer les émissions d'ammoniac des sols de bâtiments d'élevage bovins.

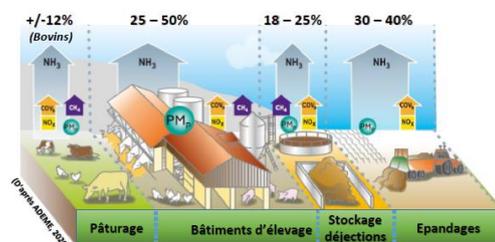


Le projet "EMISOLBV" Développer une méthode de "terrain" afin de :
 - Vérifier la réduction d'émissions gazeuses d'équipement ou pratiques
 - Étudier la contribution des sources d'émissions ponctuelles en bâtiment

Évaluation des émissions ammoniacales (NH₃)

- Effets sur la santé¹ et l'environnement²
- En France l'agriculture est le principal contributeur

Contribution aux émissions nationales			
(Citepa 2016) ¹	Secteur Agricole	Secteur Bovin	Bâtiment
Ammoniac NH₃	98 %	42 %	26 %

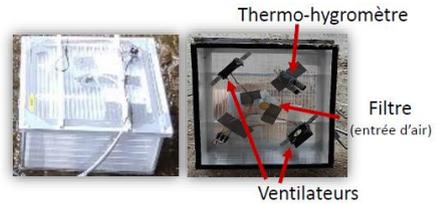


¹: Donham et al, 2002; ²: Ademe and MEDDTL, 2012

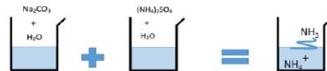


Composantes principales de la Méthode "EMISOLBV" – NH₃

I. Utilisation de **chambres ventilées semi-statiques** pour l'évaluation des émissions d'ammoniac



II. Utilisation de solutions de "raccordements" [Na₂CO₃ et (NH₄)₂SO₄ en solutions aqueuses]



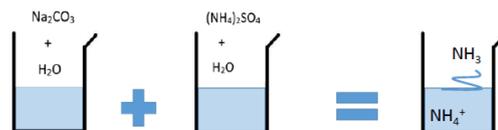
III. Utilisation de la **Spectroscopie Proche Infra-Rouge (SPIR)** pour caractériser les sols souillés et pour l'extrapolation spatiale.



• Utilisation de solutions de "raccordement" (Na₂CO₃ and (NH₄)₂SO₄)

ENJEUX

Les mesures en chambres doivent prendre en compte des variabilités potentielles (pompages, ventilation, adsorption, etc.)
Tout ceci affecte les mesures et les calculs d'émissions



OBJECTIFS

- Vérifier/contrôler l'impact des conditions expérimentales - Contrôle qualité.
- Mise en place du protocole d'échantillonnage

CONTRAINTES

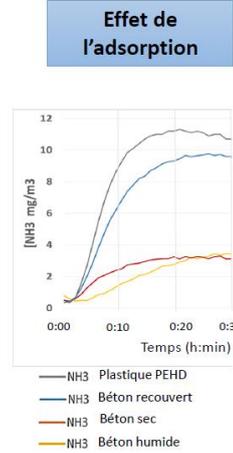
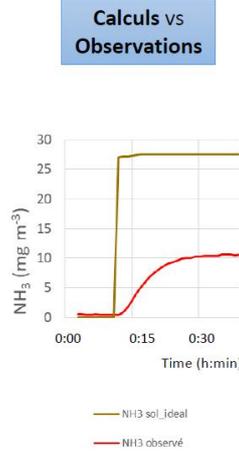
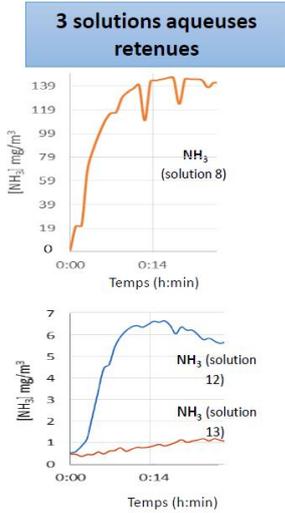
Elles doivent être "comparables" à certaines caractéristiques du lisier :

- Concentration NH₄⁺ entre 0,043 et 0,15 mol/l
- Valeurs de pH entre 7 et 9.3

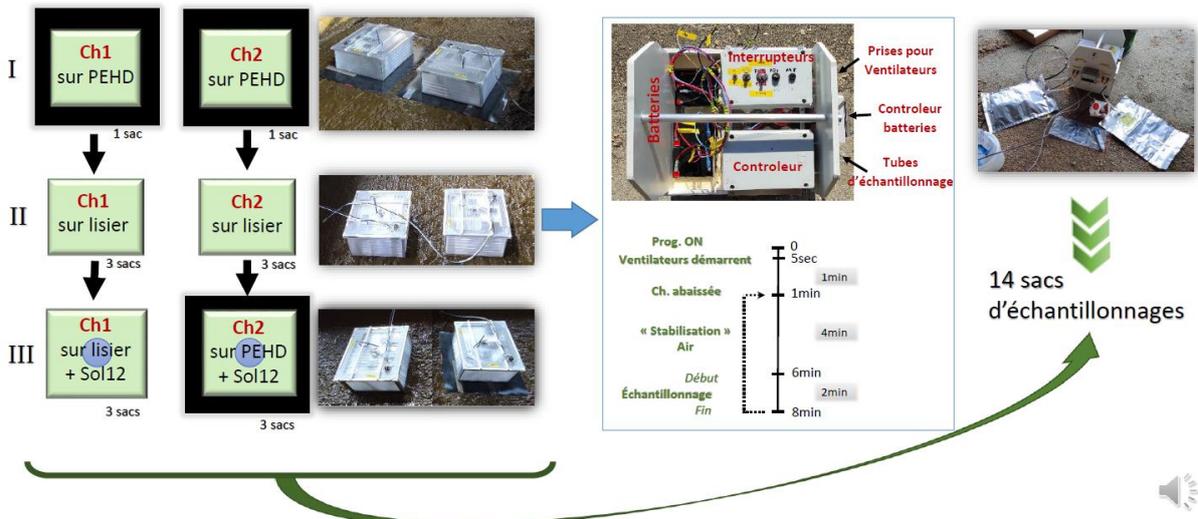
Solution	[NH ₄ ⁺] mol/L	pH
Solution 1	0,125	7,49
Solution 2	0,125	7,88
Solution 3	0,124	8,12
Solution 4	0,124	8,45
Solution 5	0,123	8,73
Solution 6	0,120	9,05
Solution 7	0,114	9,50
Solution 8	0,105	9,85
Solution 9	0,102	10,35
Solution 10	0,148	8,43
Solution 11	0,075	8,35
Solution 12	0,037	8,56
Solution 13	0,037	7,15



Solutions de « raccordement » - Mesures

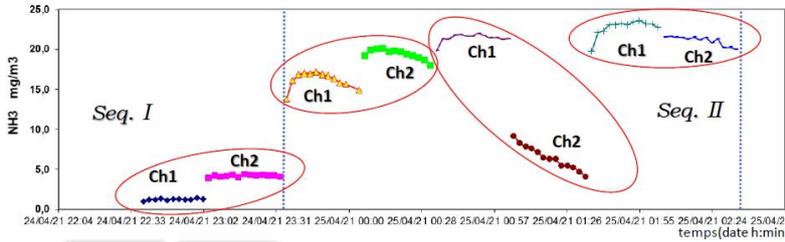


Mesures sur site



Développement d'une méthode pour évaluer les émissions d'ammoniac des sols de bâtiments d'élevage bovins.

Concentration d'NH₃ mesurées



- Variabilité en chambre
- Augmentation des concentrations puis plateau
- Besoin de réplicats
- Premières mesures à laisser

Au final:

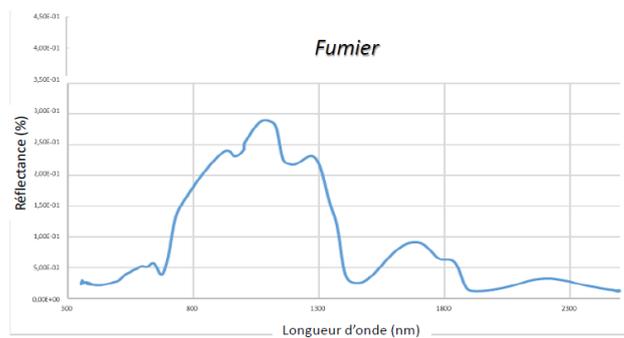
Concentrations Mesurées ,
+
Température de l'air suivies dans la chambre
+
Corrections basées sur les études laboratoires et sur les contrôles de terrains
↓
Calcul des émissions de NH₃ sous les chambres

Développement d'une méthode pour évaluer les émissions d'ammoniac des sols de bâtiments d'élevage bovins.

Utilisation de la Spectroscopie Proche Infra-Rouge (SPIR)

La SPIR est connue pour permettre de caractériser les déjections animales

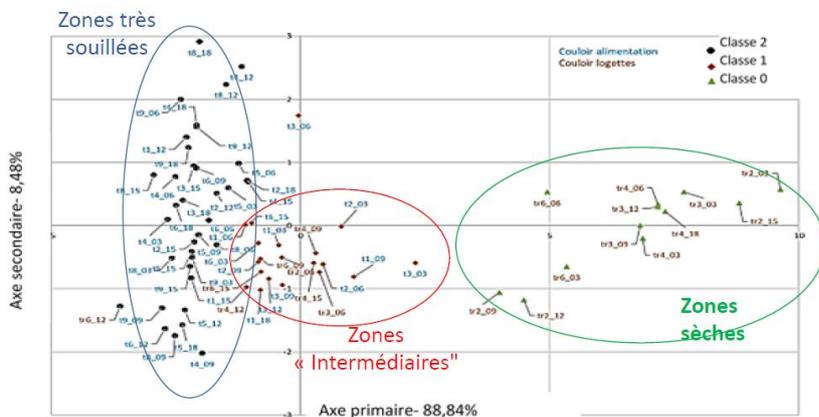
Prises simultanées de spectres et de photos sur les aires d'exercices



Spatialisation de l'hétérogénéité des dépôts de lisier



Tous les spectres ont été analysés (ACP¹) and classifiés (HCA²)

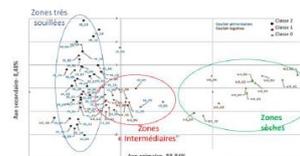


1 : Analyse à Composantes Principales
2 : Classification Arborescente Hiérarchique

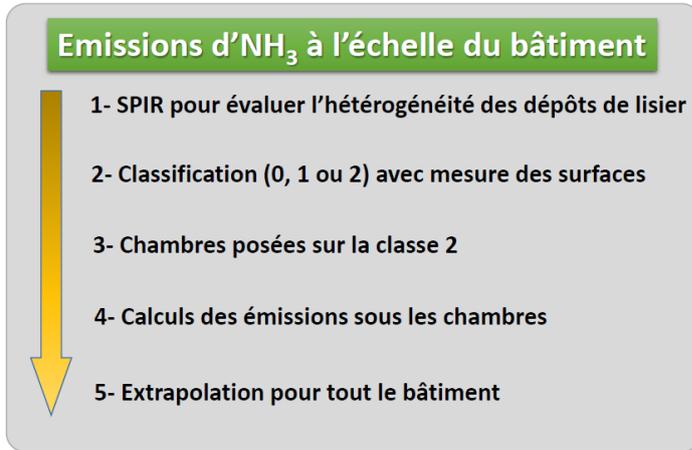


Utilisation du SPIR pour extrapolation spatiale à l'ensemble du bâtiment

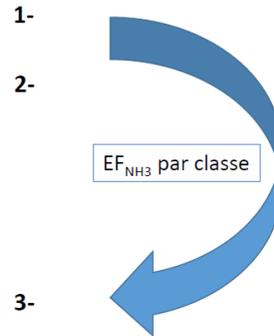
Classe	Photo	Caractéristiques	%émission chambre
0		Zones majoritairement sèches ou propres	0%
1		Mosaïques des classes 0 et 2	50%
2		Zones globalement très humides : flaques d'urine ou déjections liquides	100%



Utilisation du SPIR pour extrapolation spatiale à l'ensemble du bâtiment



Développements Futurs



Merci !

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation pour son soutien financier au travers du compte d'affectation spécial « Développement Agricole et Rural » (CASDAR).

Références citées :

1. Donham, K.J, Cumro, D., Reynolds, S. —Synergistic effects of dust and ammonia on the occupational health effects of poultry production workers. J Agromedicine. 2002 ; 8(2) : 57-76.
2. Ademe et MEDDTL. 2012. Les émissions agricoles de particules dans l'air. Etats des lieux et leviers d'action. Editions Ademe, 36 p.
3. Ademe, 2020. Guide des bonnes pratiques agricoles pour l'amélioration de la qualité de l'air. Editions Ademe, 43 p.
4. CITEPA, 2016. CITEPA, édition mars 2016. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France métropolitaine, format CEE-NU



