



**HAL**  
open science

# Application d'une méthode simplifiée en vue d'acquérir des références françaises d'émissions de gaz à effet de serre et d'ammoniac en bâtiments bovin laitier pour des conduites d'élevage contrastées

Charlène Javon

## ► To cite this version:

Charlène Javon. Application d'une méthode simplifiée en vue d'acquérir des références françaises d'émissions de gaz à effet de serre et d'ammoniac en bâtiments bovin laitier pour des conduites d'élevage contrastées. Sciences agricoles. 2012. dumas-00801807

**HAL Id: dumas-00801807**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00801807>**

Submitted on 18 Mar 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**AGROCAMPUS OUEST**

**CFR Rennes**

65 rue Saint-Brieuc CS 84215

35042 Rennes CEDEX



**INSTITUT DE L'ÉLEVAGE**

**Antenne Rennes - Le Rheu**

La Motte au Vicomte BP 35104

35651 Le Rheu CEDEX

## **Mémoire de fin d'études**

### **Diplôme d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences Agronomiques, Agroalimentaires, Horticoles et du Paysage**

Année Universitaire : 2011-2012

Spécialisation ou option : Ingénierie Zootechnique

### **Application d'une Méthode Simplifiée en vue d'acquérir des références françaises d'émissions de gaz à effet de serre et d'ammoniac en bâtiments bovin laitier pour des conduites d'élevage contrastées**

**Par : Charlène JAVON**

Volet à renseigner par l'enseignant responsable de l'option/spécialisation

OU son représentant

Bon pour dépôt (version définitive)

Date : .../.../.... Signature :

Autorisation de diffusion : Oui  Non

**Devant le Jury :**

Soutenu à Rennes le 20/09/2012

Sous la présidence de :

Maître de stage : Alicia CHARPIOT

Enseignant référent : Catherine DISENHAUS

Autres membres du jury (Nom, Qualité) : Bertrand MÉDA, Rapporteur

« Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent  
que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST »



## ***Fiche de diffusion du mémoire***

A remplir par l'auteur<sup>(1)</sup> avec le maître de stage.

Aucune confidentialité ne sera prise en compte si la durée n'en est pas précisée.

### **Préciser les limites de la confidentialité<sup>(2)</sup> :**

➤ Confidentialité absolue :  oui  non

(ni consultation, ni prêt)

↳ Si oui  1 an  5 ans  10 ans

➤ A l'issue de la période de confidentialité **ou** si le mémoire n'est pas confidentiel, merci de renseigner les éléments suivants :

Référence bibliographique diffusable<sup>(3)</sup> :  oui  non

Résumé diffusable :  oui  non

Mémoire consultable sur place :  oui  non

Reproduction autorisée du mémoire :  oui  non

Prêt autorisé du mémoire :  oui  non

.....  
Diffusion de la version numérique :  oui  non

↳ Si oui, l'auteur<sup>(1)</sup> complète l'autorisation suivante :

*Je soussigné(e)* \_\_\_\_\_ , *propriétaire des droits de reproduction dudit résumé, autorise toutes les sources bibliographiques à le signaler et le publier.*

*Date :* \_\_\_\_\_ *Signature :* \_\_\_\_\_

**Rennes/Angers, le**

**Le maître de stage<sup>(4)</sup>,**

**L'auteur<sup>(1)</sup>,**

**L'enseignant référent,**

---

(1) auteur = étudiant qui réalise son mémoire de fin d'études

(2) L'administration, les enseignants et les différents services de documentation d'AGROCAMPUS OUEST s'engagent à respecter cette confidentialité.

(3) La référence bibliographique (= Nom de l'auteur, titre du mémoire, année de soutenance, diplôme, spécialité et spécialisation/Option)) sera signalée dans les bases de données documentaires sans le résumé.

(4) Signature et cachet de l'organisme.



## REMERCIEMENTS

---

Je souhaite tout d'abord remercier Alicia CHARPIOT, mon maître de stage, pour m'avoir accueilli au sein de l'Institut de l'Élevage et avoir su me guider et me conseiller dans les missions qui m'étaient confiées.

Merci à Jean-Baptiste DOLLÉ, chef du service Bâtiment-Environnement de l'institut de l'élevage, pour le suivi de mon travail. Je remercie également Paul ROBIN (UMR SAS INRA/Agrocampus-Ouest) et Nadège EDOUARD (UMR PEGASE INRA/Agrocampus-Ouest) pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et leurs précieux conseils sur la méthodologie étudiée.

Je remercie également les personnes de l'Institut de l'élevage qui m'ont aidé sur divers points : Jacques CAPDEVILLE, pour ses recommandations concernant la typologie des élevages, Marion FERRAND pour sa précieuse aide en statistiques et Jocelyne BEAULIEU et Sarah DAUPHIN pour l'organisation logistique.

Merci à Sophie TIRARD, Pauline DEFRANCE et Isabelle SICOT, conseillers bâtiment des chambres départementales et régionales d'agriculture qui m'ont permis de réaliser les suivis dans les exploitations enquêtées.

Je n'oublie pas de remercier les éleveurs chez qui j'ai effectué les mesures pour leur bon accueil et l'ouverture dont ils ont fait preuve concernant mon travail. J'ai beaucoup appris durant cette période terrain à leurs côtés.

Un dernier grand merci à l'équipe de l'Institut de l'élevage du Rheu pour le cadre de travail chaleureux et la bonne humeur qu'elle m'a offert tout au long de mon stage.



## Glossaire

---

**Acidification** : accumulation de gaz acides dans l'atmosphère qui vont acidifier l'eau de pluie.

**Dénitrification** : transformation par les bactéries de l'azote minéral en azote atmosphérique ou en oxyde nitreux inutilisable par les plantes. Conditions d'anoxie nécessaires.

**Eutrophisation** : apport en excès de substances nutritives (azote, phosphore) dans un milieu aquatique pouvant entraîner la prolifération de végétaux aquatiques non désirés.

**Facteur d'émission** : dans le domaine de la pollution de l'air, un facteur d'émission est un coefficient multiplicateur qui permet d'estimer la quantité de polluant émise du fait d'une activité humaine. Il facilite le calcul des flux d'émission de certains polluants, dont la mesure directe est considérée comme longue ou complexe.

**Fermentation entérique** : transformation / décomposition de la matière organique sous l'action de microorganismes dans le milieu intestinal et digestif, en anaérobie.

**Fumier de raclage** : il est constitué de déjections comportant peu de litière. Il a une consistance semi-solide qui ne permet de l'entasser que sur une faible hauteur. Il laisse s'écouler des quantités importantes de purin.

**Fumier pailleux ou compact** : il se compose de déjections solides mêlées avec la litière. Sa consistance est compacte, ce qui permet de l'entasser. Il ne laisse s'écouler que des quantités très réduites de purin.

**Lisier** : mélange des déjections liquides et solides des animaux sans ou avec très peu de litière. La collecte peut se faire par gravité avec des préfosse situées sous les aires d'exercice et des canalisations vers la fosse, ou bien par raclage mécanique vers une fosse de stockage spécifique.

**Nitrification** : transformation par les bactéries de l'azote ammoniacale en azote nitrique.

**Réchauffement climatique** : augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre qui est due à l'accumulation dans les couches basses de l'atmosphère de gaz à effet de serre rejetés par les activités humaines.

**Volatilisation** : Transformation d'un liquide ou d'un solide en gaz





## Liste des abréviations

---

$\rho$  = masse volumique de l'air

ADEME = Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

ADL = Acid Detergent Lignin, lignine dosée par la méthode de Van Soest

C = Carbone

C-CH<sub>4</sub> = Carbone sous forme de méthane

C-CO<sub>2</sub> = Carbone sous forme de dioxyde de carbone

C<sub>gaz,ext</sub> = Concentration extérieure de gaz

C<sub>gaz,int</sub> = Concentration intérieure de gaz

CH<sub>4</sub> = Méthane

CO<sub>2</sub> = Dioxyde de carbone

CAR = Coefficient d'Absorption Réelle

CASDAR = Compte d'Affectation Spéciale Développement Agricole et Rural

CITEPA = Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique

Conc = Concentré

COV = Composé Organique Volatile

E<sub>C-CH<sub>4</sub></sub> = Emissions de carbone sous forme de méthane

E<sub>C-CO<sub>2</sub></sub> = Emissions de carbone sous forme de dioxyde de carbone

E<sub>N-N<sub>2</sub>O</sub> = Emissions d'azote sous forme de protoxyde d'azote

E<sub>N-NH<sub>3</sub></sub> = Emissions d'azote sous forme d'ammoniac

EE = Extrait Ethéré

EM = Energie métabolisable

EM2B = Émissions de gaz à effet de serre et d'ammoniac en Bâtiment Bovin lait (projet)

Fourr = Fourrage

GES = Gaz à Effet de Serre

GMQ = Gain Moyen Quotidien

GPV = Gain de Poids Vif

H<sub>2</sub>O = Eau

Iact = Indice d'activité

ICPE = Installations Classées pour la Protection de l'Environnement

IED = Industrial Emission Directive

IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change

K<sub>2</sub>O = Potassium

LAC = Litière Accumulée avec couloir Caillebottis

LAF = Litière Accumulée avec couloir raclé Fumier

LAL = Litière Accumulée avec couloir raclé Lisier

LF = Logettes avec couloir raclé Fumier

LL = Logettes avec couloir raclé Lisier

LLH = Logettes avec couloir Lisier Hydrocurage

MAGES = Mesures d'Atténuation des émissions de Gaz à Effet de Serre en élevage bovin lait et viande

MAND = Matières Azotées Non Digestibles



MAT = Matières Azotées Totales  
MM = Matières Minérales  
MO = Matière Organique  
MOFing = Matière Organique Fermentescible ingérée  
MOND = Matière Organique Non Digestible  
MS = Matière Sèche  
MSI = Matière Sèche Ingérée  
N = Azote  
N- N<sub>2</sub>O = Azote sous forme de protoxyde d'azote  
N-NH<sub>3</sub> = azote sous forme d'ammoniac  
N<sub>2</sub> = Diazote  
N<sub>2</sub>O = Protoxyde d'azote  
NEC = National Emission Ceilings  
Nurée = Azote uréique  
Nnu = Azote non uréique  
NH<sub>3</sub> = Ammoniac  
Pasb = Phosphore absorbable  
P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = Phosphore  
Pertes C = les pertes en carbone  
Pertes N = les pertes en azote  
PDI = Protéines Digestibles dans l'Intestin  
PDIAing = Protéines Digestibles dans l'Intestin d'origine Alimentaire ingérées  
PDIEing = Protéines Digestibles dans l'Intestin d'origine Endogène ingérées  
PL = Production Laitière  
PP = Prairie Permanente  
PPF = Pente Paillée couloir raclé Fumier  
PT = Prairie Temporaire  
PV = Poids Vif  
PVnai = Poids Vif du veau à la naissance  
Q = Production de chaleur  
Qair = Débit d'air  
SAU = Surface Agricole Utile  
SemG = Semaine de gestation (stade de gestation en semaines)  
SFP = Surface Fourragère Principale  
SG = Stade de Gestation  
SO<sub>2</sub> = Dioxyde de Soufre  
TB = Taux Butyrique  
TP = Taux Protéique  
UFL = Unité Fourragère Laitière  
UGB = Unité Gros Bovin  
VL = Vache Laitière



## Liste des figures

---

Figure 1 : Inventaire des principaux postes d'émissions de gaz à effet de serre et d'ammoniac au sein d'un système d'élevage

Figure 2 : Principe du processus de volatilisation de l'ammoniac

Figure 3 : Le rôle des activités agricoles dans les émissions mondiales de gaz à effet de serre (WRI, 2005)

Figure 4 : Rôle du secteur agricole dans les émissions nationales de dioxyde de carbone, de méthane, de protoxyde d'azote et d'ammoniac (CITEPA, 2012 ; chiffres de 2010)

Figure 5 : Représentation de l'effet vent et de l'effet cheminée sur un bâtiment bovin à ventilation naturelle (Brachet, 2007)

Figure 6 : Ordres de grandeur des émissions de C-CH<sub>4</sub> dues à la fermentation entérique obtenues dans la littérature

Figure 7 : Synthèse bibliographique des émissions de C-CH<sub>4</sub> mesurées en bâtiment à ventilation naturelle pour vaches laitières : répartition selon le système de gestion des déjections

Figure 8 : Synthèse bibliographique des émissions de N-NH<sub>3</sub> mesurées en bâtiment à ventilation naturelle pour vaches laitières : répartition selon le système de gestion des déjections

Figure 9 : Inventaire des principaux paramètres influençant les émissions de gaz en bâtiment pour bovins laitiers

Figure 10 : Effectifs de vaches laitières par département en 2005 (légende à droite) et secteurs de répartition des modes de logement des vaches laitières par région (adapté de Brachet, 2007 ; Dollé et Duyck, 2007)

Figure 11 : Répartition des types de déjections en pourcentage par région pour des ateliers vaches laitières (adapté de Brachet, 2007 : réalisé à partir de AGRESTE, 2006 et de la circulaire DEPSE, 2001)

Figure 12 : Schéma du montage du matériel de prélèvement avec la chambre à vide et la pompe à air (Brachet A., 2007)

Figure 13 : Prélèvement d'un échantillon d'air à l'extérieur du bâtiment

Figure 14 : Prélèvement d'un échantillon d'air à l'intérieur du bâtiment

Figure 15 : Thermo-hygromètre utilisé pour mesurer la température et l'humidité relative à l'intérieur et l'extérieur du bâtiment

Figure 16 : Sac TEDLAR® branché sur l'entrée d'air de l'analyseur de gaz INNOVA 1412®

Figure 17 : Bilan entrées/sorties à l'échelle du bâtiment des vaches laitières

Figure 18 : Exemple d'un choix de répartition des différents types de déjections dans un bâtiment avec litière accumulée et couloir raclé fumier

Figure 19 : Bilan des entrées et sorties des principaux éléments chez la vache laitière (Maxin G., 2006)

Figure 20 : Schéma de sélection des paramètres influençant les émissions de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et NH<sub>3</sub> qui seront testés



Figure 21 : Légende explicative des boîtes à moustaches

Figure 22 : Emissions de C-CO<sub>2</sub> calculées en fonction du temps de présence des vaches laitières et du mode de logement

Figure 23 : Emissions de C-CH<sub>4</sub> en fonction du temps de présence de vaches laitières et du mode de logement

Figure 24 : Emissions de N-NH<sub>3</sub> en fonction du temps de présence des vaches laitières et du mode de logement

Figure 25 : Effet du mode de logement et de la fréquence de raclage sur les émissions de N-NH<sub>3</sub> dans les bâtiments en système "logettes" en période hivernale.

Figure 27 : Ecart entre les émissions de C-CO<sub>2</sub> et C-CH<sub>4</sub> de la méthode simplifiée et de celles obtenus à partir du modèle de Maxin-INRA (2006) en fonction des modes de logement des vaches laitières

Figure 26 : Effet de la température d'une solution d'ammoniac sur la concentration en ammoniac gazeux de l'air en équilibre pour deux valeurs de pH et deux concentrations de la solution (CORPEN, 2001)

Figure 28 : Comparaison des émissions de C-CH<sub>4</sub> obtenues à celles rencontrées dans la bibliographie : répartition selon la méthodologie utilisée et le système de gestion de déjections

Figure 29 : Comparaison des émissions de N-NH<sub>3</sub> obtenues à celles rencontrées dans la bibliographie : répartition selon la méthodologie utilisée et le système de gestion des déjections

Figure 30 : Comparaison des rapports de gradients de concentrations C-CO<sub>2</sub>/N-NH<sub>3</sub> entre 2011 (ancienne configuration de l'analyseur) et 2012 (nouvelle configuration de l'analyseur) dans des élevages enquêtés les deux années

Figure 31 : Graphique représentant la comparaison des pertes en carbone selon l'année de mesure (2011 et 2012) et la méthode de bilan de masse utilisée

## Liste des tableaux

---

Tableau 1 : Inventaire des différentes méthodes de quantification du débit d'air et des concentrations gazeuses en bâtiment d'élevage

Tableau 2 : Résultats d'émissions de gaz à effet de serre et d'ammoniac en fonction de la saison et du mode de logement obtenus en bâtiment bovin laitier avec la méthode simplifiée (Brachet, 2007 et Chambaut et al., 2011)

Tableau 3 : Pourcentage des données brutes de chaque gaz non retenues pour l'analyse statistique

Tableau 4 : Récapitulatif des rapports Sorties/Entrées du bâtiment pour les éléments Carbone, Azote, Phosphore, Potassium et Eau

Tableau 5 : Pourcentage d'azote contenu dans les déjections qui est volatilisé sous forme de N-NH<sub>3</sub> au bâtiment : étude de l'influence du temps de présence des vaches laitières par jour et du mode de logement





## Liste des annexes

---

<u>Annexe I</u> : Les grands axes du contexte réglementaire international, européen et national concernant des émissions de gaz à effet de serre et d'ammoniac .....	I
<u>Annexe II</u> : Descriptif des techniques de quantification des émissions de gaz à effet de serre et d'ammoniac en bâtiment d'élevage bovin .....	II
<u>Annexe III</u> : Descriptif des techniques de quantification des émissions de gaz à effet de serre et d'ammoniac en bâtiment d'élevage bovin .....	VII
<u>Annexe IV</u> : Descriptif des différents modes de logement des bâtiments bovins.....	VIII
<u>Annexe V</u> : Trois conceptions de bâtiments bovins : bâtiment fermé sur les 4 côtés (en haut), bâtiment ouvert sur un côté (au milieu) et bâtiment ouvert sur un côté avec un filet brise-vent (en bas) .....	X
<u>Annexe VI</u> : Fiche mémo-technique du matériel et du principe des mesures effectuées en élevage.....	XI
<u>Annexe VII</u> : Questionnaire destiné aux éleveurs sur les caractéristiques du bâtiment, la conduite d'élevage et la gestion des effluents.....	XIV
<u>Annexe VIII</u> : Détail du fonctionnement de l'analyseur INNOVA 1412 et récapitulatif de la configuration sélectionnée pour l'étude.....	XXI
<u>Annexe IX</u> : Descriptif des tests statistiques et de logiques utilisés sur les gradients de concentrations de gaz .....	XXII
<u>Annexe X</u> : Références de quantités et de compositions des effluents de bovin lait et choix des répartitions des types de déjections en fonction du mode de logement .....	XXIII
<u>Annexe XI</u> : Références de taux de paillage en fonction du mode de logement des vaches laitières .....	XXIV
<u>Annexe XII</u> : Détail des bilans entrée/sortie des éléments carbone, azote, eau et minéraux chez la vache laitière.....	XXV
<u>Annexe XIII</u> : Protocole pour la mesure de la température des litières par l'éleveur .....	XXXII
<u>Annexe XIV</u> : Evaluation de la méthode simplifiée : comparaison aux différentes méthodologies de quantification des émissions gazeuses rencontrées dans la bibliographie et étude de la variabilité intra-méthodes.....	XXXIII



## Table des matières

---

Remerciements

Glossaire

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des annexes

**Introduction** ..... 1

**I. Contexte et Intérêt de l'étude** ..... 2

I.1. Une préoccupation grandissante autour des polluants atmosphériques ..... 2

I.1.1. Origine agricole et impact des principaux polluants atmosphériques..... 2

I.1.2. Le rôle de l'agriculture et de l'élevage sur les émissions de gaz ..... 2

I.1.3. Un contexte réglementaire dynamique..... 3

I.1.4. Une évolution de la réglementation pour les élevages bovins français ..... 3

I.2. Les méthodes de quantification des émissions en bâtiment ..... 3

I.3. Premiers résultats d'émissions en bâtiment et incertitude sur les données ..... 4

I.3.1. Une grande variabilité des résultats d'émissions ..... 4

I.3.2. Les premières valeurs de la méthode simplifiée en élevage bovin ..... 5

I.3.3. Une multitude de facteurs influençant les émissions de gaz..... 6

I.4. Intérêt et objectif de l'étude..... 6

**II. Matériel et Méthodes** ..... 7

II.1. Descriptif de l'échantillon d'exploitations..... 7

II.1.1. Typologie des élevages bovins laitiers du Grand-Ouest..... 7

II.1.2. Taille de l'échantillon et périodes de mesures..... 8

II.2. Protocole des mesures en élevage ..... 8

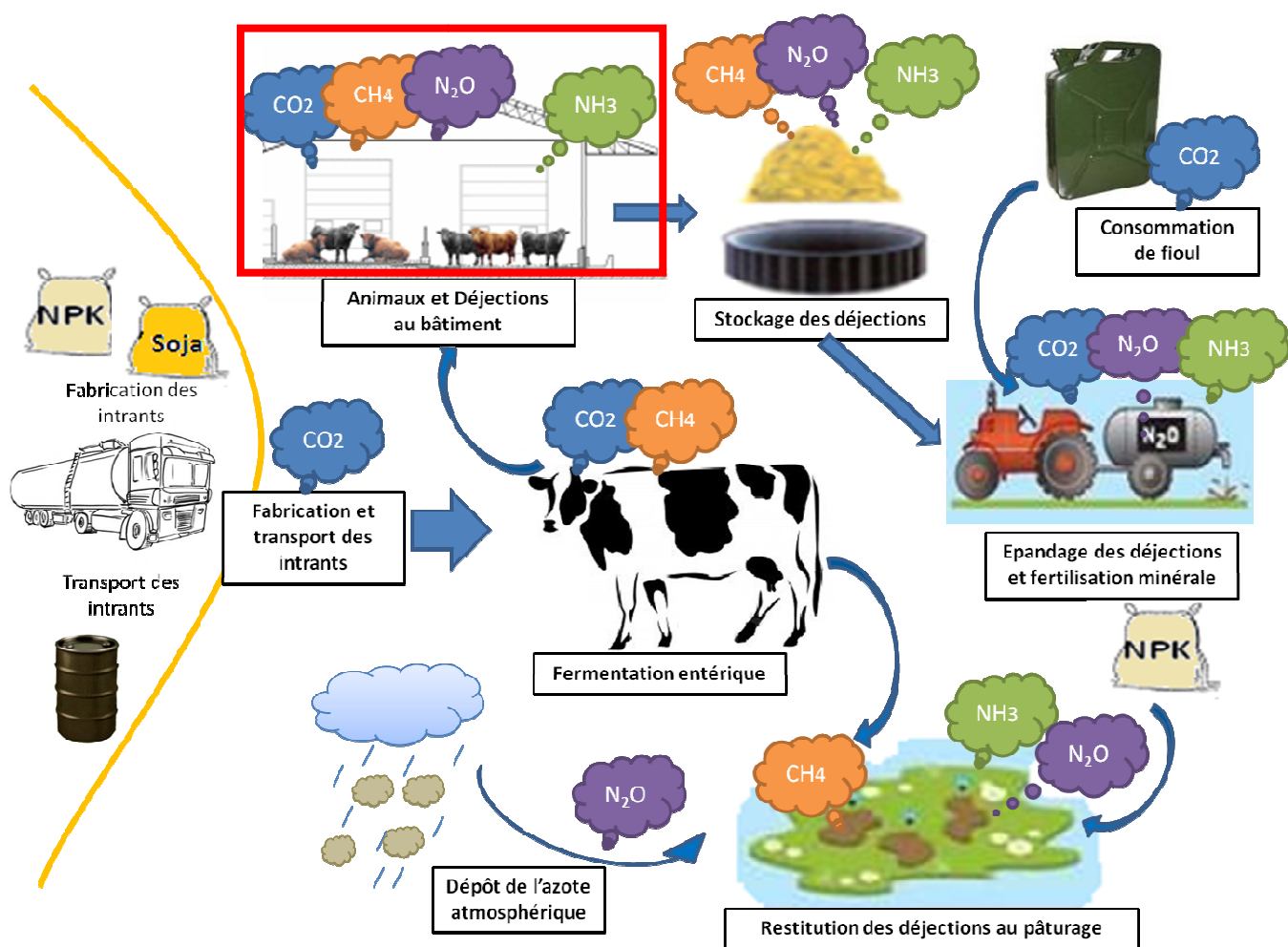
II.2.1. Les prélèvements d'échantillons d'air ..... 8

II.2.2. Les mesures et informations complémentaires..... 9



II.2.3. Les analyses des échantillons d'air .....	9
II.3. Méthodologie pour le traitement des données .....	10
II.3.1. Validation des données obtenues .....	10
II.3.2. Les bilans de masse à l'échelle du bâtiment et de l'animal .....	10
II.3.3. Le calcul des émissions de gaz .....	11
II.3.4. L'étude des facteurs d'influence potentiels sur les émissions .....	11
<b>III. Résultats</b> .....	12
III.1. Des émissions de carbone principalement liées aux animaux .....	12
III.2. Des émissions d'ammoniac davantage sensibles au mode de logement .....	13
III.3. Vérification des résultats d'émissions obtenus .....	14
III.3.1. Comparaison des émissions calculées avec la méthode simplifiée aux émissions calculées à partir du modèle Maxin-INRA .....	14
III.3.2. Étude des bilans de masse des éléments C, N, P, K et H <sub>2</sub> O .....	14
<b>IV. Discussions</b> .....	16
IV.1. Analyse des résultats d'émissions obtenus .....	16
IV.2. Analyse de la méthodologie .....	17
IV.2.1 Une méthodologie affinée par rapport aux études précédentes .....	17
IV.2.2. Les limites de la méthode simplifiée .....	18
IV.2.3. Confrontation aux autres méthodologies de quantification des émissions de gaz en bâtiment .....	19
<b>Conclusion</b> .....	20
Références bibliographiques .....	21
Annexes .....	26

**Figure 1 : Inventaire des principaux postes d'émissions de gaz à effet de serre et d'ammoniac au sein d'un système d'élevage**



## Introduction

---

Les activités humaines ont un impact sur notre environnement à différents niveaux : l'atmosphère et la qualité de l'air, la qualité de l'eau et des sols et enfin la consommation d'énergie. Actuellement, les pollutions atmosphériques sont une préoccupation mondiale et d'un point de vue réglementaire, la France s'est engagée à maîtriser voire diminuer ses émissions de polluants vers l'air. Le secteur agricole et plus particulièrement l'élevage est concerné pour leur rôle parfois majeur dans les émissions des gaz à effet de serre (GES) et d'ammoniac (NH<sub>3</sub>). Suite à l'évolution de la réglementation française et à la ratification de protocoles internationaux (Kyoto en 1997 ; Göteborg en 1999), des projets de recherche et développement ont été initiés en vue de réduire ces émissions gazeuses en élevage.

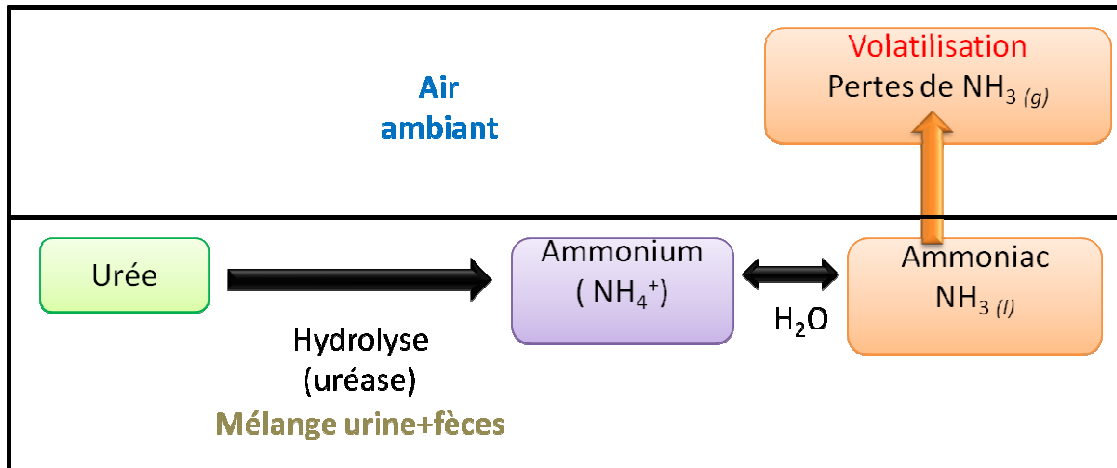
Pour atteindre les objectifs fixés, il est nécessaire de pouvoir quantifier ces émissions de polluants atmosphériques pour un système donné (Figure 1). Les mesures d'émissions gazeuses s'insèrent dans une démarche plus globale d'évaluation environnementale à l'échelle d'une exploitation ou d'un territoire. Au sein d'un élevage, il est possible de mesurer des émissions gazeuses pour un segment particulier (bâtiment, stockage, etc.). Jusqu'à présent, les méthodes mises en œuvre pour mesurer les GES en bâtiment étaient lourdes, coûteuses et difficiles à mettre en œuvre face à la diversité des systèmes de production à l'échelle mondiale, en particulier pour les bâtiments à ventilation naturelle. Par conséquent, les résultats obtenus dans la littérature étrangère sont parfois difficilement adaptables à certains systèmes de production français qui n'ont pas encore fait l'objet de mesure. En 2006, une équipe de recherche a développé une méthode dite « simplifiée » de mesures d'émissions gazeuses qui serait applicable dans des bâtiments à ventilation naturelle, largement représentés dans les élevages bovins laitiers français. Contrairement aux autres méthodes, cette dernière se base sur des prélèvements ponctuels des concentrations gazeuses et un bilan des pertes en carbone à l'échelle du bâtiment. Cette méthode semble par conséquent plus adaptée à des mesures répétées dans différents systèmes de production.

La méthode simplifiée a été choisie dans le cadre du premier axe de travail du projet EM2B (EMissions d'ammoniac et de gaz à effet de serre en Bâtiments Bovins laitiers : effets croisés du mode de logement et de l'alimentation azotée) financé par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie). ***L'objectif principal de cette étude est d'améliorer les connaissances sur les émissions gazeuses du poste bâtiment en conditions représentatives des systèmes de production français.*** L'application de la méthode simplifiée sur des systèmes contrastés (lisier vs. fumier, régimes plus ou moins riches en azote) vise aussi à déterminer l'influence du type de logement, des pratiques en bâtiment et des pratiques d'alimentation sur les émissions gazeuses. Ces mesures seront complétées par une enquête sur les pratiques en bâtiment, que ce soit pour la conduite d'élevage et la gestion des effluents, qui peuvent être des facteurs de variation non négligeables pour le calcul des émissions gazeuses.

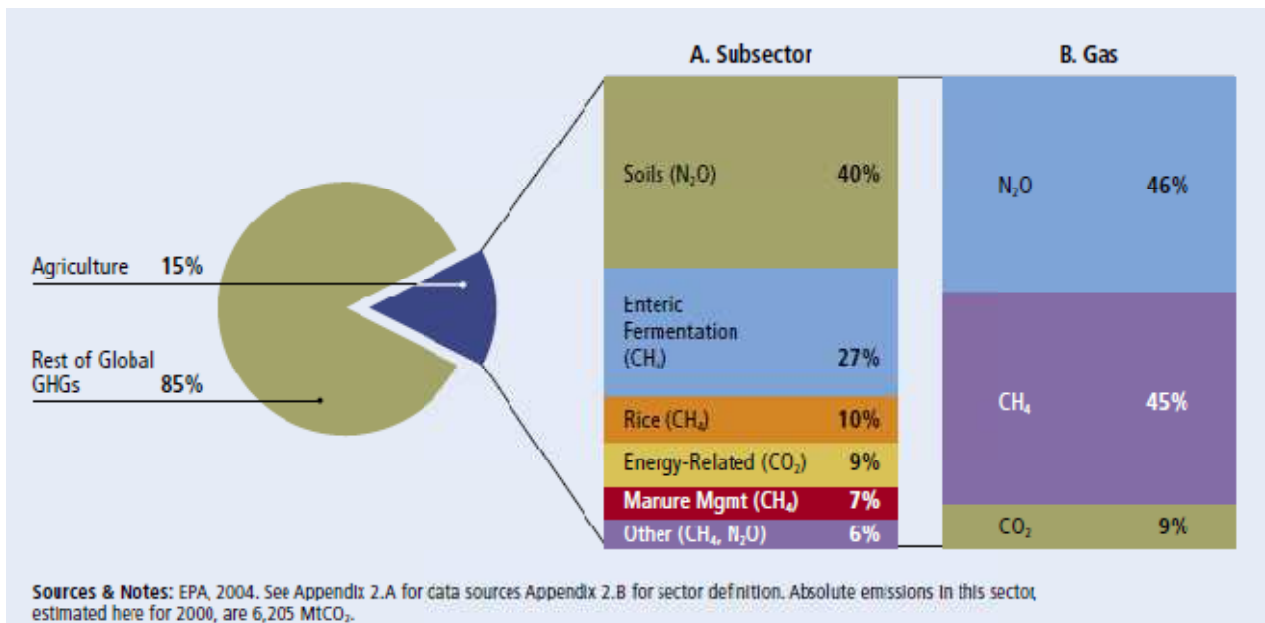
La première partie de ce rapport permettra de replacer ce projet dans le contexte actuel des problématiques environnementales en élevage. Les objectifs de cette étude y seront précisés. Une seconde partie portera sur le déroulement de cette étude, de la construction du protocole aux résultats d'émissions obtenus avec la méthode simplifiée. Une dernière partie ouvrira la discussion sur les résultats obtenus, l'applicabilité de la méthode utilisée et les pistes d'amélioration.



**Figure 2** : Principe du processus de volatilisation de l'ammoniac  
(adapté de Dollé et Capdeville, 2000)



**Figure 3** : Le rôle des activités agricoles dans les émissions mondiales de gaz à effet de serre (WRI, 2005)



# I. Contexte et Intérêt de l'étude

---

## I.1. Une préoccupation grandissante autour des polluants atmosphériques

---

### I.1.1. Origine agricole et impact des principaux polluants atmosphériques

---

Les principaux gaz à effet de serre émis par le secteur agricole sont le **dioxyde de carbone** (CO<sub>2</sub>), le **méthane** (CH<sub>4</sub>) et le **protoxyde d'azote** (N<sub>2</sub>O). Ces gaz absorbent le rayonnement infrarouge réémis à la surface de la Terre contribuant à l'effet de serre. L'augmentation de la concentration de ces gaz dans l'atmosphère participe à l'accélération du réchauffement climatique. Le CO<sub>2</sub> émis par la respiration des animaux n'est pas considéré comme un GES dans le Protocole de Kyoto, sachant que ces émissions sont intégrées dans un cycle biologique rapide. Les autres sources d'émissions de CO<sub>2</sub> sont principalement les machines agricoles consommant des combustibles fossiles.

En ce qui concerne le CH<sub>4</sub>, ce sont les écosystèmes biologiques des milieux anaérobies qui sont les principaux émetteurs (exemple : les rizières, la fermentation entérique). La source majeure d'émissions en élevage laitier est la fermentation entérique (67%) devant la gestion des déjections (31%).

Enfin, la majeure partie du protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) provient des cultures et des sols où il est produit par l'alternance des conditions favorables à la nitrification et à la dénitrification. Les apports azotés organiques et minéraux accentuent les émissions de N<sub>2</sub>O. En élevage, le N<sub>2</sub>O est principalement émis au stockage et à l'épandage des déjections (8%), mais aussi par les déjections des animaux au champ (IPCC, 1996).

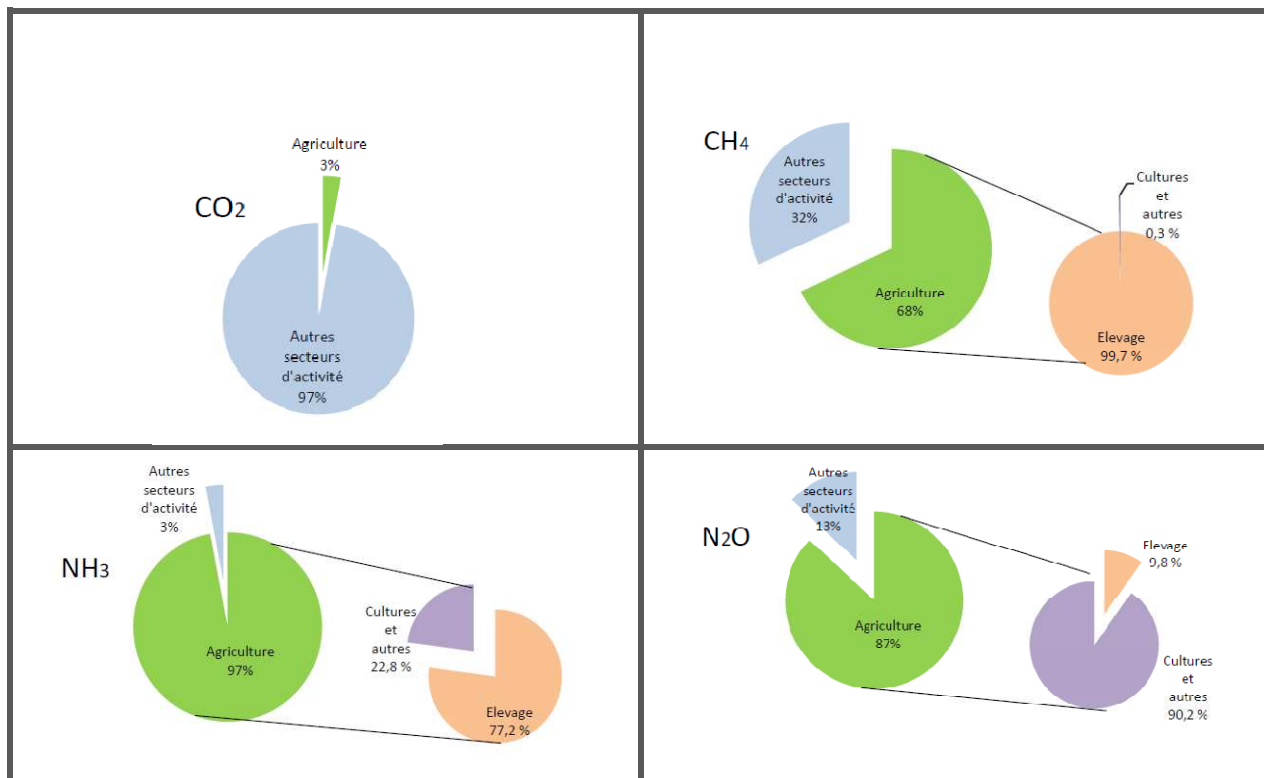
**L'ammoniac** (NH<sub>3</sub>), est un polluant atmosphérique qui contribue à l'acidification et l'eutrophisation des milieux. À forte concentration, il peut aussi porter atteinte à la santé des hommes et des animaux en irritant les yeux, la gorge et les muqueuses (Dolle et Capdeville, 2000). Indirectement, l'ammoniac contribue également à la formation de particules fines affectant l'appareil respiratoire. A l'échelle de la vache laitière, le taux de valorisation de l'azote (Nfixé / Ningéré) varie entre 20 et 35% (Peyraud *et al.*, 2012). L'azote qui n'est pas retenu pour les processus physiologiques est excrété à hauteur de 80% dans les urines et le reste dans les fèces. L'azote minéral qui est excrété sous forme d'urée dans les urines se retrouve en présence d'une enzyme fécale, l'uréase, responsable de la transformation de l'urée en ammonium, susceptible de se volatiliser (Monteny et Erisman, 1998). Le processus de volatilisation de l'ammoniac (Figure 2) correspond au transfert de l'ammoniac liquide à l'ammoniac gazeux dans l'air. Cette réaction est dépendante de la quantité d'azote urinaire, du pH et de la température l'air (Peyraud *et al.*, 2012). L'ammoniac n'est pas considéré comme un GES. Néanmoins, il agit indirectement sur leurs émissions : lors de son dépôt sur les sols, les réactions de nitrification sont accrues, entraînant l'augmentation des émissions de N<sub>2</sub>O (1% du NH<sub>3</sub> déposé, CORPEN, 2007).

### I.1.2. Le rôle de l'agriculture et de l'élevage sur les émissions de gaz

---

À l'échelle mondiale, le secteur agricole est responsable de 15% des émissions de GES. Les plus émis par les activités agricoles sont le N<sub>2</sub>O (46%) et le CH<sub>4</sub> (45%). La part des émissions de CO<sub>2</sub> liée à la combustion d'énergie fossile pour les activités agricoles est plus faible (9%). Les deux sources les plus importantes sont le travail du sol (N<sub>2</sub>O) et la fermentation entérique (CH<sub>4</sub>) qui représentent à eux deux 67% des émissions des GES provenant des activités agricoles (Figure 3).

**Figure 4 : Rôle du secteur agricole dans les émissions nationales de dioxyde de carbone, de méthane, de protoxyde d'azote et d'ammoniac (CITEPA, 2012 ; chiffres de 2010)**



**Tableau 1 : Inventaire des différentes méthodes de quantification du débit d'air et des concentrations gazeuses en bâtiment d'élevage**

$\rho_i$  = volume massique de l'air

$$E_{\text{gaz}} = Q_{\text{air}} * \rho_i * (C_{\text{gaz,int}} - C_{\text{gaz,ext}})$$

Mesure du débit d'air		Mesure des concentrations de gaz	
Mesure directe	Mesure indirecte	Méthodes de prélèvement	Méthodes d'analyse
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Débitmètre</li> <li>- Anémomètre</li> <li>- Différentiel de pression (uniquement en ventilation dynamique)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bilan de masse</li> <li>- Suivi d'un gaz traceur (SF<sub>6</sub>)</li> <li>- Bilan de production de chaleur (CIGR)</li> <li>- Modèle statistique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <u>Mesure continue</u> :                             <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Capteurs actifs/passifs</li> <li>✓ Chambre de mesure (statique ou dynamique)</li> <li>✓ Prélèvements d'échantillons d'air à intervalles de temps réguliers</li> <li>✓ Barbotage de l'ammoniac dans une solution d'acide</li> </ul> </li> <li>- <u>Mesure ponctuelle</u> :                             <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ mesure simplifiée (chambre à vide, pompe à air et sac TEDLAR®)</li> <li>✓ Tubes réactifs Dräger® associées à une pompe de détection ou boîtier de programmation =&gt; analyse simultanée</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chromatographie en phase gazeuse</li> <li>- Spectrophotométrie :                             <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ à transformation de Fourier (FTIR)</li> <li>✓ à mobilité ionique</li> <li>✓ photo-acoustique à infrarouge</li> </ul> </li> <li>- Convertisseur de NH<sub>3</sub> en Nox et analyseur de Nox (spécifique à l'azote)</li> <li>- Dosage d'une quantité d'ammoniac contenue dans une solution acide (barbotage)</li> </ul>

À l'échelle nationale, le CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la pollution Atmosphérique) se charge de réaliser des inventaires des émissions de polluants atmosphériques en France. Ces inventaires permettent d'estimer le poids du secteur agricole dans les émissions françaises de polluants atmosphériques (Figure 4).

---

### I.1.3. Un contexte réglementaire dynamique

---

La France s'est engagée à l'échelle européenne et internationale, pour tenter de maintenir, voire de réduire ses émissions de GES (Annexe I). Pour atteindre les objectifs de réduction fixés par le Protocole de Kyoto (-20% d'émissions en 2020 et -50% en 2050 par rapport à 1990), la France a mis en place en 2000 un Programme de Lutte Nationale contre le Changement Climatique (Haccala, 2004). Ce plan reste assez vague concernant les émissions du secteur agricole du fait d'un manque de données. Cependant, l'agriculture fut davantage concernée par le Plan Climat (2004) qui a précisé le programme précédent sur certains points : la maîtrise des fertilisants azotés, la diminution des intrants, la valorisation du biogaz et des produits issus de la biomasse. Les prochaines actions qui devront être mises en œuvre pour limiter les émissions sont décrites dans le Plan Climat actualisé en 2010 qui intègre les mesures du Grenelle de l'Environnement pour la période allant jusqu'à 2020.

En ce qui concerne l'ammoniac, plusieurs directives européennes (IED, NEC, etc. Annexe I) ont été mises en place pour répondre aux objectifs de plafonds d'émission fixés par le Protocole de Göteborg à l'échelle internationale. Ces directives sont traduites en droit français pour établir des programmes de réduction des émissions de polluants atmosphériques. Ces mesures sont prises dans le cadre d'amélioration de la qualité de l'air.

---

### I.1.4. Une évolution de la réglementation pour les élevages bovins français

---

Actuellement, les GES ne sont pas concernés par des mesures précises de déclaration et/ou de réduction des émissions à l'échelle de l'exploitation. Les seules mesures soumises à réglementation concernent l'ammoniac. Par exemple, les élevages de grande taille de porcs ou volailles sont soumis à déclaration de leurs émissions annuelles d'ammoniac dans le cadre de la directive européenne IED (Industrial Emission Directive). L'intégration des grands élevages de bovins est envisagée, bien qu'ils ne soient pas affectés à l'heure actuelle.

En France, les ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) constituent une autre classification des activités polluantes de certains élevages. Suite au Décret n° 2011-842 du 15 juillet 2011 modifiant la nomenclature des installations classées, les élevages de 50 à 150 vaches laitières sont soumis à déclaration et ceux de plus de 150 vaches laitières à autorisation. Les ICPE sont notamment soumises à des réglementations sur le bruit, la proximité du voisinage et la gestion des déjections, mais il n'est mentionné aucun plafond d'émissions gazeuses pour ces élevages.

Cependant, pour pouvoir formuler des réglementations sur les émissions gazeuses, il est nécessaire d'acquérir des références d'émissions aux différents postes d'un système d'élevage considéré.

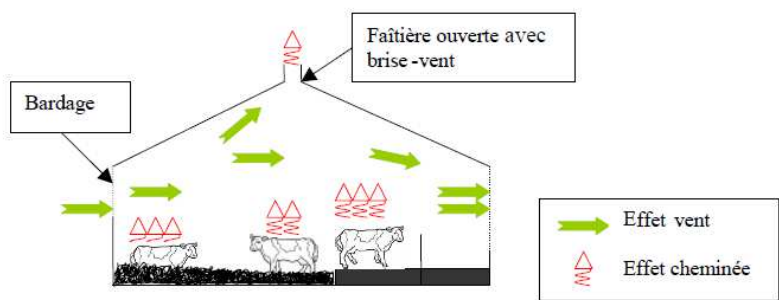
---

## I.2. Les méthodes de quantification des émissions en bâtiment

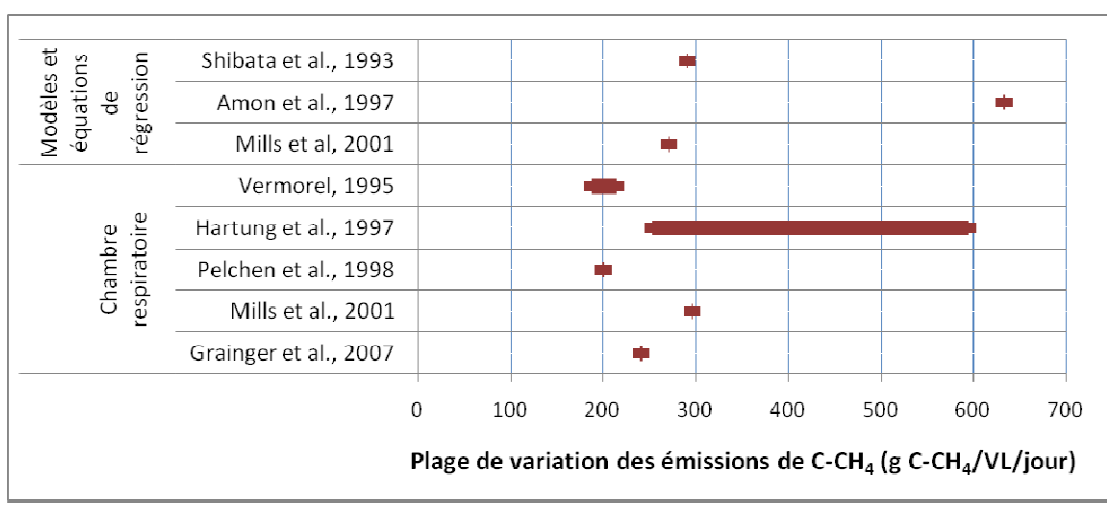
---

Les deux principales méthodes utilisées nécessitent la mesure des concentrations de gaz étudiés (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O) et peuvent être utilisées dans des bâtiments à ventilation naturelle (Tableau 1).

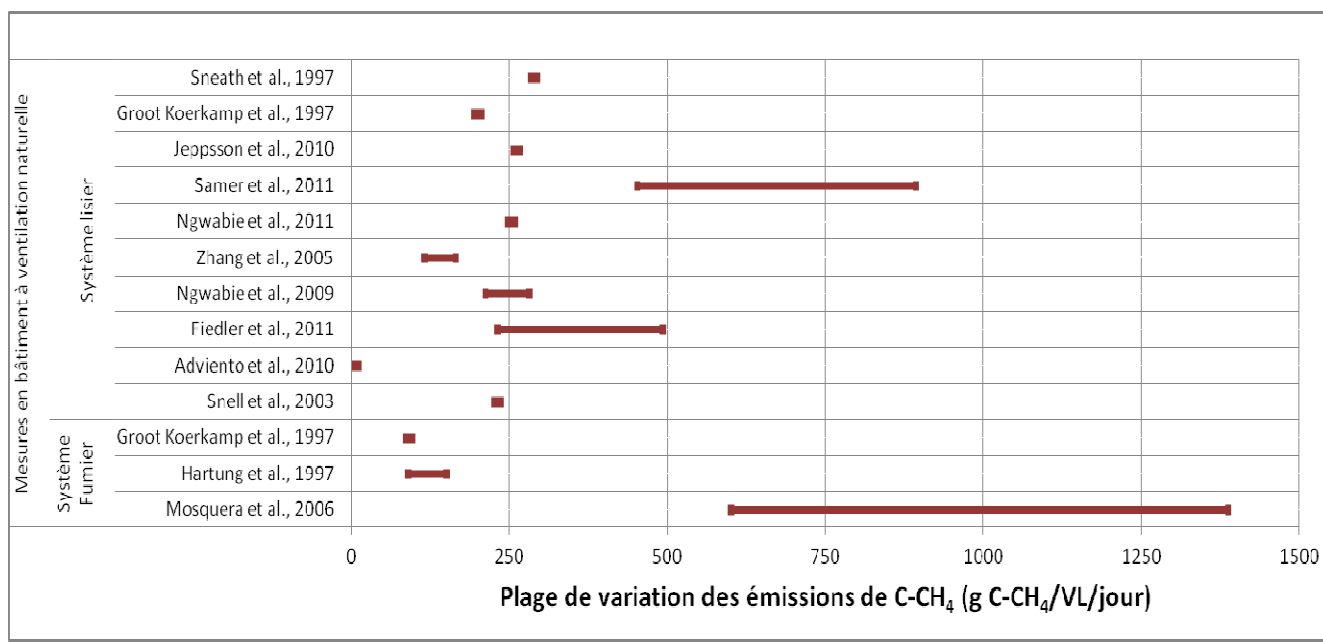
**Figure 5 : Représentation de l'effet vent et de l'effet cheminée sur un bâtiment bovin à ventilation naturelle (Brachet, 2007)**



**Figure 6 : Ordres de grandeur des émissions de C-CH<sub>4</sub> dues à la fermentation entérique obtenues dans la littérature (variabilité des performances et des rations entre les études)**



**Figure 7 : Synthèse bibliographique des émissions de C-CH<sub>4</sub> mesurées en bâtiment à ventilation naturelle pour vaches laitières : répartition selon le système de gestion des déjections**



**La première méthode de calcul** implique de connaître le débit d'air et les concentrations de gaz :

$$E_{\text{gaz}} = Q_{\text{air}} * \rho_i * (C_{\text{gaz,int}} - C_{\text{gaz,ext}})$$

Avec (les unités sont données pour le CO<sub>2</sub> à titre d'exemple) :

$E_{\text{gaz}}$  : émission du gaz mesuré (gC-CO<sub>2</sub>/h)

$Q_{\text{air}}$  : débit d'air sortant du bâtiment (m<sup>3</sup>/h)

$\rho_i$  : volume massique de l'air sortant du bâtiment (kg air sec/m<sup>3</sup>)

$C_{\text{gaz,int}}$  : concentration en gaz à l'intérieur du bâtiment (gC-CO<sub>2</sub>/kg air sec)

$C_{\text{gaz,ext}}$  : concentration en gaz à l'extérieur du bâtiment (gC-CO<sub>2</sub>/kg air sec)

Dans les bâtiments à ventilation naturelle, il est difficile d'estimer directement la ventilation sachant que les flux entrants et sortants sont mélangés et que ces derniers résultent de l'effet vent et de l'effet cheminée (Figure 5, Capdeville et Tillie, 1995). Par conséquent, de nouvelles méthodologies ont été développées ces dernières années pour évaluer les émissions dans ce type de bâtiment. Ces méthodes permettent de réaliser une mesure indirecte de la ventilation (Annexe II). Cependant, elles sont généralement lourdes et coûteuses et ne permettent pas de répéter un grand nombre de fois les mesures des émissions (ADEME, 2010).

**La deuxième méthode de calcul dite de « mesure simplifiée »** se base sur les rapports de gradients de concentrations en gaz et les bilans de masse à l'échelle des animaux et du bâtiment. Cette méthode a pour avantage de s'affranchir du calcul du débit d'air. Elle a été choisie pour effectuer les mesures d'émissions de gaz dans ce projet et sera davantage détaillée dans la partie Matériel et Méthodes (II.2.).

### I.3. Premiers résultats d'émissions en bâtiment et incertitude sur les données

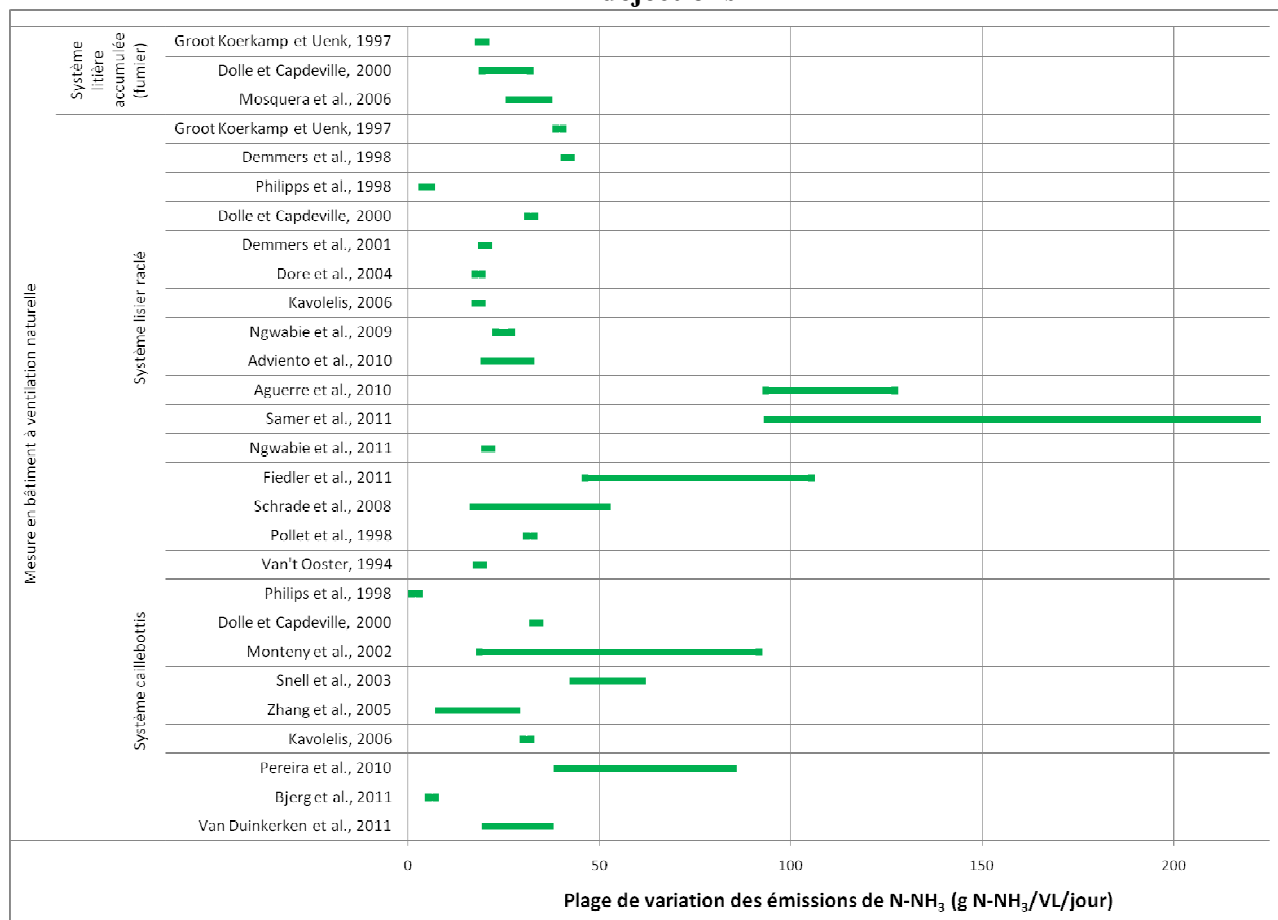
#### I.3.1. Une grande variabilité des résultats d'émissions

Même si les mesures en bâtiment ne facilitent pas la distinction sur l'origine des émissions, **il est toutefois envisageable de distinguer les deux sources d'émissions que sont l'animal et ses déjections** (Dolle et Robin, 2006).

En élevage bovin laitier, les pertes de carbone sous forme de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> sont majoritairement dues à l'animal, de l'ordre de 85-90% (Hindrichsen *et al.*, 2005). De nombreuses études se focalisent sur la production de méthane entérique qui est le poste le plus important des émissions nationales provenant de l'élevage (67%). Selon des études réalisées en chambre respiratoire, les **vaches laitières éructeraient de 187 à 632 g de C-CH<sub>4</sub>/VL/j** (Figure 6). À l'échelle du bâtiment, ces valeurs d'émissions sont généralement inférieures à celle obtenues en chambre respiratoire du fait de la dilution des gaz émis et de la difficulté à les mesurer. En effet, Groot Koerkamp et Uenk (1997) ont estimé ne mesurer que 24% des gaz émis en bâtiment. Dans une majorité des études ayant fait des mesures dans des bâtiments à ventilation naturelle, **les émissions sont de l'ordre de 4 à 890 g C-CH<sub>4</sub>/VL/j en système « logettes »** (Figure 7). Les mesures faites en système « litière accumulée » sont moins nombreuses et plus variables. Les valeurs très élevées de Mosquera *et al.* (2006) sont sûrement due à la faible fréquence de curage de la litière accumulée (1 fois/an) qui génère une litière de plus d'un mètre d'épaisseur avec une zone anaérobie importante et productrice de CH<sub>4</sub>.

**La gestion des déjections est le second poste le plus émetteur des émissions de CH<sub>4</sub>** et représente 31% des émissions nationales liées à l'élevage (Dolle et Robin, 2006). En effet,

**Figure 8 : Synthèse bibliographique des émissions de N-NH<sub>3</sub> mesurées en bâtiment à ventilation naturelle pour vaches laitières : répartition selon le système de gestion des déjections**



**Tableau 2 : Résultats d'émissions de gaz à effet de serre et d'ammoniac en fonction de la saison et du mode de logement obtenus en bâtiment bovin laitier avec la méthode simplifiée (Brachet, 2007 et Chambaut et al., 2011)**

Saison	Mode de logement	Source	Nombre d'observations	Emission moyenne** en g/VL/jour			
				C-CO <sub>2</sub>	C-CH <sub>4</sub>	N-NH <sub>3</sub>	N-N <sub>2</sub> O
HIVER	Aire paillée – Fumier	Brachet, 2007	n = 14	9271	828	48	2.2
		Chambaut et al., 2011	**	8496	804	19.2	1.4
	Logettes - Lisier	Brachet, 2007	n = 13	3715	382	50	2.9
		Chambaut et al., 2011	**	2260	237	3.7	0.4
ETE*	Aire paillée – Fumier	Brachet, 2007	n = 13	4249	379	22	0,99
	Logettes - Lisier	Brachet, 2007	n = 9	1702	174	23	1,32

\* Brachet, 2007 : Le temps moyen de stabulation en période estivale de cette étude est estimé à 11h/jour (mais varie beaucoup d'une région à une autre).

\*\* Chambaut et al., 2011 : Essais à Mirecourt (exploitation laitière en polyculture-élevage et conversion à l'agriculture biologique) au cours des hivers 2009-10 et 2010-11 : 18 journées de prélèvements (120 prélèvements élémentaires) dont 13 dates correspondant à des situations de plein hiver (novembre à mars).

lorsque les effluents sont stockés en bâtiment, ils représentent une source supplémentaire d'émission. Les conditions anaérobies sont propices à la production de méthane qui est de l'ordre de 240 g C-CH<sub>4</sub>/VL/jour dans une fosse à lisier sous caillebotis (Sneath *et al.*, 1997) et de 891 g C-CH<sub>4</sub>/VL/jour dans un fumier de litière accumulée (Groenestein *et al.*, 1994).

En ce qui concerne les émissions azotées, la part de l'azote ammoniacal émis par la fermentation entérique varierait de 5,8 à 10,7 g N-NH<sub>3</sub>/VL/jour (Hartung *et al.*, 1997). En effet, **les pertes d'azote sous forme de NH<sub>3</sub> sont majoritairement associées à la dispersion des déjections sur les aires de vie des animaux.** La part de l'azote émise dans les bâtiments représente entre 50% et 100% du total excrété selon la part de pâturage (Peyraud *et al.*, 2012) et le **poste bâtiment représente près de 35% des pertes en NH<sub>3</sub>** de l'exploitation (CITEPA, 2010). Les études menées sur les émissions d'ammoniac en bâtiment (Figure 8) montrent qu'il existe une variabilité importante intra mode de logement et qu'en moyenne les systèmes lisier (couloir raclé ou caillebotis) présenteraient des émissions globalement plus élevées que les systèmes fumier avec une litière accumulée.

### I.3.2. Les premières valeurs de la méthode simplifiée en élevage bovin

---

La méthode simplifiée adaptée de la méthode des ratios de concentration de Paillat *et al.* (2005) a déjà fait l'objet d'une étude d'évaluation (Brachet, 2007 ; Hassouna *et al.*, 2010). Les résultats de ce travail montrent qu'il est **difficile de corrélérer les modes de logement et les émissions gazeuses** du fait de la diversité des pratiques de l'éleveur pour un même mode de logement. Cependant, certaines tendances ont été mises en évidence : que ce soit en période hivernale ou estivale, les émissions de C-CO<sub>2</sub> et C-CH<sub>4</sub> sont accrues dans les bâtiments présentant une litière accumulée non curée par rapport aux autres bâtiments (Tableau 2). Les résultats d'émissions carbonées obtenus dans l'étude de Chambaut *et al.* (2011) sont en accord avec ceux de Brachet (2007). Les valeurs d'émissions par mode de logement sont plus faibles mais restent du même ordre de grandeur. Par conséquent, la méthode simplifiée étayerait les hypothèses de contribution des fermentations des litières accumulées aux émissions de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>.

Les émissions de N-NH<sub>3</sub> semblent aussi sensibles au mode de logement mais les résultats obtenus dans les deux études qui ont utilisé la méthode simplifiée sont très variables. Chambaut *et al.* (2011) trouvent des émissions de N-NH<sub>3</sub> beaucoup plus faibles que ceux obtenus par Brachet (2007), de l'ordre de -60% en système litière accumulée et de -90% en système logettes (Tableau 2). En outre, les émissions d'ammoniac accrues dans les systèmes « logettes lisier » qui sont rencontrées dans la littérature ne sont pas observées dans ces deux études. Sachant que les propriétés physico-chimiques de l'ammoniac le rendent plus difficile à mesurer, des essais complémentaires avec la méthode simplifiée sont nécessaires. Quant aux émissions de N-N<sub>2</sub>O, obtenir un gradient est plus difficile puisque ce gaz est présent en très faible quantité et que le taux de renouvellement de l'air est trop élevé pour observer un gradient.

L'évaluation de la méthode montre que les résultats sont cohérents avec ceux rencontrés dans la bibliographie, cependant la variabilité des résultats observée nécessite des mesures complémentaires. Les valeurs d'émission obtenues dans ces études ont tout de même permis de mettre en évidence l'influence de certains facteurs. Ainsi, l'impact du temps de stabulation, de la structure du bâtiment, du type de déjection produit et des pratiques associées en bâtiment feront l'objet des hypothèses de l'étude actuelle.



**Figure 9 : Inventaire des principaux paramètres influençant les émissions de gaz en bâtiment pour bovins laitiers**

**Facteurs influençant les émissions de CH<sub>4</sub>**

**Animal**

- Les émissions de CH<sub>4</sub> sont conditionnées par la race, le poids vif, le niveau de croissance et l'environnement d'un animal (Vermorel, 1995)
- Augmentation des émissions de CH<sub>4</sub> avec le niveau de production et les performances (Sauvant et al, 1999 ; Yan et al, 2006)
- Variabilité individuelle : les émissions de CH<sub>4</sub> sont variables de 40% d'une vache laitière à une autre (Jouany, 2003) à cause de la diversité microbienne dans le rumen

**Alimentation**

- Augmentation des émissions de CH<sub>4</sub> avec la dégradabilité et la teneur en matières grasses de l'aliment (Hartung et al, 1997)
- Augmentation des émissions de CH<sub>4</sub> avec l'augmentation du temps de présence des aliments dans le rumen (Benchaar et al, 1998)

**Déjections animales**

- la présence de paille favorise l'alternance de phase aérobiose et anaérobiose : diminution des émissions de CH<sub>4</sub> avec le taux de paillage de litière accumulée (Kreuzer et Hindrichsen, 2006)

**Bâtiment**

- Augmentation des émissions de CH<sub>4</sub> avec la surface du bâtiment (Groenstein et al., 2001)
- Augmentation des émissions de CH<sub>4</sub> avec l'âge d'une litière accumulée (Edouard et al., 2012)
- Diminution de l'activité des vaches avec l'augmentation de la température intérieure => diminution des émissions de CH<sub>4</sub> (Ngwabie et al., 2009)

**Facteurs influençant le débit d'air**

- surfaces d'ouverture
- température extérieure
- densité animale
- force et orientation du vent



**Facteurs influençant les émissions de NH<sub>3</sub>**

**Alimentation**

- Augmentation des émissions de NH<sub>3</sub> au moment de l'alimentation, liée à l'augmentation de l'activité des vaches qui engendre plus de déjections et plus de piétinement des déjections (Ngwabie et al., 2011)

**Déjections animales**

- Les émissions de NH<sub>3</sub> sont sensibles à un étalement des déjections, augmentant ainsi la surface de contact entre les déjections et l'air (Dolle et Robin, 2006)

**Bâtiment**

- Augmentation des émissions de NH<sub>3</sub> avec l'augmentation de la surface souillée du bâtiment (Dolle et Robin, 2006)
- Augmentation des émissions de NH<sub>3</sub> avec l'augmentation du débit d'air du à l'équilibre des concentrations à l'interface air-sol (Dolle et Robin, 2006)
- L'augmentation de la température intérieure modifie l'équilibre physico-chimique et favorise les émissions de NH<sub>3</sub> (Ngwabie et al., 2009)

### I.3.3. Une multitude de facteurs influençant les émissions de gaz

---

Malgré les incertitudes des mesures effectuées dans des bâtiments à ventilation naturelle, les travaux réalisés s'accordent sur l'influence de plusieurs facteurs sur les émissions de GES et de NH<sub>3</sub> (Figure 9) :

- l'état physiologique et la conduite alimentaire des animaux présents dans le bâtiment,
- Le type de déjection produit, en lien avec la conception des bâtiments (système lisier vs. système fumier) et la gestion des effluents,
- Le schéma de conception des bâtiments (semi-ouvert ou non) qui peut influencer la ventilation et le débit d'air,
- Les conditions climatiques (température, vents) liées à la situation des exploitations.

### I.4. Intérêt et objectif de l'étude

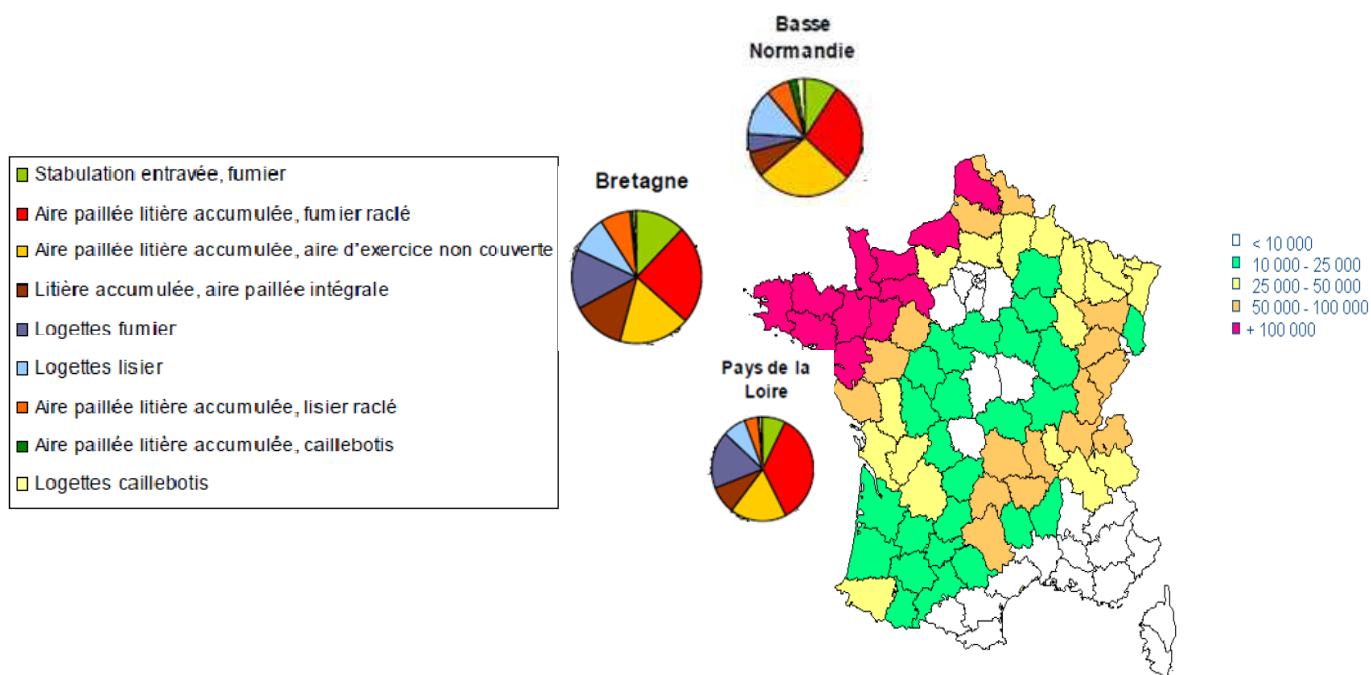
---

Pour pouvoir alimenter les bases de données qui servent au calcul des émissions globales d'un système d'élevage, il faut obtenir des données sur chaque segment du système. Au vu du faible nombre de données françaises sur les émissions de gaz en bâtiment bovin laitier, les facteurs d'émissions de la bibliographie internationale sont appliqués par défaut aux élevages français. Néanmoins, les résultats obtenus dans les pays étrangers ne sont pas toujours facilement transposables au cas français. En effet, les études étrangères sur les émissions en bâtiment bovin sont généralement réalisées sur des systèmes caillebotis, très peu répandus en France (5%, Agreste, 2006) et dans des bâtiments à ventilation dynamique à faible débit (500 m<sup>3</sup>/VL/heure contre 1000 m<sup>3</sup>/VL/heure en ventilation statique) aussi très peu rencontrés en France.

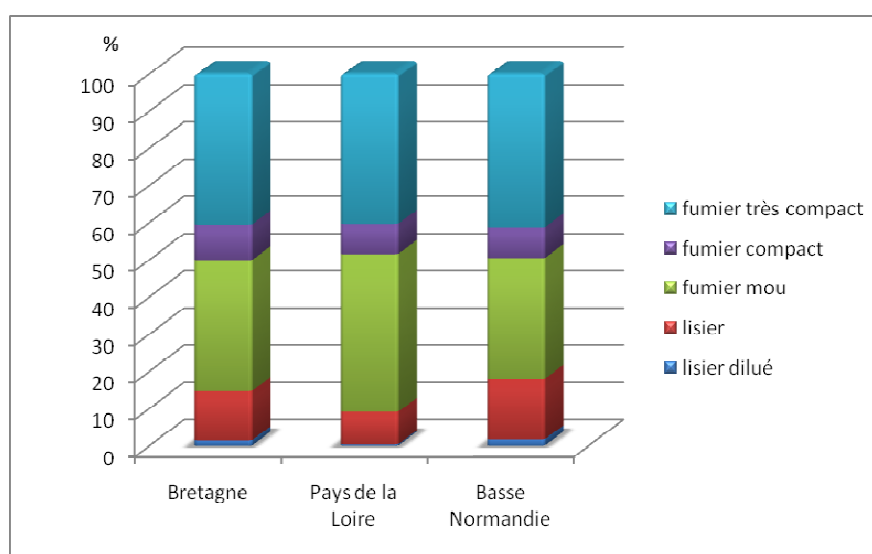
Dans le cadre de l'engagement de la France dans les protocoles internationaux, il faudrait pouvoir fournir des inventaires d'émissions caractéristiques des systèmes de production français. En 2004, le Plan Climat reconnaît les manques sur les connaissances environnementales concernant le secteur agricole et met en avant la nécessité de développer « le potentiel français d'évaluation, de recherche et d'expertise sur le thème de l'agriculture et de l'effet de serre ». Les méthodes de quantification actuelles sont souvent peu adaptées à la diversité des systèmes de production, en particulier pour les bâtiments à ventilation naturelle. Pour y répondre, des travaux ont été menés pour mettre au point une « méthode simplifiée de mesures » facilement reproductible en élevage qui permettrait d'obtenir des données d'émissions françaises.

Pour pallier à ce manque de références et compléter les études françaises déjà effectuées, les projets EM2B (financé par l'ADEME) et MAGES (financé par le CASDAR) ont été lancés. Ils se basent sur un partenariat entre l'Institut de l'élevage et les UMR SAS et PEGASE (INRA Rennes - Agrocampus-Ouest). Ces travaux ont pour objectifs d'acquérir des connaissances nouvelles sur les méthodes de mesures d'émissions gazeuses en bâtiment bovin et d'estimer le rôle de l'alimentation et du mode de conduite du troupeau sur les rejets azotés et de GES. *In fine* cela permettrait de proposer des plans d'action permettant de réduire les émissions gazeuses. L'étude présentée ici s'inscrit dans les premiers axes de travail de ces projets. Son intérêt est de pouvoir obtenir des références françaises en termes d'émissions émises en bâtiment pour des conduites d'élevage contrastées. Cette étude vise à appliquer la méthode simplifiée sur différents modes de logement et pratiques d'élevage (alimentation, gestion des effluents, etc.). Ainsi, ces travaux pourraient aider à déterminer de nouveaux facteurs d'émissions à l'échelle du bâtiment pour différents modes de logement caractéristiques des élevages bovin lait français. D'autre part, les résultats pourront contribuer à l'identification de certaines pratiques faiblement émettrices.

**Figure 10** : Effectifs de vaches laitières par département en 2005 (légende à droite) et secteurs de répartition des modes de logement des vaches laitières par région (adapté de Brachet, 2007 ; Dollé et Duyck, 2007)



**Figure 11** : Répartition des types de déjections en pourcentage par région pour des ateliers vaches laitières (adapté de Brachet, 2007 ; réalisé à partir de AGRESTE, 2006 et de la circulaire DEPSE, 2001)



## II. Matériel et Méthodes

---

*La méthode de quantification des émissions choisie est « la méthode simplifiée ».*

Elle se base sur :

- les rapports de gradients de concentrations des différents gaz calculés à partir des prélèvements d'air effectués dans les élevages.
- les bilans de masse à l'échelle du bâtiment calculés à partir des données collectées auprès de l'éleveur et de références.

### II.1. Descriptif de l'échantillon d'exploitations

---

#### II.1.1. Typologie des élevages bovins laitiers du Grand-Ouest

---

Les exploitations sélectionnées pour réaliser les mesures se situent dans les régions possédant les plus grands pourcentages du troupeau laitier français en 2004, soit la Bretagne (19%), les Pays de la Loire (13%) et la Basse Normandie (11%) (Figure 10, Dolle et Duyck, 2007). Dans ces régions, l'aire paillée avec un couloir raclé fumier se situe au premier rang en termes de capacité d'élevage (plus d'1/3 des bâtiments) avec en moyenne 55 places par bâtiment. Le système logettes avec couloir raclé fumier est aussi répandu dans ces régions fortes productrices de lait. Au vu de cette typologie, les modes de logement qui feront l'objet de mesures sont (Annexe IV) :

Présence d'une litière accumulée	{	(1) Litière accumulée avec un couloir fumier raclé (LAF)
		(2) Litière accumulée avec un couloir lisier raclé (LAL)
		(3) Litière accumulée avec un couloir caillebotis (LAC)
		(4) Pente paillée fumier (PPF)
Absence de litière accumulée	{	(5) Logettes fumier (LF)
		(6) Logettes lisier (LL)
		(7) Logettes lisier avec système d'hydrocurage (LLH)

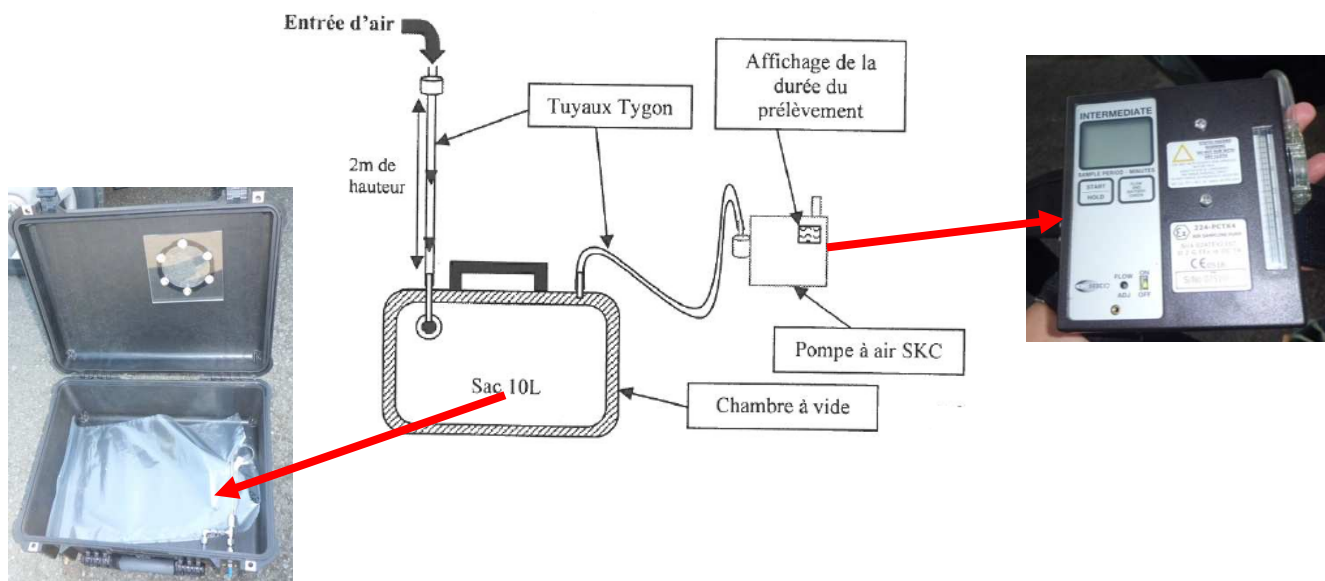
Pour chaque mode de logement, il existe deux types de conception des bâtiments (Annexe V) : certains bâtiments sont fermés sur les quatre côtés alors que d'autres sont ouverts sur un côté (bâtiments semi-ouverts). Les bâtiments semi-ouverts représentent la moitié des bâtiments qui ont fait l'objet de mesures. Ces bâtiments sont parfois munis d'un filet brise-vent sur la face ouverte au vent.

De manière générale, le type de déjection le plus rencontré est le fumier, compact ou très compact pour les aires paillées accumulées et mou pour les couloirs raclés (Figure 11). La production de fumier mou peut être importante dans certaines régions, avec par exemple près de 42% en pays de la Loire. Parallèlement, la proportion de production de lisier n'est pas très importante avec environ 20% des places disponibles pour les vaches laitières à l'échelle nationale (Brachet, 2007).

Pour pouvoir faciliter l'interprétation des résultats, certains critères doivent être fixes d'un élevage à un autre. Par conséquent, les bâtiments sélectionnés pour les mesures doivent répondre à plusieurs critères :

- Le bâtiment doit abriter une majorité de vaches laitières en stabulation permanente ou partielle et n'être pourvu que d'un seul type de logement pour les vaches laitières.
- Les vaches laitières doivent être présentes dans le bâtiment au moment des mesures et si possible a minima 2h avant la mesure en période de pâturage.

**Figure 12** : Schéma du montage du matériel de prélèvement avec la chambre à vide et la pompe à air (Brachet A., 2007)



**Figure 13** : Prélèvement d'un échantillon d'air à l'extérieur du bâtiment



**Figure 14** : Prélèvement d'un échantillon d'air à l'intérieur du bâtiment



## II.1.2. Taille de l'échantillon et périodes de mesures

---

Au total, 22 exploitations laitières ont fait l'objet de mesures d'émissions de gaz, dont 3 fermes expérimentales spécialisées bovin lait (Trévarez, Derval et La Blanche Maison). La majorité des fermes commerciales appartiennent au réseau d'éleveurs européen Dairyman, associant entre autres l'Institut de l'élevage et les chambres d'agriculture de Bretagne, Pays de la Loire et Nord Pas de Calais. Des mesures ont aussi été réalisées dans une ferme expérimentale spécialisée bovin viande (Thorigné d'Anjou) dans le cadre d'un projet annexe.

Deux séries de mesures ont été effectuées pour cette étude. La première série de mesures s'est déroulée principalement de mi-février à fin mars 2012 sur l'ensemble des exploitations de l'échantillon. À cette période et au vu des conditions climatiques favorables, certains troupeaux sortaient déjà partiellement au pâturage, mais passaient la nuit dans la stabulation alors que d'autres étaient toujours en stabulation permanente. La deuxième série de mesures s'étendait de début mai à la mi-juin au sein des mêmes exploitations. Au cours de cette période, les vaches laitières étaient dehors la journée et la nuit : elles ne passaient dans le bâtiment qu'au moment de la traite. Cela réduit considérablement le temps passé au bâtiment (en moyenne 5 heures par jour) et modifie la fonction de ce dernier puisque dans certains cas la partie couchage était vidée et non accessible aux vaches laitières.

Afin de limiter les variations liées uniquement à l'exploitation, les mesures ont été effectuées dans *au moins 10 exploitations présentant une litière accumulée et 10 exploitations en système « logettes »*. Pour chaque période de mesures :

- une seule mesure est réalisée dans les fermes commerciales.
- trois mesures sont effectuées pour les fermes expérimentales spécialisées bovin lait afin de réaliser des répétitions de la méthode dans des fermes où les données collectées sont censées être plus accessibles et plus précises (notamment sur l'alimentation).

## II.2. Protocole des mesures en élevage

---

Une fiche mémo-technique rassemblant les informations sur le matériel et le déroulement d'une journée de mesure/enquête en élevage est disponible dans l'Annexe VI.

### II.2.1. Les prélèvements d'échantillons d'air

---

*Deux échantillons d'air sont réalisés dans les exploitations*, l'un représentatif de l'extérieur du bâtiment et l'autre de l'intérieur. Un prélèvement d'air d'une durée minimale de 15 minutes doit être effectué à l'aide d'une chambre à vide, d'une pompe à air à faible débit et d'un sac TEDLAR<sup>®</sup>, étanche et conçu pour les prélèvements de gaz. Le sac TEDLAR<sup>®</sup> est contenu dans la chambre à vide facilement transportable dans laquelle le vide est réalisé grâce à la pompe à air (Figure 12). Le sac se remplit d'air par dépression via l'entrée d'air fixé sur un bâton à 2m. Au vu des coûts du matériel de prélèvement (sacs et tuyaux), les sacs sont réutilisés d'une exploitation à une autre. Deux sacs différents sont utilisés sur une exploitation et ils sont ensuite rincés avec de l'air moins chargé en gaz par l'intermédiaire d'une petite pompe à air d'aquarium.

Le **prélèvement d'air extérieur (Figure 13)** s'effectue en circulant si possible tout autour du bâtiment, à une distance de 5 à 10 mètres en évitant au mieux les zones d'émissions susceptibles d'être un biais (fumière, fosse, engin agricole en fonctionnement, autres bâtiments émetteurs, etc.). Quant au **prélèvement intérieur (Figure 14)**, il se fait en circulant dans le sens de la longueur dans les différentes parties du bâtiment où les vaches laitières sont

**Figure 15** :Thermo-hygromètre utilisé pour mesurer la température et l'humidité relative à l'intérieur et l'extérieur du bâtiment



**Figure 16** : Sac TEDLAR® branché sur l'entrée d'air de l'analyseur de gaz INNOVA 1412®



présentes au moment de la mesure, en essayant d'être le plus représentatif des surfaces souillées (40% des déjections sur l'aire de couchage et 60% sur l'aire d'alimentation pour les bâtiments de vaches laitières). Malgré toutes les précautions prises, le parcours au sein du bâtiment n'est pas toujours une pratique aisée (les vaches peuvent être agitées ou mal réparties dans le bâtiment, un raclage automatique en cours, etc.), c'est pourquoi il est important de noter les incidents ou phénomènes intervenus pendant la mesure pour l'interprétation des résultats.

**Le moment du prélèvement** doit être réfléchi en fonction de plusieurs critères (phase d'alimentation, conditions climatiques). En effet, il est préférable d'intervenir en milieu de journée dans la mesure du possible, pour s'éloigner des phases d'alimentation. Ainsi, la mesure devrait être opérée environ 4h après la distribution matinale afin de se soustraire de l'effet de l'alimentation sur les émissions de CH<sub>4</sub> et de NH<sub>3</sub>. En période de pâturage, la mesure en bâtiment doit se faire lors de la présence des animaux au minimum 2h après leur entrée dans le bâtiment. À cette période, il est nécessaire de faire un compromis puisque les vaches passent peu de temps en bâtiment donc ce n'est pas compatible avec la première condition.

---

### II.2.2. Les mesures et informations complémentaires

---

Pour pouvoir interpréter l'évolution des concentrations en fonction du climat, il est nécessaire de connaître **la température et l'hygrométrie** à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment au moment où sont effectuées les mesures. Deux thermo-hygromètres (Figure 15) sont placés dans des zones représentatives de l'ambiance intérieure et extérieure (pas en plein soleil, pas dans des zones de courants d'air) le temps de faire les prélèvements d'air. D'autre part, **les conditions climatiques** doivent être observées le jour des mesures. Lors des jours de vents forts, les mesures devront être évitées, puisque les fortes circulations d'air dans le bâtiment ont une influence directe sur les gradients de concentration de gaz.

Des **échantillons de fumier et lisier** ont été prélevés dans certains bâtiments pour comparer les compositions aux références choisies pour effectuer les calculs. Pour le fumier, on réalise un échantillon composite en prélevant à plusieurs endroits dans le bâtiment du fait de l'hétérogénéité des déjections.

Pour compléter les mesures effectuées en élevage et faciliter l'interprétation des résultats, **un questionnaire « éleveur »** a été établi (Annexe VII). Il se découpe en plusieurs parties : la première rassemble des informations générales pour situer l'exploitation dans la typologie (SAU, nombre et catégories d'animaux) ; une seconde partie concerne le bâtiment où sont effectuées les mesures et son environnement (surfaces d'aire de vie, matériaux, orientation du bâtiment par rapport au vent et au stockage des déjections); enfin la troisième partie rassemble les informations aidant au calcul des bilans de masse (taux de paillage, quantité et composition du lait, stade de lactation moyen, poids moyen des vaches, composition de la ration alimentaire).

---

### II.2.3. Les analyses des échantillons d'air

---

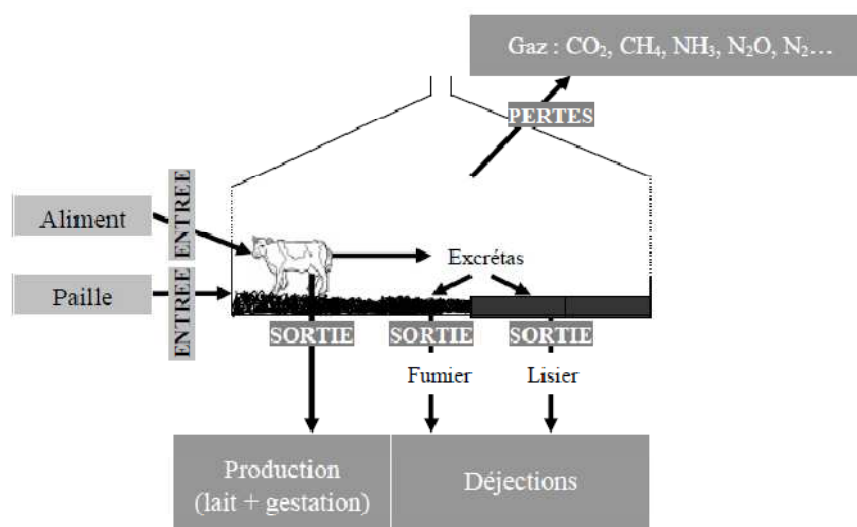
Pour obtenir les mesures de concentrations en gaz après le prélèvement, le sac TEDLAR<sup>®</sup> est branché sur l'entrée d'air d'un analyseur de gaz (INNOVA<sup>®</sup> 1412). L'analyseur de gaz employé est un spectromètre photo-acoustique à infrarouges capable de doser plusieurs gaz simultanément (Figure 16). Le principe de fonctionnement de l'appareil et la configuration choisie sont détaillés dans l'Annexe VIII. L'analyseur n'est pas transporté sur



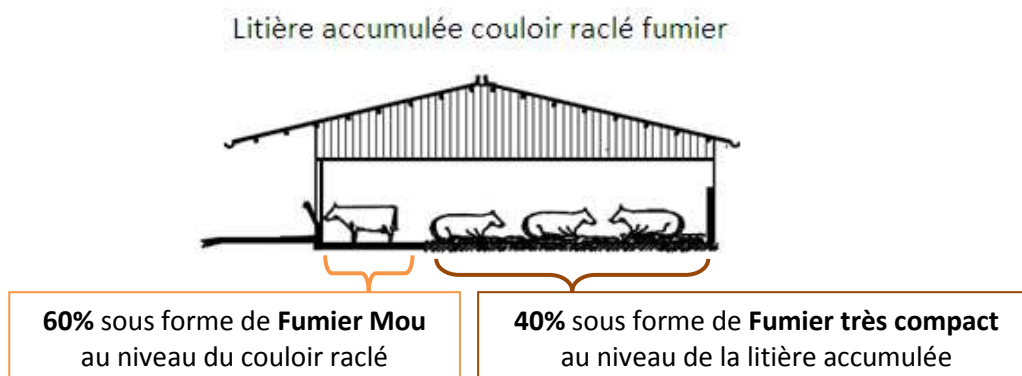
**Tableau 3** : Pourcentage des données brutes de chaque gaz non retenues pour l'analyse statistique

Gaz étudié	% de données brutes non retenues
C-CO <sub>2</sub>	8,2
C-CH <sub>4</sub>	8,2
N-NH <sub>3</sub>	26,5
N-N <sub>2</sub> O	67,3

**Figure 17** : Bilan entrées/sorties à l'échelle du bâtiment des vaches laitières (Brachet A., 2007)



**Figure 18** : Exemple d'un choix de répartition des différents types de déjections dans un bâtiment avec litière accumulée et couloir raclé fumier



le lieu de prélèvement puisqu'il nécessite un temps de stabilisation d'au minimum 2h30. La mesure des concentrations doit être faite au maximum dans les 24h après le prélèvement pour limiter au maximum les interactions entre les gaz dans le sac et pour éviter les changements de température à l'intérieur de la poche (susceptibles de générer un phénomène de condensation et de dissolution de l'ammoniac).

## II.3. Méthodologie pour le traitement des données

---

### II.3.1. Validation des données obtenues

---

Les données brutes et les gradients de concentration de gaz obtenus ont été soumis à des tests statistiques et logiques pour éliminer des valeurs suspectes sans être trop sélectif au vu du faible nombre de mesures. Les différents tests de validation qui ont été effectués sont détaillés dans l'Annexe IX et le pourcentage des données brutes qui a été écarté pour chaque gaz est disponible dans le Tableau 3. Les pourcentages élevés de valeurs non retenues pour l'ammoniac et le protoxyde d'azote sont principalement dus à leur faible concentration relative dans l'air et à leurs propriétés physico-chimiques.

### II.3.2. Les bilans de masse à l'échelle du bâtiment et de l'animal

---

Pour pouvoir calculer les émissions gazeuses à partir des mesures effectuées dans les élevages, cette méthode se base sur les rapports des gradients de concentration entre les différents gaz et sur les bilans de masse à l'échelle du bâtiment (Figure 17). Dans le cadre de la méthode simplifiée, *les émissions de gaz en bâtiment peuvent être assimilées à des pertes gazeuses sous forme d'éléments azote (NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, etc.) et carbone (CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>)*. Si toutes les pertes en carbone sont considérées gazeuses, celles-ci peuvent être calculées à partir de l'équation suivante :

$$\text{Perte C} = E_{C-CO_2} + E_{C-CH_4}$$

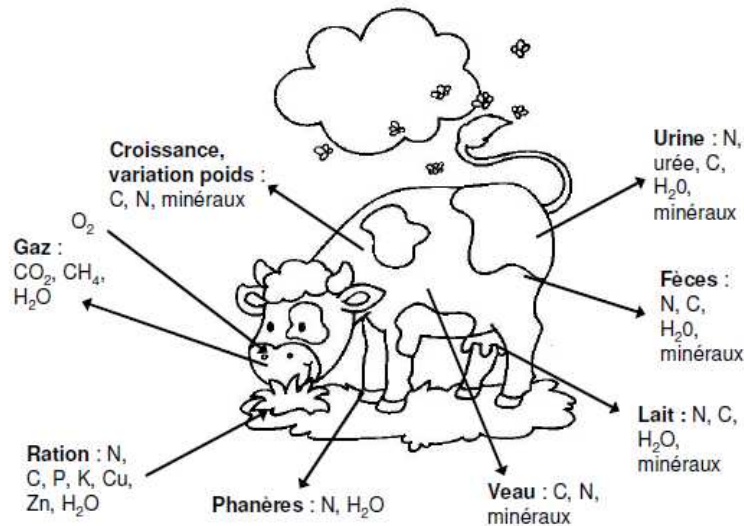
De la même manière, les pertes en éléments peuvent être estimées par la différence entre les entrants (aliment, paille) et les sortants (production, déjections) du système bâtiment, préalablement recensés. Les pertes sous forme gazeuses peuvent provenir des animaux et des déjections. Par conséquent, *un bilan de masse pour le Carbone (C) a été réalisé à l'échelle du bâtiment :*

$$\text{Perte C} = C_{\text{ingéré}} + C_{\text{litière}} - C_{\text{lait}} - C_{\text{croissance}} - C_{\text{gestation}} - C_{\text{mobilisation}} - C_{\text{déjections}}$$

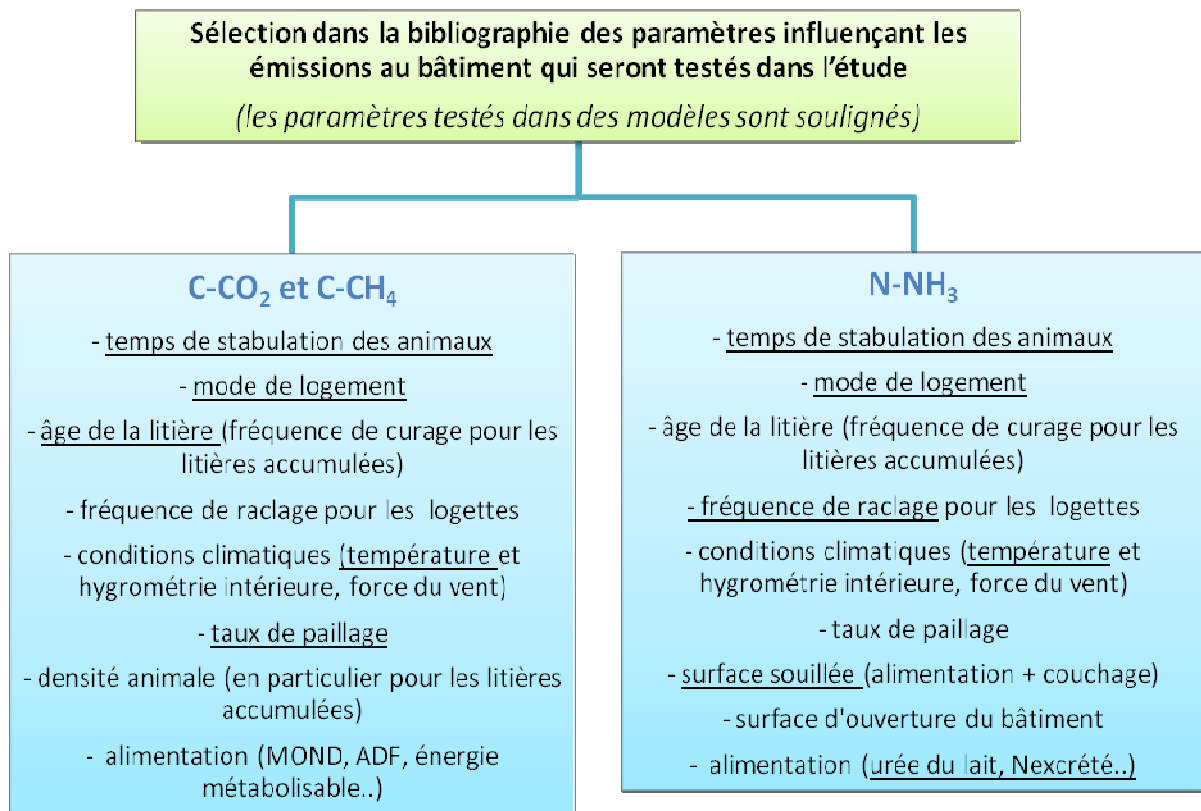
Pour calculer les émissions à l'échelle du bâtiment, il est nécessaire de tenir compte des éléments émis par les animaux mais il faut aussi estimer les émissions provenant des déjections qui peuvent stagner plus ou moins longtemps dans le bâtiment. La stagnation des déjections est propice à la volatilisation des éléments gazeux (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>...) et modifie la composition de l'effluent qui sort du bâtiment. Pour estimer les quantités de carbone dans les déjections sortant du bâtiment, des références sur les quantités et compositions des déjections produites sont utilisées. Lorsqu'il y a plusieurs types de déjections dans le même bâtiment, des références sur la répartition des déjections en fonction du mode de logement sont utilisées (Figure 18 et Annexe X). Pour être cohérent avec les références de quantités de carbone sortantes, des références de quantités de paille entrantes selon le mode de logement sont utilisées pour les calculs (Annexe X).

En ce qui concerne les quantités de carbone relatives à l'ingestion et la production des vaches laitières, il est nécessaire d'utiliser les modèles de calcul de *bilan de masse à l'échelle de l'animal*. Dans le cadre de cette étude, *le modèle de Maxin-INRA* (2006) a été utilisé pour

**Figure 19 : Bilan des entrées et sorties des principaux éléments chez la vache laitière (Maxin G., 2006)**



**Figure 20 : Schéma de sélection des paramètres influençant les émissions de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et NH<sub>3</sub> qui seront testés**



calculer les bilans de masse des principaux éléments polluants chez la vache laitière soit le Carbone (C), l'Azote (N), le Phosphore (P), le Potassium (K) et l'Eau (H<sub>2</sub>O) (Figure 19). Les bilans à l'échelle de l'animal comme le décrit Maxin peuvent se résumer de la manière suivante :  $X_{\text{ingéré}} = X_{\text{lait}} + X_{\text{croissance}} + X_{\text{gestation}} + X_{\text{mobilisation}} + X_{\text{urine}} + X_{\text{fèces}} + X_{\text{gaz}}$  (cf. Annexe XI). Pour réaliser ces bilans, plusieurs données d'élevage sont nécessaires selon les catégories d'animaux : les quantités exprimées en matière sèche des aliments de la ration, l'âge moyen, le gain de poids vif moyen quotidien (GMQ), le poids vif moyen, la quantité de lait produite, les taux butyrique et protéique du lait et le stade de gestation. Certains éléments seront fixés automatiquement en fonction des catégories comme par exemple un GMQ nul pour les animaux adultes.

### II.3.3. Le calcul des émissions de gaz

Pour pouvoir utiliser la méthode simplifiée, on assimile le débit d'air et le volume massique d'air sortant du bâtiment à un coefficient a :

$$E_{\text{gaz}} = \underbrace{Q_{\text{air}} * \rho_i}_{a} * \text{Gradient}_{\text{gaz}} = Q_{\text{air}} * \rho_i * (C_{\text{gaz,int}} - C_{\text{gaz,ext}})$$

Cette simplification applicable à tous les gaz étudiés permet d'obtenir un système d'équations à partir duquel on peut déduire les émissions de C-CH<sub>4</sub> en fonction de celles de C-CO<sub>2</sub> et du rapport de gradients de concentrations :

$$\left. \begin{array}{l} a = E_{\text{C-CO}_2} / \text{Gradient}_{\text{C-CO}_2} \\ a = E_{\text{C-CH}_4} / \text{Gradient}_{\text{C-CH}_4} \\ a = E_{\text{N-NH}_3} / \text{Gradient}_{\text{N-NH}_3} \\ a = E_{\text{N-N}_2\text{O}} / \text{Gradient}_{\text{N-N}_2\text{O}} \end{array} \right\} \begin{array}{l} E_{\text{C-CO}_2} / \text{Gradient}_{\text{C-CO}_2} = E_{\text{C-CH}_4} / \text{Gradient}_{\text{C-CH}_4} \\ \text{On peut en déduire :} \\ E_{\text{C-CH}_4} = E_{\text{C-CO}_2} * (\text{Gradient}_{\text{C-CH}_4} / \text{Gradient}_{\text{C-CO}_2}) \end{array}$$

En reprenant l'équation mettant en relation les pertes en carbone à l'échelle du bâtiment et les émissions de C-CO<sub>2</sub> et C-CH<sub>4</sub>, il est possible d'estimer les émissions de carbone sous forme de CO<sub>2</sub> :

$$\begin{aligned} \text{Pertes C} &= E_{\text{C-CO}_2} + E_{\text{C-CH}_4} = E_{\text{C-CO}_2} (1 + (\text{Gradient}_{\text{C-CH}_4} / \text{Gradient}_{\text{C-CO}_2})) \\ E_{\text{C-CO}_2} &= \text{Pertes C} / (1 + (\text{Gradient}_{\text{C-CH}_4} / \text{Gradient}_{\text{C-CO}_2})) \end{aligned}$$

$$\text{Soit : } E_{\text{C-CO}_2} = \frac{[C_{\text{ingéré}} + C_{\text{lièrre}} - C_{\text{lait}} - C_{\text{croissance}} - C_{\text{gestation}} - C_{\text{mobilisation}} - C_{\text{déjections}}]}{(1 + (\text{Gradient}_{\text{C-CH}_4} / \text{Gradient}_{\text{C-CO}_2}))}$$

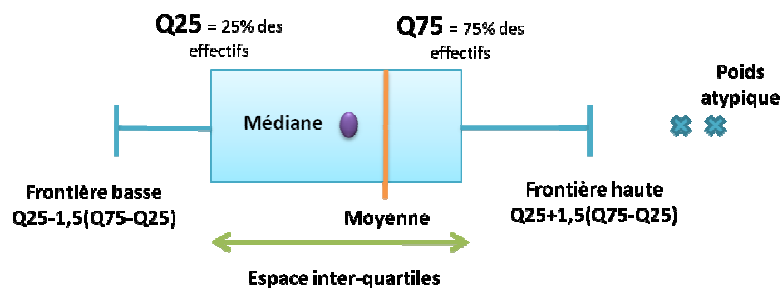
Le CO<sub>2</sub> étant émis en grande quantité par tous les types d'animaux, son gradient de concentration peut être utilisé pour rapporter les gradients de concentrations mesurées des différents gaz :

$$\begin{aligned} E_{\text{C-CH}_4} &= E_{\text{C-CO}_2} * (\text{Gradient}_{\text{C-CH}_4} / \text{Gradient}_{\text{C-CO}_2}) \\ E_{\text{N-NH}_3} &= E_{\text{C-CO}_2} * (\text{Gradient}_{\text{N-NH}_3} / \text{Gradient}_{\text{C-CO}_2}) \\ E_{\text{N-N}_2\text{O}} &= E_{\text{C-CO}_2} * (\text{Gradient}_{\text{N-N}_2\text{O}} / \text{Gradient}_{\text{C-CO}_2}) \end{aligned}$$

### II.3.4. L'étude des facteurs d'influence potentiels sur les émissions

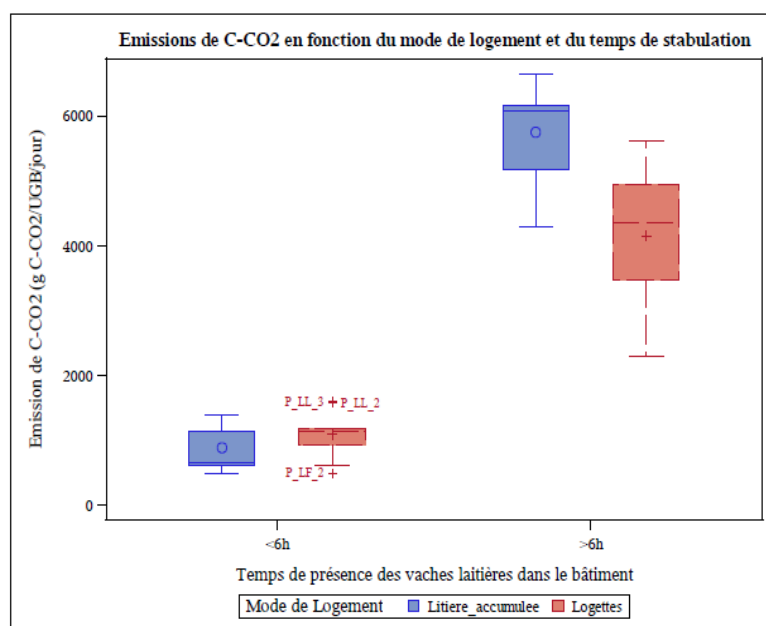
Un inventaire des paramètres pouvant influencer les émissions de gaz en bâtiment a été réalisé à partir des données de la littérature. Au vu du faible nombre de mesures effectuées, des statistiques descriptives ont permis d'éliminer l'étude de certains paramètres. Les paramètres sélectionnés pour une étude approfondie (Figure 20) ont été testés dans des modèles linéaires simples (SAS®) pour pouvoir observer certaines tendances.

**Figure 21 : Légende explicative des boîtes à moustaches**



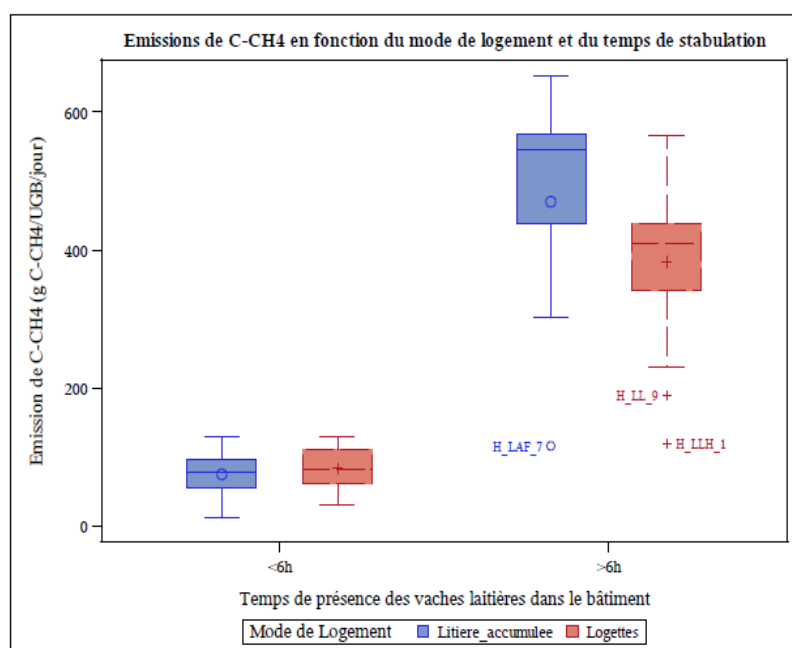
**Figure 22 : Emissions de C-CO<sub>2</sub> calculées en fonction du temps de présence des vaches laitières et du mode de logement**

		Emission de C-CO <sub>2</sub> (g/UGB/j)		
		Effectif	Moyenne	Coefficient de variation
Temps de présence	Mode de logement			
<6h	Litiere_accumulee	9	880,8	39,8
	Logettes	9	1 084,4	34,6
>6h	Litiere_accumulee	9	5 631,2	12,2
	Logettes	17	4 015,7	22,4



**Figure 23 : Emissions de C-CH<sub>4</sub> en fonction du temps de présence de vaches laitières et du mode de logement**

		Emission de C-CH <sub>4</sub> (g/UGB/j)		
		Effectif	Moyenne	Coefficient de variation
Temps de présence	Mode de logement			
<6h	Litiere_accumulee	9	74,8	49,4
	Logettes	9	84,3	40,4
>6h	Litiere_accumulee	9	460,5	34,4
	Logettes	17	344,3	39,4



### III. Résultats

---

L'objectif était de tester l'influence de différents facteurs sur les émissions de gaz en bâtiment. Comme l'a précisé la bibliographie, les émissions de carbone et d'azote calculées ne sont pas sensibles aux mêmes facteurs, ce qui est important à prendre en compte pour interpréter les résultats.

Dans la majorité des bâtiments, les concentrations en N<sub>2</sub>O étaient généralement trop faibles pour être détectées. Comme il existerait une augmentation du risque d'erreur avec de plus faibles concentrations en gaz étudié, il a été décidé de ne pas calculer les émissions pour ce gaz. Par conséquent, *les observations se feront sur les calculs d'émissions de C-CO<sub>2</sub>, C-CH<sub>4</sub> et N-NH<sub>3</sub>.*

Au vu du faible nombre de mesures effectuées, des classes de temps de présence des vaches dans le bâtiment et de modes de logement ont été réalisées. La variable saison (hiver/printemps) n'incluant pas certaines conditions climatiques exceptionnelles, il a été choisi d'utiliser le temps de présence des vaches laitières, divisé en deux classes (>6h ; <6h), pour représenter une période de stabulation permanente ou une période de pâturage. Quant aux modes de logement, ils ont été répartis en deux classes : les logements qui présentent une litière accumulée (LAC, LAF, LAL, PPF) et ceux qui sont en système logettes (LF, LL, LLH). Cette répartition permettra d'interpréter l'effet des paramètres d'intérêt sélectionnés après les statistiques descriptives sur un plus grand nombre de mesures.

#### III.1. Des émissions de carbone principalement liées aux animaux

---

*L'effet du temps de présence des vaches laitières sur les émissions calculées de C-CO<sub>2</sub> et de C-CH<sub>4</sub> est significatif* ( $p^1 < 0,0001$ ) (Figure 21, 22 et 23). Lorsque les vaches laitières sont en stabulation permanente ou quasi-permanente, les émissions de C-CO<sub>2</sub> sont en moyenne de 5,6 kg C-CO<sub>2</sub>/UGB<sup>2</sup>/jour pour des systèmes avec une litière accumulée et en moyenne de 4 kg/UGB/jour en système logettes. Les émissions de C-CO<sub>2</sub> obtenues en période de pâturage sont beaucoup plus faibles : elles sont de l'ordre de 1 kg/UGB/jour quelque soit le mode de logement.

En ce qui concerne les émissions de C-CH<sub>4</sub>, elles sont en moyenne de 0,46 kg/UGB/jour en système litière accumulée et de 0,34 kg/UGB/jour en système logettes. Comme pour les émissions de C-CO<sub>2</sub>, les émissions estivales de C-CH<sub>4</sub> sont beaucoup plus faibles, de l'ordre de 75 à 84 g/UGB/jour.

L'effet de chaque mode de logement n'était pas significatif mais lorsque les systèmes sont regroupés en deux classes « présence de litière accumulée ou non », les résultats montrent que *les émissions carbonées semblent être sensibles à l'existence d'une litière accumulée avec la présence d'un fumier très compact potentiellement émetteur de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>.* En effet, les émissions de carbone sous forme de CO<sub>2</sub> sont significativement plus élevées ( $p=0,0037$ ) dans les bâtiments où il y a une litière accumulée. La significativité n'est pas observée pour les émissions de CH<sub>4</sub> ( $p=0,18$ ) mais la même tendance est remarquable.

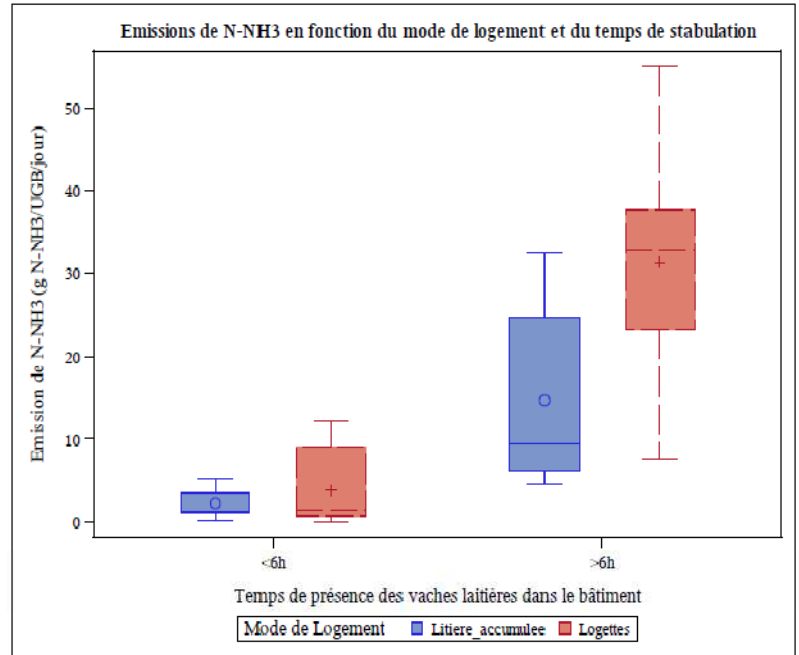
---

<sup>1</sup> Le seuil critique utilisé pour juger de la significativité des résultats est fixé à 5% pour tous les traitements de données effectués

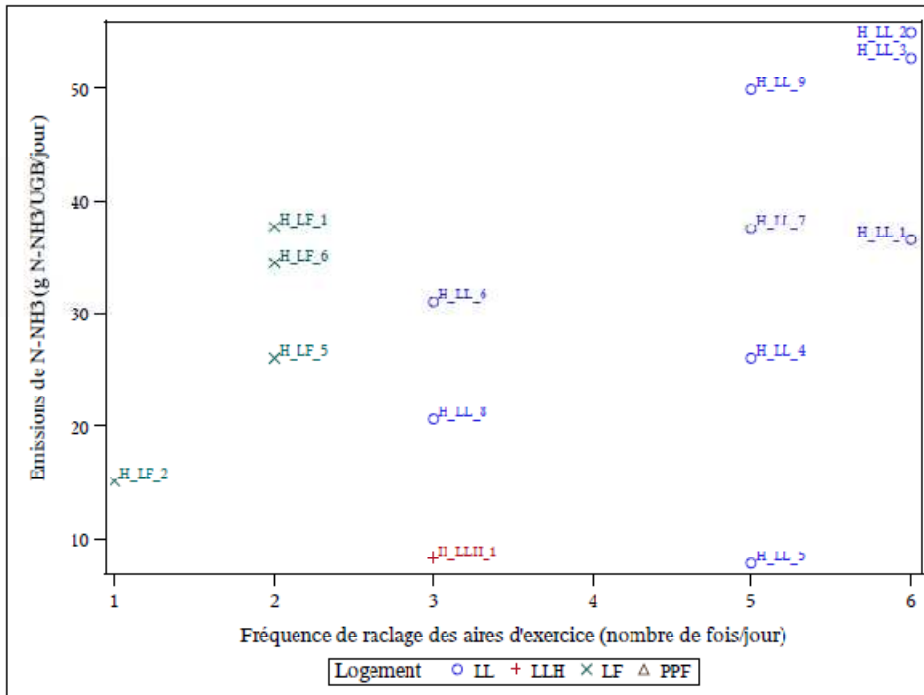
<sup>2</sup> UGB : Unité Gros Bovin (1 UGB = 1 vache laitière en production)

**Figure 24 : Emissions de N-NH<sub>3</sub> en fonction du temps de présence des vaches laitières et du mode de logement**

		Emission de N-NH <sub>3</sub> (g/UGB/j)		
		Effectif	Moyenne	Coefficient de variation
Temps de présence	Mode de logement			
	<6h			
	Litiere_accumulee	5	2,3	92,2
	Logettes	7	3,9	123,8
	>6h			
	Litiere_accumulee	8	18,6	70,8
	Logettes	16	29,0	55,4



**Figure 25 : Effet du mode de logement et de la fréquence de raclage sur les émissions de N-NH<sub>3</sub> dans les bâtiments en système "logettes" en période hivernale.**



- LL** = Logettes couloir raclé lisier
- \* **LLH** = Logettes avec système d'hydrocurage
- LF** = Logettes couloir raclé fumier mou
- PPF** = Pente paillée curée tous les 2 jours

Cependant, les Figures 22 et 23 mettent aussi en évidence la variabilité des émissions mesurées, notamment pendant la période hivernale. Cette variabilité peut être due à l'intervention tardive dans la saison où la diversité des pratiques est plus importante pendant cette phase intermédiaire entre stabulation permanente et mise au pâturage.

D'autre part, la forte variabilité observée sur les bâtiments présentant une litière accumulée est probablement due à l'hétérogénéité des fumiers rencontrés sur les aires paillées dont le fonctionnement est différent selon le taux de paillage, la densité animale, etc.

Comme il a été montré que les émissions de C-CO<sub>2</sub> et de C-CH<sub>4</sub> étaient principalement liées à l'animal, il était plus difficile de mettre en évidence l'effet de facteurs d'influence du bâtiment. Les effets du climat (température et humidité intérieure) sur les émissions ne sont pas significatifs. Les modèles linéaires montrent que le temps de présence des vaches laitières possède un effet prépondérant. L'étude plus précise de l'effet de ces critères nécessiterait des essais avec des choix de gammes de température et d'humidité pour un même temps de stabulation. D'autre part, sachant que des références de taux de paillage sont utilisées pour les calculs, il est difficile de tester les paramètres d'âge de la litière et de densité animale sans prendre en compte la variabilité réelle des quantités de paille entant dans les bâtiments qui ont fait l'objet de mesure. Par conséquent, pour pouvoir réaliser des modèles linéaires plus complets, il faudrait beaucoup plus de mesures sur des gammes de valeurs plus larges.

### III.2. Des émissions d'ammoniac davantage sensibles au mode de logement

---

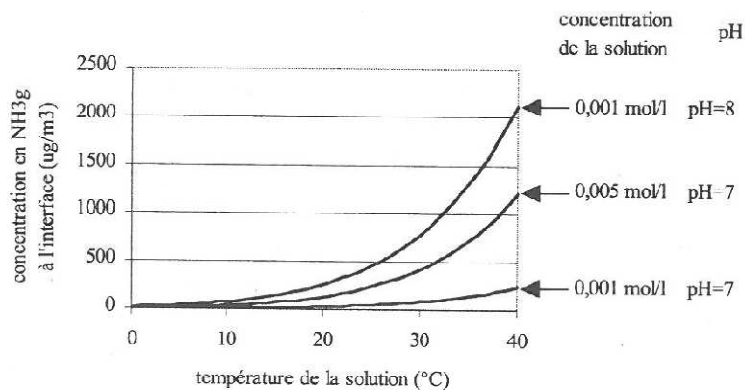
En période hivernale, les émissions azotées sous forme de N-NH<sub>3</sub> sont en moyenne de 18,6 g N-NH<sub>3</sub>/UGB/jour dans les systèmes « litière accumulée » et de 29 g N-NH<sub>3</sub>/UGB/jour en systèmes « logettes » (Figure 24); en période de pâturage plein, elles sont de l'ordre de 2,3g à 3,9g N-NH<sub>3</sub>/UGB/jour pour les systèmes « litière accumulée » et « logettes » respectivement. En période hivernale, **les modes de logement en logettes présentent des émissions significativement plus élevées ( $p=0,01$ ) par rapport aux bâtiments avec une litière accumulée.**

Malgré l'effet significatif du mode de logement sur les émissions de N-NH<sub>3</sub>, il est moins évident de déterminer les paramètres qui rentrent en jeu pour différencier le mode de logement. En comparant les bâtiments en système logettes durant la période hivernale (Figure 25), des fréquences de raclage plus élevées ont tendance à augmenter les émissions de NH<sub>3</sub>. Ce résultat est en contradiction avec l'hypothèse que les émissions de N-NH<sub>3</sub> augmentent avec l'accumulation des déjections sur les aires de vie (Dolle et Robin, 2006). Le résultat obtenu est aussi du à la présence de paille dans les couloirs raclés : en effet, **les bâtiments avec un couloir raclé fumier mou (« LF » sur la Figure 25) présentent des émissions de N-NH<sub>3</sub> plus faibles que les systèmes avec un couloir raclé lisier (« LL » sur la Figure 25) alors que la fréquence de raclage des systèmes « LF » est généralement plus faible.** La paille participerait à réduire les émissions sur les aires de dispersion des déjections. (Robin *et al.*, 2004). En revanche, aucun effet significatif de la fréquence de raclage du couloir d'alimentation n'est observé pour les bâtiments présentant une litière accumulée.

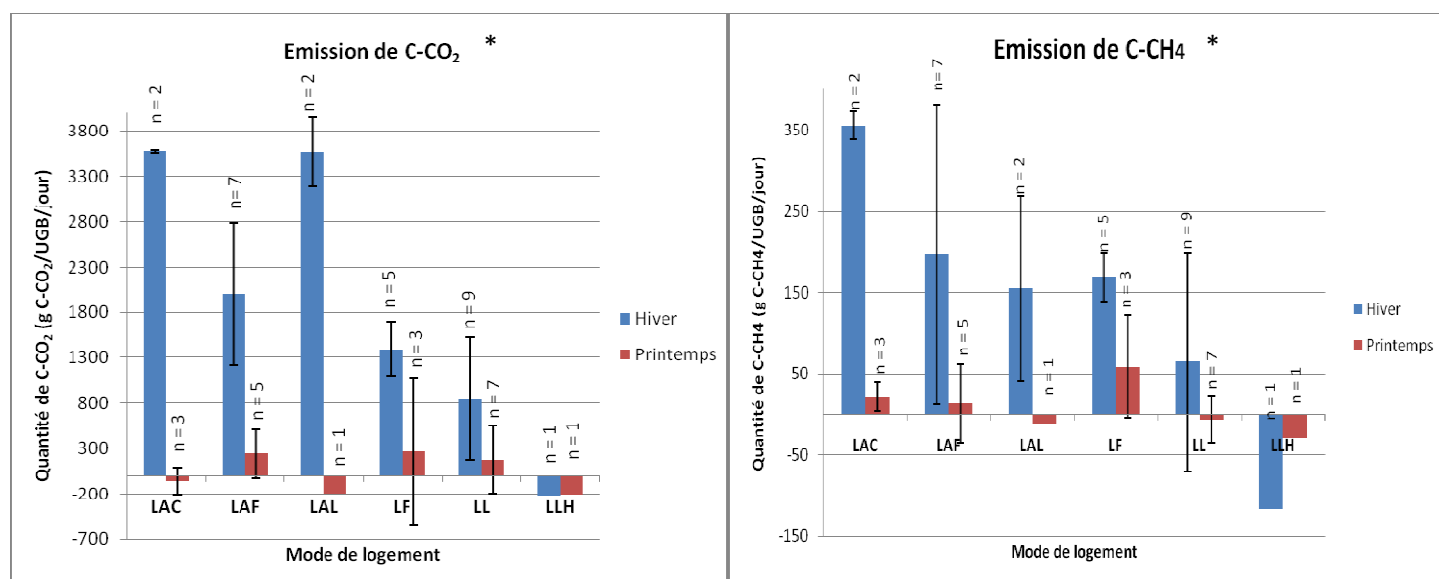
Cependant au sein de chaque catégorie étudiée, **la variabilité des émissions calculées est importante** avec des coefficients de variation supérieurs à 50. Ceci peut s'expliquer d'une part par la nature de l'ammoniac qui est un gaz très volatile et réactif donc plus difficile à mesurer. D'autre part, l'effet du mode de logement et indirectement du type de déjection produite est significatif sur les émissions de N-NH<sub>3</sub>. Or au sein d'une même catégorie de



**Figure 26 : Effet de la température d'une solution d'ammoniac sur la concentration en ammoniac gazeux de l'air en équilibre pour deux valeurs de pH et deux concentrations de la solution (CORPEN, 2001)**



**Figure 27 : Ecart entre les émissions de C-CO<sub>2</sub> et C-CH<sub>4</sub> de la méthode simplifiée et de celles obtenus à partir du modèle de Maxin-INRA (2006) en fonction des modes de logement des vaches laitières**



**LAF** = Litière accumulée couloir raclé fumier mou  
**LF** = Logettes couloir raclé fumier mou  
**LL** = Logettes couloir raclé lisière  
**LLH** = Logettes lisière avec système d'hydrocurage  
**PPF** = pente paillée couloir raclé fumier mou

\* Ecart > 0 : Emissions de la méthode simplifiée > Emissions du bilan Maxin-INRA  
 Ecart < 0 : Emission de la méthode simplifiée < Emission du bilan Maxin-INRA

**Tableau 4 : Récapitulatif des rapports Sorties/Entrées du bâtiment pour les éléments Carbone, Azote, Phosphore, Potassium et Eau**

	Synthèse des rapports Sorties/Entrées				
	Carbone	Azote	Phosphore	Potassium	Eau
Moyenne	1,0	1,0	1,4	1,6	1,1
Ecart-type	0,09	0,26	0,57	0,78	0,41
Minimum	1,0	0,6	0,7	0,7	0,7
Maximum	1,6	2,0	3,2	4,0	2,4
% de rapports non équilibrés (30% d'erreur tolérée)	0,0	7,7	49,0	53,0	17,2
% des rapports surestimés (Sorties>Entrées)	0,0	2,5	49,0	51,0	13,8
% des rapports sous-estimés (Entrées>Sorties)	0,0	5,1	0,0	2,0	3,4

mode de logement, il peut y avoir des différences de proportion et de composition des déjections. La diversité du type de déjection produite au sein d'une même catégorie peut donc aussi expliquer cette variabilité.

Les autres paramètres testés (température intérieure, surface souillée, urée du lait, quantité d'azote excrétée) n'ont pas donné de résultat significatif. En ce qui concerne l'effet de la température, la Figure 26 montre que ce n'est qu'à partir de 20°C que la température de la solution déplace fortement l'équilibre vers une augmentation de la proportion de NH<sub>3</sub> gazeux et par conséquent de la volatilisation (CORPEN, 2001). Or, comme les valeurs de températures intérieures du bâtiment n'ont pas dépassé 22°C quelle que soit la période de mesure, elles se situent sur la partie de la courbe où l'effet est moindre.

---

### III.3. Vérification des résultats d'émissions obtenus

---

#### III.3.1. Comparaison des émissions calculées avec la méthode simplifiée aux émissions calculées à partir du modèle Maxin-INRA

---

Le bilan carbone à l'échelle de l'animal de Maxin-INRA (2006) permet de calculer une estimation des quantités de carbone émises sous forme de C-CO<sub>2</sub> et C-CH<sub>4</sub>. L'émission de CH<sub>4</sub> est calculée à partir des données sur la matière organique fermentescible ingérée tandis que le CO<sub>2</sub> est calculé par différence (Figure 27).

Les émissions résultant des mesures en bâtiment ont été confrontées à ces émissions théoriques provenant des bilans de masse à l'échelle de l'animal. ***En période hivernale, les émissions de C-CO<sub>2</sub> et C-CH<sub>4</sub> issues des mesures en bâtiment sont plus élevées que les émissions du modèle, quel que soit le mode de logement.*** En effet, comme le bilan de Maxin-INRA est effectué à l'échelle de l'animal, il ne tient pas compte des émissions liées aux déjections dans le bâtiment. La différence est atténuée en période de pâturage plein où le bâtiment n'a plus la fonction de zone de couchage pour les vaches laitières donc la quantité de déjections dans le bâtiment est beaucoup plus faible.

---

#### III.3.2. Étude des bilans de masse des éléments C, N, P, K et H<sub>2</sub>O

---

***L'étude de l'équilibre des bilans de masse à l'échelle du bâtiment est une donnée supplémentaire pour vérifier plusieurs critères*** : l'équilibre de la ration utilisée, la cohérence entre la composition réelle des déjections et la composition de référence utilisée, l'exactitude des données sur la conduite d'élevage etc.

Le phosphore et le potassium sont deux éléments relativement stables qui ne sont pas émis sous forme gazeuse. Les quantités excrétées par les animaux présents dans le bâtiment doivent être retrouvées dans les déjections du bâtiment. Par conséquent, l'équilibre des bilans de masse du phosphore et du potassium permettrait de juger en partie de la justesse des bilans de masse du carbone. Compte-tenu de la difficulté de collecter des données précises en élevage sur l'alimentation, la paille et les déjections, il est considéré que les bilans sont équilibrés lorsque la différence entre les entrées et les sorties du bâtiment est inférieure à 30% (Brachet, 2007).

Alors que les bilans N et H<sub>2</sub>O sont globalement équilibrés, la différence entre les quantités de P et K entrantes et sortantes du bâtiment est beaucoup plus importante (Tableau 4). Les résultats sur les bilans P et K montrent que 49% des rapports Sorties/Entrées du bâtiment du phosphore et 51% des rapports Sorties/Entrées du bâtiment du potassium sont surestimés. ***Cette surestimation est probablement due à l'incertitude sur les données***

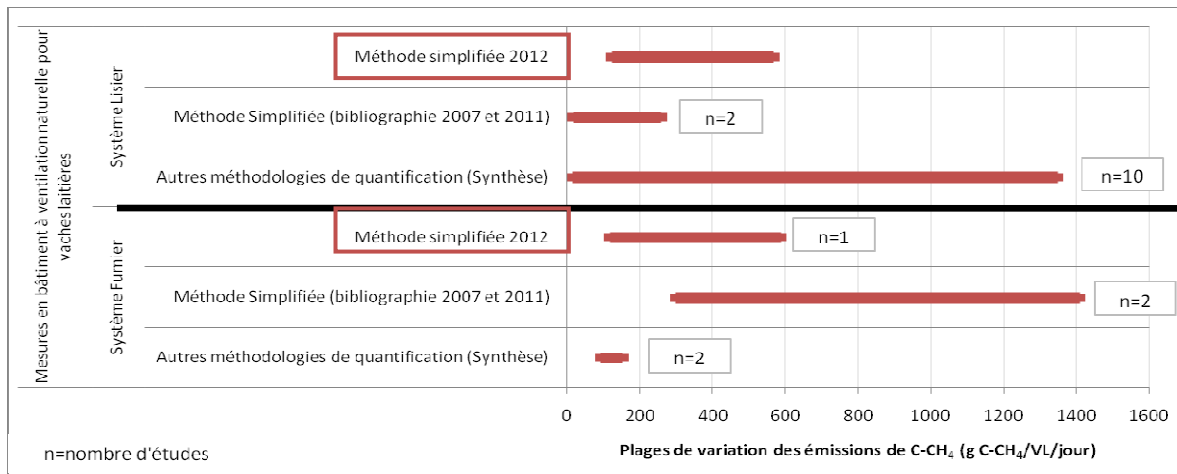


*collectées concernant les minéraux puisque que ce sont de faibles quantités qui ne sont pas toujours connues précisément par l'éleveur. Mais cette surestimation peut être aussi due à la difficulté de mettre en relation les entrées du bilan Maxin-INRA (alimentation, paille) à l'échelle de l'animal avec les données de sorties concernant le bâtiment (quantités et compositions des déjections).* Même au sein des fermes expérimentales où les données concernant l'élevage sont plus précises, plusieurs rapports sorties/entrées du P et K sont aussi surestimés.

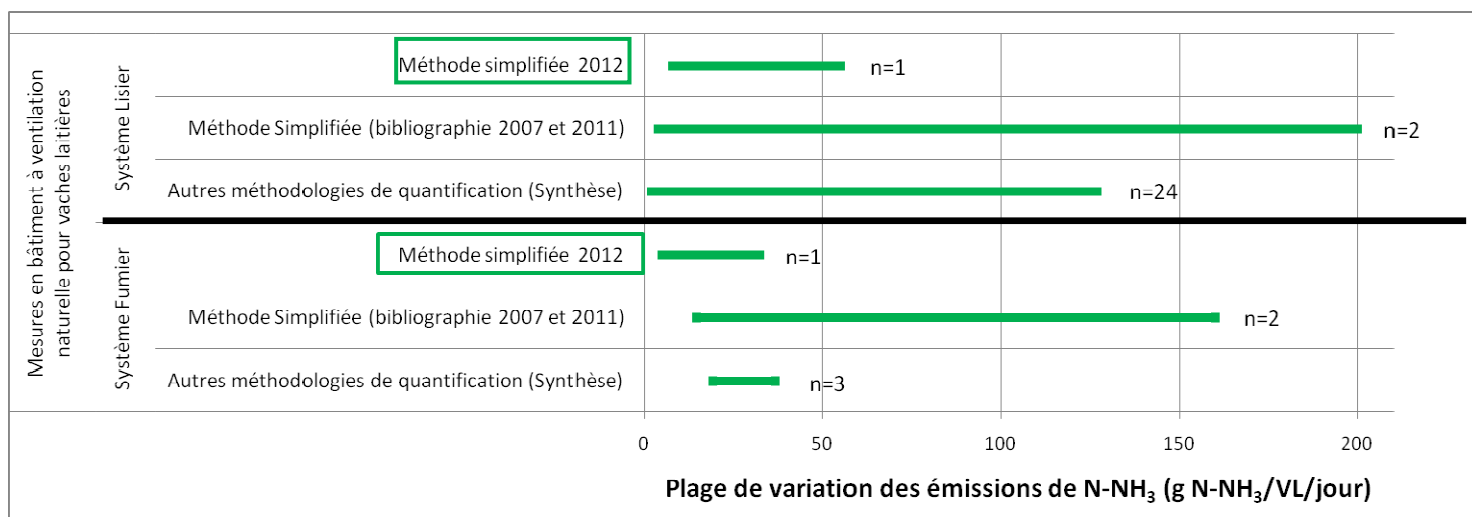
Les quantités entrantes de P et K peuvent être sous-estimées à travers les quantités et la teneur en P et K des aliments de référence sélectionnés dans la table INRA-AFZ (2007). Dans ce cas, il est important de vérifier et d'approfondir la ration mentionnée par l'éleveur. D'autre part, les quantités et compositions de référence utilisées pour les déjections à la sortie du bâtiment peuvent surestimer les quantités de P et K. Dans le cas où un prélèvement de déjection est effectué, il est conseillé de comparer les teneurs en P et K de l'échantillon à celles de référence.

Par conséquent, si le déséquilibre des rapports sorties/entrées des éléments P et K n'est pas seulement du aux références utilisées, cela remet en question la justesse de la perte en carbone calculée. *Si le rapport sorties/entrées de l'élément carbone était aussi surestimé, cela entraînerait une diminution de la perte en carbone et donc une diminution des émissions de gaz calculées.*

**Figure 28 : Comparaison des émissions de C-CH<sub>4</sub> obtenues à celles rencontrées dans la bibliographie : répartition selon la méthodologie utilisée et le système de gestion de déjections**



**Figure 29 : Comparaison des émissions de N-NH<sub>3</sub> obtenues à celles rencontrées dans la bibliographie : répartition selon la méthodologie utilisée et le système de gestion des déjections**



**Tableau 5 : Pourcentage d'azote contenu dans les déjections qui est volatilisé sous forme de N-NH<sub>3</sub> au bâtiment : étude de l'influence du temps de présence des vaches laitières par jour et du mode de logement**

Temps de présence des VL dans le bâtiment	Mode de logement	% d'azote contenu dans les déjections qui est volatilisé sous forme de N-NH <sub>3</sub> au bâtiment				
		Effectif	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
> 6h/jour	Litière accumulée	8	6,21	5,77	1,70	18,29
	Logettes	16	13,26	6,60	3,68	28,51
< 6h/jour	Litière accumulée	5	3,15	3,65	0,38	9,41
	Logettes	7	4,97	7,16	0,13	20,33

## IV. Discussions

---

### IV.1. Analyse des résultats d'émissions obtenus

---

#### Les émissions de C-CO<sub>2</sub> et C-CH<sub>4</sub>

Il existe peu de références dans la littérature sur les émissions de C-CO<sub>2</sub> en bâtiment. Alors que les émissions obtenues dans des systèmes « logettes » sont de l'ordre des résultats trouvés dans l'étude de Brachet (2007) et Chambaut *et al.* (2011), les émissions obtenues avec une litière accumulée sont plus faibles que celles de ces deux études (de l'ordre de -35%).

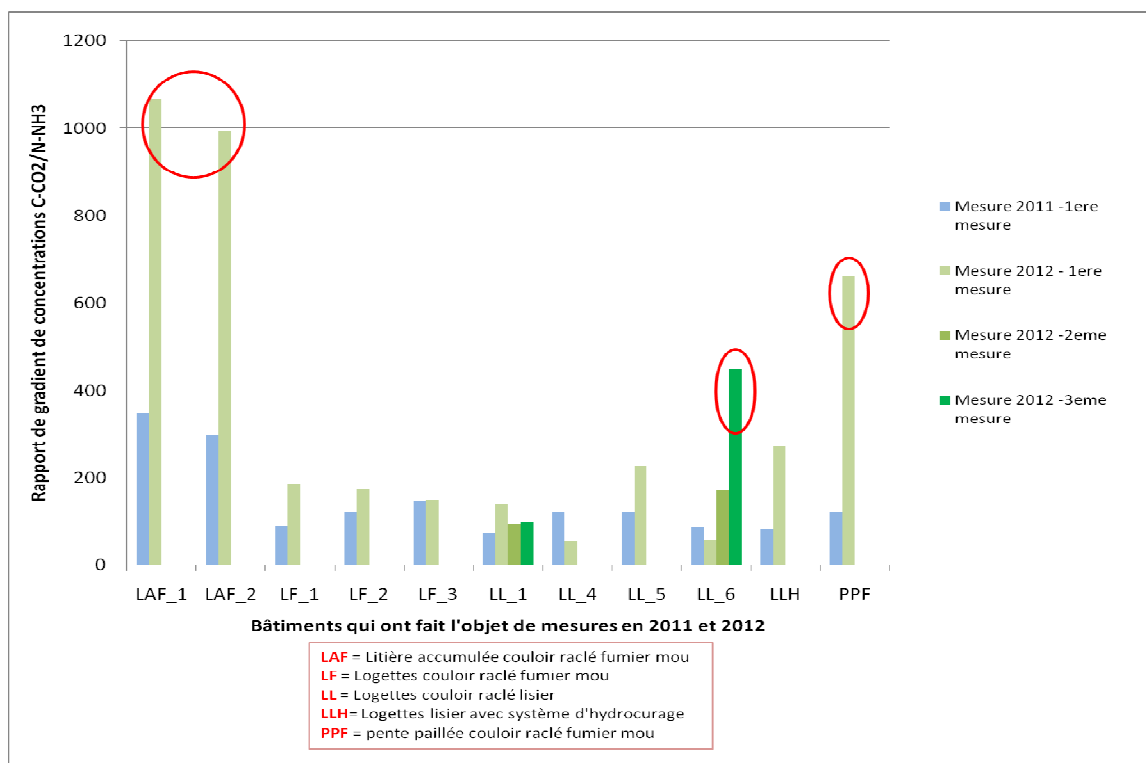
En système « logettes », les émissions de C-CH<sub>4</sub> sont globalement plus élevées que celles des autres études ayant utilisé la méthode simplifiée (Brachet, 2007 et Chambaut *et al.*, 2011) mais elles se situent dans la partie basse de la plage de variation des résultats d'émissions rencontrés avec d'autres méthodes de quantification (Figure 28). En système « litière accumulée », la situation inverse est observée : les valeurs sont globalement plus faibles que celles des études de Brachet (2007) et Chambaut *et al.* (2011) mais les résultats de la méthode simplifiée sont plus élevés que ceux des autres méthodologies.

La variabilité observée sur les émissions de C-CO<sub>2</sub> et C-CH<sub>4</sub> dans les bâtiments ayant une litière accumulée peut être due à la période de mesure et à l'hétérogénéité des litières en termes d'âge et de taux de paillage. D'autres paramètres du bâtiment peuvent avoir une influence sur les émissions carbonées mais ils n'ont pas été mis en évidence dans cette étude. Des études *in vitro* avaient pu montrer que les émissions de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> étaient supérieures de 10 à 20 fois pour le CO<sub>2</sub> et de 100 fois pour le CH<sub>4</sub> aux émissions des déjections (Hartung *et al.*, 1997). Le méthane d'origine entérique qui représente 80% des émissions en bâtiment, peut masquer les effets propres au bâtiment qui seraient minoritaires. Aucune corrélation n'a été trouvée entre la température et les émissions de CH<sub>4</sub> alors que Ngwabie *et al.* (2011) avaient mis en évidence une corrélation négative entre la température intérieure (de 5 à 20°C) et les émissions de CH<sub>4</sub>. En effet, cette corrélation négative serait justifiée par une diminution significative de l'activité des vaches laitières avec l'augmentation de température dans le bâtiment. Par conséquent, il pourrait être intéressant de mesurer l'activité des vaches laitières dans les futurs projets. D'autre part, l'hypothèse d'une augmentation des émissions de C-CH<sub>4</sub> avec l'âge de la litière (Edouard *et al.*, 2012) n'a pas pu être confirmée ici mais peut s'expliquer par l'hétérogénéité des litières accumulées. Ainsi, pour les bâtiments ayant une litière accumulée, il serait préférable de réaliser 3 passages : lors de la 1<sup>ère</sup> semaine d'accumulation, en milieu d'accumulation et lors de la dernière semaine d'accumulation. Pour approfondir l'étude de ce paramètre, il serait intéressant de l'associer à la mesure de la température du fumier (Annexe XIII) qui peut servir d'indicateur de l'activité microbienne.

#### Les émissions de N-NH<sub>3</sub>

La variabilité observée sur les résultats d'émissions de N-NH<sub>3</sub> se retrouve sur l'ensemble des études trouvées dans la littérature (Figure 29). Quel que soit le type de déjections produites, les émissions de N-NH<sub>3</sub> obtenues sont globalement plus faibles que celles obtenues auparavant avec la méthode simplifiée (Brachet, 2007 et Chambaut *et al.*, 2011). Une explication possible de la diminution des émissions est le changement de configuration de l'analyseur qui a permis de diminuer les interférences entre l'ammoniac et d'autres composés volatils. Par ailleurs, la part de l'azote excrété volatilisé sous forme d'NH<sub>3</sub> en bâtiment est en moyenne de 12% en période hivernale mais les valeurs restent très variables inter et intra mode de logement (Tableau 5), ce qui est cohérent avec la littérature. En effet, le facteur d'émission moyen est de 10% de l'azote excrété (Peyraud *et al.*, 2012) mais il peut varier considérablement, allant de 3% (Sommer *et al.*, 2007) à près de 30% pour des rations très riches en azote (Aguerre *et al.*, 2010).

**Figure 30 : Comparaison des rapports de gradients de concentrations C-CO<sub>2</sub>/N-NH<sub>3</sub> entre 2011 (ancienne configuration de l'analyseur) et 2012 (nouvelle configuration de l'analyseur) dans des élevages enquêtés les deux années**



*L'effet de la présence de paille sur les émissions de NH<sub>3</sub>* avait aussi été observé par Gilhespy *et al.* (2009) et Robin *et al.* (2004) dans des bâtiments bovins et porcins respectivement. En effet, la présence de paille sur les aires de vie permettrait de diminuer la surface de contact entre le NH<sub>3</sub> liquide et l'air. En augmentant la quantité de paille distribuée de 33%, les émissions de NH<sub>3</sub> mesurées étaient diminuées de 50%. Les autres paramètres qui faisaient l'objet d'hypothèses n'ont pas pu être mis en évidence dans cette étude. L'absence de corrélation entre la température et les émissions de NH<sub>3</sub> avait été observée par Dollé et Capdeville (2000) alors que Ngwabie *et al.* (2011) avait noté une augmentation significative des émissions de NH<sub>3</sub> avec la température intérieure. L'intensité du renouvellement de l'air dans le bâtiment pouvait cacher l'effet température dans certains cas. Il avait été émis quelques doutes sur *l'augmentation des émissions de NH<sub>3</sub> avec la fréquence de raclage* des couloirs d'exercice rencontrée de cette étude. Les hypothèses formulées expliquant l'intervention d'autres facteurs d'influence sont renforcées par les résultats de Moreira et Satter (2006) qui n'avaient constaté aucun effet de la fréquence de raclage sur les émissions de NH<sub>3</sub>. Sachant que les émissions de NH<sub>3</sub> sont liées aux déjections, il serait intéressant d'estimer le temps entre le dernier raclage des aires bétonnées et la mesure des concentrations en gaz. Ce critère serait alors plus représentatif que la fréquence de raclage pour estimer la quantité de déjection présente sur les aires de vie au moment des mesures ponctuelles.

La confrontation des résultats de cette étude avec ceux de la littérature a pu montrer certaines divergences qui peuvent s'expliquer d'une part par la diversité des bâtiments qui ont fait l'objet d'étude. D'autre part, la variété des méthodes de mesures utilisées tant pour déterminer le débit d'air que les concentrations des gaz explique également l'amplitude des facteurs d'émissions. Enfin, certaines pratiques influençant indirectement les émissions n'ont peut être pas été mises en évidence à l'heure actuelle.

---

## IV.2. Analyse de la méthodologie

---

### IV.2.1 Une méthodologie affinée par rapport aux études précédentes

---

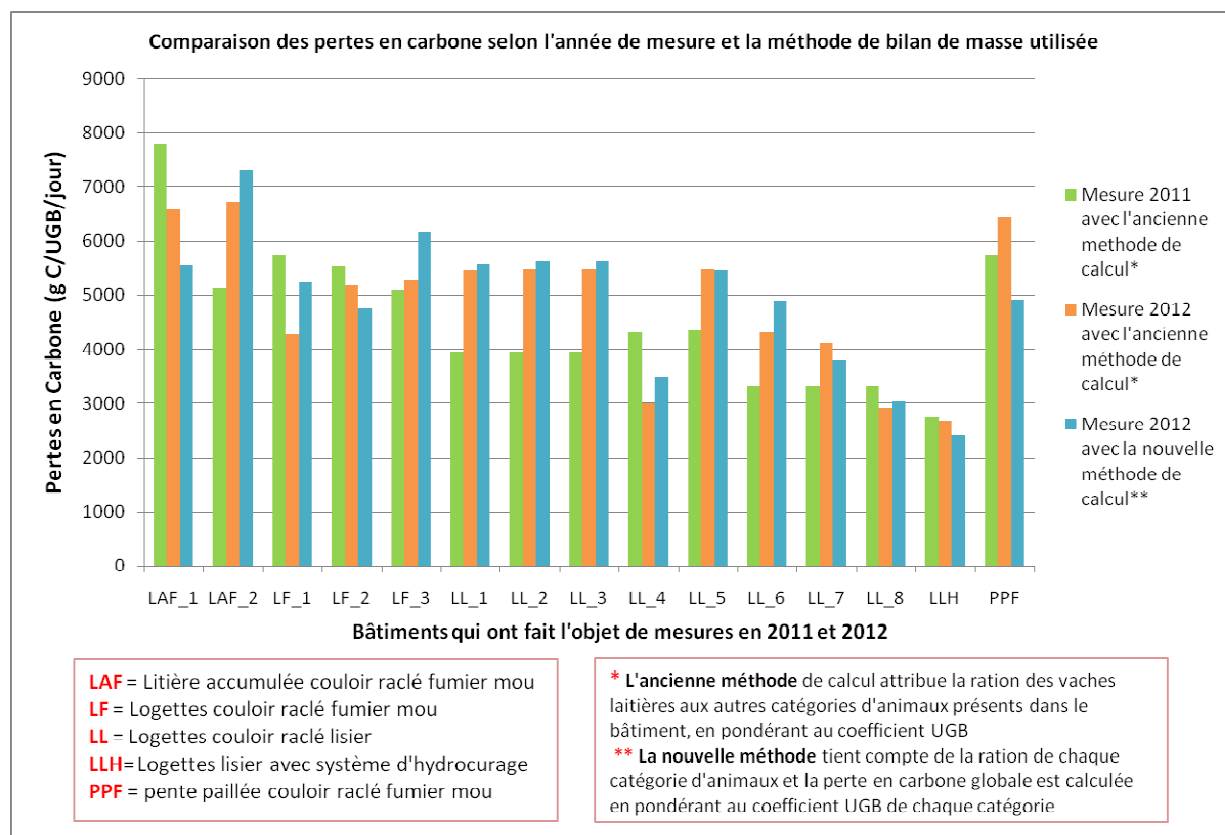
Malgré l'évolution du protocole de la méthodologie, la comparaison des résultats de la méthode simplifiée dans les élevages qui avaient aussi fait l'objet de mesures en 2011, a permis de mettre en évidence certains critères qui méritent réflexion.

Dans le cadre de cette étude, la configuration de l'analyseur a été modifiée avec notamment l'ajout d'un « filtre éthanol » pour limiter les interférences avec l'ammoniac (mis en évidence dans l'étude d'Edouard *et al.*, 2012). Le changement de configuration est notamment remarquable sur l'augmentation des rapports de gradients de concentrations C-CO<sub>2</sub>/N-NH<sub>3</sub>, en particulier pour les bâtiments ayant une litière accumulée (Figure 30). Par conséquent, **le choix de configuration de l'analyseur de gaz est un élément qui mérite réflexion** pour éviter certaines interférences entre les différents gaz étudiés. Dans le cas où les rations/ensilages sont dans le bâtiment ou à proximité de celui-ci au moment des mesures, une configuration spécifique de l'analyseur INNOVA<sup>®</sup> (ajout d'un filtre évitant les interférences entre les composés volatils et l'ammoniac) ou l'utilisation d'une autre technique de mesure des concentrations très sélective est fortement conseillée.

D'autre part, **la méthode de calcul a été affinée pour les bâtiments accueillant d'autres catégories d'animaux que les vaches laitières**. La nouvelle méthode prend en compte les bilans de masse des différentes catégories d'animaux alors que l'ancienne utilisait celui des vaches laitières pondéré au coefficient UGB. Même si les émissions carbonées de



**Figure 31 : Graphique représentant la comparaison des pertes en carbone selon l'année de mesure (2011 et 2012) et la méthode de bilan de masse utilisée**



2011 et 2012 ne sont pas directement comparables du fait de conditions de réalisation différentes d'une année sur l'autre, le changement de méthode est remarquable sur les composantes des pertes en carbone à l'échelle du bâtiment (Figure 31). *Lorsque les deux méthodes sont comparées sur l'année 2012, il est noté que l'ancienne méthode a tendance à surestimer la quantité de carbone ingérée et celle produite, en allouant une ration adaptée à des animaux fortement producteurs à des jeunes bovins aux besoins moins élevés. L'ancienne méthode sous-estimait aussi la quantité de paille entrant dans le bâtiment sachant que les jeunes bovins sont généralement élevés sur des aires paillées intégrale ou partielles.*

Une « analyse de sensibilité » a pu mettre en *évidence le poids de la perte en carbone dans le calcul des émissions*. En effet, une augmentation de 20% de la perte en carbone se répercute automatiquement sur le résultat des émissions de C-CO<sub>2</sub> alors qu'une variation de 20% du rapport de gradients de concentrations C-CO<sub>2</sub>/C-CH<sub>4</sub> ne modifie le résultat que de 2%. Des différences de perte en carbone de plus de 20% ont été observées entre l'ancienne et la nouvelle méthode. Par conséquent, sachant que l'objectif final est d'avoir une perte en carbone la plus juste possible, il semble important de préciser *les quantités de carbone entrantes et sortantes pour chaque catégorie présente dans le bâtiment au moment des mesures*.

Au vu de la variabilité des valeurs rencontrée, il semblerait que *répéter la mesure simplifiée dans un même élevage* permette d'obtenir des données plus robustes. Lorsque les mesures simplifiées sont effectuées trois jours de suite dans un même bâtiment, les pratiques de l'éleveur ne sont peu/pas modifiées : cela permet de juger de la sensibilité de la méthode à des paramètres autres que les interventions de l'éleveur (conditions climatiques, paramètres inconnus, etc.).

---

## IV.2.2. Les limites de la méthode simplifiée

---

### IV.2.2.1. Les limites temporelles et spatiales de la méthode de prélèvement d'air

---

Le principe de prélever des échantillons ponctuels de gaz comme le propose la méthode simplifiée peut poser *la question de la représentativité temporelle des mesures*, que ce soit à l'échelle de la journée mais aussi de la saison. En effet, le prélèvement d'échantillon s'effectue pendant 15 à 20 minutes donc il est possible qu'il ne soit pas complètement représentatif de l'ensemble de la journée. Au vu de la variabilité temporelle observée sur des mesures continues, l'estimation de l'incertitude de la méthode simplifiée devient délicate à cause des mesures intermittentes (ADEME, 2010). Se pose aussi la question de l'heure d'intervention dans la journée : pour ni sous-estimer ni surestimer les émissions de CH<sub>4</sub> et de NH<sub>3</sub>, il était conseillé de réaliser les mesures en dehors des pics d'émissions liés à l'alimentation et l'activité des vaches laitières (Brachet, 2007). Cependant, en période de pâturage, l'opérateur est contraint de réaliser la mesure lorsque les vaches sont en bâtiment, donc généralement au moment de la complémentation avant la mise à l'herbe qui suit. Par conséquent, des prélèvements ponctuels de 20 minutes en période de présence partielle des animaux dans le bâtiment ne semblent pas être recommandés au regard de ces essais. Pour pouvoir valider l'adaptabilité de la méthodologie, il faudrait étudier plus spécifiquement les courbes de décroissance des émissions après la sortie des animaux et les modalités de répartition des éléments du bilan carbone selon la présence des animaux. Pour l'instant, la méthode la plus robuste est de calculer les émissions au prorata du temps de présence dans le bâtiment mais il est possible que cela ne reflète pas totalement la variabilité diurne des émissions au bâtiment. Pour obtenir des prélèvements plus représentatifs temporellement, des



équipes néerlandaises travaillent sur la même méthode mais avec des prélèvements automatiques et intermittents sur 24h en un ou deux points du bâtiment.

La méthode peut aussi atteindre *quelques limites vis-à-vis de la variabilité spatiale* des émissions de gaz à l'échelle du bâtiment. En ce qui concerne les prélèvements de gaz à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment, il est possible qu'il y ait une influence du circuit de l'expérimentateur au moment de la mesure. Parfois, il n'est pas possible de faire le tour entier du bâtiment donc l'expérimentateur doit faire un aller-retour au niveau d'une partie du bâtiment. Si ce circuit correspond à une zone de début ou de fin de ventilation, cela peut influencer les gradients de concentration de gaz. D'autre part, la ventilation du bâtiment peut être à l'origine d'un gradient de gaz sur la hauteur du bâtiment (concentration élevée au niveau du sol et faible au niveau du faîtage par exemple). Le choix arbitraire de faire la mesure simplifiée à 2m de hauteur nécessiterait des essais complémentaires pour vérifier l'absence d'effet de la hauteur de la zone de prélèvement dans le bâtiment sur les concentrations de gaz mesurées. Dans le cas contraire, il faudrait envisager de faire des prélèvements à différentes hauteurs.

#### *IV.2.2.2. Des incertitudes sur la méthode de calcul*

---

La méthode de calcul a pu être affinée à l'échelle des pertes en carbone (IV.2.1.). Néanmoins, même si la méthode a été testée dans des fermes expérimentales où les données collectées étaient plus précises, l'incertitude de certaines données collectées (par exemple la quantité et composition des effluents) nécessite d'utiliser des données de référence qui ne sont pas toujours représentatives des situations réelles rencontrées. D'autre part, avec la méthode des bilans de masse à l'échelle du bâtiment, il est possible qu'il y ait une légère surestimation des émissions de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O sachant que le carbone et l'azote peuvent s'échapper sous la forme d'autres molécules (par exemple sous forme de N<sub>2</sub> pour l'azote).

#### *IV.2.3. Confrontation aux autres méthodologies de quantification des émissions de gaz en bâtiment*

---

Le travail bibliographique qui avait été effectué dans les études précédentes a permis de constituer une base de données sur les émissions de GES et de NH<sub>3</sub>. Le traitement de cette base de données a permis de comparer les résultats de cette étude avec ceux rencontrés dans la littérature, mais aussi de rendre compte de l'incertitude remarquable de chaque méthode de quantification (Annexe XIV). En ce qui concerne les émissions de C-CO<sub>2</sub> en système lisier, les résultats de la méthode simplifiée sont largement inférieurs à ceux des méthodes de mesures continues plus fréquemment utilisées. Ce n'est pas le cas des émissions de C-CH<sub>4</sub> et N-NH<sub>3</sub> qui restent dans l'ordre de grandeur des autres méthodes de mesure en système lisier. Pour les systèmes produisant du fumier, les émissions de C-CH<sub>4</sub> sont en moyenne deux fois inférieures à celles rencontrées lors de mesures continues avec l'utilisation d'un gaz traceur.

Même si actuellement, les méthodes de mesures continues avec utilisation d'un gaz traceur et d'un bilan de masse du CO<sub>2</sub> sont considérées comme des méthodes couramment utilisées à l'échelle mondiale, la variabilité des résultats observés pour chaque méthode de mesure montre qu'il n'existe pas de réelle méthode de référence. Cette constatation constitue une difficulté supplémentaire pour interpréter les résultats de la méthode simplifiée et de valider son application. En effet, il n'est pas évident de juger si la mesure directe ou indirecte du débit d'air est plus ou moins fiable que l'utilisation de la perte en carbone à l'échelle du bâtiment comme c'est le cas dans la méthode simplifiée.



## Conclusion

---

L'objectif de cette étude était d'appliquer la méthode simplifiée dans différents systèmes d'élevage laitiers français afin d'évaluer s'il existe un effet du mode de logement, des pratiques en bâtiment et d'alimentation sur les émissions gazeuses de ce poste. **Les résultats d'émissions obtenus ont permis de confirmer certaines hypothèses** avec notamment l'influence du temps de stabulation des vaches dans le bâtiment. Par conséquent, la différence de fonctionnement des bâtiments bovins en fonction de la saison est un élément important à prendre en compte pour étudier des facteurs d'émission à l'échelle de l'année. Même si les émissions carbonées sont principalement dues aux animaux présents dans le bâtiment au moment des mesures, la présence d'une litière accumulée semble être une source supplémentaire de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>. D'autre part, les émissions de NH<sub>3</sub> sont aussi sensibles au mode de logement avec des émissions accrues en système lisier. **La variabilité observée au sein d'un même type de logement rend difficile la mise en évidence de l'influence de paramètres plus fins** et nécessiterait plus de données pour obtenir des facteurs d'émissions de chaque mode de logement étudié. Ces derniers, utilisés pour l'évaluation environnementale, doivent s'appuyer sur des résultats plus robustes dans le cadre de proposition de mesures de réduction d'émissions. Un projet de bâtiment s'établit sur une vision à long terme et par conséquent, les investissements à faire doivent justifier que le changement technique garantit une réduction des émissions sans mettre en difficulté le système de production.

Les résultats présentés sont focalisés sur le poste bâtiment pour pouvoir préciser les facteurs d'émissions de ce segment. Néanmoins, **ces résultats doivent être replacés dans le contexte du système d'exploitation** où il existe d'autres postes d'émissions, comme le stockage des déjections. En effet, il est observé relativement plus de volatilisation en bâtiment en système lisier et au stockage pour le fumier, d'où l'importance d'avoir une vision globale de l'exploitation (Peyraud *et al.*, 2012).

L'évaluation de cette méthode aboutit à la nécessité de réaliser certains compromis. D'une part, l'utilisation de la méthode simplifiée a pu mettre en évidence qu'il y avait **un certain nombre de facteurs pouvant influencer le résultat final**. L'incertitude du calcul des émissions imposerait donc de réaliser des prélèvements s'étalant davantage dans le temps et d'avoir les informations les plus précises possibles sur les pratiques réalisées dans le bâtiment considéré. D'autre part, l'objectif de cette méthodologie était de simplifier les autres méthodes qui étaient lourdes et coûteuses. Par conséquent, la poursuite de l'évaluation de la méthode simplifiée devra permettre de déterminer les seuils de précision et de répétitions répondant au mieux aux objectifs de cette nouvelle méthode. Ainsi, l'application de la méthode simplifiée en bâtiment vaches laitières nécessiterait encore des travaux d'adaptation pour être appliquée en élevage bovin allaitant où l'intervention d'un opérateur extérieur au niveau des aires de vie des animaux est plus délicate et où les paramètres concernant l'alimentation et la production des animaux sont moins bien renseignés et connus.

L'évaluation de la méthode simplifiée sera poursuivie dans la deuxième partie du projet EM2B via sa comparaison à des mesures continues mises en place pour tester deux modes de logement (lisier vs. fumier) combinés avec des régimes azotés différents. En effet, l'alimentation est un paramètre d'influence non négligeable sur les rejets qui doit être maîtrisé pour limiter les pertes à chaque poste d'émission de l'exploitation. La globalité de ces projets permettra d'acquérir des connaissances sur les émissions du poste bâtiment qui seront intégrées dans des études environnementales plus vastes et d'aboutir à des modèles de prévision de rejets.



## Références bibliographiques

---

ADEME (2010). Procédures de référence pour la mesure des émissions de polluants gazeux des bâtiments d'élevage et stockages d'effluents d'élevage, 6 décembre 2010, 519 p.

Adviento-Borbe M.A.A., Wheeler E.F., Brown N.E., Topper P.A., Graves R.E., Ishler V.A., Varga G.A. (2010). Ammonia and greenhouse gas flux from manure in freestall barn with dairy cows on precision fed rations, *Transactions of the ASABE*, 53, pp. 1251-1266.

AGRESTE (2006). Enquête bovine au 1er novembre 2001 - Bâtiments d'élevage. *Collection Chiffres et Données - Série Agriculture n°175*, janvier 2006, 50 p.

Aguerre M.J., Wattiaux M.A. Hunt T., Larget B.R. (2010). Effect of dietary crude protein on ammonia-N emission measured by herd nitrogen mass balance in a freestall dairy barn managed under farm-like conditions. *Animal*, 4 (8), pp 1390-1400.

Amon, B., Boxberger, J., Amon, T., Zaussinger, A., Pöllinger, A. (1997). Emission data of NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub> N<sub>2</sub>O from fattening bulls, milking cows and during different ways of storing solid manure. In: EurAgEng (Ed.): Ammonia and Odour Control from Animal Production Facilities, Symposium, 6.-10. October 1997, Vinkeloord, The Netherlands, pp 397-404.

Benchaar C., Rivest J., Pomar C. and Chiquette J. (1998). Prediction of methane production from dairy cows using existing mechanistic models and regression equations. *Journal of Animal Science*. 76, pp. 617-627.

Bodet J.M, Hacala S, Aubert C., Texier C. (2001). Fertiliser avec les engrais de ferme. Ed. Institut de l'Elevage, ITAVI, ITCF, ITP. 105 p.

Brachet A. (2007). Mise au point d'une méthode simplifiée de mesure des émissions de gaz à effet de serre dans les bâtiments d'élevage bovin adaptée au contexte français, Mémoire de fin d'étude, ESA d'Angers, 107 p.

Capdeville J., Tillie M. (1995). L'ambiance dans les bâtiments d'élevage bovin, ovin, caprin et équin, Institut de l'élevage, Paris, 64 p.

Chambaut H., Moussel E., Pavie J., Coutard J.P., Galisson B., Fiorelli J.L., Leroyer J. (2011). Profils environnementaux des exploitations d'élevage bovins lait et viande en agriculture biologique en conventionnelle : enseignements du projet cedABio, *Rencontres Recherches ruminants*, 18, pp 53-56.

Circulaire DEPSE/SDEA n° 2001-7047 du 20/12/01 relative à la capacité de stockage des effluents d'élevage et à l'application de la réglementation des installations classées relatives aux élevages (BO min. Agr. n°52, 28 décembre 2001).

CITEPA (2010). Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France. Séries sectorielles et analyses étendues, 312 p.

CITEPA (2012). Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France. Séries sectorielles et analyses étendues, Format SECTEN, 336 p.

CORPEN (2001). Les émissions d'ammoniac d'origine agricole dans l'atmosphère – Etat des connaissances et perspectives de réduction des émissions. *Ministère de l'agriculture et de la pêche, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement*. 110 p.





CORPEN (2007). Substances relatives à l'acidification, l'eutrophisation et à la pollution photochimique – Emissions dans l'air en France métropolitaine. Mis à jour en France Métropolitaine. CITEPA, Paris. 17 pp.

Demmers T.G.M., Burgess L.R., Short J.L., Phillips V.R., Clark J.A., Wathes C.M. (1998). First experiences with methods to measure ammonia emissions from naturally ventilated cattle buildings in the UK. *Atmospheric Environment*. **32** (3), pp. 285-293.

Demmers T.G.M., Burgess L.R., Phillips V.R., Clark J.A., Wathes C.M. (2001). Assessment of techniques for measuring the ventilation rate, using an experimental building section. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **79** (1), pp. 107-116.

Dolle J.B., Capdeville J., Matinez J., Peu P. (2000). Emissions d'ammoniac en bâtiment et au cours du stockage des déjections en élevage bovin. Institut de l'élevage, Août 2000, 71 p. Compte-rendu n°9993304.

Dolle J.-B., Robin P. (2006). Emissions de gaz à effet de serre en bâtiment d'élevage bovin. In : Journées AFPP – Prairies, élevage, consommation d'énergie et GES, 27-28 mars 2006, 10 p.

Dolle J.-B., Duyck J.-B. (2007). Les consommations d'énergie en bâtiment d'élevage bovin. Collection résultats Institut de l'élevage, Département Technique d'Elevage et Qualité, Service Bâtiment-Environnement, 138 p. Compte-rendu final n° 050733008, N°ISBN : 978-2-84148-313-4.

Dore C.J., Jones B.M.R., Scholtens R., Huis in't Veld J.W.H., Burgess L.R., Phillips V.R. (2004). Measuring ammonia emission rates from livestock buildings and manure stores Part II: Comparative demonstrations of three methods on the farm, *Atmospheric Environment*, **38**, pp. 3017-3024.

Edouard N., Charpiot A., Hassouna M., Faverdin P., Robin P., Dollé J.-B. (2012). Ammonia and greenhouse gases emissions from dairy cattle buildings : slurry vs. farm yard manure management systems, *Colloque EMILI*, 10 au 13 juin 2012, Saint-Malo, France, 11 p.

Fiedler A.M., Müller H.G. (2011). Emissions of ammonia and methane from a livestock building natural cross ventilation, *Meteorologische Zeitschrift*, **20**, pp. 59-65.

Gilhespy S.L., Webb J., Chadwick D.R., Misselbrook T.H., Kay R., Camp V., Retter A.L., Bason A. (2009). Will additional bedding in buildings housing cattle and pigs reduce ammonia emission? *Biosystems Engineering*, **102** (2), pp.180-189.

Grainger C., Clarke T., McGinn S.M., Auldist M.J., Beauchemin K.A., Hannah M.C., Waghorn G.C., Clark H., Eckard R.J. (2007). Methane emissions from dairy cows measured using the sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) tracer and chamber techniques, *Journal of Dairy Science*, **90**, pp. 2755–2766.

Groenestein C.M., Huis In 't Veld J.W.H. (1994). Practical research into ammonia emissions from animal houses XV : straw bed house for sucking cows (in dutch). Directorate for agricultural research (DLO). Report 94-1006, Wageningen, 14 p.

Groot Koerkamp P.W.G. and Uenk G.H. (1997). Climatic conditions and aerial pollutants in and emissions from commercial production systems in the Netherlands. In: *Voermans JAM & Monteny (Eds.) Ammonia and odour control from animal production facilities. Proceedings of the International Symposium*. Research station for pig husbandry (PV). Rosmalen, pp.139-144.

Hacala S. (2004) : Rapport d'avancement n°1 : Evaluation des émissions de gaz à effet de serre et stockage de carbone dans les exploitations bovines, Institut de l'Elevage & Ademe, 100 p. Compte rendu n°043314.



Hartung E., Jungbluth T., Brose G. (1997). Ammonia and greenhouse gas emissions from dairy barns. ASAE Annual International Meeting, Minneapolis, Minnesota. paper n° 974127.

Hassouna M., Robin P., Brachet A., Paillat J.M., Dollé J.B., Faverdin P. (2010). Development and validation of a simplified method to quantify gaseous emissions from cattle buildings. CIGR XVII<sup>th</sup> World Congress – Québec City, Canada, June 13-17, 2010.

Hindrichsen I.K., Wettstein H.R., Machmüller A., Jörg B., Kreuzer M. (2005). Effect of the carbohydrate composition of feed concentrates on methane emission from dairy cows and their slurry. *Environ. Monit. Assess.* 107, pp. 329-350.

INRA (2007). Alimentation des bovins, ovins, caprins. Besoins des animaux, valeur des aliments. Editions Quae, 310 p.

Institut de l'élevage (2001). Protocole pour la mesure de la température des litières par l'éleveur, 1p.

Institut de l'élevage et Chambres d'Agriculture du Grand Ouest (2003). Les bâtiments des vaches laitières. *Document réalisé dans le cadre du Réseau Bâtiment des Chambres d'Agriculture de l'Ouest (ISBN 2-84148-049-6)*

IPCC (1996): Greenhouse Gas Inventory Reporting Instructions. Eds. : Houghton J., Meira Filho L.G., Lim B., Treanton K., Mamaty I., Bonduki Y., Griggs D.J. and Callender B.A.. *Volume 1. IPCC/OECD/IEA. UK Meteorological Office, Bracknell.*

Jeppsson K.-H., Ngwabie N.M., Nimmermark S., Gustafsson G. (2010). Greenhouse gas emissions from naturally-ventilated dairy cow barns. In : Greenhouse Gases and Animal Agriculture Conference 2010.

Jouany J.P. and Martin C. (2003). Enteric methane and CO<sub>2</sub> emissions by ruminants. Carbo-Europe-GHG. In : *Agricultural Greenhouse Gas Budget (SS2) and Grasslands Greenhouse Gas Budget (SS3)*, September, 4th and 5th 2003, Clermont-Ferrand, France.

Kavolelis B. (2006). Impact of animal housing systems on ammonia emission rates, *Polish Journal of Environmental Studies*, 15 (5), pp. 739-745.

Kreuzer M. and Hindrichsen I.K. (2006). Methane mitigation in ruminants by dietary means : The role of their methane emission from manure, *International Congress Series*, 1293, pp. 199-208.

Maxin G. (2006). Modélisation entrée/sortie des éléments carbone, azote, eau et minéraux chez la vache laitière. Mémoire de fin d'études, ÉSITPA, 120 p.

Mills J.A.N., Dijkstra J., Bannink A., Cammel S.B., Kebreab E., France J. (2001). A mechanistic model of whole-tract digestion and methanogenesis in the lactating dairy cow: model development, evolution and application. *Journal of Animal Science*, 79, pp. 1584-1597.

Monteny G.J., Erisman W. (1998). Ammonia emission from dairy cow buildings: a review of measurement techniques, influencing factors and possibilities for reduction. *Netherlands Journal of Agriculture Science*, 46, pp. 225-247.

Monteny G.J., Smits M.C.J., Van Duinkerken G., Mollenhorst H., Boer I.J.M. (2002). Prediction of ammonia emission from dairy barns using feed characteristics Part II : relation between urinary urea concentration and ammonia emission, *Journal of Dairy Science*, 85, pp. 3389-3394.



Moreira V.R. et Satter D. (2006). Effect of scraping frequency in a freestall barn on volatile nitrogen loss from dairy manure. *Journal of Dairy Science*, 89, pp 2579-2587.

Mosquera J., Hol J.M.G., Monteny G.J. (2006). Gaseous emissions from a deep litter farming system for dairy cattle. *International Congress Series*, 1293, pp 291-294.

Ngwabie N.M., Jeppsson K.H., Nimmermark S., Swensson C., Gustafsson G. (2009). Multi-location measurements of greenhouse gases and emission rates of methane and ammonia from a naturally-ventilated barn for dairy cows, *Biosystems Engineering*, 103, pp. 68-77.

Ngwabie N.M., Jeppsson K.H., Gustafsson G., Nimmermark S. (2011). Effects of animal activity and air temperature on methane and ammonia emissions from a naturally ventilated building for dairy cows, *Atmospheric environment*, 45, pp 6760-6768.

Pedersen S., Takai H., Johnsen J.O., Metz J.H.M., Groot Koerkamp P.W.G., Uenk G.H., Phillips V.R., Holden M.R., Sneath R.W., Short J.L., White R.P., Hartung J., Seedorf J., Schröder M., Linkert K.H.H., Wathes C.M. (1998). A comparison of three balance methods for calculating ventilation rates in livestock buildings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 70 (1), pp. 25-37, ISSN 0021-8634.

Paillat J.M., Robin P., Hassouna M., Callarec J., Toularastel P. (2005). Environmental assessment of composting pig slurry with wheat straw based on the Guernévez process. *Proc. Conference " International Workshop on Green Pork Production"*, Paris, France.

Pedersen S., Sällvik K. (2002). Heat and moisture production at animal and house levels. CIGR, 4<sup>th</sup> Report of working group on Climatization of Animal Houses, 46 p.

Pelchen A., Peters K.J., Holter J.B. (1998). Prediction of methane emissions from lactating dairy cows. *Arch.Tierz. Dummerstorf*, 41 (6), pp. 553-563.

Pereira J., Fanguero D., Misselbrook H., Chadwick D.R., Coutinho J., Trindade H. (2011). Ammonia and greenhouse gas emissions from slatted and solid floors in dairy cattle houses: A scale model study, *Biosystems Engineerings*, 109, pp. 148-157.

Peyraud J.-L., Cellier P., Donnars C., Réchauchère O. (2012). Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA, France, 68 p.

Phillips V.R., Bishop S.J., Price J.S., You S. (1998). Summer emissions of ammonia from a slurry-based, UK, dairy cow house. *Bioresource Technology*, 65, pp. 213-219.

Pollet I., Christiaens J., Van Langenhove H. (1998). Determination of the ammonia emission from cubicles houses for dairy cows based on a mass balance, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 71, pp. 239-248.

Robin P., Hassouna M., Texier C. (2004). Emissions d'ammoniac et de protoxyde d'azote des porcs engraisés sur litière de paille, *Journées Recherche Porcine*, 36, pp. 63-70.

Samer M., Loebstin C., Fiedler M., Ammon C., Berg W., Sanftleben P., Brunsch R. (2011). Heat balance and tracer gas technique for airflow rates measurement and gaseous emissions quantification in naturally ventilated livestock buildings, *Energy and Buildings*, 43, pp 3718-3728.

Sauvant D., Jouany J.P., Giger-Reverdin S., Vermorel M., Fonty G. (1999). Production de méthane par les ruminants : analyse des processus, quantification et modélisation, spatialisation et bilans, possibilités de réduction des émissions. In : *Bilan et gestion des GES dans l'espace rural* –



*Colloque national organisé avec le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Paris, 18-19 mai 1999. p. 70-86.*

Schrade S., Keck M., Hartung E. (2008). Measurement of ammonia emissions in naturally ventilated cattle housings with an exercise yard : selection of relevant accompanying parameters. In: Proceedings of the International Conference on Agricultural Engineering AgEng2008 22-25 June 2008, Hersonissos, Greece, 8p.

Shibata M., Terada F., Kurihara M., Nishida T., Iwasaki K. (1993). Estimation of methane production in ruminants. *Animal Science Technology*, 64, pp. 790-796.

Sneath R.W., Phillips V.R., Demmers T.G.M., Burgess L.R., Short J.L., Welch S.K. (1997). Long term measurements of greenhouse gas emissions from UK livestock building. *Livestock Environment V. Vol I. Proceedings of the fifth international symposium, Minnesota, May 29-31, pp. 146-153.*

Snell H.G.J., Seipelt F., Den Vanweghe H.F.A. (2003). Ventilation rates and gaseous emissions from naturally ventilated dairy houses. *Biosystems engineering*, 86 (21), pp. 67-73.

Sommer S.G., Pedersen S.O., Sorensen P., Poulsen H.D., Moller H.B. (2007). Methane and carbon dioxide emissions and nitrogen turnover during liquid manure storage. *Nutrient Cycling in Agrosystems*, 78 (1), pp. 27-36.

Van Duinkerken G, Smits MCJ, André G, Sebek LBJ, Dijkstra J. (2011). Milk urea concentration as an indicator of ammonia emission from dairy cow barn under restricted grazing, *Journal of Dairy Science*, 94, pp. 321-335.

Van't Ooster A. (1994). Using natural ventilation theory and dynamic heat balance modelling for real time prediction of ventilation rates in naturally ventilated livestock houses. In: World Congress on Agricultural Engineering – International Society of Agricultural Engineers. Merelbeke, Belgium. pp. 1-12.

Vermorel M. (1995). Emissions annuelles de méthane d'origine digestive par les bovins en France. Variations selon le type d'animal et le niveau de production. *INRA – Productions animales*, 8 (4), pp. 265-272.

Vranken E., Claes S., Hendriks J., Darius P., Berckmans D. (2004). Intermittent measurements to determine ammonia emissions from livestock buildings. *Biosystems Engineering*, 88 (3), pp. 351–358.

WRI (2005). World Institute Resources - Navigating the Numbers : Greenhouse Gas Data and International Climate Policy. Auteurs : Baumert K.A., Herzog T., Pershing J. 122 pp.

Yann T., Mayne C.S., Porter M.G. (2006). Effects of dietary and animal factors on methane production in dairy cows offered grass silage-based diets, *International Congress Series - Elsevier*. 1293, pp. 123-126.

Zhang G., Strøm J.S., Li B., Rom H.B., Morsing S., Dahl P., Wang C. (2005). Emission of ammonia and other gases from naturally ventilated dairy cattle buildings, *Biosystems Engineering*, 92 (3), pp. 355-364.





# Annexes

---