



## Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>  
Eprints ID : 17458

**To cite this version :**

Heger, Simon. *Place de la génétique animale parmi les solutions envisagées pour la mitigation des émissions entériques de méthane par les bovins de races allaitantes*. Thèse d'exercice, Médecine vétérinaire, Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse - ENVT, 2016, 190 p.

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: [staff-oatao@inp-toulouse.fr](mailto:staff-oatao@inp-toulouse.fr).

# PLACE DE LA GÉNÉTIQUE ANIMALE PARMIS LES SOLUTIONS ENVISAGÉES POUR LA MITIGATION DES ÉMISSIONS ENTÉRIQUES DE MÉTHANE PAR LES BOVINS DE RACES ALLAITANTES

THESE  
pour obtenir le grade de  
DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

DIPLOME D'ÉTAT

*présentée et soutenue publiquement  
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

*par*

**HEGER Simon**

Né le 16 juillet 1991 à ECULLY (69)

**Directeur de thèse : M. Alain DUCOS**

## JURY

PRESIDENT :  
**M. Patrick CALVAS**

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEURS :  
**M. Alain DUCOS**  
**M. Pierre SANS**

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE  
Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

MEMBRE INVITE :  
**M. Gilles RENAND**

Directeur de recherche INRA à l'unité GABI du Centre de Recherche de Jouy-en-Josas



# Liste des enseignants



Répartition des Enseignants-Chercheurs par Département.

Mise à jour : 06/09/2016

DIRECTRICE : ISABELLE CHMITELIN

ELEVAGE ET PRODUITS/SANTE PUBLIQUE VETERINAIRE	SCIENCES BIOLOGIQUES ET FONCTIONNELLES	SCIENCES CLINIQUES DES ANIMAUX DE COMPAGNIE, DE SPORT ET DE LOISIRS
<p><b>Responsable : M. SANS</b></p> <p><u>ALIMENTATION ANIMALE :</u> M. ENJALBERT Francis, PR Mme PRIYMENKO Nathalie, MC Mme MEYNADIER Annabelle, MC</p> <p><u>EPIDEMIOLOGIE :</u> Mathilde PAUL, MC</p> <p><u>MALADIES REGLEMENTEES-ZOONOSES-MEDECINE PREVENTIVE DES CARNIVORES DOMESTIQUES-DROIT VETERINAIRE :</u> M. PICAUVET Dominique, PR</p> <p><u>PARASITOLOGIE-ZOOLOGIE :</u> M. FRANC Michel, PR M. JACQUIET Philippe, PR M. LIENARD Emmanuel, MC Mme BOUHSIRA Emilie, MC</p> <p><u>HYGIENE ET INDUSTRIE DES ALIMENTS :</u> M. BRUGERE Hubert, PR M. BAILLY Jean-Denis, PR Mme BIBBAL Delphine, MC Mme COSTES Laura, AERC Mme DAVID Laure, MCC</p> <p><u>PATHOLOGIE DE LA REPRODUCTION :</u> M. BERTHELOT Xavier, PR M. BERGONIER Dominique, MC Mme CHASTANT-MAILLARD Sylvie, PR Mme HAGEN-PICARD Nicole, PR M. NOUVEL Laurent-Xavier, MC Mme MILA Hanna, MC</p> <p><u>PATHOLOGIE DES RUMINANTS :</u> M. SCHELCHER François, PR M. FOUCRAS Gilles, PR M. CORBIERE Fabien, MC M. MAILLARD Renaud, MC M. MEYER Gilles, PR</p> <p><u>PRODUCTION ET PATHOLOGIE AVIAIRE ET PORCINE :</u> Mme WARET-SZKUTA Agnès, MC M. JOUGLAR Jean-Yves, MC M. GUERIN Jean-Luc, PR M. LE LOC'H Guillaume, MC</p> <p><u>PRODUCTIONS ANIMALES AMELIORATION GENETIQUE ECONOMIE :</u> M. DUCOS Alain, PR M. SANS Pierre, PR M. RABOISSON Didier, MC</p>	<p><b>Responsable : Mme GAYRARD</b></p> <p><u>ANATOMIE :</u> M. MOGICATO Giovanni, MC M. LIGNEREUX Yves, PR Mme DEVIERS Alexandra, MC</p> <p><u>ANATOMIE PATHOLOGIQUE - HISTOLOGIE :</u> M. DELVERDIER Maxence, PR Mme LETRON-RAYMOND Isabelle, MC Mme BOURGES-ABELLA Nathalie, PR Mme LACROUX Caroline, PR</p> <p><u>BIOLOGIE MOLECULAIRE :</u> Mme BOUCLAINVILLE-CAMUS Christelle, MC</p> <p><u>MICROBIOLOGIE – IMMUNOLOGIE - MALADIES INFECTIEUSES :</u> M. MILON Alain, PR M. BERTAGNOLI Stéphane, PR M. VOLMER Romain, MC Mme BOULLIER Séverine, MC Mme DANIELS Hélène, MC</p> <p><u>BIOSTATISTIQUES :</u> M. CONCORDET Didier, PR M. LYAZRHI Faouzi, MC</p> <p><u>PHARMACIE-TOXICOLOGIE :</u> M. PETIT Claude, PR Mme CLAUW Martine, PR M. GUERRE Philippe, PR M. JAEG Philippe, MC</p> <p><u>PHYSIOLOGIE –PHARMACOLOGIE THERAPEUTIQUE :</u> M. BOUSQUET-MELOU Alain, PR Mme GAYRARD-TROY Véronique, PR Mme FERRAN Aude, MC M. LEFEBVRE Hervé, PR</p> <p><u>BIOCHIMIE :</u> Mme BENNIS-BRET Lydie, MC</p> <p><u>ANGLAIS :</u> M. SEVERAC Benoît, PLPA Mme MICHAUD Françoise, PCEA</p>	<p><b>Responsable : Mme CADIERGUES</b></p> <p><u>ANESTHESIOLOGIE</u> M. VERWAERDE Patrick, MC</p> <p><u>CHIRURGIE :</u> M. AUTEFAGE André, PR M. ASIMUS Erik, MC M. MATHON Didier, MC Mme MEYNAUD-COLLARD Patricia, MC Mme PALIERNE Sophie, MC</p> <p><u>MEDECINE INTERNE :</u> Mme DIQUELOU Armelle, MC M. DOSSIN Olivier, MC Mme LAVOUE Rachel, MC Mme GAILLARD-THOMAS Elodie, MCC</p> <p><u>OPHTALMOLOGIE :</u> M. DOUET Jean-Yves, MC</p> <p><u>DERMATOLOGIE :</u> Mme CADIERGUES Marie-Christine, PR</p> <p><u>IMAGERIE MEDICALE</u> M. CONCHOU Fabrice, MC</p> <p><u>BIOLOGIE MOLECULAIRE :</u> Mme TRUMEL Catherine, PR</p> <p><u>PATHOLOGIE DES EQUIDES :</u> M. CUEVAS RAMOS Gabriel, MC Mme PRADIER Sophie, MC Mme LALLEMAND Elodie, AERC</p>



## Dédicaces - Jury

A Monsieur le Professeur Patrick Calvas, Président du Jury,  
Professeur des Universités en Génétique Médicale et Praticien Hospitalier au CHU de Purpan  
à Toulouse,

Pour avoir accepté de présider le jury de soutenance de ma thèse.

Hommages respectueux.

A Monsieur le Professeur Alain Ducos, Directeur de cette thèse et 1<sup>er</sup> Assesseur du Jury,  
Professeur en Zootechnie à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse,  
Pour m'avoir proposé ce sujet et pour ses précieux conseils lors de la réalisation de ce travail.

Je lui témoigne ma reconnaissance et mon plus profond respect.

A Monsieur le Professeur Pierre Sans, 2<sup>ème</sup> Assesseur du Jury,  
Professeur en Productions Animales à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse,  
Pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury de cette thèse.

Sincères remerciements.

A Monsieur Gilles Renand, Invité au Jury,  
Directeur de Recherche INRA à l'unité GABI (Génétique Animale et Biologie Intégrative) du  
Centre de Recherche de Jouy-en-Josas,

Pour avoir eu la patience de m'accompagner lors de mes premiers pas en génétique, puis de  
me guider avec écoute et franchise au cours de chaque étape de mon travail expérimental.

Je lui témoigne ma gratitude.



## Remerciements

A ma fiancée,

A mes parents,

A ma petite sœur,

A mes grands-parents,

A ma défunte grand-mère,

Leur amour, leur soutien, leur fierté, leur patience et leur implication dans mon épanouissement social et professionnel sont à l'origine de ce premier aboutissement. Malgré la distance, ils m'ont aidé à donner le meilleur de moi-même quand tout allait bien, et à surmonter les épreuves dans les moments de doute. J'essaierai de mettre tous les jours en avant les valeurs qu'ils ont largement contribué à me transmettre, afin que chaque grand événement de ma vie leur procure une aussi douce joie que celle ressentie grâce à ma réussite en école vétérinaire.





# Table des matières

<b>Liste des enseignants</b> .....	3
<b>Dédicaces - Jury</b> .....	5
<b>Remerciements</b> .....	7
<b>Table des matières</b> .....	9
<b>Table des illustrations</b> .....	13
Liste des figures.....	13
Liste des tableaux .....	15
Liste des protographies.....	16
<b>Glossaire des unités et abréviations</b> .....	17
<b>Introduction</b> .....	23
<b>Partie I : Etude bibliographique</b> .....	25
<b>Chapitre 1 : Impact et origines des émissions entériques de méthane</b> .....	25
<b>I. Le méthane, un gaz à effet de serre</b> .....	25
1) <i>Les gaz à effet de serre et leurs conséquences</i> .....	25
2) <i>Rôle du méthane dans le réchauffement climatique dû à l'homme</i> .....	29
<b>II. Place de l'élevage bovin allaitant dans les émissions de méthane</b> .....	35
1) <i>Résumé des principales sources de production de méthane</i> .....	35
2) <i>Impact de l'élevage bovin allaitant</i> .....	37
<b>III. Origines des émissions de méthane par la fermentation entérique des ruminants</b> .....	40
1) <i>Production du méthane</i> .....	40
a) <i>Production dans le rumen</i> .....	40
b) <i>Production dans le gros intestin</i> .....	44
c) <i>Conséquences de cette production de méthane pour l'animal</i> .....	44
2) <i>Transfert du méthane dans l'organisme</i> .....	46
3) <i>Emissions du méthane</i> .....	48
<b>IV. Bilan de l'impact sur l'effet de serre des bovins de races allaitantes et de leurs émissions entériques de méthane</b> .....	51
<b>Chapitre 2 : Mitigation des émissions entériques de méthane : étude des solutions envisagées</b> ..	53
<b>I. Organisation du cheptel bovin allaitant : exemple de la France</b> .....	53
1) <i>Elevages (hors taureaux de reproduction)</i> .....	53
2) <i>Entreprises de sélection (et taureaux de reproduction en élevages)</i> .....	54
<b>II. Quantifier les émissions de méthane par les bovins de races allaitantes</b> .....	56
1) <i>Contexte</i> .....	56
2) <i>Mesures effectuées sur les animaux</i> .....	57
a) <i>Mesures en groupe</i> .....	57

b)	Mesures individuelles.....	58
i.	<i>Mesures directes sur le long terme</i> .....	60
❖	Les chambres respiratoires .....	60
❖	La technique par traceur SF <sub>6</sub> .....	63
ii.	<i>Mesures directes à court terme</i> .....	65
❖	Le GreenFeed .....	66
❖	La technique CO <sub>2</sub> .....	68
iii.	<i>Mesures directes moins recommandées et/ou moins utilisées pour le moment</i> .....	70
iv.	<i>Mesures de paramètres associés</i> .....	71
v.	<i>Conclusion sur les mesures individuelles d'émissions de méthane</i> .....	72
3)	<i>Méthodes alternatives</i> .....	73
a)	Les mesures <i>in vitro</i> .....	73
b)	Modèles d'estimation de la production de méthane .....	75
i.	<i>Le modèle IPCC</i> .....	75
ii.	<i>Les autres modèles</i> .....	76
4)	<i>Synthèse des moyens existants</i> .....	77
5)	<i>Optimisation des méthodes existantes</i> .....	79
<b>III.</b>	<b>Solutions pour la mitigation</b> .....	80
1)	<i>Contexte</i> .....	80
2)	<i>Les solutions ne faisant pas appel à la génétique sur le caractère « méthane »</i> .....	83
a)	Distribution et composition de la ration .....	87
i.	<i>Distribution de la ration</i> .....	87
ii.	<i>Quantité distribuée et teneur en matière organique digestible</i> .....	87
iii.	<i>Proportion et nature des concentrés</i> .....	89
iv.	<i>Nature et qualité du fourrage</i> .....	92
v.	<i>Utilisation de lipides insaturés</i> .....	93
vi.	<i>Apport azoté</i> .....	95
vii.	<i>Utilisation d'algues</i> .....	96
b)	Additifs et biotechnologies.....	96
i.	<i>Extraits de plantes</i> .....	97
❖	Saponines.....	97
❖	Tanins .....	98
❖	Huiles essentielles .....	98
ii.	<i>Composés chimiques</i> .....	99
❖	Nitrates et Sulfates.....	99
❖	Acides organiques .....	100
❖	Composés inhibiteurs de la méthanogenèse .....	101
❖	Antibiotiques ionophores.....	102

iii.	<i>Biotechnologies</i> .....	102
❖	Probiotiques.....	102
❖	Vaccins et anticorps.....	103
❖	Autres biotechnologies envisagées, mais très peu exploitables pour l’instant .....	104
c)	Améliorer la productivité des élevages .....	104
i.	<i>Augmenter le niveau de production pendant les « temps productifs »</i> .....	105
ii.	<i>Réduire la durée des « temps improductifs »</i> .....	106
❖	Les reproducteurs .....	106
❖	Les génisses de renouvellement .....	107
iii.	<i>Maintenir les animaux à leur potentiel</i> .....	108
d)	Bilan .....	109
3)	<i>Apport de la sélection génétique sur le caractère « méthane »</i> .....	111
a)	Rappels et état des lieux .....	111
b)	Outils de sélection des reproducteurs .....	115
i.	<i>Performances mesurées directement sur les animaux et/ou sur leurs apparentés</i> ....	115
ii.	<i>Paramètres « proxy »</i> .....	117
iii.	<i>La génomique</i> .....	121
❖	Quelques rappels de génomique .....	121
❖	Méthodologie d’application la génomique au cas des émissions de méthane.....	125
❖	Premiers résultats disponibles .....	126
❖	Perspectives d’avenir.....	127
c)	Bilan sur l’utilisation du caractère « méthane » pour la mitigation des émissions entériques de méthane .....	128
4)	<i>Adaptation des leviers d’actions aux situations locales et au contexte international</i> .....	130
5)	<i>Bilan général sur la place de la génétique animale parmi les solutions envisagées pour la mitigation des émissions entériques de méthane par les bovins allaitants</i> .....	134
<b>Partie II : Etude expérimentale</b> .....		137
<b>Expérimentation de la possibilité de sélectionner les bovins charolais sur le caractère « méthane » à l’aide de mesures effectuées par des GreenFeed</b> .....		137
<b>I. Intérêts, objectifs et description de l’expérience</b> .....		137
1)	<i>Sélectionner, à terme, des bovins français faiblement émetteurs de méthane</i> .....	137
a)	La France, 9 <sup>ème</sup> producteur mondial de viande bovine .....	137
b)	La Charolaise : première race allaitante française.....	138
2)	<i>Réduire les coûts de mesure et augmenter rapidement la quantité d’informations disponibles mondialement</i> .....	140
a)	Le projet BVE3 : pour un élevage « Bovin-Viande Economiquement et Ecologiquement Efficace ».....	140
b)	Apport de nouvelles données dans le cadre d’un programme international .....	142

<b>II. Matériels et méthodes</b> .....	143
1) <i>Les bovins charolais utilisés</i> .....	143
a) Les taurillons .....	143
b) Les génisses.....	145
2) <i>Les mesures</i> .....	145
a) Poids et ingestion.....	145
b) Les GreenFeed.....	146
c) Mesures complémentaires : temps de rumination, capacité à digérer la MO et « épaisseur de gras ».....	148
3) <i>Utilisation du logiciel SAS et exploitation des mesures</i> .....	150
a) Calculs des valeurs corrigées des paramètres d'efficacité économique et des paramètres « proxy ».....	150
b) Calcul des consommations résiduelles .....	151
c) Calcul des moyennes d'émissions corrigées de méthane .....	151
d) Calculs des corrélations entre paramètres .....	152
e) Calcul des répétabilités.....	153
<b>III. Résultats, interprétations et discussion chez les taurillons</b> .....	153
1) <i>Résultats concernant les émissions de méthane</i> .....	153
a) Effets « lot », « heure », « période de visite » .....	153
b) Variabilités interindividuelles .....	155
c) Corrélations avec les paramètres d'efficacité économique .....	155
d) Répétabilités .....	156
2) <i>Interprétations des résultats présentés et discussion</i> .....	157
<b>IV. Résultats, interprétations et discussion chez les génisses</b> .....	160
1) <i>Résultats</i> .....	160
a) Illustration des effets « lot », « heure » et « période de visite » sur les émissions de méthane .....	160
b) Variabilités interindividuelles des émissions .....	161
c) Corrélations des émissions avec les paramètres d'efficacité économique .....	161
d) Corrélations des émissions avec les potentiels paramètres « proxy » .....	162
e) Répétabilités .....	163
f) Corrélations entre mesures sur 4 semaines et mesures sur 8 semaines .....	163
2) <i>Interprétations des résultats présentés et discussion</i> .....	163
<b>V. Discussion générale et perspectives suite à cette expérience</b> .....	166
<b>Conclusion</b> .....	169
<b>Agrément scientifique</b> .....	172
<b>Bibliographie</b> .....	173
<b>Webographie</b> .....	189

## Table des illustrations

### Liste des figures

Figure 1	: Description schématique du devenir des rayons infrarouges émis par la Terre.....	25
Figure 2	: Mesures et estimations de l'évolution des températures avec et sans l'impact de l'activité humaine.....	27
Figure 3	: Observations de la nette augmentation des concentrations atmosphériques en dioxyde de carbone et en méthane au cours des 800 000 et des 65 dernières années..	29
Figure 4	: Courbes de décroissance de la concentration en CO <sub>2</sub> et en CH <sub>4</sub> au cours du temps et PRG du CH <sub>4</sub> en fonction du nombre d'années après émission.....	33
Figure 5	: Estimation des émissions mondiales de méthane d'origine anthropique en 2010 selon la source.....	35
Figure 6	: Estimation en 2010 et projection pour l'année 2030 des émissions mondiales de méthane d'origine anthropique par source.....	36
Figure 7	: Emissions de méthane selon les catégories de bovins.....	38
Figure 8	: Contribution relative des principales catégories d'animaux d'élevage aux émissions entériques de méthane en France.....	39
Figure 9	: Appareil digestif des bovins.....	40
Figure 10	: Contenu de la panse.....	41
Figure 11	: Chaîne de réaction simplifiée, schématisant la fermentation des glucides végétaux pour aboutir aux acides gras volatils (AGV) et au méthane.....	41
Figure 12	: Principales équations stœchiométriques simplifiées de la fermentation du glucose dans le rumen.....	42
Figure 13	: Impact du pH sur la flore du rumen et sur la production des AGV.....	43
Figure 14	: Représentation des estimations approximatives de la part de production et d'émissions du méthane par les différents systèmes, d'après l'ensemble des données décrites précédemment.....	47
Figure 15	: Mesure de la production de méthane après alimentation chez 4 moutons.....	49
Figure 16	: Mesure des émissions en chambre respiratoire sur des moutons recevant 3 niveaux d'alimentation différents.....	49
Figure 17	: Nombreuses mesures des émissions de méthane chez un bœuf nourri une fois par jour, régime riche en fourrage.....	50
Figure 18	: Diagramme d'une chambre respiratoire à circuit ouvert.....	61
Figure 19	: Mise en place du dispositif pour la technique par traceur SF <sub>6</sub> .....	63

Figure 20 : Concordance observée entre les mesures de CH <sub>4</sub> mesurées en CR et par la technique SF <sub>6</sub> .....	64
Figure 21 : Illustration de l'intérêt de répéter les mesures.....	66
Figure 22 : Le GreenFeed <sup>®</sup> , conçu par l'entreprise C-lock Inc. dans le Dakota du Sud.....	67
Figure 23 : Corrélation des mesures effectuées au LMD avec celles effectuées en chambre respiratoire sur des vaches laitières.....	71
Figure 24 : Postes d'émissions et flux de matières retenus pour l'évaluation de l'impact « gaz à effet de serre ».....	81
Figure 25 : Influence, calculée en intra-expérience, du niveau d'alimentation sur la production de CH <sub>4</sub> en g/kg de MOD.....	88
Figure 26 : Influence, calculée en intra-expérience, de la proportion d'aliment concentré sur la production de CH <sub>4</sub> /kg de MOD.....	89
Figure 27 : Effet de la supplémentation lipidique sur la production de méthane, en fonction des acides gras majeurs de la source lipidique.....	94
Figure 28 : Influence, calculée en intra-expérience, de la teneur en MAT du régime sur la méthanogenèse.....	96
Figure 29 : Schéma bilan de l'utilisation de la RFI comme paramètre « proxy » pour sélectionner des animaux faiblement émetteurs de méthane.....	120
Figure 30 : Illustration de la notion de déséquilibre de liaison.....	122
Figure 31 : Résumé des différentes étapes aboutissant à l'estimation de l'index génomique d'un animal sur un caractère.....	124
Figure 32 : Estimation de la précision des index génomiques en fonction de la taille de la population de référence et de l'héritabilité, pour une population efficace de 150 animaux, et un déséquilibre de liaison parfait entre les SNP et les QTL.....	125
Figure 33 : Représentation schématique de la distribution des intensités d'émission et de l'écart des intensités d'émission pour un produit donné, à l'intérieur d'une région, une zone climatique et un système de production.....	131
Figure 34 : Répartition des vaches charolaises en France, année 2000.....	139
Figure 35 : Baisse du nombre d'observations par jour et par animal en fin de période expérimentale.....	144
Figure 36 : Les tests de calibration et de récupération.....	148
Figure 37 : Illustration de l'influence sur les émissions de méthane des effets « lot », « heure » et « période de visite ».....	154
Figure 38 : Evolution du poids et de la quantité d'aliment ingérée au cours du temps.....	155

## Liste des tableaux

Tableau 1	: Pouvoirs de Réchauffement Globaux des principaux GES sur 100 ans.....	31
Tableau 2	: Les durées de vie dans l'atmosphère de 4 des principaux GES .....	33
Tableau 3	: Résumé des émissions estimées de GES par l'élevage à l'échelle mondiale.....	36
Tableau 4	: Comparaison des principales méthodes de mesures directes individuelles pour les bovins allaitants.....	78
Tableau 5	: Effets de la défaunation sur la population méthanogène et les paramètres fermentaires.....	85
Tableau 6	: Moyens d'accroître la proportion de propionate dans les AGV produits dans le rumen.....	85
Tableau 7	: Effets de la composition de la ration alimentaire sur la concentration des Archaea méthanogènes du rumen.....	90
Tableau 8	: Effets de la composition de la ration sur la diversité des Archaea méthanogènes du rumen.....	91
Tableau 9	: Effets potentiels des principaux leviers d'action sur les émissions de GES.....	110
Tableau 10	: Catégorisation des régions selon le niveau de production et l'intensité d'émission de méthane entérique.....	132
Tableau 11	: Corrélations entre les émissions de méthane et les différents paramètres étudiés chez les taurillons.....	156
Tableau 12	: Etude des corrélations de mesures d'émissions de CH <sub>4</sub> entre quinze semaines.....	157
Tableau 13	: Moyennes d'émissions calculées à partir des valeurs brutes de toutes les génisses....	160
Tableau 14	: Corrélations entre les émissions de méthane, les différents paramètres d'efficacité économique étudiés chez les génisses, et la proportion de condensé ingérée.....	162
Tableau 15	: Répétabilité entre les valeurs obtenues sur les quatre premières semaines et les quatre suivantes.....	163
Tableau 16	: Corrélations entre les moyennes calculées sur 8 semaines et celles calculées sur chacune des périodes de 4 semaines.....	163



## Liste des photographies

Photographie 1 : Chambres respiratoires avec murs transparents, fabriquées à l'Université d'Aarhus (Danemark).....	62
Photographie 2 : Le Gasmét portable.....	69
Photographie 3 : Utilisation du LMD.....	71
Photographie 4 : Prélèvement de jus de rumen sur une « vache hublot ».....	74
Photographie 5 : 3 bovins de race charolaise.....	138
Photographie 6 : Elevage bovin de l'Unité Expérimentale de Bourges.....	141
Photographie 7 : Un taurillon charolais équipé d'un collier Ruminact.....	149

## Glossaire des unités et abréviations

°C : Degré Celcius

Ac : Acétate

AD : *Anno Domini* (après Jésus Christ)

ADEFAC : Association pour le Développement Economique des Filières Animales du Centre

ADN : Acide DésoxyriboNucléique

AG : Acide Gras

AGI : Acides Gras Insaturés

AGV : Acide Gras Volatil

ATP : Adénosine-5'-TriPhosphate

BA : Bovins de races Allaitantes

BC : *Before Christ* (avant Jésus Christ)

BCM : BromoChloroMéthane

BES : BromoEthaneSulfonate

BIOEPAR : Biologie Epidémiologie et Analyse de Risque en santé animale

BL : Bovins de races Laitières

BVE3 : Pour un élevage « Bovin-Viande Economiquement et Ecologiquement Efficace »

CB : Cellulose Brute

CD : Coefficient de Détermination

CFC : ChloroFluoroCarbure

CH<sub>4</sub> : Méthane

CHU : Centre Hospitalier Universitaire

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

CO<sub>2</sub>éq : Voir « éq CO<sub>2</sub> »

CoM : Coenzyme M, 2-mercaptoéthanesulfonate

COP21 : *21th Conference Of the Parties* (21<sup>ème</sup> Conférence des Parties de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques)

CR : Chambre Respiratoire

CV : Coefficient de Variation

EB : Energie Brute

EBV : *Estimated Breeding Value* (valeur génétique estimée)

EPA : (*United States*) *Environmental Protection Agency*

éq CO<sub>2</sub> = CO<sub>2</sub>éq : Equivalent CO<sub>2</sub>, unité standardisée permettant de comparer les effets des GES

ETR : Ecart-Type Résiduel

FAO : *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)

GABI : Génétique Animale et Biologie Intégrative

GEBV : *Genomic Estimated Breeding Value*

GENOE : Coopérative de Génétique et d'Organisation de l'Elevage

GES : Gaz à Effet de Serre

GF : GreenFeed<sup>®</sup>

GIEC : Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat

GLM : *Generalized Linear Model* (modèle linéaire généralisé)

GMQ : Gain Moyen Quotidien

GtCO<sub>2</sub>éq : Gigatonne d'éq CO<sub>2</sub>

H et H<sup>+</sup> : Atome hydrogène et ion hydrogène

h : Héritabilité

H<sub>2</sub> : Dihydrogène

IA : Insémination Artificielle

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

IPCC : *Intergovernmental Panel on Climate Change* (GIEC en français)

IR : Infra-Rouge

IVGTP : *In Vitro Gas Production Technique*

kJ : Kilojoule

LMD : *Laser Methane Detector* (détecteur laser de méthane)

Lsmeans : *Least-Squares Means* (estimation de la moyenne des moindres carrés)

m<sup>3</sup> : Mètre cube

MAT : Matière Azotée Totale

MEEM : Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer

mL : Millilitre

MO : Matière Organique

MOD : Matière Organique Digestible

MoSAR : Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants

MS : Matière Sèche

MSI : Matière Sèche Ingérée = Masse Sèche Ingérée

Mt : Mégatonne

MY : *Methane Yield* (rendement en méthane, c'est-à-dire « production de méthane par quantité d'aliment ingérée »)

N<sub>2</sub>O : Protoxyde d'azote

NA : Niveau Alimentaire

NDF : *Neutral Detergent Fiber*

O<sub>2</sub> : Dioxygène

PCI : Proportion de Condensé Ingérée

PCO : Proportion de Concentrés

PCR : *Polymerase Chain Reaction*

PEM : Prédiction des Emissions de Méthane

pH : Potentiel hydrogène

PMQ : Production de Méthane Quotidienne

ppm : Partie par million

ppmv : Parties par millions en volume

Pr : Propionate

PRG : Pouvoir de Réchauffement Global

Proxy : Paramètre associé

PV : Poids Vif

qPCR : *Quantitative Polymerase Chain Reaction*

QTL : *Quantitative Trait Locus*

r : Corrélation

rép : Répétabilité

RFI : *Residual Feed Intake* (consommation résiduelle)

RUSITEC : *Rumen Simulation Technique*

SAS® : *Statistical Analysis System* (logiciel commercial d'analyses statistiques)

SF<sub>6</sub> : Hexafluorure de soufre

SNP : *Single Nucleotide Polymorphism*

T° : Température

UE : Union Européenne

UMR : Unité Mixte de Recherche

UNEP : *United Nations Environment Programme* (Programme des Nations Unies pour l'Environnement)

USA : *United States of America* (Etats-Unis)

V : Variance

Vitamine B12 : Colabamine





## Introduction

L'effet de serre d'origine humaine, cause majeure du réchauffement climatique, est une problématique essentielle depuis quelques décennies. Les études scientifiques toujours plus abondantes et le relais médiatique qui s'ensuit témoignent de l'impact croissant de ce phénomène sur la société, qui craint les répercussions que pourrait avoir ce réchauffement sur les générations futures. Devant l'ampleur des dangers pouvant être reliés à l'augmentation des températures de la Terre, une mitigation du réchauffement climatique semble indispensable. Ce terme de mitigation est utilisé pour désigner des moyens et des mesures d'atténuation d'effets, par exemple dans le cas d'impacts négatifs sur l'environnement.

L'effet de serre est dû à de nombreux gaz, tous issus d'une multitude de sources. Face à une distribution aussi étalée des émissions de gaz à effet de serre (GES), à la fois entre les pays et entre les secteurs, il serait largement insuffisant de s'attacher à un seul domaine d'activité pour la lutte contre le réchauffement de notre planète. Celle-ci doit reposer sur une action collective, avec une répartition des mesures de réduction à établir entre tous les acteurs mondiaux, dès lors que leur contribution aux émissions n'est pas négligeable.

Le méthane, de formule chimique  $\text{CH}_4$ , est le deuxième GES le plus impliqué dans le réchauffement de la planète derrière le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). La première source de production mondiale de  $\text{CH}_4$  est la fermentation entérique par les ruminants (bovins, ovins...). Beaucoup de personnes ont déjà lu au moins une fois un article de la presse « grand public » mettant en cause « le pet des vaches ». Ce constat est la preuve qu'en plus du réel impact qu'ont les émissions entériques sur le climat, l'image de l'élevage bovin dans la société est ici impliquée. Précisons que, contrairement à ce qui est souvent lu dans la presse, ces gaz sont très majoritairement émis par éruktion, et non par l'intermédiaire des flatulences. En effet, l'exceptionnelle capacité des ruminants à digérer les trois quarts de la cellulose des plantes aboutit en partie à la production de méthane émis dans l'environnement par le nez et par la bouche. Ce rejet du méthane produit par les micro-organismes du tube digestif est appelé « émission entérique ». Bien que du  $\text{CO}_2$  soit également présent dans ces émissions, sa contribution à l'effet de serre via la production entérique est considérée comme négligeable étant donné les puits de carbone présents dans l'environnement des ruminants (Martin et al., 2006).

Par rapport aux autres espèces d'élevage (Vermorel et al., 2008), les bovins participent beaucoup aux émissions entériques de GES, avec un impact significatif des races allaitantes (c'est-à-dire sélectionnées et élevées principalement pour la production de viande). Malgré des engagements gouvernementaux pris sur les GES dans leur ensemble, les mesures spécifiques portant sur les émissions entériques de méthane tardent à se mettre en place. En témoigne



l'exclusion du méthane entérique du champ d'application de la stratégie nationale « bas carbone » en France, le ministère de l'écologie préférant pour l'instant une approche incitative et volontariste pour engager le monde agricole dans des démarches respectueuses de l'environnement (Sénat, 2015 (Web)). Malgré cette production de méthane, l'ancrage des ruminants dans le patrimoine de nombreux pays, leur capacité à pâturer sur certains territoires inexploitable par ailleurs, leur rôle dans la biodiversité et la production d'aliments encore très demandés par le consommateur, et l'emploi direct et indirect lié à leur élevage (au moins 1,3 milliard de personnes, selon Thornton (2010)) sont des paramètres à prendre en compte avant d'initier des actions visant à diminuer leurs émissions de gaz à effet de serre. L'une des solutions repose sur la diminution de la consommation de viande. Cette perspective n'est envisageable que par la modification du comportement et des habitudes de toute une société, ce qui est souvent très long à se mettre en place. Or, d'après les informations fournies par le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (GIEC), il y a urgence à réduire les émissions de GES. Dans cette perspective, l'avantage principal du méthane est qu'il a une durée de vie courte dans l'atmosphère (Johnson et Johnson, 1995). Diminuer les émissions de ce gaz aura donc des effets rapides.

Autre intérêt à réduire la production de méthane par les bovins : sa formation représente une perte d'énergie par rapport à celle ingérée (Johnson et Johnson, 1995). De nombreuses solutions économiquement rentables peuvent ainsi être proposées aux éleveurs. Parmi celles-ci, la génétique, qui vise à favoriser la mise à la reproduction d'individus émettant moins de méthane que les autres, pour que les générations suivantes produisent elles aussi une plus faible quantité de ce GES. Cependant, les connaissances sont actuellement insuffisantes. Une coopération internationale et de nombreuses études vont donc être nécessaires.

Nous allons maintenant observer dans une première partie comment les GES, et notamment le méthane, peuvent avoir un impact sur le réchauffement climatique, puis comment les bovins de races allaitantes participent à son émission. Dans une seconde partie, nous verrons que des recherches sur les moyens de quantifier individuellement ou en groupe les émissions de méthane sont en cours, ce qui est indispensable pour étudier les mécanismes physiologiques et les paramètres génétiques associés à la production de ce gaz. Nous pourrions alors discuter de la place de la sélection génétique parmi les solutions proposées pour la mitigation des émissions entériques. Enfin, puisque les chercheurs manquent encore de données sur les moyens de mesure du méthane émis et sur la capacité de la génétique à contribuer à une baisse de sa production, nous apporterons dans une troisième partie de nouvelles informations obtenues par des mesures au GreenFeed® sur des bovins charolais, dans le cadre du projet INRA BVE3 (Institut National de la Recherche Agronomique, pour un élevage « Bovin-Viande Economiquement et Ecologiquement Efficace ») auquel j'ai participé.

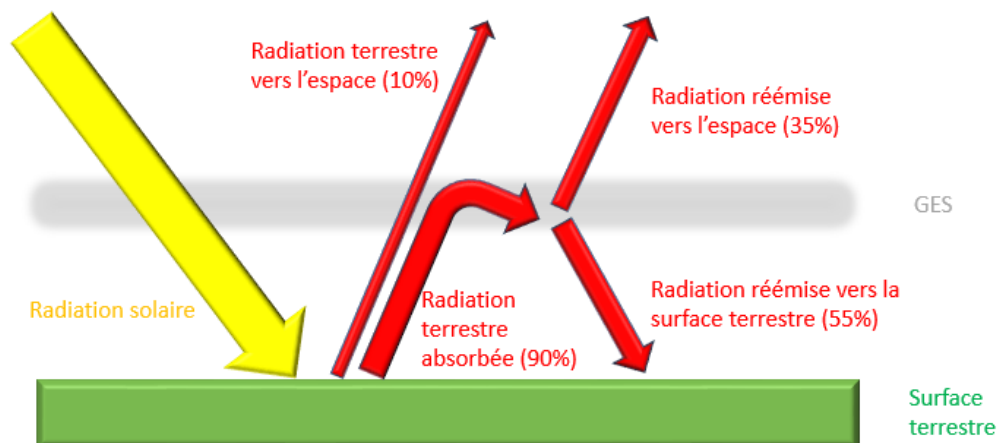
# Partie I : Etude bibliographique

## Chapitre 1 : Impact et origines des émissions entériques de méthane

### I. Le méthane, un gaz à effet de serre

#### 1) Les gaz à effet de serre et leurs conséquences

A l'origine, l'effet de serre est un phénomène naturel et indispensable à l'équilibre de la vie sur Terre telle que nous la connaissons aujourd'hui. En effet, un gaz à effet de serre (GES) est un gaz qui va intercepter dans l'atmosphère une certaine proportion du rayonnement infrarouge (IR) émis par la Terre (Vermorel, 1995). Or, d'après le CNRS<sub>a</sub> (Centre National de la Recherche Scientifique), 2002 (Web), alors que 10% de ces rayonnements vont directement dans l'espace (figure 1), 90% vont être absorbés puis réémis à une longueur d'onde légèrement plus élevée vers l'espace (39% de l'énergie émise par l'atmosphère) et vers notre planète (61%). Ces radiations retournant vers la Terre vont augmenter la température de la surface terrestre de 33°C environ, pour une moyenne aux alentours de 15°C au lieu des -18°C auxquels la nature serait confrontée sans l'effet de serre (ENS Lyon (Ecole Normale Supérieure de Lyon), 2003 (Web)). En 2008, nous ne connaissons encore aucun organisme capable de se reproduire en dessous de -12°C (Prieur, 2008), preuve du rôle indispensable de l'effet de serre. De plus, la nuit, malgré l'absence de rayonnement solaire, les températures restent clémentes grâce à celui-ci (CNRS<sub>a</sub>, 2002 (Web)).



Les pourcentages sont exprimés par rapport à la radiation IR terrestre totale.

Figure 1 : Description schématique du devenir des rayons infrarouges émis par la Terre

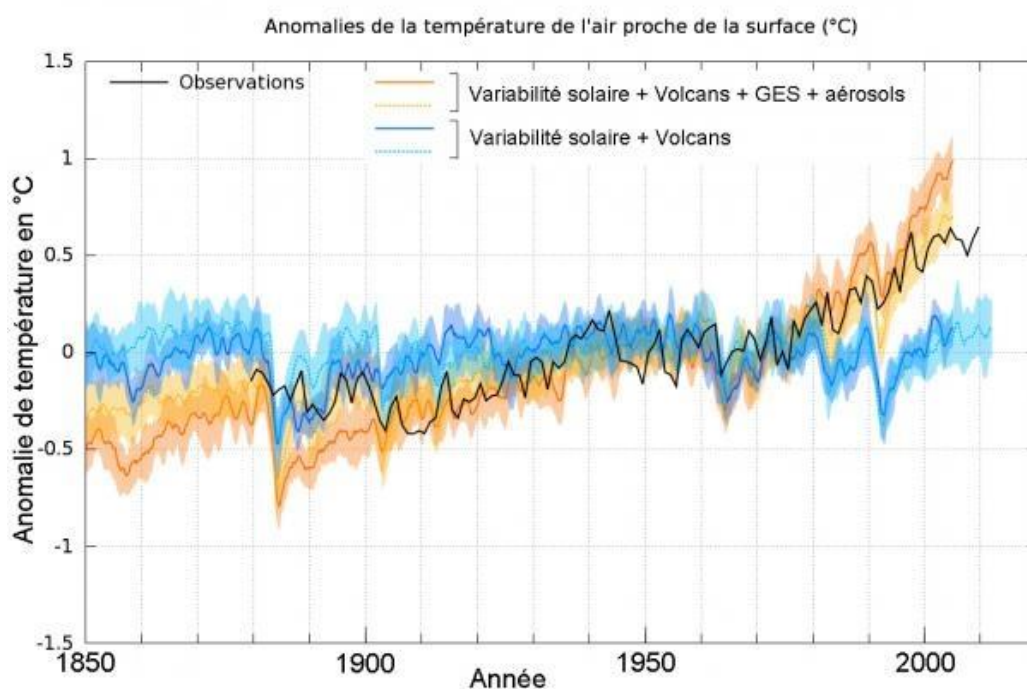
Cependant, comme pour l'immense majorité des phénomènes naturels, la résultante bénéfique de l'effet de serre repose sur un équilibre à conserver. Ce n'est plus le cas depuis quelques décennies. Selon Urban (2015), une augmentation de 2°C des températures mondiales

d'ici la fin du siècle pourrait menacer la survie sur Terre de 5,2% des espèces. 2,8% sont déjà menacées d'extinction et, selon ce même auteur, une augmentation de température de 4,3°C conduirait alors 16% des espèces à entrer dans cette catégorie. Mais les conséquences ne s'arrêtent pas là. Retrait des glaciers, élévation du niveau de la mer, insécurité alimentaire dans certaines régions, impact sur les coraux par augmentation de l'acidité de l'eau due à l'accumulation de CO<sub>2</sub>, etc. sont autant d'effets déjà visibles du dérèglement climatique (GIEC, 2014).

Des mesures politiques, aux répercussions économiques plus ou moins importantes, ont été et vont encore être prises dans le but de limiter l'impact des GES d'origine anthropique sur notre planète. Après le Sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992 qui avait pour objectif de stabiliser les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre en prenant en compte la responsabilité différenciée des pays industrialisés et des pays en développement, une conférence de l'ONU (Organisation des Nations Unies) sur le climat à Kyoto en 1997 a réuni 159 pays s'accordant sur un protocole visant à réduire de 5,2% les émissions annuelles des pays industrialisés avant 2012. Ce protocole, entré en vigueur en 2005, n'a pas été ratifié par l'un des pays les plus émetteurs : les Etats-Unis (USA). En 2007, le Grenelle de l'environnement a eu pour but d'aboutir à l'élaboration d'un plan d'action destiné à refonder la politique de l'écologie en France, puis, en 2008, le « paquet énergie climat » adopté par le conseil européen visait entre autres à diminuer de 20% les émissions de GES avant 2020. En 2014, Ségolène Royal a présenté en juillet un projet de loi prévoyant une réduction de 40% des GES français d'ici 2030, le Conseil de l'Union Européenne (UE) a adopté en octobre le « paquet énergie climat 2030 » ayant le même objectif, et les USA et la Chine, représentant 45% des émissions mondiales, ont enfin trouvé un accord en novembre les engageant à réduire de 26 à 28% les émissions pour les USA d'ici 2025, et à commencer la réduction à partir de 2030 pour la Chine. Le dernier grand rendez-vous en date a eu lieu à Paris, en décembre 2015, accueillant la 21<sup>ème</sup> Conférence des parties de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (appelée la « COP21 »), et visant à maintenir le réchauffement mondial en deçà de 2°C, voire 1,5°C, d'ici 2100 (Convention-cadre sur les changements climatiques (2015) approuvée par l'UE et 195 autres Etats, dont les USA et la Chine). Nous remarquons ici que la mobilisation politique s'accroît au cours du temps, avec des décisions prises aux échelles nationale, européenne et mondiale. Malgré cette mobilisation, la politique a pour l'instant du retard sur les avancées de la science en ce qui concerne le climat. Par exemple, nous observons que le protocole de Kyoto n'impose des objectifs légaux qu'à un ensemble de pays à l'origine de seulement 13,4% des émissions de GES (UNEP (Programme des Nations Unies pour l'Environnement, 2012), cité par Gerber et al. (2013)). Les rapports du Groupe

Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (GIEC) sont de plus en plus alarmants, et de plus en plus clairs en ce qui concerne la responsabilité de l'Homme dans le réchauffement climatique.

Après une hausse de température ( $T^\circ$ ) de  $0,85^\circ\text{C}$  entre 1880 et 2012, les différents scénarii établissant l'augmentation des  $T^\circ$  en fonction des politiques adoptées par les Etats de tous les continents prédisent des valeurs allant de  $+0,3^\circ\text{C}$  à  $+4,8^\circ\text{C}$  en 100 ans par rapport aux températures de la fin du siècle dernier (GIEC, 2013). Selon le GIEC, il est sûr à 95% que l'activité humaine soit la cause principale du réchauffement observé depuis 1900, avant tout à cause de ses émissions de GES d'une part, et de substances détruisant la couche d'ozone d'autre part. Tous ces chiffres suivent une tendance d'implication croissante du rôle de l'Homme dans le réchauffement climatique. En effet, dans le rapport de 2001, la probabilité d'implication principale de l'activité humaine n'était que de 66% et la prévision maximale d'augmentation de la  $T^\circ$  ne devait pas excéder  $3,6^\circ\text{C}$ . La figure 2, proposée par le CNRS<sub>b</sub> (Web), nous permet deux observations :

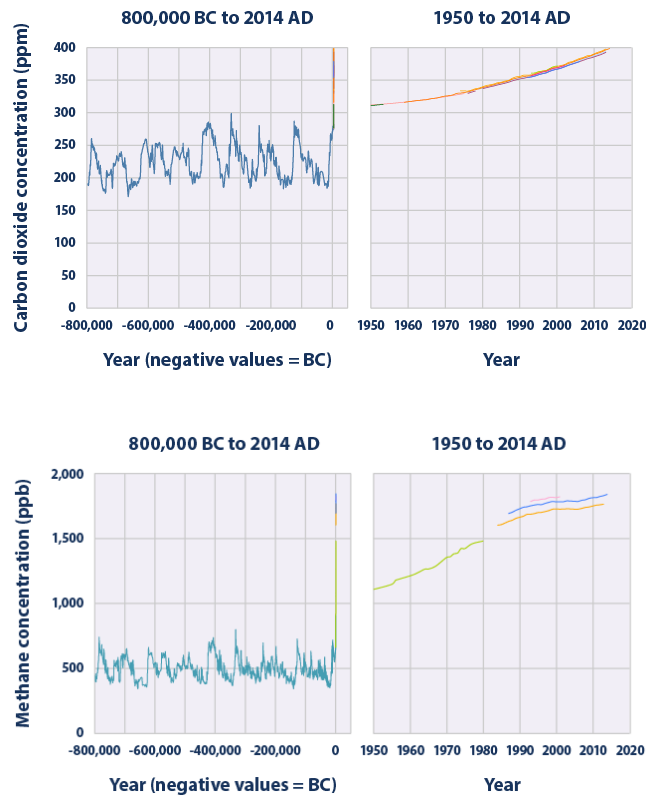


La période 1901-2000, utilisée comme référence, sert de base «  $0^\circ$  ». Nous observons ici l'évolution de la température annuelle moyenne à la surface de la Terre de 1850 à 2000 par rapport à la température moyenne mesurée sur la période de référence. Sont alors représentées les valeurs mesurées (courbe noire) et celles calculées par les modèles du CNRM-CERFACS (traits clairs) et de l'IPSL (traits foncés). Les courbes bleues ne tiennent compte que des forçages naturels (variabilité solaire et volcans) tandis que les courbes orange tiennent compte des forçages naturels et des forçages anthropiques (gaz à effet de serre et aérosols). Pour chacune des courbes, les résultats ont été obtenus à partir d'une dizaine de simulations : la moyenne correspond à la courbe, et la variation autour de cette moyenne correspond à l'enveloppe colorée. © IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace) / CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques) / CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique) ; figure réalisée par Patrick Brockmann.

Figure 2 : Mesures et estimations de l'évolution des températures avec et sans l'impact de l'activité humaine (Patrick Brockmann pour le CNRS<sub>b</sub> (Web))

- L'homme semble effectivement être la cause principale du réchauffement climatique puisque les modèles orange, incluant le rôle anthropique, amènent à une augmentation des T° bien plus marquée que les modèles bleus, n'incluant que les causes de réchauffement naturelles.
- Les modèles d'estimation des T° effectués par le CNRM-CERFACS et l'IPSL sont proches des T° effectivement mesurées. Ceci nous mène à penser que les prédictions assez préoccupantes d'élévation de T° décrites par le GIEC (2013 et 2014), qui reposent sur les modèles de ces deux organismes, devraient se rapprocher de la réalité à venir.

Selon le GIEC (2013 et 2014), et dans un premier temps, une réduction de 40 à 70% des émissions mondiales de gaz à effet de serre par rapport à 2010 serait nécessaire d'ici 2050 pour que la T° n'augmente pas de plus de 2°C. Cette diminution concerne à la fois le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>) et le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), ainsi que l'ensemble des GES anthropiques. Les chlorofluorocarbures (CFC) ont quant à eux déjà été fortement réduits suite à leur interdiction de mise sur le marché en Europe depuis l'an 2000, puisqu'il avait été prouvé que ces gaz participent au « trou dans la couche d'ozone » en plus de contribuer à l'effet de serre. Ils ont cependant été remplacés par d'autres halocarbures ayant eux aussi un potentiel d'effet de serre. Le protocole de Kyoto, qui prévoyait déjà une baisse de 5% des gaz à effet de serre en 2012 par rapport à 1990, est loin d'avoir atteint cet objectif. Nous avons au contraire observé une augmentation des émissions de 34% en 20 ans, malgré une diminution de 18% par l'Union Européenne. Les graphiques présentés en figure 3 témoignent de l'augmentation des concentrations de deux GES mesurées dans l'atmosphère.



Les différentes couleurs de courbes observables sur les 65 dernières années représentent des résultats qui ont été obtenus par des mesures à divers endroits de la planète.

BC = *Before Christ* = Avant Jésus Christ ; AD = *Anno Domini* (soit « après Jésus Christ », par opposition à BC).

Figure 3 : Observations de la nette augmentation des concentrations atmosphériques en dioxyde de carbone (en haut) et en méthane (en bas) au cours des 800 000 (à gauche) et des 65 (à droite) dernières années (*United States Environmental Protection Agency (EPA<sub>b</sub>, 2016, (Web))*)

En plus du CO<sub>2</sub>, du CH<sub>4</sub>, du N<sub>2</sub>O et des halocarbures, nous pouvons citer l'eau, l'ozone et l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) comme gaz à effet de serre (Manicore, 2007 (Web)). Bien que, selon le GIEC (2007), 72% de l'effet de serre soit dû à l'eau sous toutes ses formes (vapeur, nuages...), les émissions humaines d'eau sont absolument négligeables par rapport aux émissions naturelles. Cette cause d'effet de serre doit donc être considérée comme nécessaire à l'équilibre de la vie sur Terre, tout comme celles à l'origine d'une partie du CO<sub>2</sub>, du CH<sub>4</sub>, du N<sub>2</sub>O et de l'ozone qui sont émis chaque jour naturellement. L'objectif est plutôt d'agir sur les molécules « industrielles » que sont les halocarbures (en particulier le CFC) et le SF<sub>6</sub>, ainsi que sur la fraction de CO<sub>2</sub>, de CH<sub>4</sub>, de N<sub>2</sub>O et d'ozone d'origine humaine.

## 2) Rôle du méthane dans le réchauffement climatique dû à l'homme

Comme nous l'avons vu, les gaz à effet de serre sont variés. Il est important de noter que les principales causes d'émission sont souvent multiples, et généralement très différentes d'un gaz à l'autre (Manicore, 2007 (Web)). Par exemple la France, 11<sup>ème</sup> plus gros émetteur de

gaz à effet de serre par habitant de l'Union Européenne des 27 en 2009 (MEEM (Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer), 2009), répartit ses émissions entre divers domaines très variés :

- Le transport routier en véhicule particulier représente la principale source de GES avec environ 14% de nos émissions. Le CO<sub>2</sub> est de loin le principal gaz émis par cette voie.
- Les fermentations entériques et les effluents d'élevage sont à l'origine de 9% des GES français, notamment à cause du méthane.
- Le traitement des déchets participe lui à environ 2,6% des émissions.
- Etc.

Nous remarquons bien ici que l'effort se doit d'être collectif, à l'aide de nombreuses actions menées dans tous les domaines et tous les pays concernés (Dessus et al., 2008). Pour éviter un réchauffement global de 2°C, la recommandation européenne de stabilisation de la concentration atmosphérique des GES est de « 450 ppmv (parties par millions en volume) d'équivalent CO<sub>2</sub> (unité qui sera expliquée par la suite) ». En prenant en compte le rôle de chaque gaz, cette recommandation peut être atteinte, par exemple, en combinant une division par deux des émissions de CO<sub>2</sub> et une réduction de 30% des émissions de méthane et de protoxyde d'azote en 2050 par rapport à 1990. Une réduction par deux des émissions de CO<sub>2</sub> ne permettra pas d'atteindre la cible à elle seule. Ainsi, il faut un effort concomitant sur plusieurs gaz.

Afin de hiérarchiser les priorités d'action, il est nécessaire d'estimer l'impact relatif de chacun des gaz sur l'effet de serre additionnel dû à l'homme.

Cette estimation repose traditionnellement sur trois paramètres :

- Le forçage radiatif du gaz à une quantité donnée, par exemple 1 tonne
- Une durée donnée, en général 100 ans
- Sa quantité d'émission anthropique

Le forçage radiatif traduit la capacité du gaz à intercepter les rayons IR terrestres et à les renvoyer vers le sol (Manicore, 2007 (Web)). Sa valeur, à une quantité de gaz donnée, est toujours associée à une période de temps déterminée. Comme l'explique Jean-Marc Jancovici ((Manicore, 2007 (Web))), nous calculons alors le pouvoir de réchauffement global (PRG) du gaz, qui est en fait une valeur comparative à l'effet qu'aurait le CO<sub>2</sub> pendant une durée déterminée s'il était émis en même quantité (1 tonne) et au même moment que le gaz étudié.

Ainsi, nous obtenons la formule :

$$\text{PRG}_{\text{gaz}} = \frac{\int_0^N F_{\text{gaz}}(t) dt}{\int_0^N F_{\text{CO}_2}(t) dt}$$

Avec F = le forçage radiatif du gaz à chaque instant et à une quantité de départ fixée, et N une durée correspondant en général à 100 ans.

Il existe une forte variabilité entre les GES (tableau 1) :

Tableau 1 : Pouvoirs de Réchauffement Globaux des principaux GES sur 100 ans (GIEC, 2007)

<b>Gaz</b>	<b>Formule</b>	<b>PRG relatif / CO<sub>2</sub> (à 100 ans)</b>
<b>Gaz carbonique</b>	CO <sub>2</sub>	1
<b>Méthane</b>	CH <sub>4</sub>	25
<b>Protoxyde d'azote</b>	N <sub>2</sub> O	298
<b>Perfluorocarbures</b>	C <sub>n</sub> F <sub>2n+2</sub>	7400 à 12200
<b>Hydrofluorocarbures</b>	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> F <sub>p</sub>	120 à 14800
<b>Hexafluorure de soufre</b>	SF <sub>6</sub>	22800

Il est aisé de comprendre qu'à un PRG donné, plus la quantité du gaz entrant dans l'atmosphère va être importante, plus cela aura de conséquences sur le réchauffement climatique. Pour exprimer la combinaison « PRG-quantité émise » en unité massique et standardisée, les scientifiques se réfèrent à « l'équivalent CO<sub>2</sub> » :

$$n \text{ éq CO}_2_{\text{gaz}} = \text{PRG}_{\text{gaz}} * m$$

Avec m exprimant en kg la quantité du gaz étudié et n représentant la valeur de l'effet de serre du GES étudié en « kg éq CO<sub>2</sub> ».

Ainsi, les effets des GES peuvent être comparés dans une unité standardisée, l'éq CO<sub>2</sub>, et les valeurs de ces effets vont dépendre à la fois des PRG des gaz et de leur quantité en kg. Il est ici extrêmement important de retenir que « éq CO<sub>2</sub> » n'est pas équivalent à « CO<sub>2</sub> ». Cette valeur témoigne en réalité de l'effet de serre d'un GES.

Une étude de Rodhe (1990) estimait le rôle du méthane sur l'effet de serre anthropique à 18%, contre 49% pour le CO<sub>2</sub>, 6% pour le N<sub>2</sub>O et 14% pour les CFC. A cette époque, Johnson et Johnson (1995) émettaient des estimations du même ordre de grandeur en ce qui concerne le méthane avec des valeurs allant de 15 à 17%. Malgré sa très faible concentration dans l'atmosphère en 1995 par rapport au CO<sub>2</sub> ([CH<sub>4</sub>] ≈ [CO<sub>2</sub>]/200), tous ces auteurs estimaient déjà



que son fort pouvoir réchauffant le conduisait malgré tout à jouer un rôle non négligeable dans l'effet de serre.

Cette reconnaissance du rôle du méthane dans l'effet de serre a été accentuée au cours du temps. En effet, selon le 4<sup>ème</sup> rapport du GIEC (2007),  $PRG_{CH_4} = 25 * PRG_{CO_2} = 25$  sur 100 ans, alors qu'il ne valait que 21 selon le 2<sup>ème</sup> rapport du GIEC (1995). En 2011, cette valeur a été ré estimée une nouvelle fois à la hausse, à 28.

Il est cependant important de noter que ce PRG est une manière simplifiée de représenter les choses. En effet, il étudie uniquement les effets du gaz non transformé<sup>(1)</sup>, sur une durée fixée à 100 ans<sup>(2)</sup>, et il s'appuie sur une émission ponctuelle<sup>(3)</sup> du gaz considéré. En réalité, nous verrons par la suite que :

- (1) L'épuration naturelle d'un gaz peut le transformer en d'autres gaz ayant eux aussi un effet de serre, ce qui n'est pas pris en compte ici dans le PRG.
- (2) Par rapport au CO<sub>2</sub>, un même gaz peut avoir plus ou moins d'effet sur le réchauffement planétaire si l'on se place à plus court terme.
- (3) Les mesures politiques sont généralement pérennes. Lorsqu'un pays décide de réduire ses émissions de GES par rapport aux années précédentes, la nouvelle quantité visée sert ensuite de référence pour de nombreuses années. Le PRG, qui ne prend en considération qu'une réduction ponctuelle des émissions (donc seulement à un instant t), n'est donc pas parfaitement adapté.

Pour résumer, avec le PRG utilisé traditionnellement sur 100 ans, nous savons simplement d'après le tableau 1 que réduire d'une tonne les émissions d'un gaz comme le méthane à un instant t aura 25 fois plus d'effet sur le siècle à venir que de réduire d'une tonne les émissions de CO<sub>2</sub>.

Les études actuelles confirment le rôle du méthane dans le réchauffement climatique, avec des émissions de 598 mégatonnes (Mt) par an, alors que seules 576 Mt/an sont éliminées (Broucek, 2014). Elles démontrent même que celui-ci a un impact bien plus fort sur le climat que ce que l'on pensait jusqu'alors. Le 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC (2013 et 2014) attire notre attention sur le fait que le méthane est en réalité la cause de 32% de l'effet de serre depuis 1750 contre 56% pour le CO<sub>2</sub>. Cette nouvelle estimation s'appuie sur l'un des éléments cités auparavant<sup>(1)</sup>, à savoir qu'une fois épuré, le méthane va participer à la formation d'eau stratosphérique et d'ozone troposphérique, qui eux aussi causent un effet de serre. Nous remarquons qu'au moment du protocole de Kyoto, qui s'appuyait sur les PRG de 1995, la nécessité de prendre des mesures rapides sur le méthane était ainsi grandement sous-estimée.

Nous savons donc maintenant que le rôle du méthane dans le réchauffement climatique sur le long terme est très significatif, derrière le CO<sub>2</sub> et très loin devant les autres GES anthropiques. Mais, si l'on se place à plus court terme<sup>(2)</sup> et donc à l'horizon 2050 par exemple, le PRG sur 35 ans du méthane émis en 2015 est multiplié par 2 en comparaison avec le PRG sur 100 ans, puisqu'avec sa durée de vie courte ( $t_{1/2} = 12$  ans) il aura quasiment pleinement agit dans les deux cas, alors que le CO<sub>2</sub> et sa durée de vie plus longue (100 ans) n'aura pas eu tout son effet en 35 ans (tableau 2 et figure 4).

Tableau 2 : Les durées de vie dans l'atmosphère de 4 des principaux GES (GIEC, 2007)

Gaz	Durée de vie approximative dans l'atmosphère
Gaz carbonique	100 ans
Méthane	12 ans
Protoxyde d'azote	120 ans
Halocarbures	Jusqu'à 50.000 ans

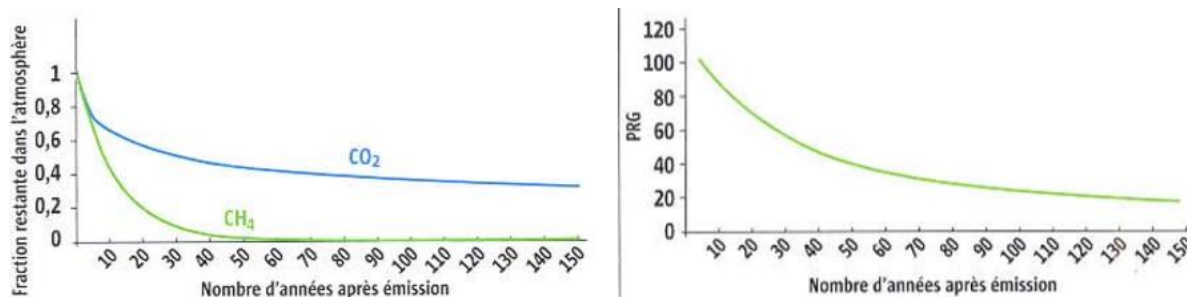


Figure 4 : Courbes de décroissance de la concentration en CO<sub>2</sub> et en CH<sub>4</sub> au cours du temps (à gauche) et PRG du CH<sub>4</sub> en fonction du nombre d'années après émission (à droite) (Dessus et al., 2008)

Enfin, selon Dessus et al. (2008), les mesures politiques sont généralement pérennes<sup>(3)</sup>. Ainsi, il a par exemple été prouvé que, sur 40 ans, le PRG<sub>pérenne</sub> du CH<sub>4</sub> est encore augmenté d'un facteur d'environ 1,5 par rapport au « PRG<sub>ponctuel</sub> ».

Toutes ces études nous démontrent que malgré un impact prépondérant du CO<sub>2</sub> sur l'effet de serre anthropique, d'autres GES jouent un rôle loin d'être négligeable. C'est notamment et surtout le cas du méthane. Afin de rentrer dans les objectifs fixés lors de la COP21, à savoir limiter le réchauffement de la planète à 2°C d'ici 2100 par rapport à l'ère

préindustrielle, la lutte contre les émissions de ce gaz est une piste à privilégier en première intention, et ce pour plusieurs raisons :

- Le méthane joue un rôle significatif dans le réchauffement climatique (et sur la santé, l'ozone troposphérique étant toxique).
- Selon Actu-environnement<sup>b</sup> (2010, Web) la lutte contre les émissions du méthane remet peu en question les modes de vie et a un faible impact sur la croissance économique des pays développés et en développement.
- Selon l'Organisation Mondiale de la Météorologie, citée par Actu-environnement<sup>a</sup> (2008, Web), la fonte des glaciers s'est accélérée à l'échelle des 10 ans, preuve de l'utilité de prises de décisions ayant un effet rapide. Ce gaz, en comparaison avec les autres GES, a une durée de vie très courte dans l'atmosphère (12 ans, confère ci-dessus). Les actions menées contre ses émissions auront donc un effet plus rapide que pour les autres GES. Ceci est important non seulement pour respecter les engagements politiques cités plus haut, mais avant tout pour éviter un emballement et un cercle vicieux irréversible du réchauffement planétaire, qui pourrait en bonne partie provenir de l'instabilité des hydrates de méthane océaniques et de la fonte du pergélisol sibérien, libérant à leur tour du méthane, et qui inquiètent de plus en plus les scientifiques. Ainsi, non seulement l'objectif de 450 ppmv en équivalent CO<sub>2</sub> est important à atteindre aussi rapidement que possible, mais ne pas dépasser auparavant un certain seuil apparaît également nécessaire. Cela implique une diminution de 40 à 70% de nos émissions de GES d'ici 2050 selon le GIEC (2013 et 2014).

Prenant en compte à la fois la diversité des GES, la multitude de sources anthropiques pour chacun d'entre eux, l'ensemble des conséquences qui risquent de découler de leur trop forte concentration répartie internationalement, et la vitesse avec laquelle il faut trouver des solutions, nous en déduisons que les actions à mener se doivent d'être rapidement réparties entre les différents acteurs du système mondial. Outre le CO<sub>2</sub>, qui reste la première cause de l'effet de serre anthropique, le méthane est un gaz sur lequel il faut agir immédiatement. Nous allons donc maintenant observer quels sont les domaines impliqués dans son émission, puis, parmi cette diversité de sources de méthane, nous verrons plus en détail quel est l'impact de l'élevage sur les émissions de ce GES.

## II. Place de l'élevage bovin allaitant dans les émissions de méthane

### 1) Résumé des principales sources de production de méthane

Si pendant quelques décennies la concentration en méthane semblait stagner, celle-ci est à nouveau en augmentation depuis la fin des années 2000. En considérant qu'une forte proportion des émissions sont dues à l'Homme, puisque seules 30% sont d'origine naturelle selon Demeyer et Fievez (2000), il est indispensable d'identifier quelles sont les principales sources anthropiques du méthane pour proposer des leviers d'action efficaces.

Les émissions mondiales de méthane ont été estimées par l'EPA<sub>a</sub> (2010 (Web)) à 6 875 millions de tonnes en éq CO<sub>2</sub>. Selon cette même source, le monde de l'agriculture semble très fortement impliqué dans les émissions totales de méthane (figure 5) :

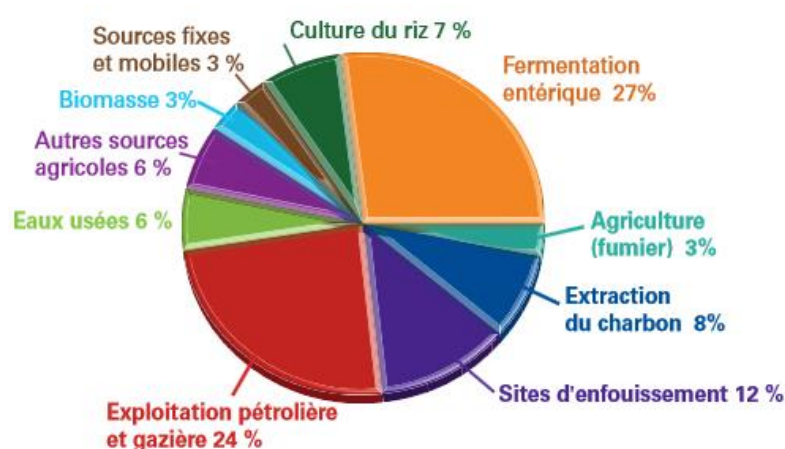
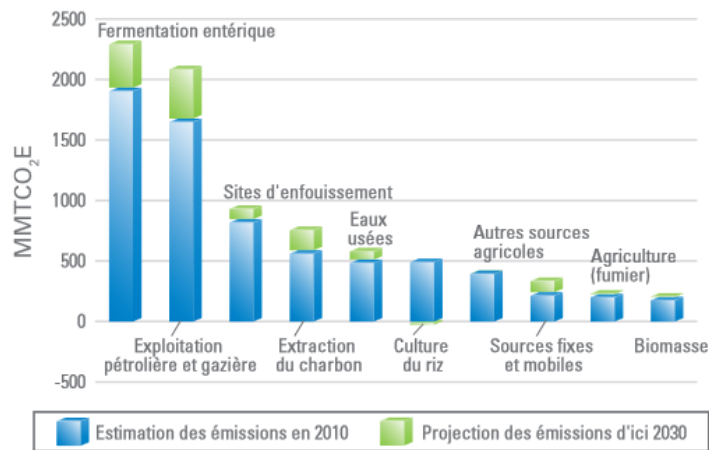


Figure 5 : Estimation des émissions mondiales de méthane d'origine anthropique en 2010 selon la source (Global Methane Initiative (Web))

Bien que les sites d'enfouissement, le traitement des eaux usées, et les exploitations pétrolières, gazières et de charbon aient un impact non négligeable, l'agriculture, avec en particulier la fermentation entérique des animaux, joue effectivement le rôle le plus significatif (+8% en 2010 par rapport à la quantité émise en 2000, d'après Tubiello et al. (2013)). Cette répartition des émissions devrait peu varier dans les 15 prochaines années (figure 6), mais une augmentation globale de la quantité de méthane émise dans l'atmosphère devrait être observée (majoritairement due au développement de l'élevage dans les pays émergents).



MMTCO<sub>2</sub>E = mégatonnes d'équivalent CO<sub>2</sub>.

Figure 6 : Estimation en 2010 et projection pour l'année 2030 des émissions mondiales de méthane d'origine anthropique par source (Global Methane Initiative (Web))

Selon le GIEC (2007), les émissions de GES dues à l'élevage (périmètre incluant la transformation) représentent 14,5% des émissions anthropiques totales, et le méthane est le principal contributeur de l'effet de serre dans ce secteur. Cette information est renforcée par l'article de Gerber et al. (2013) qui, en s'appuyant sur ce même rapport du GIEC, explique que sur les 7,1 GtCO<sub>2</sub>éq d'émission de GES comptabilisées pour le secteur de l'élevage (dont 65% par les bovins ; tableau 3), 3,1 sont dues au méthane (soit 44% des émissions mondiales de méthane, et 44% des émissions de GES par l'élevage). 90% de ce méthane serait dû aux émissions entériques (leur quantification à l'échelle mondiale est toutefois associée à un coefficient de variation de 18% selon Herrero et al. (2016)). Les 4 GtCO<sub>2</sub>éq restantes sont ensuite attribuées pour moitié au CO<sub>2</sub> (5% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>) et au N<sub>2</sub>O (53%).

Tableau 3 : Résumé des émissions estimées de GES par l'élevage à l'échelle mondiale (Inspiré de l'article de Gerber et al., 2013)

	Quantité due à l'élevage (GtCO <sub>2</sub> éq/an)	Pourcentage (%) parmi les émissions anthropiques mondiales du/des gaz considéré(s)	Remarques sur les sources d'émission au sein du secteur de l'élevage
<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>3,1</b>	<b>44</b>	<b>90% par émission entérique</b>
CO <sub>2</sub>	2	5	
N <sub>2</sub> O	2	53	
<b>Tous les GES</b>	<b>7,1</b>	<b>14,5</b>	<b>65% dus à l'élevage bovin</b>

Il est important de préciser ici que, contrairement à ce qu'il se passe pour le CO<sub>2</sub> avec des sols jouant un rôle important de puits de carbone (comme les forêts et les prairies, souvent citées dans la littérature), et évitant à une partie des émissions totales de CO<sub>2</sub> de rester dans l'atmosphère et d'engendrer un effet de serre, un très faible pourcentage du CH<sub>4</sub> est consommé dans ces sols (Roger et al., 1999). Ainsi, la lutte contre ce GES passe avant tout par la diminution des émissions et/ou la récupération de celles-ci à la source.

La fermentation entérique étant la principale source anthropique de méthane, nous allons nous intéresser aux émissions des différentes espèces animales d'élevage et remarquer que les bovins de races allaitantes sont à l'origine d'une forte proportion de celles-ci.

## 2) *Impact de l'élevage bovin allaitant*

Déjà dans les années 90, des chercheurs tentaient de déterminer assez précisément quel était l'impact des animaux d'élevage sur l'effet de serre. Selon Johnson et Johnson (1995), les ruminants émettraient 250 à 500L de méthane par jour, ce qui aurait contribué à 2% du réchauffement climatique au siècle dernier. En s'appuyant sur une publication de Johnson et al. (1991), Vermorel (1995) expliquait que le méthane causait 15% de l'augmentation de l'effet de serre, et que diminuer de 25% les émissions de méthane par les ruminants aurait réduit d'1% l'effet de serre. En comparaison, une meilleure législation sur les émissions de CO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>O par les véhicules associée à une diminution de la consommation d'essence aurait réduit de 2 à 8% l'effet de serre, et l'interdiction de l'usage des CFC aurait permis de conserver la couche d'ozone et de diminuer de 10% l'effet de serre. Dans cette publication, cet auteur expliquait que les bovins contribuaient à 70% des émissions par les mammifères (40% par les pays développés, 30% par les pays en développement), soit à 91,3% des émissions par les herbivores d'élevage, et que parmi les bovins français, 38% étaient émis par les 4,6 millions de vaches laitières (figure 7), 26% par les 4 millions d'allaitantes, 23% par les 6,6 millions de bovins en croissance destinés à la production de viande et 13% par les génisses futures reproductrices (moitié lait, moitié viande). Ces estimations reposaient en bonne partie sur l'alimentation et sur des équations de prédiction, et l'auteur reconnaissait que cette étude pouvait être améliorée par la suite avec une meilleure connaissance des effectifs de bovins français (notamment des jeunes bovins exportés maigres) et de la composition des aliments.

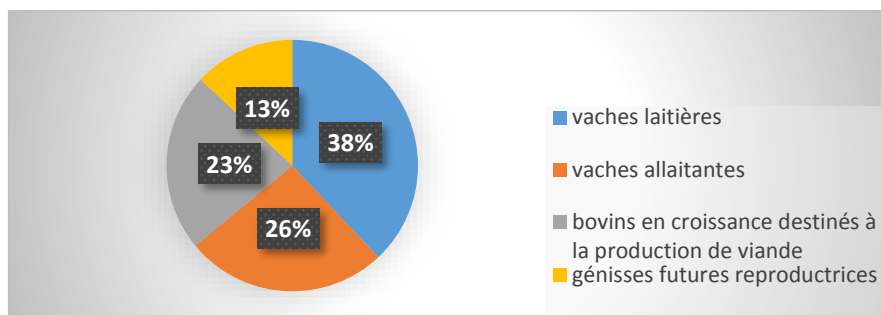


Figure 7 : Emissions de méthane selon les catégories de bovins

Les études plus récentes démontrent que le rôle des bovins dans l'effet de serre est en réalité plus important. Selon Robinson et al. (2009), les émissions entériques de méthane par le bétail représentent par exemple 10,3% des émissions de GES en Australie, et Vermorel et al. (2008), en s'appuyant sur une publication de Moss et al. (2000), nous décrivent le méthane entérique comme étant responsable de 45% des émissions totales françaises de méthane, soit une responsabilité dans 5% du réchauffement global dû à notre pays. Vermorel et al. (2008) estiment le méthane entérique à 17% des émissions totales mondiales, pour une part dans le réchauffement planétaire de 2 à 4%. Ces valeurs utilisent comme référence le pouvoir réchauffant du méthane tel qu'il était connu il y a une dizaine d'années. En réalité, il se pourrait que les derniers rapports du GIEC tendent à prouver une nette augmentation de la part du méthane entérique dans le réchauffement climatique.

Comme cela a été expliqué précédemment, les causes du réchauffement climatique et des émissions de gaz à effet de serre sont extrêmement nombreuses, ce qui implique une très forte dispersion des responsabilités entre les différents secteurs d'activité dans le réchauffement climatique. Ainsi, la majorité du réchauffement planétaire provient d'une multitude de domaines chacun impliqué dans moins de 10% de celui-ci, et il faut établir des plans de lutte dans tous ces domaines. L'implication du méthane d'origine entérique ne peut donc être négligée ni à l'échelle française, ni à l'échelle mondiale, et sa réduction fait pleinement partie des objectifs à atteindre aussi vite que possible.

Gerber et al. (2013) constatent que, dans l'ordre, les bovins laitiers et non laitiers à l'échelle mondiale émettent bien plus de méthane entérique (77%) que les buffles et les petits ruminants (moutons et chèvres, dans l'ordre), eux-mêmes bien plus en cause que les espèces non ruminantes. Pour la France, en adaptant aux données de l'INRA une méthode précise, « Tier 3 », recommandée par le GIEC (2006), et qui prend en compte des facteurs de variation liés à la fois à l'animal (type et niveau de production, race...) et à la ration (type, quantité...), Vermorel et al. (2008) démontrent que 32% des émissions entériques sont issues des vaches laitières, 26% des vaches allaitantes, et 32,5% des bovins en croissance et à l'engraissement

(les races allaitantes représentent une proportion un peu plus grande des émissions dans cette catégorie). Chacun des deux types de races bovines est ainsi à l'origine de plus de 45% des émissions (figure 8), contre 6,2% pour les ovins et moins de 1,5% pour chacune des autres espèces animales d'élevage. Les auteurs précisent que malgré quelques imprécisions persistantes sur les effectifs et sur les compositions alimentaires, les efforts de réduction d'émissions entériques doivent donc avant tout se concentrer sur les bovins.

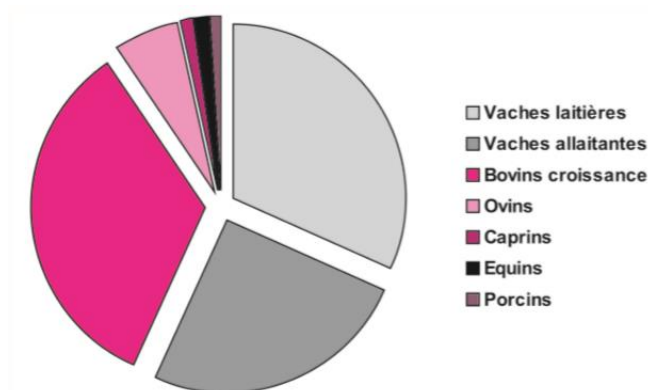


Figure 8 : Contribution relative des principales catégories d'animaux d'élevage aux émissions entériques de méthane en France (Vermorel et al., 2008)

A l'échelle mondiale, une publication de Gerber et al. (2013) incrimine légèrement plus les émissions entériques de méthane par les bovins spécialisés pour la production de viande (996 millions de tonnes d'éq CO<sub>2</sub> par an), en comparaison à celles des bovins laitiers (845 millions de tonnes). Suite à des calculs effectués à partir des données de cette étude, nous remarquons que le système herbager des bovins allaitants est à l'origine d'une bien plus forte proportion des émissions totales de GES par la filière bovine que celui des bovins laitiers (20,6% contre 7,8%). Il faudra donc prendre en compte le fait que le nombre de bovins allaitants régulièrement au pâturage est considérable, afin de proposer des solutions adaptées aux élevages de ces animaux.

Les bovins de races allaitantes sont ainsi à l'origine d'une proportion très significative des GES émis à l'échelle nationale, et même à l'échelle mondiale (Gerber et al., 2013), en particulier à cause du méthane. L'élevage de ces animaux étant généralement différent sur de nombreux points (absence de traite, alimentation, pâturage plus fréquent...) de l'élevage des bovins laitiers, les moyens de quantification et de réduction des émissions ne sont parfois pas les mêmes. Dans le deuxième chapitre de ce travail, les solutions étudiées concerneront les bovins allaitants. Précisons que certaines d'entre elles sont applicables dans l'élevage de bovins laitiers et dans l'élevage ovin, et que des études sont ou ont déjà été réalisées pour proposer des leviers d'action dans ces autres filières (Guégan (thèse en cours), etc.).



Le méthane jouant un rôle important dans l'effet de serre, nous pourrions considérer que les émissions entériques des bovins de races allaitantes sont à elles seules à l'origine d'au moins 1 à 2% du réchauffement climatique planétaire, et sans doute davantage en prenant en compte les dernières données parues dans le 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC. Il apparaît évident que dans un pays comme la France, ayant une forte activité d'élevage, et dans le but de lutter contre le réchauffement climatique mondial, réduire ces émissions doit être l'une des priorités. D'autant plus que certaines méthodes prouvées comme étant efficaces dans la réduction des GES par les bovins de races allaitantes (BA) pourraient être adaptées aux bovins de races laitières (BL), et inversement, ce qui permettrait de réduire encore davantage le réchauffement mondial. Pour cela, il est nécessaire d'acquérir une bonne connaissance des mécanismes et origines des émissions de méthane par les BA, qui s'apparentent à ceux de tous les ruminants.

### III. Origines des émissions de méthane par la fermentation entérique des ruminants

#### 1) Production du méthane

La production de méthane par les ruminants provient à la fois de ses réservoirs gastriques (en particulier le rumen, aussi appelé la panse ; figure 9) et de son gros intestin (cæcum et colon).

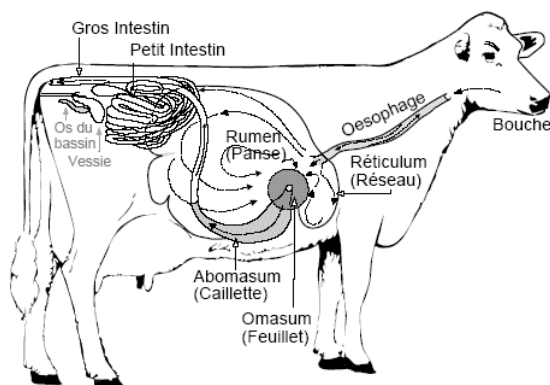


Figure 9 : Appareil digestif des bovins (Biodis, Web)

Nous allons donc étudier comment le méthane est produit dans ces deux parties du tube digestif.

#### a) Production dans le rumen

La production a quasiment exclusivement lieu dans le rumen qui, pour rappel, possède un contenu divisé en 3 phases : les gaz, situés au-dessus du contenu solide de la panse (appelé « langue de foin »), qui lui-même flotte sur le liquide ruminal dans lequel se trouvent des particules en suspension (figure 10). Les micro-organismes, qui assurent la digestion dans la

panse, se trouvent à la fois sur la langue de fourrage, en suspension dans le liquide, et sur les parois du rumen.

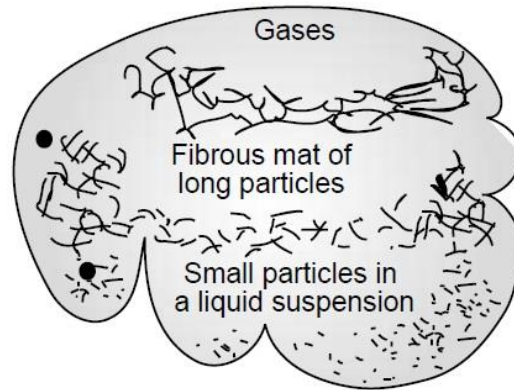


Figure 10 : Contenu de la panse (Dairy Essentials, Babcock Institute, 2015, Web)

La digestion par les micro-organismes va, à partir des polysides végétaux consommés par les ruminants, conduire à la chaîne de réactions simplifiée suivante :

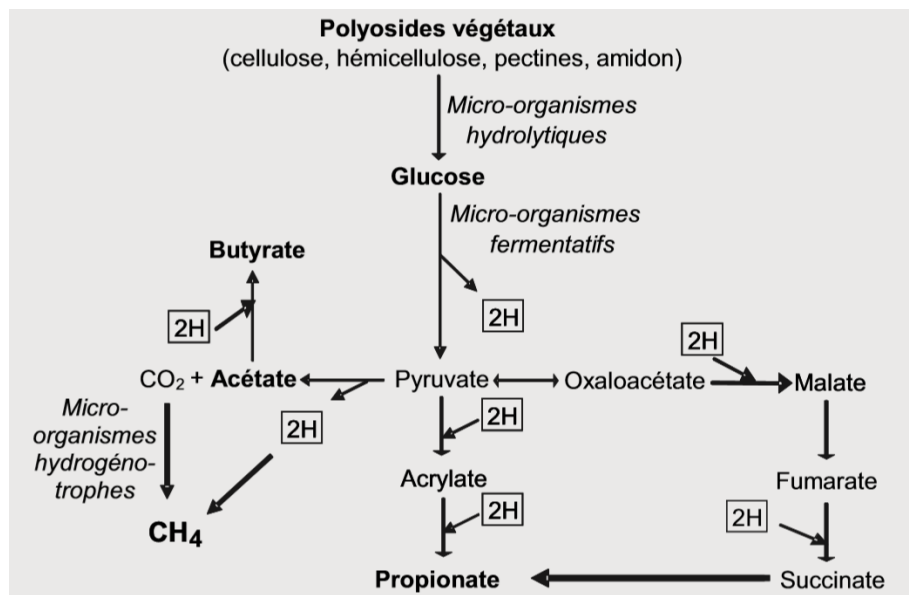


Figure 11 : Chaîne de réaction simplifiée, schématisant la fermentation des glucides végétaux pour aboutir aux acides gras volatils (AGV) et au méthane (Martin et al., 2006)

L'amidon, la cellulose, les hémicelluloses et les pectines sont des glucides végétaux. Les glucides de paroi, à savoir la cellulose, les hémicelluloses et les pectines, sont difficiles à digérer. Mais les ruminants, grâce à leur système digestif particulier et à leur flore digestive complexe qui agit en synergie, sont capables de les digérer et de les utiliser dans leur métabolisme. En effet, les trois acides gras volatils (AGV) formés, l'acétate, le propionate et le butyrate (figure 11), sont d'importantes sources d'énergie pour les ruminants qui vont les absorber à travers leur paroi ruminale.

Nous pouvons observer que lorsque de l'acétate est formé à partir du pyruvate, cette réaction est associée à la production de CO<sub>2</sub> et de H<sub>2</sub> qui peuvent réagir sous l'action des archées et aboutir à la formation de méthane :  $\text{CO}_2 + 8 \text{H}^+ + 8 \text{e}^- \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$  (Broucek, 2014), associé à la production d'une molécule d'ATP (Adénosine-5'-TriPhosphate), utilisable par les micro-organismes. En revanche une autre voie de production d'acétate (dite voie de l'acétogenèse réductrice), minoritaire, consomme le CO<sub>2</sub> et l'H<sub>2</sub> pour produire de l'acétate, de l'eau et de l'ATP. De son côté, la voie du propionate, de par sa consommation d'hydrogène, évite la production de méthane. Globalement, en tenant également compte de la neutralisation des AGV par les bicarbonates de la salive, la formation d'une molécule d'AGV génère 1 à 3 molécules de CO<sub>2</sub>. Ce CO<sub>2</sub> va en partie réagir et être à l'origine de méthane. Dans des schémas plus complexes, nous pourrions remarquer que certains autres composés aboutissent aussi à la production de méthane. Voici un résumé des principales voies de fermentation du glucose dans le rumen (figure 12) :

Glucose → 2 acétate + 4 H <sub>2</sub> + 2 CO <sub>2</sub> - 2 H <sub>2</sub> O + 4 ATP
Glucose → 2 propionate - 2 H <sub>2</sub> + 2 H <sub>2</sub> O + 4 ATP
Glucose → butyrate + 2 H <sub>2</sub> + 2 CO <sub>2</sub> + 3 ATP

Figure 12 : Principales équations stœchiométriques simplifiées de la fermentation du glucose dans le rumen (Sauvant et al., 2011)

Selon Vermorel (1995), la voie métabolique majoritaire dépend du faciès microbien (composé de bactéries, protozoaires, champignons, archées...) lui-même dépendant du milieu (pH, nature des substrats, vitesse de dégradation et potentiel d'oxydo-réduction). D'après une publication de Demeyer et Fievez (2000), ce sont surtout des archées (par exemple des genres *Méthanobrevibacter*, Rumen Cluster C, *Methanomicrobium*, etc. (Popova, 2011a)), strictement anaérobies, qui utilisent le formate, les méthylamines, l'hydrogène gazeux, le CO<sub>2</sub>, l'acétate ou encore le méthanol pour produire du méthane. Ces micro-organismes sont donc dits méthanogènes. La plupart de ces substrats sont des intermédiaires dans la chaîne de réaction précédente, et la majorité se trouve du côté de la voie de formation de l'acétate et du butyrate. La croissance et l'activité des archées méthanogènes dépendent de la teneur en H<sub>2</sub> du milieu. Les protozoaires sont à l'origine d'une production de dihydrogène, favorisant donc la production de méthane.

Pour la flore microbienne, l'utilisation et la transformation de l'hydrogène gazeux sont importantes afin de retrouver un équilibre thermodynamique indispensable à leur activité. Ainsi, sachant que l'hydrogène formé va perturber la flore microbienne, il est naturellement nécessaire pour celle-ci d'éviter sa présence dans le rumen, soit par la formation du méthane,

soit en utilisant la voie du propionate. En admettant que le taux de récupération moyen de l'hydrogène est de 90%, Demeyer et Fievez (2000) ont d'ailleurs fait part d'une formule démontrant l'importance de la voie métabolique dans la production de méthane :

$$M = 0,450 (A) - 0,275 (P) + 0,400 (B)$$

Avec M = méthane ; A = acétate ; P = propionate ; B = butyrate, le tout en production molaire.

Nous remarquons bien ici que, plus la quantité de propionate formé est importante, moins nous aurons de méthane produit. Ces auteurs appuient la publication de Vermorel (1995) en expliquant que l'orientation vers l'une ou l'autre des voies va dépendre de plusieurs facteurs :

- Le type de substrat : moins de méthane est produit avec un substrat protéique.
- La ration de l'animal : les glucides facilement fermentescibles comme l'amidon vont entraîner une fermentation accélérée, donc une diminution du pH, ce qui va modifier le faciès microbien (figure 13) dans le sens d'une diminution de l'activité de la flore cellulolytique (à l'origine de l'acétate et du butyrate), des protozoaires, voire des archées (qui ont un pH optimal compris entre 6,1 et 7,8 selon les espèces, d'après les études de Miller et Wolin (1985), Jarvis et al. (2000) et Miller et Lin (2002), citées par Popova et al. (2011b)). Il y a en contrepartie augmentation de l'activité des bactéries amylolytiques, productrices de propionate. La voie de production du méthane est ainsi fortement diminuée avec des glucides très fermentescibles.

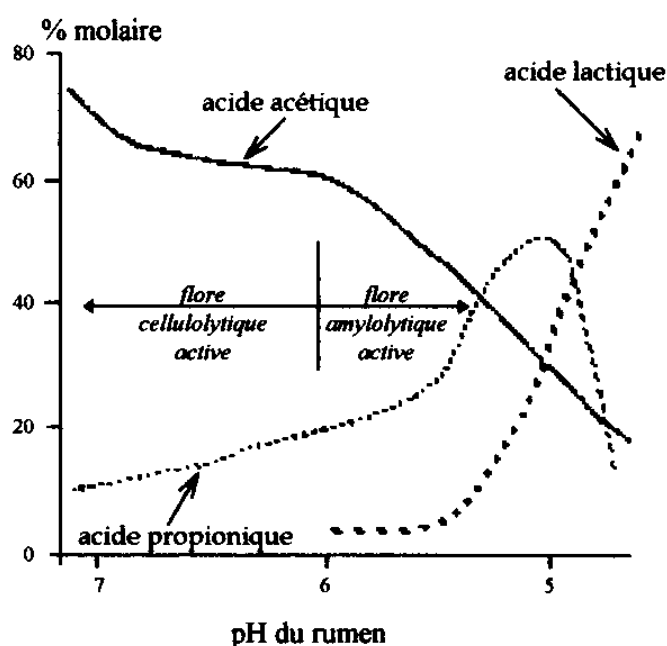


Figure 13 : Impact du pH sur la flore du rumen et sur la production des AGV (Département de l'Agriculture de la FAO (Food and Agriculture Organization), Web) ©FAO

- Un facteur supplémentaire est signalé par Demeyer et Fievez (2000) : l'animal. En effet, même dans des conditions environnementales et alimentaires identiques, des variations dans les émissions de méthane sont observées. Elles pourraient provenir selon ces auteurs de la cinétique de salivation des ruminants, modifiant la population microbienne ruminale par variation de la vidange du rumen. De plus, le pH et l'activité des protozoaires sont deux paramètres qui pourraient être en partie contrôlés par la cinétique et le volume du rumen, propres à chaque individu. Ce raisonnement de Demeyer et Fievez (2000), à partir d'une étude de Teather et al. (1984) (22 vaches), est maintenant appuyé par une publication de Goopy et al. (2014) (20 brebis).

#### b) Production dans le gros intestin

Lorsque l'aliment ingéré n'est pas entièrement digéré dans les réservoirs digestifs des ruminants, le cæcum et le colon vont être le siège de nouvelles fermentations. Ils contiennent des AGV et des micro-organismes assez semblables au rumen, avec toutefois deux différences notables signalées par Demeyer et Fievez (2000) :

- Il n'y a pas de protozoaires, à l'origine d'une partie de l'hydrogène formé dans le rumen.
- Une proportion non négligeable du CO<sub>2</sub> et du H<sub>2</sub> réagissent pour former de l'acétate dans la voie de l'acétogenèse réductrice. Ainsi, alors que la présence de H<sub>2</sub> favorise seulement la formation de méthane et de propionate dans le rumen, sa présence va également favoriser la formation des autres AGV dans le gros intestin, AGV qui sont énergétiquement utiles pour le bovin.

Selon ces auteurs, pour des rations riches en fibres alimentaires, et donc faiblement fermentescibles, la contribution post-ruminale à la digestion peut atteindre 45%. Bien que cette digestion post-ruminale semble plus marquée chez l'ovin que chez le bovin, avec une méthanogenèse pouvant atteindre 23% de la production totale, nous constatons dans cet article que pour les gros ruminants également cette portion du tube digestif joue un rôle non négligeable dans la production de méthane.

#### c) Conséquences de cette production de méthane pour l'animal

A partir de la célèbre maxime d'Antoine Laurent Lavoisier, reformulant une idée originelle d'Anaxagore de Clazomènes, selon laquelle « *rien ne se perd, rien ne se crée, tout se*

*transforme* », nous pouvons naturellement nous demander si ces pertes en CH<sub>4</sub>, non utilisé par l'animal, ne représenteraient pas un gaspillage de l'aliment ingéré ? D'après des études de Blaxter et Clapperton (1965) et Johnson et Johnson (1995), 2 à 12% de l'énergie ingérée est effectivement gaspillée en méthane. Cela pourrait être considéré comme le prix à payer de l'exceptionnelle adaptation des ruminants à digérer la cellulose (Pickering et al., 2015b), et donc à pouvoir se nourrir d'une grande partie d'herbe au pâturage ou de fourrage sec en stabulation. Selon Vermorel (1995), la dégradation complète d'1kg de matière organique de fourrage dans le rumen équivaut à l'énergie fournie par 750g d'amidon sec, énergie très bien exploitée par les ruminants sous forme d'AGV, mais cela produit 66L de méthane.

Cependant, nous pouvons déjà songer à la possibilité de minimiser ce « prix à payer » à l'étape de production du méthane. Johnson et Johnson (1995) résument dans leur publication un ensemble de méthodes permettant de minimiser le gaspillage d'énergie ingérée dû à la production de méthane :

- Augmenter le niveau de prise alimentaire diminuerait le pourcentage d'énergie perdue (Johnson et al., 1994). Cela reste cependant difficile à quantifier.
- Il y a diminution des pertes d'énergie ingérée avec des glucides très digestibles. Ainsi, voici dans l'ordre les causes de pertes énergétiques selon le type de glucides ingérés : glucides de paroi > sucres solubles > amidon (Moe et Tyrrell (1979), et Torrent (non publié)). Selon Hutcheson (1994), seulement 2 à 3% de perte d'énergie est observée avec les régimes riches en concentrés des USA.
- Le broyage et l'utilisation sous forme de granulés des fourrages diminuent la production de méthane (Blaxter, 1989) quand les régimes ne sont pas restreints. La quantité de méthane produite par unité d'aliment ingéré peut alors diminuer de 20 à 40%.
- L'ajout de lipides à la ration diminue les pertes en méthane. Nous pourrions l'expliquer par la biohydrogénation des acides gras insaturés (AGI), facilitant la production d'acide propionique et l'inhibition des protozoaires, et évitant ainsi qu'il y ait réduction du CO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub>, mais la quantité d'hydrogène métabolique utilisée pour les AGI reste faible (1%) par rapport à celle pour la réduction du CO<sub>2</sub> (48%). Leur effet serait donc surtout dû à leur impact sur la fermentescibilité du substrat (Haaland, 1978).
- Les protozoaires du rumen semblent jouer un rôle dans la production de méthane. Pour des régimes à base de céréales, il est possible de diminuer la production de méthane par défaunation, mais ce n'est pas le cas pour une alimentation fourragère (Whitelaw et al. (1984), et Itabashi et al. (1984)).

A ces méthodes, nous pouvons ajouter la sélection d'animaux produisant naturellement moins de méthane, en vérifiant que cette diminution est héritable et pourra donc se transmettre de génération en génération. Il existe deux principaux angles d'attaque pour cette méthode :

- Sélectionner des animaux produisant moins de méthane par quantité ingérée, c'est-à-dire ayant un meilleur rendement en méthane (= methane yield = MY). En particulier, le temps de rétention ruminale (Pinares-Patiño et al., 2011a) et la taille du rumen (Goopy et al., 2014) semblent avoir un impact non négligeable sur le MY.
- Selon Johnson et Johnson (1995), le meilleur moyen de diminuer les émissions de méthane serait d'améliorer l'efficacité de l'énergie alimentaire utilisée. En effet, à part avec un régime constitué exclusivement de concentrés et qui permet de ne gaspiller que 3% de l'énergie ingérée, il n'y a quasiment aucun moyen de perdre moins de 5,8 à 6,5% de l'énergie. Il faudrait donc qu'avec les 94% d'énergie utilisée, la production soit augmentée, diminuant cette fois-ci la quantité de méthane émise par unité de production en lait ou en viande.

Nous avons donc pu observer que les productions de méthane dépendent de différents facteurs, qui vont avoir un impact sur la capacité et la localisation de digestion des composés alimentaires par les micro-organismes du rumen. Cependant, Pickering et al. (2015b) font remarquer que malgré une production de méthane par le gros intestin représentant 8 à 16% de la production totale chez les ruminants (Murray et al. (1978) cités par Sauvart et al. (2011)), une bien plus faible proportion des émissions totales va être émise par l'intermédiaire des flatulences. Nous allons donc étudier le devenir du méthane dans l'organisme une fois que celui-ci a été produit, et voir comment ce trajet le mène à être très majoritairement émis par voie buccale et non anale.

## 2) Transfert du méthane dans l'organisme

Par un raisonnement purement mécanique, nous pourrions penser que l'ensemble de ce qui est produit dans le rumen va être émis par la bouche des ruminants, et que le méthane formé dans le colon va être expulsé lors de flatulences. En réalité, selon Pickering et al. (2015a), 97,5% du méthane d'un bovin qui mange de la luzerne est émis par la bouche. Cette observation est appuyée par Martin et al. (2006) qui expliquent que, contrairement à une affirmation courante, le méthane produit est rejeté dans l'atmosphère par voie orale (95%), au cours d'éruclations régulières et par les poumons après passage dans le sang, mais très peu par flatulences (5% ; figure 14).

Une étude de Murray et al. (1976) a analysé les trajets du méthane chez 4 moutons nourris au foin de luzerne. Ils ont réalisé un suivi de la radioactivité de différentes zones de l'organisme suite à l'administration de méthane marqué soit au  $^{14}\text{C}$ , soit au  $^3\text{H}$ , dans le rumen puis dans le cæcum :

- Concernant le méthane du rumen :
  - Lorsque l'on administre le méthane marqué dans le rumen, il n'y a aucune excrétion par les flatulences. Il n'y a donc pas de transfert du méthane vers le gros intestin, que ce soit par le tube digestif ou par le sang.
  - 4 à 6% du méthane est excrété par les poumons après passage dans le sang.
  - Tout le reste est présumé émis par éructation. Comme l'expliquent Heywood et Wood (1985), ce gaz éructé va d'abord passer dans l'œsophage après ouverture du cardia du réticulo-rumen. Puis, des contractions antipéristaltiques, les ouvertures du sphincter œsophagien supérieur et de la glotte, associées à la fermeture du nasopharynx, vont entraîner la ré-inhalation d'une grande partie des gaz dans les poumons. Il y a ensuite expiration de ces gaz, mélangés à ceux apportés par le sang.
- Concernant le méthane du gros intestin :
  - Lorsque l'on administre le méthane marqué dans le gros intestin, aucune radioactivité dans les gaz du rumen n'est détectée. Il n'y a donc pas de transfert du méthane vers le rumen, que ce soit par le tube digestif ou par le sang.
  - 89% est excrété par les poumons.
  - Tout le reste est émis par l'anus.

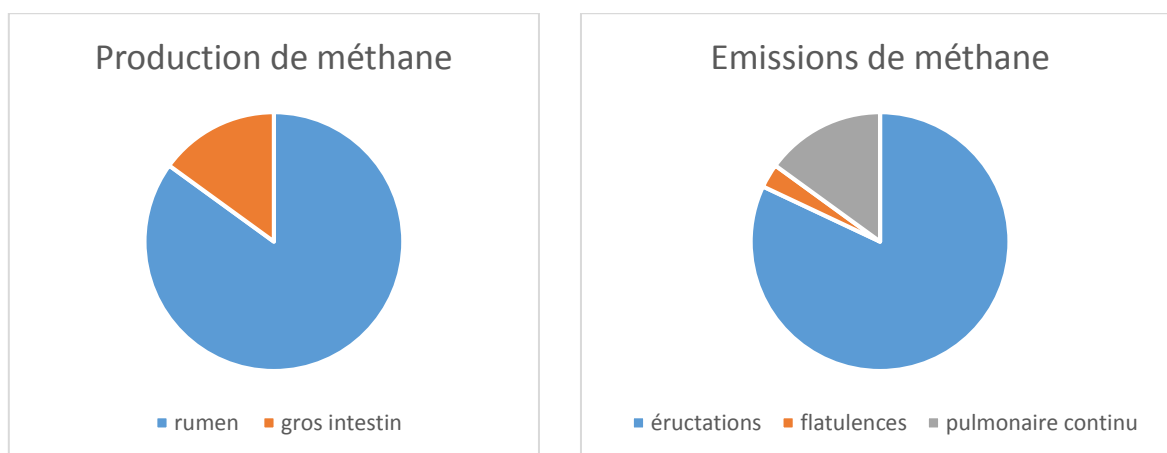


Figure 14 : Représentation des estimations approximatives de la part de production et d'émissions du méthane par les différents systèmes, d'après l'ensemble des données décrites précédemment



Bien que cette étude porte sur un faible nombre d'individus, qu'il existe quelques variations entre la physiologie d'un petit ruminant et celle d'un bovin, entre les animaux d'une même espèce (selon le volume du rumen, le régime, la fréquence respiratoire...), ainsi que pour un même animal (selon son activité, sa position, le fait qu'il soit en train de manger, de ruminer... (Chagunda, 2013a)), ces observations nous expliquent pourquoi la proportion de méthane émise par flatulences est en réalité bien plus faible que celle émise par voie buccale. Nous remarquons également qu'une partie du méthane va être expirée en continu, et non émise en grande quantité de façon ponctuelle comme c'est le cas lors d'une éructation ou d'une flatulence. En effet, une partie du méthane va être absorbée par le sang et être expirée par voie pulmonaire au cours de chaque cycle respiratoire.

### 3) Emissions du méthane

L'éructation, principale source d'émissions entériques de méthane par les bovins, commence approximativement 4 semaines après la naissance, quand la nourriture solide est retenue dans le réticulo-rumen (Anderson et al., 1987). Les bovins éructent toutes les 40 à 90 secondes et ont, d'après Mortola et Lanthier (2005), une fréquence respiratoire de 25 à 40 mouvements par minute. Comme la fréquence respiratoire varie beaucoup d'un animal à l'autre, et pour un même animal au cours de la journée (Piccione et al., 2004), les mécanismes d'excrétion du méthane (éructation, inhalation, exhalation et expiration) doivent changer selon l'individu et le moment. Mais ce qui importe le plus n'est pas de connaître les proportions de gaz qui sont passées par les poumons (origine sanguine, ré-inhalation...). Nous cherchons surtout à déterminer pour chaque individu la quantité totale de méthane émise.

Traditionnellement les émissions de méthane sont exprimées en quantité par jour, quelles que soient les durées et les moyens de mesure. Cependant, lorsque l'on mesure un même animal à plusieurs instants, des différences significatives entre les valeurs obtenues sont observées :

- Tout d'abord, nous remarquons des variations sur le long terme. Les saisons, par exemple, vont avoir un impact. Cela peut en partie être dû au régime alimentaire différent selon les saisons (Pickering et al., 2015a), mais même en conservant un régime identique, des variations sont observées (Pinares-Patiño et al., 2013).
- Ensuite, des variations selon un cycle de 24h sont constatées, comme nous l'expliquent Pickering et al. (2015a). En effet, selon Gregorini (2012), les ruminants ingèrent naturellement la majorité de leur nourriture le matin et en fin d'après-midi. Or, avec ce rythme de distribution de l'aliment, Robinson et al. (2009) ont montré, en chambre de

mesure respiratoire, qu'il y avait une augmentation biphasique des émissions de méthane 15 minutes après les prises alimentaires, et que celle-ci se maintenait pendant quelques heures. Judd et al. (1999) vont dans le sens de cette observation pour les ruminants au pâturage, avec des pics d'émission en milieu de matinée et en fin d'après-midi. Cette augmentation d'émission rapidement après l'ingestion serait directement due à une augmentation de production de méthane (figures 15 et 16), qui fait suite à l'arrivée dans le rumen de substrat fermentescible pour les micro-organismes.

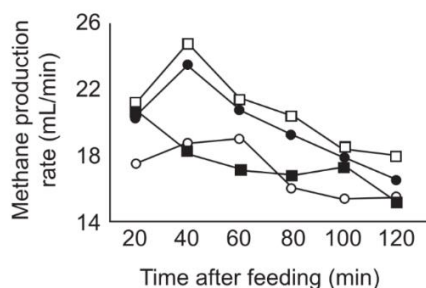
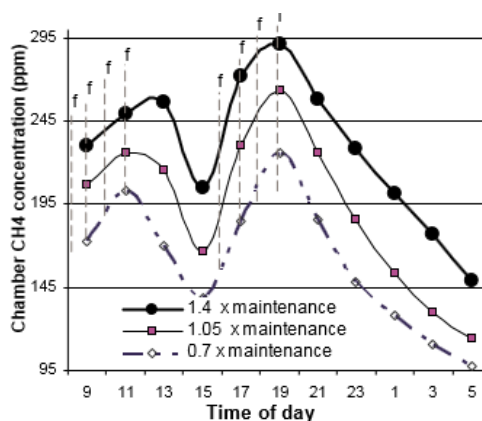


Figure 15 : Mesure de la production de méthane après alimentation chez 4 moutons (Mathers et Walters, 1982)



Avec f : instants où l'aliment est distribué.

Figure 16 : Mesure des émissions en chambre respiratoire sur des moutons recevant 3 niveaux d'alimentation différents (Robinson et al., 2009)

- Enfin, de fortes variations à court terme (parfois d'une minute à l'autre) sont observées (figure 17). Bien qu'après l'ingestion il y ait augmentation de la production de méthane, celui-ci ne va pas forcément être intégralement émis dans les instants qui suivent. En réalité, la fréquence d'éruclation est liée à l'accumulation de gaz dans le sac dorsal du rumen, qui est certes elle-même associée à l'approvisionnement en aliment, mais qui l'est également à la rumination, à l'activité, à la position et aux mouvements de l'animal (McCauley et Dziuk (1965) cités par Pickering et al. (2015a)). Selon ces éléments, du méthane peut s'accumuler sans qu'il y ait éruclation, et modifier le pool de gaz du

rumen. Puis une éructation plus tardive va induire une forte augmentation de la quantité de méthane mesurée par rapport aux instants précédents.

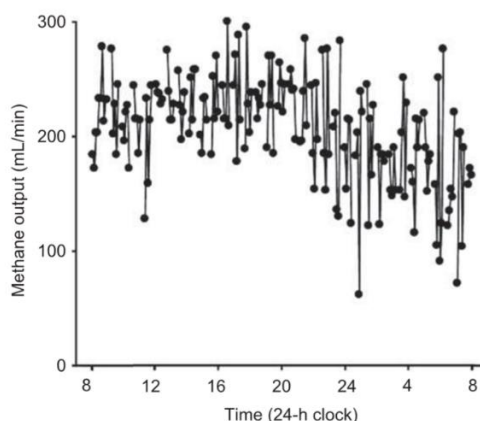


Figure 17 : Nombreuses mesures des émissions de méthane chez un bœuf nourri une fois par jour, régime riche en fourrage (McCrabb et Hunter, 1999)

Dans la littérature, il est possible d'obtenir un ordre d'idée de la quantité de méthane qu'un bovin émet chaque jour, et des variations entre les individus. Un exemple de quantité d'émission moyenne de méthane par les bovins de race allaitante (BA) a été obtenu lors d'un travail effectué par Renand et Maupetit (2016) sur 124 génisses charolaises mesurées par des GreenFeed :

$$\text{CH}_4 = 189 \pm 23 \text{ g/j (CV= 12\%)}$$

CV = coefficient de variation en pourcentage =  $(23/189) \times 100$ .

En reliant ce résultat à la pesée de la nourriture ingérée par chaque bovin, convertie en matière sèche ingérée (=MSI), nous obtenons comme MY moyen sur les génisses :

$$\text{CH}_4/\text{MSI} = 23,76 \pm 4,27 \text{ g/kg (CV = 18\%)}$$

Cependant, ces valeurs peuvent bien sûr varier, notamment avec un régime différent de celui utilisé dans l'expérience de Renand (fourrage à l'auge et granulés de luzerne, blé, pulpe de betterave et son de blé à l'appareil de mesure).

Si l'on s'intéresse aux émissions de méthane par rapport à la production de viande, Vermorel (1995) explique qu'en tenant compte du méthane émis par les mères des jeunes bovins de race allaitante abattus pour la viande, les mesures vont de 800 à 1500 litres de méthane/kg de muscles produit (ou, selon Gerber et al. (2013), 46,2kg CO<sub>2</sub>éq par kg de poids pour la production de viande, contre 2,8kg CO<sub>2</sub>éq par kg de lait standardisé pour la production laitière). En poussant le raisonnement jusqu'aux protéines consommables, nous avons entre 4600 et 7700 litres/kg de protéines musculaires chez les bovins allaitants.

Pour résumer, la production et les émissions de méthane peuvent être sensiblement modifiées selon plusieurs facteurs. Si l'aliment distribué, par exemple, peut avoir un impact, la difficulté pour la mesure des émissions de méthane par les bovins va surtout reposer sur les variations intra-individuelles qui sont observables d'une journée à l'autre et au cours d'une même journée. Ainsi, comme Pickering et al. (2015a) le font observer, cette inconstance dans les émissions influe sûrement sur les estimations de production journalière. Théoriquement, il faudrait donc réaliser des mesures sur le long terme (plusieurs heures) au cours de chaque journée, et ce pendant des périodes étalées sur plusieurs mois, ou alors démontrer que des mesures à court terme (de quelques minutes par exemple) et/ou sur de plus courtes périodes peuvent être représentatives de la capacité ou non pour un individu et son environnement à émettre peu de méthane.

#### **IV. Bilan de l'impact sur l'effet de serre des bovins de races allaitantes et de leurs émissions entériques de méthane**

Le méthane est un gaz à effet de serre très impliqué dans le réchauffement climatique actuel. Les émissions entériques représentent une part significative des quantités totales émises dans l'atmosphère. Les bovins sont de loin majoritaires dans ce mode de production de gaz à effet de serre, avec une responsabilité partagée entre BL et BA. Nous allons nous intéresser aux solutions proposées pour réduire les émissions entériques de méthane par les BA.

Une variabilité existe dans les résultats de mesures d'émission. Celle-ci pourrait être écologiquement exploitable lorsqu'elle offre un espoir de diminuer la quantité totale de méthane émis grâce à l'utilisation d'additifs alimentaires et/ou d'aliments plus adaptés à la réduction des GES d'origine bovine, ou encore grâce à l'éventuelle sélection génétique des bovins moins émetteurs. En revanche, la variabilité observable chez un même individu élevé dans des conditions constantes est une contrainte, puisque les variations au cours d'une même journée ou encore celles d'un mois à l'autre vont imposer des dispositifs de mesure adaptés, dans le but de repérer malgré tout quels sont les bovins et les conduites d'élevage à choisir pour une diminution de l'impact des fermentations entériques sur l'environnement.

Afin d'exploiter au mieux la variabilité, il est en premier lieu nécessaire de connaître l'organisation du cheptel bovin allaitant. Cela permettra de savoir à quels niveaux des leviers d'action pourront être mis en place, et de repérer quels sont les moyens de quantification des émissions adaptés aux contraintes. Une fois ces études effectuées, des solutions pourront être envisagées et analysées dans le but d'identifier celles qui sont efficaces. Parmi ces solutions, nous nous intéresserons en particulier à la sélection génétique.



## **Chapitre 2 : Mitigation des émissions entériques de méthane : étude des solutions envisagées**

### **I. Organisation du cheptel bovin allaitant : exemple de la France**

La recherche apporte beaucoup d'informations qui seront potentiellement exploitables à l'avenir dans le but de diminuer les émissions de méthane. Cependant, ces études doivent être adaptées à l'organisation du cheptel bovin allaitant, puisque les conditions du terrain (élevages et entreprises de sélection) ne peuvent pas toujours offrir des moyens d'évaluation des animaux aussi performants que ceux utilisés initialement dans les Centres de Recherche. Concernant le méthane, les mesures directes nécessitent des conditions particulières et un matériel onéreux. Elles ne peuvent donc pas être réalisées à grande échelle chez les éleveurs.

Appliquer directement en élevage les résultats de la recherche lorsque cela est possible, réaliser des mesures dans les entreprises de sélection, trouver d'autres caractères corrélés aux émissions et mesurables sur le terrain par des organismes spécialisés, ou encore passer par la génomique sont des pistes potentielles pour pallier à ce problème. Dans un pays comme la France, acteur majeur de la production de viande bovine, au 9<sup>ème</sup> rang mondial en 2013 avec 1,43 million de tonnes équivalent carcasse (FranceAgriMer, 2014), voici une description sommaire des deux niveaux dans lesquels il va être possible d'appliquer les résultats des chercheurs.

#### *1) Elevages (hors taureaux de reproduction)*

L'objectif de ces exploitations est d'élever des animaux qui serviront finalement à la production de viande bovine. Ils représentent l'immense majorité du cheptel bovin allaitant français et leur impact sur les émissions entériques de méthane est donc très marqué. Quel que soit le type de production, du naisseur à l'emboucheur (qui engraisse les animaux juste avant l'abattage), en passant par tous les éleveurs intermédiaires, il y a présence dans l'élevage d'animaux qui émettent du méthane.

Pour la gestion de leur exploitation, les éleveurs font des choix. La race sélectionnée, le type d'alimentation, la conduite d'élevage, la valeur génétique des animaux sur divers caractères (le GMQ = Gain Moyen Quotidien = vitesse à laquelle l'animal prend du poids en kg/j, la fécondité...), entre autres, sont autant de paramètres susceptibles d'influencer parfois considérablement le niveau des émissions de méthane par animal ou par kg de viande produite.

Une grande partie des recherches va être directement applicable dans ces élevages. En effet, lorsque celles-ci démontrent par exemple que des aliments, des additifs alimentaires, ou encore des modes de fonctionnement dans la gestion du troupeau permettent de réduire les émissions totales de méthane, le choix de suivre les recommandations devra être réalisé dans les exploitations. En revanche, en ce qui concerne l'évaluation individuelle des émissions de chaque bovin, la mesure directe de celles-ci en élevage est impossible car trop chère et trop contraignante. Il faudra soit identifier d'autres caractères corrélés avec la production de méthane et mesurables sur le terrain, soit se fier à l'évaluation génétique des animaux, reposant sur la mesure du caractère d'émission de CH<sub>4</sub> chez des individus apparentés et/ou sur la génomique.

Pour motiver les éleveurs à s'engager dans une stratégie globale de réduction des émissions de méthane, il est bien sûr préférable de démontrer que leurs choix auront des répercussions économiques positives ou nulles. Dans le cas contraire, l'Etat devra probablement soit imposer des mesures visant à diminuer les émissions entériques, soit inciter à cette réduction par l'intermédiaire de primes.

## 2) Entreprises de sélection (et taureaux de reproduction en élevages)

Ces entreprises possèdent des taureaux ayant une valeur génétique connue, appelée index, et souhaitent exploiter cette valeur en vendant aux éleveurs des paillettes de semence issues de leurs taureaux. Celles-ci serviront à inséminer des vaches de l'élevage et à adapter ainsi le renouvellement du troupeau aux objectifs de l'éleveur. Cependant, en élevage allaitant, il existe aussi un certain nombre de mâles reproducteurs (appelés taureaux « de monte naturelle ») directement présents dans les élevages.

Tous ces taureaux représentent une très faible proportion du cheptel bovin allaitant, mais leur impact sur la production de méthane peut être significatif, puisque l'immense majorité des troupeaux descendent de ces mâles reproducteurs qui vont donc potentiellement transmettre génétiquement leur aptitude ou non à émettre beaucoup de méthane.

L'établissement des index découle de plusieurs étapes :

- En premier lieu, et en relation avec ses partenaires professionnels (Institut de l'Elevage...), l'INRA établit les objectifs de sélection et contribue à identifier les caractères (reproduction, etc.) qui vont être pris en compte dans l'index global des animaux.
- Il faut ensuite évaluer ces caractères dans le cheptel bovin allaitant :
  - Certains vont pouvoir être estimés directement en élevage et dans les entreprises de sélection par des organismes spécialisés. Par exemple, la

conformation bouchère. Mais réaliser cela pour le méthane paraît peu envisageable.

- D'autres ne sont directement mesurables qu'en entreprise de sélection. C'est le cas de la consommation résiduelle (c'est-à-dire la capacité à peu manger pour beaucoup produire = RFI = *Residual Feed Intake*). Nous pourrions imaginer que cela sera éventuellement aussi le cas du méthane.
  - Quelques caractères nécessitent une estimation par la mesure d'un autre facteur qui lui est corrélé (facteur dit « proxy »). Une bonne RFI, par exemple, laisse présager d'une plus faible proportion de gras par rapport au muscle (Renand et al., non publié a). Nous pourrions imaginer l'utilisation d'un « proxy » dans les entreprises de sélection, voire en élevage, en ce qui concerne l'estimation du caractère « méthane ».
  - Enfin, la génomique offre l'avantage de fournir une évaluation de l'animal dès sa naissance, faisant gagner du temps et permettant de réduire la nécessité d'effectuer en routine des mesures parfois coûteuses. Cette méthode repose sur l'analyse de l'ADN (acide désoxyribonucléique) des animaux, apportant des informations sur la potentielle présence de gènes ayant une forte influence dans l'expression phénotypique (c'est-à-dire observable) d'un caractère donné. Maîtriser cette méthode pour le caractère « méthane » va nécessiter de nombreuses recherches, mais nous pourrions là encore penser que cela sera un jour réalisable à la fois pour les animaux d'élevage et pour ceux d'entreprise de sélection, puisqu'un simple prélèvement d'échantillon sur l'animal sera suffisant.
- L'INRA calcule alors l'index de chaque bovin pour chaque caractère, en s'appuyant à la fois sur les évaluations propres de l'animal et sur celles de ses parents et descendants quand elles sont disponibles. L'objectif est d'inclure le méthane dans ces estimations, et qu'il ait une influence sur l'index global de l'animal.

Une fois ces index obtenus sur chaque caractère et l'index global calculé, des experts vont pouvoir conseiller aux éleveurs quel taureau correspondrait à la vache qui va être inséminée, afin de répondre aux objectifs de l'exploitation.

Les recherches sur l'apport potentiel de la génétique dans la réduction des émissions de méthane en France ont donc pour but d'intégrer ce caractère aux décisions qui vont être prises par les éleveurs, sur conseil des entreprises spécialisées, et selon les index calculés par l'INRA.



Le principe est semblable à l'international, avec actuellement un partage des données de la recherche entre tous les pays afin d'apporter rapidement des solutions au problème du réchauffement planétaire.

Pour identifier un maximum de solutions, il faut en premier lieu être capable de mesurer les émissions de méthane suffisamment précisément pour observer quels leviers d'action permettraient d'aboutir à des valeurs basses. Nous allons donc tout d'abord étudier quelles sont les méthodes de quantification du méthane.

## **II. Quantifier les émissions de méthane par les bovins de races allaitantes**

### *1) Contexte*

De multiples moyens de mesurer ou d'estimer les émissions de méthane ont été proposés. Aucun n'est pour le moment appliqué sur le terrain pour la sélection génétique, mais ils servent, dans la recherche, à obtenir des informations indispensables sur la façon dont nous pourrions maîtriser les émissions entériques à l'avenir. Tous présentent des avantages et des inconvénients. Le coût du matériel, l'adaptabilité de la machine aux mesures dans les systèmes pâturants, la contrainte (voire les risques) que cela représente pour le manipulateur et pour l'animal, le nombre d'individus pouvant être mesurés simultanément ou encore la fiabilité de l'outil sont des paramètres à prendre en compte dans le choix de la méthode utilisée.

Déjà dans les années 1990, Johnson et Johnson (1995) expliquaient qu'il fallait s'interroger sur la façon de mesurer le méthane (échelle de groupe ou individuelle ? Mesure effective ou équations selon la nourriture ingérée et/ou l'équilibre de fermentation ? ...). D'après Pickering et al. (2015a), le caractère CH<sub>4</sub> peut être défini à trois niveaux :

- Au niveau du système d'exploitation. Puis, en connaissant le nombre de têtes, nous estimons quelles sont les émissions par individu en moyenne.
- Selon le niveau de production animale (donc selon l'évolution du poids de carcasse du bovin, en kg), ce qui va aboutir à des résultats sur l'intensité d'émission, appelée aussi « intensité de méthane » (quantité (en g) de CH<sub>4</sub>/kg de production).
- Enfin, au niveau de l'animal lui-même avec des mesures d'émissions, de poids et de prise alimentaire individuelles, dans le but d'évaluer par exemple pour chaque individu le MY = g CH<sub>4</sub>/kg MSI (Masse Sèche d'aliment Ingéré), ou encore la consommation résiduelle :
  - Pour ce dernier niveau d'étude, il faudra tout d'abord trouver une méthode d'échantillonnage du gaz émis par les bovins (comment récupérer ce gaz ? A quels moments ? Pendant quelle durée ? Etc.).

- Une fois échantillonné, comme le décrivent Johnson et Johnson (1995), la concentration en méthane dans le gaz total peut être mesurée de diverses manières (infrarouge dans un flux de gaz, chromatographie gazeuse, spectroscopie de masse, laser...).

Nous avons vu auparavant que les émissions de méthane ne sont pas constantes dans une journée pour un même animal, et qu'elles peuvent en outre varier sur le long terme selon de multiples facteurs (les saisons par exemple). Dans le but d'augmenter la quantité et la qualité des informations procurées par la recherche, puis pour pouvoir les appliquer à l'avenir sur le terrain, c'est-à-dire en élevage et en entreprise de sélection, il est indispensable de maîtriser les méthodes de mesure disponibles. Il faut donc étudier leur capacité à pallier aux contraintes liées à la physiologie des bovins allaitants et à leur environnement.

Nous allons dans un premier temps observer quels sont les moyens de mesurer les animaux en groupe, puis nous verrons quelles techniques permettent d'évaluer les émissions quotidiennes individuelles de méthane par les bovins allaitants. Enfin, des méthodes alternatives (*in vitro*, modèles d'estimations...) seront proposées. Précisons que les résultats apportés par la recherche sont encore insuffisants à l'heure actuelle. En conséquence, certaines études effectuées sur les bovins laitiers et les ovins seront ici décrites, à condition bien sûr qu'il soit possible d'exploiter chez les BA la méthode utilisée auparavant chez les autres ruminants.

En règle générale, les mesures sont exprimées en  $g_{CH_4}/j$ .

## 2) Mesures effectuées sur les animaux

### a) Mesures en groupe

Elles permettent de tenir compte des interactions des animaux entre eux, et avec leur environnement. Etant donné la complexité de ces méthodes et leur faible utilisation dans le domaine de la sélection génétique, principal sujet de mon travail, seule une description sommaire de certaines techniques sera effectuée ici.

D'après Johnson et Johnson (1995), il est possible d'utiliser des méthodes micro-météorologiques, des traceurs ou encore des techniques de « bilan massique » :

- Méthodes micro-météorologiques : très complexes et très difficiles à mettre en place, elles nécessitent des contraintes logistiques et financières importantes (exemple : un anémomètre sonique), et il faut s'assurer que le volume de mesures inclut bien tous les animaux, ce qui complique encore ces techniques, notamment au pâturage.

- Méthodes par traceur : le SF<sub>6</sub>, décrit dans les méthodes de mesure individuelles, peut être libéré à une vitesse connue dans 5 à 10 points de la zone de pâture du bétail afin de suivre le même parcours que le méthane. On mesure ensuite les concentrations de méthane et de SF<sub>6</sub> en différents points. Il faut enfin connaître les concentrations basales de ces deux gaz. Les différences de concentrations ( $C_{\text{avec bétail}} - C_{\text{basales}}$ ) des deux gaz associées à la quantité connue de SF<sub>6</sub> libéré sur un temps donné permettent de connaître les émissions de méthane. Cette méthode est par exemple décrite par Lamb et al. (1986).  
Remarque : la technique CO<sub>2</sub>, également décrite dans les méthodes individuelles de mesure, pourrait aussi être appliquée à des mesures de groupe selon Storm et al. (2012).
- Les techniques de « bilan massique » : on calcule la différence de concentration de méthane entre ce qui sort et ce qui entre dans un groupe de bovins. Ces calculs tiennent compte du volume et du flux d'air dans l'enclos. Westberg et al. (1990) décrivent un protocole afin de réaliser cela en intérieur, Johnson et Johnson (1995) résumant comment le faire en extérieur.

Enfin, les mesures de groupe vont apporter des informations sur l'impact qu'un ensemble d'animaux va avoir sur les émissions totales de GES, et éventuellement sur certaines solutions (conduite d'élevage, etc.) visant à réduire les émissions. En effet, il est possible d'analyser quelles sont les différences quantitatives de production de méthane entre deux groupes élevés dans des conditions différentes. En revanche, ces méthodes ne traduisent pas la capacité propre d'un animal à émettre moins de méthane que les autres alors qu'il est élevé dans des conditions similaires.

L'apport de résultats obtenus par des mesures individuelles va donc offrir de nouvelles perspectives pour la mitigation des émissions entériques.

#### b) Mesures individuelles

Parmi ces techniques, certaines vont permettre de mesurer les animaux « sur le long terme », c'est-à-dire que l'air exhalé est récolté en continu sur plusieurs heures ou journées consécutives sans s'arrêter. D'autres vont évaluer les émissions « à court terme », c'est-à-dire par des prélèvements d'échantillons ponctuels qui devront ensuite être ramenés à une émission journalière quand cela est possible. Enfin, des méthodes dites « proxy » vont être envisagées et décrites à la fin de cette partie.

Certains outils vont pouvoir être utilisés sur de longues périodes, c'est-à-dire que les animaux sont mesurés chaque jour, sur le court ou le long terme, pendant plusieurs semaines ou mois. D'autres ne seront réalisées que sur de courtes périodes, ne dépassant parfois pas quelques jours.

L'avantage des mesures individuelles repose sur le fait qu'elles permettent de repérer les variations d'émissions entre des animaux élevés dans les mêmes conditions, en plus d'évaluer les effets d'autres facteurs éventuellement analysables par des comparaisons entre groupes entiers. Ces variations interindividuelles vont servir de fondement à la sélection génétique. En revanche, les variations intra-individuelles au cours d'une journée et d'une saison à l'autre vont représenter des contraintes. Les méthodes de mesure et leur interprétation doivent ainsi être adaptées, afin de s'assurer que l'estimation à un instant  $t$  de la production de méthane quotidienne (PMQ) de l'animal traduise correctement ce que celui-ci va émettre chaque jour tout au long de sa vie.

La répétabilité (rép) est un paramètre qui va nous permettre d'observer si une estimation d'émission individuelle est fiable, et si un animal qui émet moins que les autres à un instant  $t$  continue d'émettre moins au cours du temps. Pour un caractère qui se répète au cours d'une vie (c'est le cas des émissions de méthane), elle traduit la corrélation qu'il y a entre deux performances successivement évaluées chez un même animal et pour un même caractère.

Or, la performance d'un animal pour un caractère donné dépend à la fois d'effets fixes (par exemple la même alimentation donnée à tous les animaux au cours d'une même expérience), de son environnement permanent (historique de l'animal, etc.), de sa valeur génétique additive (c'est-à-dire la somme des effets moyens des gènes paternels et maternels pour le caractère étudié), et d'une résiduelle (effets non anticipés, dont les variations intra-individuelles quotidiennes). Les effets fixes sont propres à l'expérience et ne varient donc pas pendant celle-ci, tandis que l'environnement permanent et la valeur génétique additive sont propres et fixés pour chaque individu mais variables d'un animal à l'autre.

Ainsi, la performance vaut :

$$P = \mu + \text{effets fixes} + \text{environnement permanent} + \text{valeur génétique additive} + \text{résiduelle}$$

Avec  $\mu$  = performance moyenne sur l'ensemble de la population.

Dans un protocole expérimental, pour que la corrélation entre deux performances successivement évaluées chez un même animal soit haute, il faut que la valeur de performance mesurée dépende principalement du potentiel fixé de l'animal, et pas des effets non anticipés. Autrement dit, il faut que les variations entre performances mesurées chez tous les individus

soient en grande partie dues aux valeurs génétiques additives des animaux et à leur environnement permanent.

Finalement, nous avons :

$$\text{Répétabilité} = V_{EP} + V_A / V_{\text{Totale}} = V_{ii} / V_{\text{totale}}$$

Avec V = variance, EP = environnement permanent, A = valeur génétique additive et ii = interindividuelle.

Ainsi, plus la répétabilité est proche de 1 pour un intervalle de temps entre deux mesures donné, plus cela signifie que l'estimation est fiable pour évaluer la performance de l'animal sur la durée de l'intervalle. Selon le moyen de mesure utilisé, il faudra adapter les protocoles afin d'avoir des estimations aussi répétables que possible, et sur un intervalle aussi long que possible.

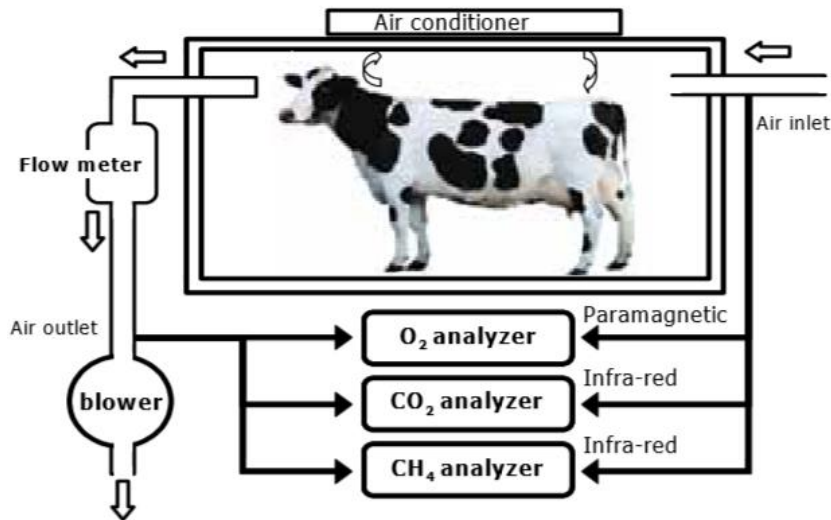
Sauf indication contraire, les informations sur les moyens d'estimation individuelle d'émissions de méthane proviennent d'une publication de Storm et al. (2012).

#### *i. Mesures directes sur le long terme*

##### ❖ Les chambres respiratoires

Elles sont considérées comme la méthode de mesure standard et sont utilisées depuis une centaine d'années. Le principe est qu'elles collectent le gaz total exhalé par l'animal et mesurent ainsi la concentration de certains gaz, comme le méthane par exemple.

Parmi tous les procédés développés, nous pouvons citer les systèmes calorimétriques, dans lesquels la composition de l'air est mesurée. Deux types de circuits existent : ouverts (majoritairement utilisés ; figure 18), et fermés.



Une pompe permet à l'air de suivre un circuit le menant de l'entrée à la sortie, en passant par la chambre dans laquelle se trouve l'animal, par un appareil de mesure du flux d'air, et par des capteurs de différents gaz.

Figure 18 : Diagramme d'une chambre respiratoire à circuit ouvert (Bhatta et al., 2007)

Dans ces systèmes, il est possible en règle générale de calculer l'émission entérique de l'animal à partir du flux d'air et de la concentration en méthane de l'air entrant et de l'air sortant. Des calculs plus complexes ont été développés pour prendre en compte la légère différence observée entre les flux d'air entrant et sortant, et les changements dans la concentration des différents gaz de la chambre.

De nombreuses chambres respiratoires (CR) ont été construites sur ce principe, certaines prenant l'air directement dans la pièce dans laquelle se trouve la chambre respiratoire, d'autres étant isolées avec une humidité et une température contrôlées.

Presque tous les types d'alimentations (et leur relation avec les émissions de méthane) peuvent être explorés : la quantité, la composition, l'utilisation d'additif, l'alimentation à volonté ou non... De plus, nous pouvons connaître les variations d'émissions au cours de la journée. Mais malgré de bonnes précision et fiabilité des mesures, avec un contrôle aisé de l'environnement de l'animal, certains éléments empêchent cette méthode d'être considérée comme idéale :

- Nous observons un impact sur le comportement de l'animal (absence d'exercice, etc.), et notamment sur la quantité de matière sèche ingérée (MSI) par celui-ci (Herd et al. (2016) cités par Renand et al. (non publié b)), l'alimentation étant un facteur influençant significativement la quantité d'émissions de gaz à effet de serre. Cependant il semblerait que dans des chambres aux murs transparents (photographie 1), permettant ainsi aux bovins de se voir, la quantité de MSI ne soit pas modifiée (Hellwing (non publié) cité par Storm et al. (2012)).



Photographie 1 : Chambres respiratoires avec murs transparents, fabriquées à l'Université d'Aarhus (Danemark) (Storm et al., 2012)

- Nous pouvons nous interroger sur la capacité de ce moyen de mesure à être révélateur de ce qu'il se passe pour des animaux au pâturage. En effet, ces derniers sélectionnent leur nourriture lorsqu'ils sont au pré, ce qui ne peut pas être réalisé en CR. De plus, l'herbe fraîche continue de respirer dans la CR, elle pourrait donc modifier les concentrations en GES. Ces éléments posent problème puisque les bovins de races allaitantes passent souvent beaucoup de temps à l'extérieur.
- Bien que des systèmes aient été développés afin de réduire les coûts, ce moyen de mesure reste cher (plusieurs centaines de milliers d'euros l'unité).
- Les variations d'émissions intra-individuelles d'un jour à l'autre ( $CV = 7,2\%$ , Blaxter et Clapperton (1965)) conduisent à privilégier des mesures sur 3 à 5 jours pour s'assurer de la représentativité des résultats obtenus. Or, un seul animal à la fois peut être mesuré dans une même chambre. Ce moyen n'apporte donc pas des résultats rapides sur un grand nombre d'animaux, alors que cela est nécessaire pour pouvoir proposer des solutions de mitigation au plus vite.
- Malgré des recommandations d'au moins 3j de mesures consécutifs dans la littérature (Wright et al., 2004, Gamsworthy et al., 2012, et Xue et al., 2011), Pickering et al. (2015b) indiquent que la répétabilité des mesures individuelles de méthane est bonne sur des jours consécutifs (0,69 dans une étude de Herd (non publiée) citée par Pickering et al. (2013)), mais diminue quand l'intervalle augmente entre les périodes de mesures. Cela est confirmé pour le MY dans une étude de Pinares-Patiño et al. (2013), qui explique qu'une mesure sur 3 jours est peu représentative du phénotype de l'animal sur un an ou une vie, et qu'il faudrait donc répéter les mesures quelques temps plus tard.

### ❖ La technique par traceur SF<sub>6</sub>

Elle a été inventée il y a une vingtaine d'années pour faciliter la mesure des bovins au pâturage, ce qui peut être très utile pour apporter des informations adaptées aux conditions d'élevage fréquemment rencontrées avec les bovins allaitants.

Le gaz SF<sub>6</sub> (hexafluorure de soufre) présente les avantages d'être peu cher, facile à détecter et à analyser, physiologiquement inerte et stable, non-toxique et capable de se mélanger aux gaz du rumen. Un tube à perméation dont la vitesse de libération du SF<sub>6</sub> est connue va être placé dans le rumen de l'animal (figure 19). A la sortie du mufle, nous fixons un tube capillaire relié à une boîte de collection des gaz émis. Cette boîte peut se trouver sur le dos de l'animal, ou pendue à son cou. Le tube capillaire va contrôler à quelle vitesse la boîte va se remplir, son contenu étant généralement analysé par chromatographie tous les jours.

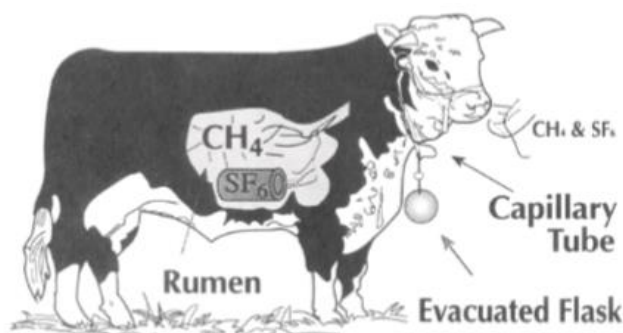


Figure 19 : Mise en place du dispositif pour la technique par traceur SF<sub>6</sub> (Storm et al., 2012)

Nous pouvons alors calculer la quantité de méthane produit et émis avec la formule :

$$F_{CH_4} = F_{SF_6} * \frac{[CH_4 \text{ mesurée}] - [CH_4 \text{ atmosphérique}]}{[SF_6 \text{ mesurée}] - [SF_6 \text{ atmosphérique}]}$$

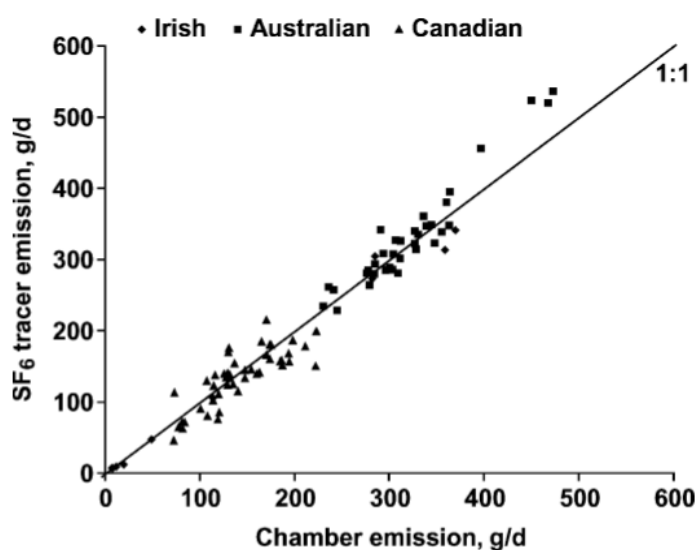
Avec F<sub>CH<sub>4</sub></sub> la quantité totale de méthane émise pendant la durée de collecte en g, F<sub>SF<sub>6</sub></sub> la quantité du traceur relâchée et connue (g), et les « [ ] » signifiant « concentration », toutes mesurées avec le même analyseur (ppm).

Plus rarement, des résultats obtenus par des mesures réalisées sur des gaz prélevés directement dans le rumen ont été publiés (Tekippe et al., 2011).

Cette méthode « SF<sub>6</sub> » présente les avantages de pouvoir étudier les émissions en fonction de multiples schémas d'alimentation, comme c'est le cas pour les chambres respiratoires, et d'être utilisable au pâturage. Son coût est moindre. Malgré une plus haute variabilité mesurée avec la technique SF<sub>6</sub> par rapport aux mesures en chambre respiratoire (Grainger et al., 2007), des études montrent que les valeurs d'émissions quotidiennes et de MY



obtenues par la technique SF<sub>6</sub> concordent bien avec celles obtenues en chambres respiratoires (Deighton et al. (2013), Grainger et al. (2007) ; Figure 20).



Remarque 1 : nous observons que, selon l'étude, et donc selon le type d'animal, d'alimentation, etc. la quantité de méthane émis varie.

Remarque 2 : nous remarquons qu'une majorité des résultats montre une valeur légèrement plus haute en CR par rapport à la technique SF<sub>6</sub>.

Figure 20 : Concordance observée entre les mesures de CH<sub>4</sub> mesurées en CR et par la technique SF<sub>6</sub> (Grainger et al., 2007, méta-analyse à partir de leurs propres données et des résultats d'une étude canadienne (McGinn et al., 2006) et d'une étude irlandaise (O'Mara, non publiée)

En revanche, voici quelques inconvénients lorsque l'on utilise cette méthode :

- Il y a obligation pour l'animal de s'habituer à porter le matériel (Hegarty et al., 2007).
- Le SF<sub>6</sub> est un GES. Il peut de plus rester des résidus dans la viande (Bhatta et al., 2007).
- Il est difficile d'étudier les variations d'émission au sein d'une même journée, à moins de prélever le contenu de la boîte plusieurs fois par jour, ce qui est chronophage et parfois dangereux pour le manipulateur, et potentiellement perturbant pour l'animal et son comportement.
- La vitesse de libération du gaz SF<sub>6</sub> n'est pas parfaitement constante (Ulyatt et al., 1999). De plus, elle semble être 6 à 11% moins rapide qu'en conditions de laboratoires. Bien que des méthodes tenant compte de ces défauts soient décrites (Ulyatt et al., 1999), cela peut avoir un léger impact sur la précision des estimations de quantité de méthane produit.
- Les tubes relâchant rapidement le gaz SF<sub>6</sub> mènent à des estimations de quantité de méthane supérieures par rapport aux tubes à relâchement lent. Pour comparer des résultats, il est donc conseillé d'utiliser des tubes semblables.

- Bien que la répétabilité des mesures d'un jour à l'autre semble correcte (0,49 à 0,73 (Vlaming et al., 2008), sur 4 vaches laitières, selon l'aliment distribué (fourrage ou céréales, respectivement)), nous manquons d'estimations fiables sur de nombreux animaux (Pickering et al., 2013), en particulier chez les bovins de races allaitantes.
- Pour la mesure des quantités de SF<sub>6</sub> et de CH<sub>4</sub> atmosphériques, il est par exemple difficile de tenir compte du vent qui va jouer un rôle dans la modification des valeurs mesurées dans l'échantillon analysé.
- Johnson et al. (1994) et Ulyatt et al. (1999) ont observé des valeurs 5 à 7% inférieures à celles obtenues en chambre respiratoire, ce qui peut en partie être expliqué par le fait que les émissions anales de méthane sont prises en compte dans les chambres respiratoires, et pas avec la technique SF<sub>6</sub>.
- Les coefficients de variation intra et interindividuels sont plus élevés avec cette technique par rapport aux chambres respiratoires (2 à 3 fois plus dans une étude de Pinares-Patiño et al. (2011b) sur des moutons). Cela implique de devoir mesurer les émissions pendant de plus longues périodes afin de mettre significativement en avant des différences dans l'efficacité de diverses méthodes pour réduire les émissions de méthane.

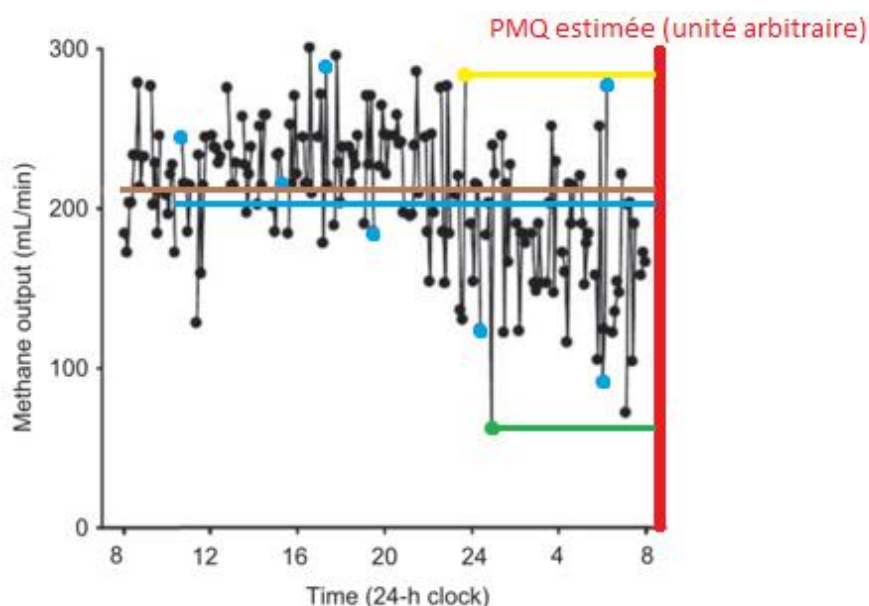
## *ii. Mesures directes à court terme*

Etant donné les variations d'émissions d'un instant à l'autre chez les ruminants, elles présentent toutes l'inconvénient de ne pas être assez fiables pour ramener cela à une émission journalière lorsque l'on effectue une seule mesure. La répétabilité calculée sur des valeurs quotidiennes est donc moins haute qu'en chambre respiratoire.

En revanche, leur facilité d'utilisation et leur faible coût permettent généralement de mesurer beaucoup d'animaux et d'obtenir de nombreuses valeurs sur de longues périodes pour chacun d'eux, ce qui améliore finalement la fiabilité des estimations d'émissions journalières, et ce qui présente en plus l'avantage de fortement augmenter la quantité d'informations nécessaires à la connaissance des solutions de mitigation d'émissions de méthane par les bovins de races allaitantes et par les ruminants en général. De plus, ces techniques sont souvent plus adaptables à une utilisation au pâturage, ce qui correspond aux projets de la recherche qui aspire de plus en plus à effectuer des mesures dans un environnement proche des conditions d'élevage, afin que les conditions expérimentales ne faussent pas les résultats (Hegarty, 2013).

Ainsi, selon Hegarty (2013), deux challenges sont attribués aux mesures à court terme : fournir une estimation répétable du taux d'émission, et pouvoir être reliées à une PMQ

(= production de méthane quotidienne). Il faut donc répéter les mesures pour se rapprocher de la production réelle (figure 21).



PMQ réelle sur une journée.

Estimations de la PMQ avec une unique mesure faite au hasard au moment d'une faible émission ou lors d'une forte émission.

Estimation de la PMQ avec la moyenne arithmétique de nombreuses mesures.

Figure 21 : Illustration de l'intérêt de répéter les mesures (Figure initiale (en noir) de McCrabb et Hunter, 1999)

Cette illustration a été réalisée afin de montrer qu'en multipliant les mesures sur une journée, les risques de fortement sous-estimer ou surestimer la PMQ sont diminués. Le raisonnement est le même en réalisant des mesures chaque jour sur une longue période (quelques mois), puisque là encore, un équilibre entre valeurs basses et valeurs hautes va pouvoir se mettre en place. Nous allons étudier deux techniques permettant de réaliser des mesures à court terme chez les bovins de races allaitantes.

#### ❖ Le GreenFeed

Les animaux peuvent aller chercher un supplément d'aliments dans un distributeur qui va les reconnaître et pouvoir mesurer la quantité de méthane (ainsi que celle de CO<sub>2</sub>) émise pendant qu'ils mangent, soit pendant 3 à 5 minutes.

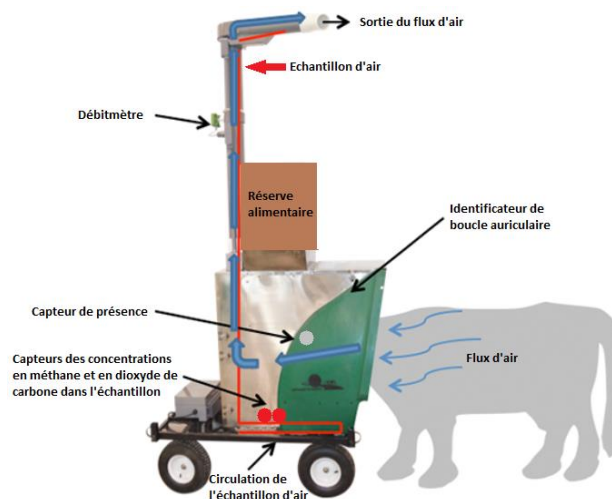


Figure 22 : Le GreenFeed<sup>®</sup>, conçu par l'entreprise C-lock Inc. dans le Dakota du Sud (Crédit image : C-Lock Inc.)

Un flux d'air passe en continu dans le circuit et sa vitesse est mesurée (figure 22). Pendant que l'animal mange au distributeur intégré dans le GreenFeed (GF), il va exhaler de l'air, qui va lui aussi passer dans ce circuit. Il va alors être possible de mesurer, grâce à des capteurs infrarouges, la concentration en méthane (et en CO<sub>2</sub>) présente dans le circuit. Un capteur de position du nez de l'animal s'assure que celui-ci est bien placé correctement au cours de la mesure.

A partir de la vitesse de l'air et des concentrations obtenues en présence et en absence de l'animal, il est possible de déterminer quelle quantité a été émise par celui-ci pendant son temps de présence à la machine.

En plus d'être facile d'utilisation, peu contraignant pour le manipulateur, relativement peu cher (environ 40 000 euros l'unité), et de pouvoir mesurer plusieurs animaux (une vingtaine) à de multiples reprises au cours d'une même journée, cet appareil présente l'avantage de pouvoir être utilisé à la fois en stabulation, en stalle entravée ou au pâturage. Il est peu contraignant pour l'animal, ce qui diminue la probabilité qu'il ait un impact sur son comportement et donc sur sa production de méthane. Enfin, lorsque l'on utilise la moyenne des mesures au GreenFeed de chaque animal sur une assez longue période, la corrélation de ces mesures avec celles obtenues en chambre respiratoire est bonne ( $r = 0,85$  pour la PMQ et  $0,60$  pour le MY chez des Angus (Velazco et al., 2016)), et la répétabilité entre les moyennes des animaux est très correcte (rép=0,77 avec des moyennes calculées sur 2 fois 4 semaines consécutives, sur 124 génisses charolaises (Renand et Maupetit, 2016)).

Ses inconvénients :

- La mesure du méthane ne s'effectue que quand l'animal a la tête dans la machine. Pour ensuite ramener cette estimation à la journée, les équations linéaires vont

entraîner de fortes variabilités intra-individuelles d'une mesure à l'autre et donc d'un jour à l'autre. Heureusement, il est possible de mesurer beaucoup d'animaux à de multiples reprises et sur de longues périodes, atténuant la variabilité due à l'instant de mesure.

- Actuellement, la nourriture solide distribuée au GreenFeed est en général un aliment condensé. Pour les mesures au pâturage, il serait préférable d'avoir la possibilité de distribuer un appât à faible teneur en énergie (sel, eau...) afin de ne pas modifier le régime de l'animal (Renand et Maupetit, 2016).
- Cette technique est nouvelle, nous manquons encore de recul.

#### ❖ La technique CO<sub>2</sub>

Avec cette technique, le CO<sub>2</sub> est utilisé comme traceur naturellement produit par l'animal. Le principe est que l'on mesure à intervalles réguliers le ratio des concentrations [CH<sub>4</sub>] / [CO<sub>2</sub>] dans l'air émis par l'animal, tout en calculant quelle est la quantité quotidienne de CO<sub>2</sub> qui va être produite par le bovin. A une quantité d'énergie métabolique ingérée donnée, la production de CO<sub>2</sub> est beaucoup moins variable dans la journée que la production de CH<sub>4</sub>. Le CO<sub>2</sub> peut donc servir de marqueur interne, et le même type d'équation qu'avec la technique SF<sub>6</sub> est alors appliqué.

La quantification du CO<sub>2</sub> produit repose sur plus de 100 ans d'études portant sur la chaleur produite par l'animal en fonction de son régime alimentaire, et sur la forte relation existant entre production quantitative de chaleur et de CO<sub>2</sub> (Elia et Livesey, 1988). Nous savons par exemple que pour des animaux à l'entretien (donc ne produisant pas), 1L de CO<sub>2</sub> est émis par 22 kilojoules environ de chaleur créée. Des corrections peuvent être apportées à cette valeur de base lorsque l'animal est en lactation ou en croissance/engraissement, et en fonction du régime alimentaire et de la taille de l'animal.

Les mesures de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> peuvent être réalisées à l'aide d'un appareil portable. En effet, les concentrations en CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> dans l'air expiré par les bovins étant respectivement 100 et 1000 fois plus élevées que celles dans l'air atmosphérique, il suffit d'avoir 5 à 10% d'air respiratoire dans l'échantillon analysé pour que cela soit significatif des concentrations émises par l'animal. Avec l'équipement Gasmeter (*Gasmeter Technologies Oy*, Helsinki, Finlande ; Photographie 2) généralement employé, portable et facile d'utilisation, l'analyse repose sur des mesures infrarouges réalisées à la sortie du mufler de l'animal, de nombreuses fois par jour, et pendant plusieurs jours.



Photographie 2 : Le Gasmét portable (Storm et al., 2012)

Cette technique présente l'avantage de pouvoir éventuellement être développée pour application au pâturage. De plus, elle est rapide d'utilisation et assez peu onéreuse. Elle peut donc servir sur beaucoup d'animaux. Lassen et Lovendhal (2016), sur 3 121 vaches Prim'Holstein, concluent à une très forte corrélation entre les émissions de méthane estimées et celles obtenues par la technique CO<sub>2</sub>.

Quelques inconvénients à cette méthode :

- La quantité de CO<sub>2</sub> produit dépendant de la taille, de l'activité, et de la production de l'animal, la difficulté pour comparer des animaux entre eux s'en trouve augmentée. En effet, même en leur fournissant une alimentation constante, il faudra estimer l'émission de méthane en fonction d'un autre paramètre lui-même estimé (le CO<sub>2</sub>), augmentant le risque d'erreur.
- Bien que la production de CO<sub>2</sub> dans une journée soit moins épisodique que celle de méthane, elle peut tout de même présenter quelques variations, notamment à cause de l'activité à un instant t (Corbett et al., 1971), ce qui va avoir un impact sur la précision de l'estimation journalière à partir d'une mesure à court terme.
- Puisque l'on réalise une mesure à court terme, il y a augmentation de la variation intra-individuelle d'un jour à l'autre. En revanche, le fait de pouvoir mesurer beaucoup de fois un grand nombre d'animaux va réduire l'erreur standard des expériences.
- Cette technique est très nouvelle, nous manquons encore de recul et de publications la concernant, notamment chez les bovins allaitants (très peu d'informations sont disponibles sur les modalités d'utilisation de cette technique, et sur la répétabilité des résultats obtenus). Dans une publication de Lassen et al. (2012), sur 50 Prim'Holstein et 43 jersiaises, les répétabilités entre visites au robot de traite obtenues étaient de 0,37 et 0,33, respectivement.

iii. *Mesures directes moins recommandées et/ou moins utilisées pour le moment*

Les « *Head boxes* », décrites dans une étude de Johnson et Johnson (1995), reposent sur le même principe que les chambres respiratoires. Ce sont des boîtes étanches entourant la tête de l'animal pendant que celui-ci est à l'auge. Elles présentent l'avantage d'être moins chères, mais elles sont encore plus contraignantes pour l'animal et les émissions par flatulences ne sont pas mesurées (McLean et al., 1987).

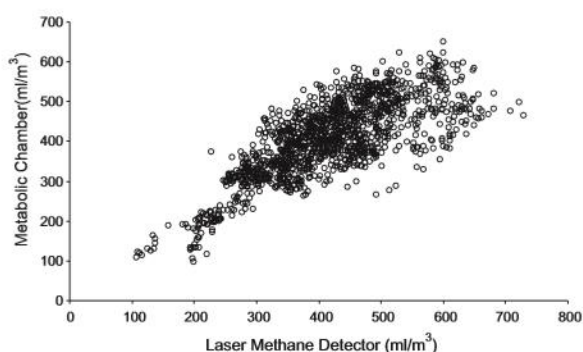
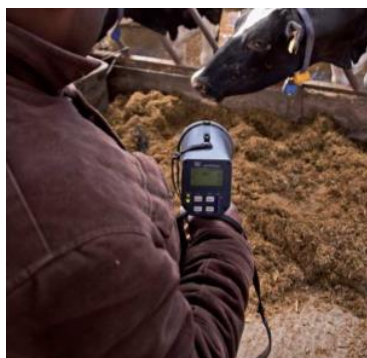
Les masques, qui fonctionnent aussi sur le même principe que les chambres respiratoires, ne permettent pas de nourrir. Les mesures se font donc à court terme. En plus de cet inconvénient, Liang et al. (1989) ont trouvé que les mesures sous-estimaient la production de 9% en moyenne.

Johnson et Johnson (1995) décrivent également une technique par traceur isotopique : il y a utilisation de  $^3\text{H}$  **méthane** ou de  $^{14}\text{C}$  **méthane** sur des « vaches hublot » (photographie 4, page 74) (Murray et al., 1976). Après perfusion du gaz marqué dans le rumen ventral, nous récoltons des échantillons de gaz dans le rumen dorsal (ou alors nous analysons éventuellement l'air expiré) puis nous calculons la production totale de méthane en fonction de l'activité dans le gaz récolté. Au lieu de perfuser, France et al. (1993) ont aussi travaillé avec une administration unique. Divers modèles mathématiques en fonction de la précision souhaitée existent. Les calculs et la mise en place expérimentale sont assez simples, mais la perfusion est difficile car le méthane est peu soluble. De plus, selon Bhatta et al. (2007), ces molécules radioactives ne peuvent pas être utilisées avec des animaux destinés à entrer dans la chaîne alimentaire. En alternative, les  $^{13}\text{C}$  **méthane** sont très chers, et les hydrogènes des  $^2\text{H}$  **méthane** peuvent être transférés à d'autres molécules, faussant les résultats.

D'autres gaz traceurs ont été envisagés (Bhatta et al., 2007). L'éthane et le propane (haut seuil de détection), le xénon et le krypton (chers), et l'argon (haute concentration basale).

L'utilisation d'un LMD (*Laser Methane Detector ; Engineering Company of Tokyo Gas Engineering Solutions Corporation*, Tokyo, Japon ; Photographie 3) a été décrite dans quelques publications très récentes dont celles de Chagunda et al. (2013b), de Ricci et al. (2014), et de Pickering et al. (2015a). Elle consiste en des mesures ponctuelles (quelques dizaines de seconde) sur l'air exhalé, réalisées manuellement à quelques mètres de l'animal et à l'aide d'une spectroscopie d'absorption infrarouge. Comme pour toute technique de mesure à court terme, le but est de multiplier les mesures pour que la moyenne soit représentative des émissions de l'animal. Cette nouvelle technique présente les avantages d'être peu coûteuse, rapide, et une

bonne corrélation entre mesures au LMD (en ml/m<sup>3</sup> ou en ppm) et en chambre respiratoire serait possible à obtenir ( $r = 0,8$ ,  $p\text{-value} < 0,001$ , Chagunda et Yan (2011) chez 8 bovins laitiers ; Figure 23). Cependant, une telle corrélation n'est pas toujours observée ( $r = 0,47$ , Chagunda et al. (2013b) chez 2 bovins laitiers), la répétabilité des résultats obtenus avec un LMD est encore mal connue (rép  $< 0,1$ , Pickering et al. (2015a), avec très peu de données), et il reste à étudier le sujet beaucoup plus en profondeur pour savoir comment prendre en compte les conditions d'expériences (moment de mesure par rapport à la dernière alimentation (3 à 5 heures après selon Ricci et al. (2014) sur 24 brebis et 72 bœufs en finition), nécessité d'identifier les valeurs hautes dues à des éructations, impact de la position, de l'activité, de l'humidité, de la vitesse et de la direction du vent...), en particulier si l'on souhaite utiliser le LMD au pâturage ou à la ferme (Chagunda et al., 2013b).



Photographie 3 (à gauche) : Utilisation du LMD (Chagunda, 2013a (crédit photo : A. Ross)), et figure 23 (à droite) : Corrélation des mesures effectuées au LMD avec celles effectuées en chambre respiratoire sur des vaches laitières (Chagunda et Yan, 2011)

Des mesures en chambre respiratoire portable pour les ovins ou encore en salle de traite pour les laitières ont été décrites, mais elles ne sont pas applicables avec les bovins allaitants. Elles ne sont donc pas décrites ici.

#### *iv. Mesures de paramètres associés*

Ces méthodes sont dites « méthodes proxy ».

Nous manquons encore de beaucoup d'informations pour savoir s'il serait possible d'estimer les émissions chez les bovins allaitants par quantification des méthanogènes à l'aide de techniques comme la qPCR (*quantitative Polymerase Chain Reaction*), ou grâce à des marqueurs moléculaires contenus dans le lait (en particulier les acides gras (Kandel et al. (2012)) ou dans d'autres échantillons biologiques (par exemple les fèces, l'urine, ou le plasma). Actuellement, bien que des publications décrivent certaines de ces techniques comme



prometteuses pour estimer l'influence d'une alimentation sur les émissions (McCartney et al., 2013), elles ne sont pas assez efficaces pour évaluer avec précision les variations interindividuelles.

Comme nous l'avons vu auparavant, la production des AGV et du méthane dans le rumen sont tous les deux issus de la fermentation microbienne. Le H<sub>2</sub>, molécule utilisée pour produire du méthane, est également un inhibiteur de l'activité des micro-organismes producteurs d'AGV. Herd et al. (2013), dans une étude sur 532 jeunes taureaux et génisses Angus en chambre respiratoire, ont abouti à une corrélation de 0,28 entre la concentration ruminale en AGV et le MY (L/kg MSI), de 0,32 avec l'intensité de méthane (L/kg de poids vif gagné) et proche de 0 avec la production brute de CH<sub>4</sub>. Le pourcentage de propionate parmi les AGV formés est significativement et négativement corrélé avec le MY et l'intensité de méthane. Cette méthode est encore très discutée. Beaucoup de travaux sur ce sujet sont nécessaires.

Il serait aussi possible d'estimer la corrélation entre les émissions de méthane et un autre caractère tel que la consommation résiduelle (RFI = *Residual Feed Intake*). La RFI correspond à la différence entre la quantité d'énergie réellement ingérée et celle qui est généralement ingérée pour un poids et un GMQ donnés. Ainsi, si pour un poids et une croissance donnés, l'animal mange moins que ce que l'on aurait pu penser, cela signifie qu'il transforme efficacement sa nourriture. Dans ce cas, la RFI est négative. Puisque le méthane correspond à un gaspillage de l'énergie ingérée, nous pouvons émettre l'hypothèse que les animaux efficaces, donc à faible RFI, présenteront moins de pertes d'énergie et donc moins d'émissions de méthane. Il serait ainsi envisageable de sélectionner des animaux moins émetteurs de méthane à partir de mesures du poids et d'analyses de l'alimentation. Il faut cependant garder à l'esprit que la quantité ingérée est rarement précisément mesurée dans les entreprises de sélection et dans les élevages, ce qui compliquera la sélection sur ce caractère « RFI ».

D'autres paramètres « proxy », cités par Pickering et al. (2013), ont été envisagés (épaisseur du gras dorsal, taille du *longissimus thoracis*, évaluation du persillé). Les résultats sont encore largement insuffisants.

#### v. Conclusion sur les mesures individuelles d'émissions de méthane

Ces méthodes sont indispensables à l'utilisation de la sélection génétique dans le but de réduire les émissions de méthane. Elles permettent en outre d'étudier l'impact de certains facteurs, comme l'alimentation, sur la production entérique de GES. Si, en raison de contraintes logistiques et financières, il paraît inenvisageable d'utiliser ces techniques de mesure en

élevage, elles sont adaptées à la recherche et certaines d'entre elles pourraient un jour être exploitées en entreprise de sélection (mesures directes à court terme et à faible coût ? RFI ? ...). Dans tous les cas, leur utilisation en Centre de Recherche offre la possibilité de déceler des leviers d'action qui seront applicables à l'avenir sur le terrain. En continuant de publier une grande quantité de résultats, avec un partage international des données et une standardisation des protocoles (en trouvant un compromis entre précision des mesures et quantité d'animaux mesurés), il serait même envisageable d'intégrer le paramètre « méthane » aux index génomiques. De nombreuses études portent encore sur la précision de chacun de ces outils d'évaluation des émissions de méthane, et sur les moyens d'estimation de cette précision (par exemple, Gardiner et al. (2015) explorent avec un nouveau protocole la précision des mesures de 6 chambres respiratoires).

Maintenant que nous avons observé les moyens d'estimer les émissions de méthane directement sur les animaux, nous allons étudier quelques méthodes alternatives qui ne nécessitent pas de réaliser des mesures directement sur les bovins. Ces méthodes n'apportant pas d'information directement valorisable pour la sélection génétique, seule une description sommaire en sera faite.

### 3) Méthodes alternatives

#### a) Les mesures *in vitro*

Les techniques de simulation du rumen et de production de gaz *in vitro* (RUSITEC (*rumen simulation technique*) et IVGPT (*in vitro gas production technique*)) peuvent permettre de mesurer des quantités de méthane produites selon plusieurs « alimentations » utilisées. En effet, divers aliments ou mélanges sont associés avec du « jus de rumen » récolté sur des bovins donneurs, dans des conditions parfaitement contrôlées (température à 39°C, pH, apport en minéraux indispensables, etc.), et les concentrations en gaz sont mesurées après des durées données. Dans le même temps, il est possible d'observer la dégradation de l'aliment, pour déterminer si une réduction de production de méthane correspond à une dégradation plus ou moins forte de celui-ci.

Ces techniques présentent de multiples avantages (Storm et al., 2012). Il est possible de réaliser plusieurs centaines d'incubations en même temps, ce qui permet d'avoir suffisamment de données pour que les résultats soient significatifs. De plus, les expériences durant généralement 1 à 4 semaines, de nombreux aliments et additifs peuvent être testés en assez peu de temps et pour un coût modéré. Les conditions environnementales sont parfaitement contrôlées, et il est possible de passer outre la variation interindividuelle des animaux en

utilisant le même jus de rumen pour tous les tests effectués et en comparant les résultats obtenus. De préférence, ce jus de rumen est un mélange de plusieurs donneurs afin de favoriser la présence d'un maximum de micro-organismes différents.

En revanche, ces méthodes présentent des inconvénients (Storm et al., 2012) :

- Elles nécessitent des « vaches hublots » pour aller chercher le jus de rumen directement dans le réservoir gastrique (Photographie 4). De façon alternative, il est possible de réaliser une intubation endo-oesophagienne afin de pomper le liquide, ou de le prélever sur des animaux abattus.



Photographie 4 : Prélèvement de jus de rumen sur une « vache hublot » (Collection personnelle)

- Si certaines études (Bhatta et al., 2006) montrent une bonne concordance entre les résultats *in vitro* et ceux mesurés en chambre respiratoire ou par technique SF<sub>6</sub>, d'autres rapportent que ce n'est pas toujours le cas (Klevenhusen et al., 2011).
- Avec ces techniques, seule la fermentation microbienne est analysée. Les interactions pouvant se produire dans un animal entier, influant sur la digestibilité et les émissions, ne sont ici pas prises en compte. De plus, en comparaison avec des conditions *in vivo*, le faciès microbien peut évoluer différemment au cours du temps.
- Le temps d'adaptation des micro-organismes au nouvel aliment distribué n'est pas pris en compte de la même manière que lorsque les expériences se font sur animal entier. En effet, avant le prélèvement, les animaux et donc les micro-organismes reçoivent généralement une ration standardisée. Après le prélèvement, c'est l'aliment testé qui va être donné à la flore du jus de rumen. Or, les micro-organismes mettent 2 à 4 semaines pour s'adapter à la nouvelle source alimentaire (Williams et al., 2009).
- Ces techniques ne permettent pas de comparer les animaux entre eux.

Finalement, ces techniques sont très utiles en première approche avant d'effectuer des expérimentations sur animal entier.

#### b) Modèles d'estimation de la production de méthane

Pour prédire les émissions nationales ou internationales de méthane par les ruminants, et donc connaître leur impact sur le réchauffement climatique, il n'est pas possible de mesurer chaque animal. Il a donc été nécessaire de passer par des modèles reposant sur les moyennes d'émissions en fonction des caractéristiques des animaux (poids, type de production...), de l'alimentation utilisée (énergie, nutriments...) et de la prise alimentaire (en matière sèche = MS). Ces modèles découlent généralement de mesures effectuées sur des individus en chambre respiratoire ou par les techniques SF<sub>6</sub> ou CO<sub>2</sub>.

Ces modèles n'ont pas pour principal objectif de repérer quelle technique permet de diminuer les émissions de méthane, mais plutôt de comparer des zones géographiques entre elles sur leur implication dans les émissions totales de GES, sachant qu'il est impossible de mesurer tous les animaux d'un pays ni même d'une région pour des raisons de temps et de coût évidentes. Ainsi, ils ne permettent généralement pas de proposer des solutions de mitigation des émissions, mais plutôt de savoir éventuellement où il serait le plus urgent d'en proposer (bien que certains modèles soient occasionnellement exploités comme paramètres « proxy » pour la recherche de leviers d'action (Pickering et al., 2015a, et de Haas et al., 2011)). Le but de ce travail étant avant tout de décrire la place de la génétique pour la mitigation des émissions de méthane, nous ne verrons que succinctement en quoi ces modèles consistent.

Sauf indication contraire, les informations reposent là encore sur la publication de Storm et al., 2012.

##### *i. Le modèle IPCC*

Ce modèle de l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, soit le GIEC en français) est celui considéré comme standard, et est occasionnellement utilisé comme paramètre « proxy ». En fonction de la qualité des données fournies par le pays, des méthodes de calculs différentes sont utilisées. « Tier 1 » est la méthode la plus simple, « Tier 2 » et « Tier 3 » sont plus complexes et dépendent de l'apport de multiples informations précises.

Tier 1 considère simplement qu'à partir de l'énergie brute ingérée, 6,5% va être perdue sous forme de méthane, hormis en élevage à alimentation intensive (plus de 90% de concentrés), dans lesquels seulement 3% est perdue. Ainsi, à partir du nombre de bovins allaitants dans le

pays et de leur quantité d'ingestion quotidienne en énergie, nous estimons la part d'émissions de GES due à ce type d'élevage puisque nous connaissons l'énergie contenue dans un poids donné de méthane :

$$\text{Méthane (kg/j)} = \text{EBI (MJ/d)} \times 0,065/55.65$$

Avec EBI = énergie brute ingérée, et avec 55,65 correspondant à l'énergie en MJ contenue dans 1kg de méthane.

En revanche, pour le modèle le plus complexe, Tier 3, il est par exemple nécessaire de savoir quelle est la digestibilité et quels sont les nutriments présents dans l'aliment, ou encore quelle est la production de l'animal, puisque tout cela va influencer sur le pourcentage d'énergie perdue sous forme de méthane. Tier 2 est un modèle intermédiaire entre Tier 1 et Tier 3.

## *ii. Les autres modèles*

Une très grande diversité de modèles a été proposée pour les bovins, s'appuyant parfois sur des éléments extrêmement variables d'un modèle à l'autre. Par exemple :

- Dans l'étude d'Ellis et al. (2007), méthane (MJ/j) =  $0.14 \times \text{fourrage (\%)} + 8.6$
- Dans l'étude de Yan et al. (2006), méthane (L/j) =  $0.34 \times \text{PC (kg)} + 19.7 \times \text{MS (kg/j)} + 12$
- Dans l'étude de Kirchgessner et al. (1994), méthane (g/j) =  $63 + 79 \times \text{FB} + 10 \times \text{ENA} + 26 \times \text{PB} - 212 \times \text{MGB (kg/j)}$
- Etc.

Avec PC = poids corporel, MS = matière sèche, FB = fibres brutes, ENA = extrait non azoté, PB = protéines brutes et MGB = matière grasse brute.

Nous remarquons bien ici que ces modèles s'appuient sur des éléments différents. Quand certains utilisent simplement la proportion de fourrage dans la ration (Ellis et al., 2007), d'autres nécessitent de connaître le poids de l'animal et la quantité de matière sèche contenue dans l'aliment (Yan et al., 2006), voire sa composition précise (Kirchgessner et al., 1994). Les unités d'expression de l'émission de méthane ne sont pas non plus les mêmes. Enfin, selon Sejian et al. (2011), il serait possible d'incorporer des informations sur le climat et la gestion de troupeau dans les équations.

Les études sur la précision de chacun de ces modèles ne sont pas encore suffisamment fiables, puisque d'une publication à l'autre les résultats peuvent varier. Il semblerait que la plupart ne soient pas adaptés pour tous les régimes, impliquant d'utiliser le bon modèle selon l'alimentation distribuée (Herd et al., 2014). Ils permettent tout de même une estimation globale des émissions et, lorsqu'ils tiennent compte de la prise alimentaire de chaque animal, ils sont parfois utilisés pour évaluer les émissions individuelles.

#### 4) Synthèse des moyens existants

Si les modèles d'estimation d'émissions de méthane permettent surtout d'évaluer la part d'une zone géographique ou d'un ensemble d'animaux dans les émissions de GES, les techniques *in vitro* offrent des éléments de réponse sur l'impact que peuvent avoir l'alimentation et l'utilisation d'additifs sur les émissions de méthane. Les mesures de groupe apportent en plus des informations sur le rapport entre niveau de production et émissions de méthane, et éventuellement sur le rôle que peuvent jouer une conduite d'élevage et/ou un environnement particulier par rapport à d'autres conditions différentes.

En ce qui concerne les mesures directes et individuelles de méthane, le tableau 4 récapitule les atouts et inconvénients des principales méthodes disponibles.

Tableau 4 : Comparaison des principales méthodes de mesures directes individuelles pour les bovins allaitants (Inspiré en partie d'une comparaison effectuée par Storm et al., 2012)

	Chambre	SF <sub>6</sub>	CO <sub>2</sub>	GreenFeed
<b><u>Atouts possibles</u></b>				
Mesures sur le long-terme	+	+	-	-
Mesures sur une longue période	-	+	+	+
Prise en compte des variations dans une journée	+	-	+	+
Mesures rapides de beaucoup d'animaux	-	+	+	+
Estimations précises de l'intégralité du méthane émis	+	-	-	-
Tests de diverses alimentations (type, quantité...)	+	+	+	+
Applications au pâturage	-	+	+	+
Comparaisons aux caractéristiques de l'animal (Poids, GMQ...)	+	+	+	+
<b><u>Inconvénients</u></b>				
Prix	+	-	-	-
Contraintes pour l'animal	+	+	-	-
Contraintes pour le manipulateur	-	+	+/-	-
Manque de recul	-	-	+	+

Le modèle de référence, en chambre respiratoire, est bien sûr indispensable. Mais il est nécessaire de trouver d'autres façons de quantifier la production de méthane afin de réduire les coûts, de fournir au plus vite un nombre suffisant de résultats, voire d'être en capacité d'utiliser ces outils de mesure sur le terrain. Comme l'expliquent Pickering et al. (2015b), la forte variation observée dans une journée et entre les jours impose de faire un choix raisonné sur le moyen et le nombre de mesures. Il faut être suffisamment précis pour refléter le phénotype sur le long-terme, mais sans que les contraintes et le coût soient trop conséquents.

Finalement, le choix entre l'ensemble des méthodes décrites dépend de l'objectif de l'étude et des moyens humains et financiers disponibles. Leur utilisation, selon les cas, permet d'estimer l'impact qu'un pays ou qu'un ensemble d'animaux va avoir sur les émissions de GES, et/ou de repérer quelles solutions permettraient de diminuer les émissions entériques.

Dans le but d'accélérer la réduction des émissions de méthane par les BA, il est en plus possible d'optimiser l'exploitation des résultats obtenus par les moyens de mesure disponibles.

#### 5) Optimisation des méthodes existantes

Pour les mesures sur le long terme mais sur de courtes périodes, nous pourrions effectuer une deuxième mesure de l'animal quelques mois plus tard afin de réajuster la valeur attribuée à sa PMQ, son MY et son intensité de méthane.

Nous avons pu observer qu'en ce qui concerne les mesures à court terme, la répétabilité est plus basse que pour les mesures sur le long terme. Ainsi, il faut multiplier les mesures. Nous pouvons cependant utiliser d'autres moyens pour améliorer encore la fiabilité des résultats obtenus par ces outils de mesure :

- Pour des protocoles dans lesquels la mesure est toujours faite au même moment dans le cycle d'alimentation quotidien, il est possible d'étendre la mesure à court-terme proportionnellement à une PMQ, avec toutefois un coefficient à appliquer dépendant du régime et du moment de mesure (Hegarty, 2013). L'utilisation de protocoles standardisés quand cela est possible est donc à envisager, comme expliqué par exemple par Robinson et al. (2009) avec des ovins, pour augmenter la répétabilité des tests réalisés.
- Robinson et al. (2009) ont également envisagé l'intérêt de « procédures multi-étapes » pour augmenter la précision de sélection sur les caractères à faible répétabilité. Dans ces procédures, seuls les animaux suffisamment « extrêmes » sont à nouveau testés. Ainsi dans cette publication, pour des tests ayant une répétabilité allant de 0,25 à 0,5, il est par



exemple démontré que si l'on veut sélectionner 50 animaux avec un budget permettant de réaliser 1000 tests, mieux vaut mesurer 850 individus, puis à nouveau les 150 meilleurs et garder enfin les 50 qui auront la meilleure moyenne, plutôt que de tester 1000 individus pour conserver les 50 meilleurs sur une seule mesure.

Dans le but d'augmenter rapidement la quantité et la qualité de ses informations, il est essentiel que la recherche travaille encore beaucoup au développement de nouvelles techniques de mesure, et à la maîtrise et l'optimisation de celles existantes. De plus, étant donné le coût de ces mesures sur le terrain, trouver d'autres méthodes (comme la présence ou l'absence d'un organisme marqueur dans le rumen) pourrait devenir préférable à l'avenir, et identifier les mécanismes en cause dans les variations d'émission de méthane devrait également être bénéfique. Pour cela, il faut être capable de déterminer qui sont les très faibles et les très forts émetteurs, afin de les comparer.

Malgré une marge de progrès encore significative pour l'estimation des émissions de méthane, des solutions de mitigation des émissions entériques sont déjà proposées.

### **III. Solutions pour la mitigation**

#### *1) Contexte*

Selon Robinson et al. (2009), il pourrait être nécessaire de réduire les émissions mondiales de 50% d'ici 2020. Un projet très ambitieux qui est peu susceptible d'être atteint chez le bétail seulement grâce à la mise à la reproduction des animaux sélectionnés pour leur potentiel génétique.

Une multitude de solutions sont ainsi mises en avant. Certaines nécessitent des travaux de recherche complémentaires afin de préciser leur efficacité, leur faisabilité et leur coût. D'autres, liées à des pratiques éprouvées, sont aujourd'hui disponibles et applicables en exploitation. Comme l'expliquent Dollé et al. (2011), leur mise en œuvre peut dans certains cas se traduire par des économies sur le fonctionnement de l'exploitation ou au contraire nécessiter des investissements parfois importants. Globalement, pour les filières bovines, un plan d'action qui rassemblerait plusieurs pistes de réduction compatibles tout en améliorant la rentabilité de la production serait préférable. Dans le cas contraire, les gouvernements devront, par des mesures politiques, inciter ou contraindre les éleveurs à respecter les recommandations.

Des stratégies existent pour réduire les émissions de méthane, mais également celles de protoxyde d'azote et de gaz carbonique, qui sont les deux autres principaux GES dus à l'activité d'élevage. Toujours d'après Dollé et al. (2011), toutes les stratégies doivent être évaluées et

testées pour les trois GES concernés de manière à éviter tout transfert de pollution d'un gaz à un autre ou d'une activité à une autre. De plus, une exploitation est un système ouvert, avec des intrants, et des produits qui en sortent (figure 24). Ainsi, ces auteurs abordent la notion d'analyse du cycle de vie. Cela consiste à connaître l'impact d'un produit sur les ressources et l'environnement, de l'extraction des matières premières jusqu'à son traitement en fin de vie (mise en décharge, recyclage...), en passant par les ressources naturelles utilisées pour sa transformation et sa conservation. Sur le périmètre s'arrêtant au portail de l'exploitation, il s'agit d'inventorier les impacts directs liés au processus de production au niveau de l'exploitation agricole mais également les impacts indirects inhérents à la fabrication des intrants et à leur transport. Cela concerne généralement les animaux, les surfaces destinées à l'atelier, et l'ensemble des intrants (énergie, fertilisants, alimentation...) de cet atelier et de ces surfaces (Gac et al. (2010) cités par Dollé et al. (2011)). Pour le lait et la viande consommés, les émissions associées au périmètre de l'exploitation représentent 70 à 90% des émissions totales de l'ensemble du cycle de vie des deux produits (Tomasula et Nutter (2011) et Herrero et al. (2016)). Une bonne connaissance des impacts à l'échelle de l'exploitation est donc essentielle.

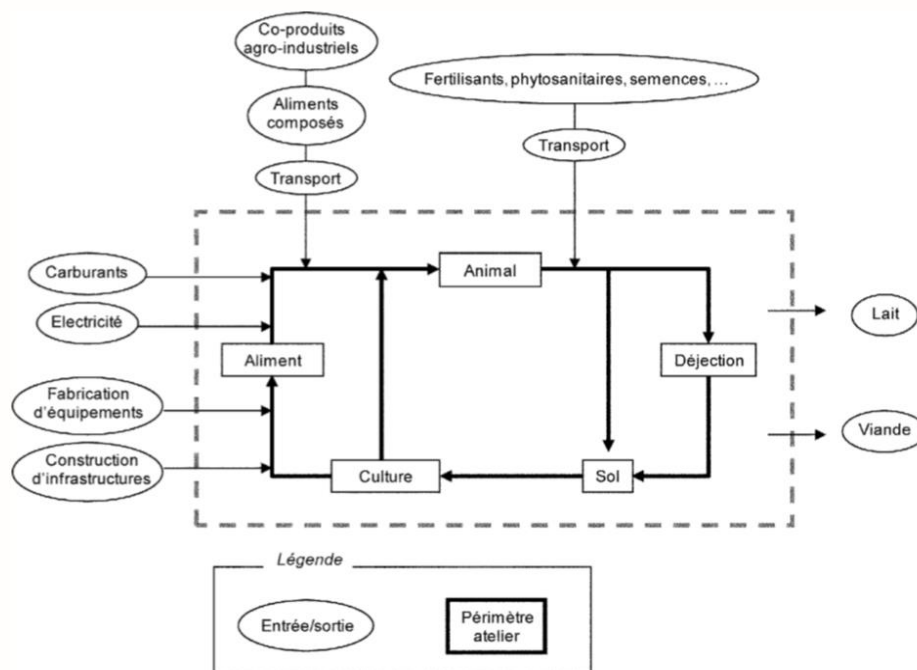


Figure 24 : Postes d'émissions et flux de matières retenus pour l'évaluation de l'impact « gaz à effet de serre » (Dollé et al., 2011)

Enfin, l'acceptabilité par et pour le consommateur des techniques de réduction de la production de méthane sera évoquée. Certaines stratégies efficaces font en effet appel à des additifs non autorisés, peuvent présenter un risque d'effets délétères sur l'animal ou le consommateur, ou sont simplement mal perçues par ce dernier.

Les évaluations conduites sur les systèmes de production français et étrangers montrent une variabilité de l’empreinte carbone entre les systèmes, et une variabilité encore plus importante intra-système, qui dépend du niveau d’optimisation des pratiques (Dollé et al., 2011). Le différentiel observé peut ainsi atteindre jusqu’à 30% entre les exploitations optimisées et les systèmes non optimisés. Ce constat met en évidence les marges de progrès envisageables pour certaines exploitations grâce à une optimisation des pratiques. Une réduction des émissions de GES comprise entre 5 et 15% pour des exploitations dont l’empreinte carbone se situe aujourd’hui dans la moyenne paraît envisageable. Ces potentiels de réduction mettent en avant la faculté de l’élevage à répondre au défi du changement climatique. Il faut cependant avoir à l’esprit que les objectifs de réduction de 30% voire davantage sont difficilement atteignables en l’état actuel des connaissances. A quantité mondiale de production de viande constante, les avancées technologiques, la recherche en génétique etc., devraient permettre d’y répondre à terme.

D’après Pickering et al. (2015b), la quantité de méthane (et autres GES) émise par quantité de production (lait ou viande) a diminué au cours des 50 dernières années dans les pays développés grâce à l’amélioration continue de la productivité. Par exemple l’empreinte carbone dans l’industrie des USA, en CO<sub>2</sub>éq/kg de lait, valait en 2007 seulement 37% de ce qu’elle valait en 1944 (Capper et al., 2009). Ceci est dû à l’amélioration génétique des Prim’Holstein, mais également au changement de type d’élevage et d’alimentation. Il en est de même pour l’empreinte carbone en bovin allaitant, en CO<sub>2</sub>éq/kg de viande, avec une diminution de 16% entre 1977 et 2007 (Capper, 2011) pour les mêmes raisons.

Nous observons ici les trois grandes catégories de leviers d’actions qui vont permettre à l’avenir de diminuer encore les émissions entériques de méthane :

- L’alimentation
- La conduite d’élevage
- La génétique

En sachant que l’élevage laitier s’est plus précocement et plus intensément modernisé que l’élevage de bovins allaitants, nous pouvons aisément imaginer qu’il reste encore une grande marge de manœuvre en ce qui concerne les bovins élevés pour la viande.

La production de méthane représente une perte d’énergie par rapport à celle ingérée. En tenant compte du fait que l’aliment est l’un des principaux postes de dépenses pour les éleveurs, nous pouvons penser qu’avec une alimentation adaptée et des animaux élevés et sélectionnés pour correctement exploiter l’énergie disponible, les émissions de méthane vont être réduites et

la rentabilité des élevages va être augmentée. En outre, si les animaux produisent autant de viande en mangeant moins, cela va diminuer leur impact sur l'utilisation des ressources naturelles et sur l'environnement (réduction des quantités d'effluents).

Nombreuses sont les préconisations faites par des organismes officiels internationaux comme la FAO (*Food and Agriculture Organization*), le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat), ou la CCNUCC (Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques). Il n'y a pas de solution miracle pour réduire les émissions entériques de méthane, mais les principales pistes vont être présentées en ayant à chaque fois le souci d'inclure dans le raisonnement les répercussions que pourraient avoir les stratégies envisagées sur les autres GES et sur la viabilité économique de l'éleveur.

## 2) Les solutions ne faisant pas appel à la génétique sur le caractère « méthane »

La réduction de la consommation de viande bovine, envisagée dans de multiples études (par exemple : Herrero et al. (2016), ou encore Stehfest et al. (2009), et Smith et al. (2013), tous deux cités par Gerber et al. (2013)), aurait bien sûr comme effet de contribuer à la diminution des émissions de GES. Pour parvenir à cela, diverses méthodes seraient envisageables : augmenter le prix de la viande, sensibiliser le consommateur, contrôler la production, les exportations et les importations, etc.

Cette solution, qui repose sur des idéologies et coutumes d'ordres politique et sociétale, et dont les potentielles répercussions économiques sont à garder à l'esprit, ne sera pas davantage abordée dans cette thèse. En effet, l'objectif de ce travail est de rendre compte de la place de la génétique parmi les solutions scientifiques visant à la mitigation des émissions entériques de méthane tout en répondant à la demande du consommateur. Pour le moment, selon Gerber et al. (2011) cités par Doreau et al. (2011a), la consommation mondiale de produits animaux augmente, tendance appelée à se poursuivre en raison de l'évolution démographique et de l'accroissement de la part des produits animaux dans l'alimentation des pays en développement et émergents.

La grande majorité de ces solutions, hors sélection génétique, repose sur l'utilisation d'aliments ou de produits qui vont avoir un impact sur la flore ruminale. En effet, Popova et al. (2011b) rappellent que si le méthane contribue à 40 à 60% des émissions de GES à l'échelle de la ferme, cela est en grande partie dû aux fermentations entériques (80% du méthane émis contre 20% avec les effluents d'élevage). Ces émissions résultent des interactions entre les micro-organismes et leur environnement (animal hôte, taille du rumen...), mais surtout des

interactions des micro-organismes entre eux (symbiose, prédation, compétition...). Or, peu d'études ont été effectuées sur la relation entre production de CH<sub>4</sub> et mécanismes microbiens, encore moins *in vivo*. Nous savons tout de même que malgré leur capacité à limiter les baisses brutales de pH ruminal en cas de ration riche en amidon, évitant l'acidose, les protozoaires ne sont pas indispensables au fonctionnement du rumen. Tenter de les faire disparaître de la flore digestive paraît donc envisageable, puisqu'ils jouent un rôle déterminant dans la production de méthane. Concernant les archées, leur concentration pourrait avoir un léger impact, mais il semblerait que ce soient surtout des changements dans leur diversité et leur activité en raison de la disponibilité en H<sub>2</sub> qui vont avoir une incidence. Cette communauté présente une forte capacité d'adaptation, et nous connaissons encore mal leur diversité. Cela souligne la nécessité d'étudier sur le long terme et en prenant en compte l'ensemble de la communauté microbienne du rumen.

Rappelons que, pour le bovin, cette flore présente l'atout majeur de fabriquer des AGV, importante source d'énergie chez les ruminants. Cependant, la production d'acétate va entraîner l'augmentation du pool d'H<sub>2</sub> dans le rumen, alors que la formation de propionate va le diminuer. Or, selon Czerkawski (1986) cité par Popova et al. (2011b), 48% du pool d'H<sub>2</sub> est utilisé dans la méthanogénèse. Ainsi, Doreau et al. (2011a) décrivent deux modes d'action majeurs à étudier :

- Réduire la production nette d'hydrogène : cela passe avant tout par une réduction du nombre de protozoaires. La défaunation totale (c'est-à-dire la suppression des protozoaires du rumen) utilisée en conditions expérimentales est inapplicable sur le terrain. Nous verrons que la défaunation peut tout de même être partielle avec l'utilisation de rations très riches en céréales ou grâce à l'effet toxique de certains composés sur les protozoaires (par exemple certains acides gras, ou encore des composés secondaires de plantes, comme les saponines). Les protozoaires fabriquent surtout de l'acétate et du butyrate, donc du H<sub>2</sub>. De plus, des archées méthanogènes sont attachées directement aux protozoaires et sont responsables de 9 à 25% du CH<sub>4</sub> produit dans le rumen (Newbold et al. (1995) cités par Popova et al. (2011b)). En moyenne, nous observons une baisse de 10% des émissions de CH<sub>4</sub> après défaunation (tableau 5). Nous expliquerions cette baisse de CH<sub>4</sub> par :
  - La diminution du nombre de protozoaires.
  - La modification de la diversité des archées (qui ne sont cependant pas moins abondantes) vers des espèces moins efficaces dans la production de méthane. Le lien que cela pourrait avoir avec leurs relations symbiotiques avec les protozoaires n'a pas encore été clairement établi.

Tableau 5 : Effets de la défaunation sur la population méthanogène et les paramètres fermentaires (Popova et al., 2011b)

Archaea méthanogènes (nombres) (%)	CH <sub>4</sub>	AGV $\mu\text{mol/mL}$	Butyrate mol/mol AGV	Acétate/ Propionate	Références
+ 10	- 20% (CH <sub>4</sub> L/kg MSI)	Pas de changement	- 33%	- 26%	Mosoni <i>et al</i> 2011
+ 3	- 11% (CH <sub>4</sub> L/kg MSI)	+ 14%	- 16%	- 12%	Popova <i>et al</i> 2010
- 998	ND	↗ <sup>a</sup>	↘ <sup>a</sup>	↘ <sup>a</sup>	Takenaka <i>et al</i> 1995
+ 53	Pas de changement	Pas de changement	Pas de changement	- 25%	Machmüller <i>et al</i> 2003

ND : information non disponible dans la publication.  
<sup>a</sup> Valeur non disponible dans la publication.

Cependant, il est encore nécessaire de trouver des techniques de défaunation facilement applicables dans la pratique (certains additifs, extraits de plantes...). En outre, une limite à cette stratégie repose sur le fait que nous observons une réduction de la digestibilité des parois en l'absence de protozoaires.

- Réorienter l'hydrogène vers d'autres voies métaboliques potentiellement bénéfiques pour l'animal :
  - L'augmentation de la part du propionate dans le profil des AGV est une première solution. Cette orientation est souvent liée à une diminution du pH (cas des rations riches en concentrés). Le pH a par ailleurs un effet spécifique : des pH faibles entraînent une diminution des protozoaires et des méthanogènes (Van Kessel et Russel, 1996). Ci-dessous (tableau 6), la liste des possibilités pour favoriser la production de propionate qui seront décrites par la suite :

Tableau 6 : Moyens d'accroître la proportion de propionate dans les AGV produits dans le rumen (Doreau et al., 2011a) ©INRA

Augmentation du pourcentage de concentré
Parmi les fourrages, forte digestibilité (herbe jeune)
Parmi les concentrés glucidiques, richesse en amidon (céréales)
Parmi les céréales, vitesse de digestion dans le rumen élevée (blé, orge)
Addition d'acides gras polyinsaturés à 18 carbones (tournesol, lin)
Antibiotiques ionophores
Acides organiques

- Un autre moyen pour réorienter l'hydrogène disponible pour la production de méthane est de l'utiliser dans d'autres voies biochimiques, comme la voie de l'acétogénèse réductrice ou encore les réductions de sulfates ou de nitrates. Il est

à noter que l'hydrogénation des acides gras (AG) polyinsaturés ne compte que marginalement dans la captation d'hydrogène permettant de limiter la méthanogenèse : dans une ration de vaches laitières riche en AG polyinsaturés, la captation de l'hydrogène nécessaire pour saturer ces AG ne réduirait la production de méthane que de 5 à 6%. Leur rôle de « puits à hydrogène » est donc assez faible.

Comme décrit par Doreau et al. (2011a), pour étudier ces moyens, les essais *in vitro* ont souvent des effets significatifs sur la production de méthane mais les conclusions tirées sont parfois hâtives. En effet les systèmes *in vitro* les plus utilisés reproduisent imparfaitement les processus physiologiques dans le rumen. Les essais *in vivo* sont nombreux avec des rations classiques, mais beaucoup plus limités dans le cas des additifs. Les essais sur le long terme sont quant à eux très rares. Pourtant, en raison des possibilités d'adaptation de l'écosystème microbien du rumen, certaines solutions proposées pourraient être efficaces uniquement à court terme. Les mesures de production de méthane sont réalisées le plus souvent après 2 à 4 semaines d'application du traitement étudié. Nous préciserons donc si les effets obtenus ont été confirmés sur le long terme, c'est-à-dire après plusieurs mois d'application du traitement.

De très nombreux travaux ont été réalisés. Seuls les plus représentatifs vont être décrits, l'objectif étant simplement d'être en mesure de comparer l'aptitude de certains leviers d'action à être plus ou moins efficaces que la sélection génétique pour la réduction des émissions de méthane entérique. Une bibliographie plus exhaustive est cependant disponible dans la littérature. Sauf indication contraire, la quasi-totalité des informations sera tirée d'une synthèse assez récente des solutions proposées, parue dans la revue '*Inra Productions Animales*, **volume 24, n°5**, 2011 : Dossier : Gaz à effet de serre en élevage bovin : le méthane'. Les publications du dossier sont : Doreau et al. (2011b), Dollé et al. (2011), Sauvant et al. (2011), Popova et al. (2011b), (Doreau et al., 2011a). Ces informations sont complétées par quelques articles supplémentaires, et une publication de Gerber et al. (2013).

La réduction de la production de méthane peut être exprimée soit en g par jour (PMQ), soit en g par kg de Matière Sèche (MS) ingérée (MY, ce qui permet d'évaluer l'impact d'une pratique sur les processus digestifs), soit en g par kg de viande produite (intensité de méthane, ce qui intègre l'efficacité de production).

Trois grandes catégories de leviers d'action vont être sommairement décrites ici, afin de mettre en avant leurs atouts et leurs limites.

### a) Distribution et composition de la ration

Déjà dans les années 90, Johnson et Johnson (1995) mentionnaient l'importance d'éviter les carences nutritionnelles, grâce à la qualité de l'aliment et à son utilisation, pour réduire les émissions de méthane. Ces auteurs préconisaient des fourrages de meilleure qualité, davantage de céréales, et des récoltes plus précoces pour limiter la quantité de glucides de parois.

En effet, l'alimentation joue un rôle non négligeable. Il est connu qu'à court et moyen terme (minutes/heures et jours) les émissions sont corrélées à la prise de nourriture. Nous allons étudier quelques facteurs de mitigation des émissions de méthane liés à l'alimentation.

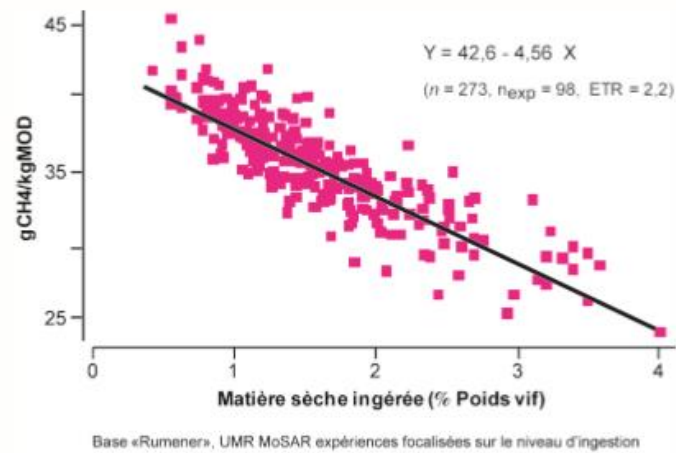
#### *i. Distribution de la ration*

Selon Pickering et al. (2015b), que l'on donne des repas en une fois, ou répartis en huit fois sur la journée, la PMQ et le MY ne sont pas modifiés. L'effet sur les émissions de méthane de l'utilisation de rations complètes ou séparées a été très peu étudié et n'apporte pour l'instant aucun résultat exploitable, l'important étant de distribuer une ration équilibrée pour limiter le gaspillage d'aliment et maintenir l'animal en bonne santé (Hristov et al., 2013a).

#### *ii. Quantité distribuée et teneur en matière organique digestible*

Selon Hegarty (2013), la quantité d'aliment ingérée est un facteur de régulation très significatif. Cette idée est confirmée par Sauvante et al. (2011), qui démontrent l'influence négative du Niveau Alimentaire (NA), calculé comme la MS Ingérée (MSI) exprimée en % du Poids Vif (MSI%PV), sur la production de CH<sub>4</sub> exprimée par rapport à l'énergie brute des rations ingérées (ECH<sub>4</sub>%EB). En d'autres termes, à un PV donné, plus l'animal va manger, moins il va gaspiller d'énergie en méthane par rapport à celle ingérée. Donc, lorsque l'on augmente la MSI d'un animal, la quantité de CH<sub>4</sub> émise par MSI (en g/kg) va diminuer. Il en est de même pour le rapport gCH<sub>4</sub>/kg de Matière Organique Digestible (MOD), qui tient compte de la digestibilité de la matière sèche ingérée (figure 25).





Remarques (valables pour tous les graphiques de Sauvant et al. (2011) qui suivront) :

- La base « Rumener » rassemble des mesures de bilan d'énergie (digestibilité de la ration, pertes sous forme de méthane, ou d'urine).
- L'UMR MoSAR est l'Unité Mixte de Recherche de Modélisation Systémique Appliquée aux Ruminants.
- Dans l'équation, X est l'axe des abscisses et Y celui des ordonnées (n est le nombre d'animaux testés,  $n_{exp}$  le nombre d'expériences intégrées dans le calcul, et ETR l'Ecart-Type Résiduel).

Figure 25 : Influence, calculée en intra-expérience, du niveau d'alimentation sur la production de CH<sub>4</sub> en g/kg de MOD (Sauvant et al., 2011)

D'après Sauvant et al. (2011), la teneur en Matière Organique Digestible (MOD, en % de la MS) joue un rôle pivot. Statistiquement, dans cette publication, nous pouvons observer l'équation :

$$\text{CH}_4/\text{MSI (g/kgMS)} = 7,14 + 0,22 \text{ MOD.}$$

Par une simple utilisation mathématique de cette formule, nous pouvons par exemple observer que pour des teneurs en MOD de 60 et 70%, les émissions de méthane par MSI seront plus fortes avec 70% de MOD, mais celles par MOD ingérée seront plus fortes avec 60% de MOD. Finalement, les équations prenant en compte la teneur en MOD sont donc plus précises que les équations comparables basées uniquement sur la MS. Cela s'explique par le fait que les rations pauvres en MOD (en %MS) présentent des fermentations ruminales à rapport Acétate/Propionate (Ac/Pr) élevé et sont donc plus méthanogènes.

En définitive, augmenter le niveau d'alimentation et la teneur en MOD diminue la proportion d'énergie perdue sous forme de méthane, ce qui est logiquement bénéfique pour la production de l'animal. Bien sûr, nous ne pouvons pas indéfiniment augmenter la quantité d'aliment ingérée par l'animal, ni sa qualité.

### iii. Proportion et nature des concentrés

D'après Sauvants et al. (2011), l'influence de la PCO (proportion de concentrés, exprimée en proportion de la MS du régime) est curvilinéaire pour le rapport CH<sub>4</sub>/MOD :

$$\text{CH}_4 \text{ (g/kg de MOD)} = 35,3 + 15,84 \text{ PCO} - 34,59 \text{ PCO}^2$$

La figure 26 présente l'allure de cette relation. La production maximale de CH<sub>4</sub> (37,1 g/kg de MOD) est réalisée pour PCO = 0,23. En deçà elle varie peu et, au-delà, la production de CH<sub>4</sub> décroît quand la PCO augmente.

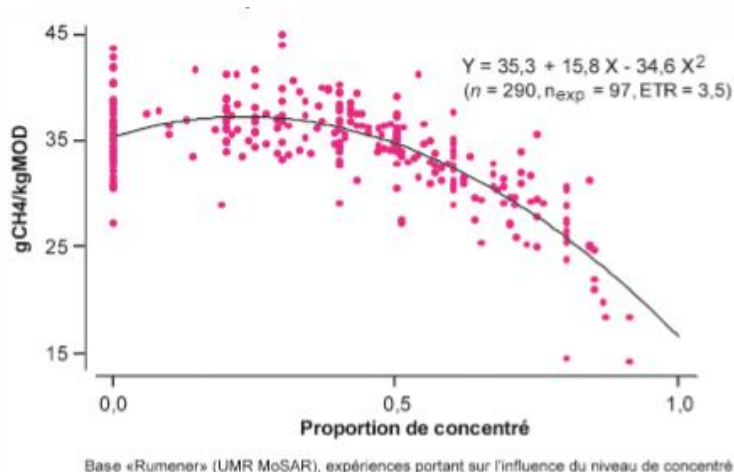


Figure 26 : Influence, calculée en intra-expérience, de la proportion d'aliment concentré sur la production de CH<sub>4</sub>/kg de MOD (Sauvants et al., 2011)

Cependant, selon Hindrichsen et al. (2006) cités par Dollé et al. (2011), l'augmentation de la part de concentrés dans la ration aboutit à des émissions liées aux déjections animales supérieures pour des vaches laitières alimentées avec du foin et des concentrés comparativement à un régime composé de foin seul. De plus, pour Dollé et al. (2011), cette option technique peut entraîner un accroissement des coûts de production et met les ruminants en concurrence avec l'Homme pour l'accès aux ressources alimentaires. Par ailleurs, la production des concentrés est elle-même à l'origine de GES, ce qui rend cette solution moins attrayante que ne le laisse présager une analyse rapide. Toutefois, sur la phase d'engraissement seule, le gain sur le méthane entérique permis par les régimes à très hautes teneurs en concentrés (>70%) reste acquis à l'échelle du système, malgré des émissions plus importantes de N<sub>2</sub>O et de CO<sub>2</sub> (Doreau et al. (2011c) cités par Dollé et al. (2011)).

Ceci est pris en compte dans la méthode d'estimation du GIEC dite « Tier 1 » qui propose d'estimer les émissions de méthane de 5 à 6,5% de l'énergie brute ingérée pour l'ensemble des rations, excepté pour les rations de type « feedlot », très riches en concentrés, pour lesquelles elles sont estimées à 3% de l'énergie brute ingérée (GIEC, 2006). Cette variation

dans le gaspillage sous forme de méthane de l'énergie ingérée selon la proportion de concentrés a également été observée par Lovett et al. (2003) cités par Doreau et al. (2011a), avec des rapports fourrage/concentrés dans la ration allant de 65/35 à 10/90. Ces différents résultats sont liés à l'effet du pourcentage de concentrés sur le rapport Ac/Pr dans les AGV du rumen, et à la diminution du pH à des niveaux de concentrés dans la ration très élevés (ce qui va avoir un effet direct sur les protozoaires et les archées, moins actifs (Martin et al., 2010)). En effet, d'après Sauvante et al. (2011), l'état d'acidose ruminale réduit la méthanogenèse selon l'équation statistique :

$$\text{CH}_4 \text{ (g/kg de MOD)} = - 34,3 + 10,3 \text{ pH}$$

Bien sûr, pour que la vitesse et la qualité de production ne soient pas altérées, il faut veiller à ce que cet état d'acidose n'ait pas d'impact trop marqué sur la santé de l'animal et sur le fonctionnement du rumen (Hristov et al., 2013a).

Finalement selon Popova et al. (2011b), l'utilisation de concentrés, et donc d'amidon, n'aurait pas beaucoup d'effet sur le nombre de méthanogènes (tableau 7). Elle entrainerait en revanche une diminution de leur diversité qui pourrait être en partie à l'origine de la réduction de production de méthane (tableau 8).

Tableau 7 : Effets de la composition de la ration alimentaire sur la concentration des Archaea méthanogènes du rumen (Popova et al., 2011b)

Les différents modes d'expression de la concentration microbienne sont indiqués en italique au-dessus des valeurs numériques pour chaque étude. Quand la production de méthane a été mesurée, les résultats sont indiqués dans la colonne «Remarques». Toutes les études ont été réalisées *in vivo* sur des bovins, à l'exception de celle de Mao et al (2010) qui a été réalisée sur des agneaux en croissance.

Rations alimentaires		Effet	Remarques	Références
Fibres	Amidon + lipides			
<i>log (copies mcrA/g MS)</i> 9,02	9,07	= (P > 0,05)	- 28% CH <sub>4</sub> /g/j avec la ration «amidon + lipides»	Popova et al 2011
<b>74% paille d'avoine</b>	<b>28% d'avoine et 58% d'orge</b>			
<i>copies rrs Archaea/mL contenu ruminal</i> 2,12 x 10 <sup>7</sup>	2,15 x 10 <sup>7</sup>	= (P > 0,96)	Animaux «efficaces» dans l'utilisation de la ration	Zhou et al 2010
2,52 x 10 <sup>7</sup>	2,18 x 10 <sup>7</sup>	= (P > 0,76)	Animaux «inefficaces» dans l'utilisation de la ration	
<b>pauvre en concentré</b>	<b>riche en concentré</b>			
<i>cellules/g contenu ruminal</i> 4 x 10 <sup>5</sup>	8 x 10 <sup>5</sup>	ND		Leedle et al 1988
<b>Manioc (75%)</b>	<b>Maïs (75%)</b>			
<i>copies rrs Archaea/mL</i> 1,55 x 10 <sup>5</sup>	4,46 x 10 <sup>5</sup>	+ 65% (P < 0,05)	Rations supplémentées avec 15 g/kg MS urée	Wanapat et al 2009
7,26 x 10 <sup>7</sup>	2,40 x 10 <sup>5</sup>	+ 70% (P < 0,05)	Rations supplémentées avec 30 g/kg MS urée	
<b>Témoin<sup>a</sup></b>	<b>+ Huile de raifort</b>			
<i>log (cellules/mL contenu ruminal)</i> 8,6	6,9	- 24,4 (P < 0,05)	- 23% CH <sub>4</sub> /kg MSI avec la ration supplémentée avec l'huile de raifort	Mohammed et al 2004
<b>Témoin<sup>b</sup></b>	<b>+ Huile de soja</b>			
<i>rrs Archaea en % de rrs Bactérien</i> 0,34	0,20	- 70% (P < 0,05)	- 13,9% CH <sub>4</sub> L/kg MSI avec la ration supplémentée avec l'huile de soja	Mao et al 2010

ND : information non disponible dans la publication.

<sup>a</sup> Ration témoin composée de fourrage : mélange d'aliments concentrés 60 : 40 ; la ration expérimentale est supplémentée avec 2% sur la base de la matière sèche ingérée d'huile de raifort.

<sup>b</sup> Ration témoin composée de fourrage : mélange d'aliments concentrés 60 : 40 ; la ration expérimentale est supplémentée avec 3% sur la base de la matière sèche ingérée d'huile de soja.

Tableau 8 : Effets de la composition de la ration sur la diversité des Archaea méthanogènes du rumen (Popova et al., 2011b)

Toutes les études ont été réalisées *in vivo* sur des bovins.

Ration	Gène ciblé	Nombre de bandes <sup>a</sup>	Espèces identifiées	Références
Foin 75% orge	<i>rrs</i>	6 à 8 1 à 4	<i>Methanobrevibacter spp.</i> <i>Methanosphaera stadmanae</i>	Ouwerkerk <i>et al</i> 2008
Manioc (+ 15 ou 30 g/kg MS urée) Maïs (+ 15 ou 30 g/kg MS urée)	<i>rrs</i>	7 7	ND	Wanapat <i>et al</i> 2009
74% paille d'avoine 28% d'avoine et 58% d'orge	<i>rrs</i>	24 22	<i>Methanobrevibacter ruminantium NT7</i> <i>Methanobrevibacter smithii</i> <i>Methanobrevibacter sp. AbM4</i> <i>Methanobrevibacter ruminantium NT7</i>	Zhou <i>et al</i> 2010
87% concentré riche en fibres 87% concentré riche en amidon + lipides	<i>mcrA</i>	19 14	ND	Popova <i>et al</i> 2011

ND : information non disponible dans la publication.

<sup>a</sup> En utilisant les techniques d'empreinte moléculaire, les différents segments d'ADN sont visualisés sous forme de bandes. En général, on assume qu'une bande correspond à une seule séquence et donc à une espèce microbienne donnée. Le nombre des bandes est utilisé pour estimer la richesse de la population ciblée.

*rrs* : son nom complet est « gène ARN ribosomal 16s »

*mcrA* : son nom complet est « gène de la méthyl-coenzyme M réductase A »

Outre leur proportion, la nature des concentrés peut avoir son importance (maïs broyé, avoine floconnée, etc.). Les effets de la transformation de l'aliment sur sa digestibilité, son taux de passage dans le rumen, et sa teneur en énergie, vont avoir un impact sur la production de méthane (Hristov et al., 2013a). Cependant, peu de résultats sont publiés sur l'impact de la vitesse de digestion de l'amidon (Sauvant et al., 2011), et il semblerait que les différences selon la nature des glucides des concentrés soient plus modestes que les différences liées à la proportion de concentrés dans la ration (Doreau et al., 2011a). De plus, il est indispensable de tenir compte du coût de cette transformation, et des émissions de GES qui ont lieu au cours des différents procédés (Hristov et al., 2013a).

Enfin, Sauvant et al. (2011) ont étudié l'influence combinée de l'apport de concentrés et du niveau alimentaire, puisque ces deux facteurs sont connus pour être fréquemment en interaction en pratique. Pour des niveaux alimentaires faibles, l'influence de l'apport de concentrés sur le CH<sub>4</sub> en g par kg de MOD est peu marquée, alors que pour des niveaux alimentaires plus élevés, il apparaît une influence négative marquée.

Pour conclure, augmenter la proportion de concentrés dans la ration permettrait de diminuer les émissions entériques de méthane mais pourrait être à l'origine d'émissions de GES par ailleurs. Nous manquons encore de résultats sur l'impact de la nature des concentrés utilisés.

#### iv. *Nature et qualité du fourrage*

D'après Doreau et al. (2011a), certains auteurs observent des différences, parfois très modérées, selon la matière première (maïs, herbe, etc.) ou le type du fourrage (ensilage, foin, etc.), et d'autres non. Des recherches complémentaires sur l'effet de la ration de base restent à mener.

La méta-analyse d'Archimède et al. (2011) citée par Doreau et al. (2011a) n'a pas mis en évidence de différence d'émissions de méthane *in vivo* entre graminées et légumineuses des climats tempérés. Toutefois, d'autres travaux suggèrent que les légumineuses sont à l'origine d'une émission de méthane entérique plus faible que les graminées (ex : McCaughey et al. (1999) cités par Doreau et al. (2011a), avec luzerne-graminées par rapport à graminées). L'effet de la luzerne parfois observé pourrait laisser penser que la réduction de méthane serait due à la richesse de cette légumineuse en malate, un acide organique contribuant à réduire la production de méthane, ou à certains métabolites secondaires comme les saponines. Cette même méta-analyse d'Archimède et al. (2011) a également montré que les graminées des climats chauds induisent une production de méthane supérieure de 10 à 17% à celle des graminées des climats tempérés, à mêmes digestibilité, teneur en NDF (*Neutral Detergent Fiber*) et niveau d'ingestion. Inversement, les légumineuses des climats chauds induisent une production de méthane inférieure à celles des climats tempérés, ce qui est très probablement dû à la proportion de tanins en moyenne supérieure dans les légumineuses tropicales.

Comme l'expliquent Sauvante et al. (2011), la qualité du fourrage (c'est-à-dire sa teneur en MOD) dépend étroitement du stade de développement des plantes et donc de leur teneur en constituants pariétaux. En intra-expérience, pour les fourrages pauvres, le CH<sub>4</sub> produit est de l'ordre de 40 g/kg de MOD. Pour de meilleurs fourrages, il est de l'ordre de 36 g/kg de MOD. De plus, avec des fourrages de bonne qualité, la quantité de méthane émis par gain de croissance est réduite (Hristov et al., 2013a). Les fourrages les plus pauvres produisent en revanche moins de CH<sub>4</sub> par kg de MS que les fourrages les plus riches. Cette apparente contradiction entre modes d'expression de la production du CH<sub>4</sub> reflète les différences de teneur en MOD et de profil fermentaire entre les fourrages pauvres et les fourrages riches. Elle souligne la nécessité d'exprimer la production de CH<sub>4</sub> selon les deux modes d'expression, ce qui est de plus en plus pratiqué dans les publications.

Finalement, les influences de la matière première utilisée et du type de fourrage sur les émissions de méthane sont encore mal définies, mais la qualité de celui-ci (stade de développement des plantes, progrès en génétique végétale, etc.) peut jouer un rôle assez

important (en particulier en termes d'intensité de méthane, selon Fraser et al. (2014), avec des bovins allaitants élevés sur des pâtures de haute et basse qualité).

D'après Herrero et al. (2016), améliorer la digestibilité de la ration (augmentation de la quantité de concentrés, meilleurs fourrages...) pourrait, dans l'absolu, mener à une réduction des émissions de CO<sub>2</sub>eq par l'agriculture proche de 10% par an. Cependant, en tenant compte des différents contextes économiques et des difficultés d'adaptation que pourraient rencontrer diverses régions du monde, la diminution à espérer serait plutôt proche de 2% par an.

#### v. *Utilisation de lipides insaturés*

Selon Doreau et al. (2011a) et Sauvant et al. (2011), leur utilisation est un des moyens alimentaires les plus efficaces pour diminuer la production de méthane. Une compilation de 27 publications (Grainger et Beauchemin (2011) cités par Doreau et al. (2011a) et Sauvant et al. (2011)) donne un poids important à leur apport, dont l'effet sur les émissions entériques persisterait dans le temps (Grainger et Beauchemin (2011), et Martin et al. (2011) cités par Dollé et al. (2011)). Cette réduction sur le long terme serait cependant encore contestable d'après Hristov et al. (2013a). Enfin, un autre avantage de l'ajout de lipides dans la ration repose sur le fait que, contrairement à l'apport d'amidon, la valeur énergétique est augmentée sans provoquer de baisse de pH (Popova et al., 2011b).

La complémentation en lipides décroît le rapport Ac/Pr dans le rumen. Donc l'action des lipides sur la méthanogenèse passe en partie par un effet sur le profil des AGV dans le rumen (Sauvant et al., 2011). Doreau et Ferlay (1995) cités par Popova et al. (2011b) démontrent un effet toxique sur les protozoaires, et Doreau et al. (2011a) décrivent leur rôle dans la consommation de l'H<sub>2</sub> disponible.

La dose de lipides utilisée a son importance (Popova et al., 2011b), et le type de lipides également. Par exemple dans la publication de Zhang et al. (2008) citée par Popova et al. (2011b), les acides gras à longue chaîne poly-insaturés sont efficaces sur les méthanogènes, alors que ceux à longue chaîne saturés ou mono-insaturés le sont moins. Les différentes souches de méthanogènes peuvent cependant avoir une sensibilité variable à un même lipide.

Dans une revue de synthèse de Martin et al. (2010) citée par Doreau et al. (2011a), et mise à jour par la suite, 82 régimes enrichis en lipides tirés de 33 publications ont été répertoriés. Cette synthèse montre que la diminution moyenne de la production de méthane dépend de la nature des Acides Gras (AG). Elle est la plus importante pour les AG à chaîne moyenne (apportés par le coprah, 8,5% par point de lipides supplémentaires), puis pour l'acide

linoléique (apporté par le lin, 5,6% par point de lipides supplémentaires), puis pour l'acide linoléique (apporté par le tournesol et le soja, 4,0% par point de lipides supplémentaires). Les AG mono-insaturés comme l'acide oléique (apporté par le colza), les AG saturés, palmitique et stéarique (savons de calcium d'huile de palme, graisses cristallisées) ont un effet plus limité (figure 27). Cependant, toutes les études ne sont pas en accord sur l'importance du type de lipides (Grainger et Beauchemin, 2011). Les connaissances actuelles à propos de l'effet des différentes sources de lipides sur les populations microbiennes du rumen ne permettent pas d'expliquer ces divergences.

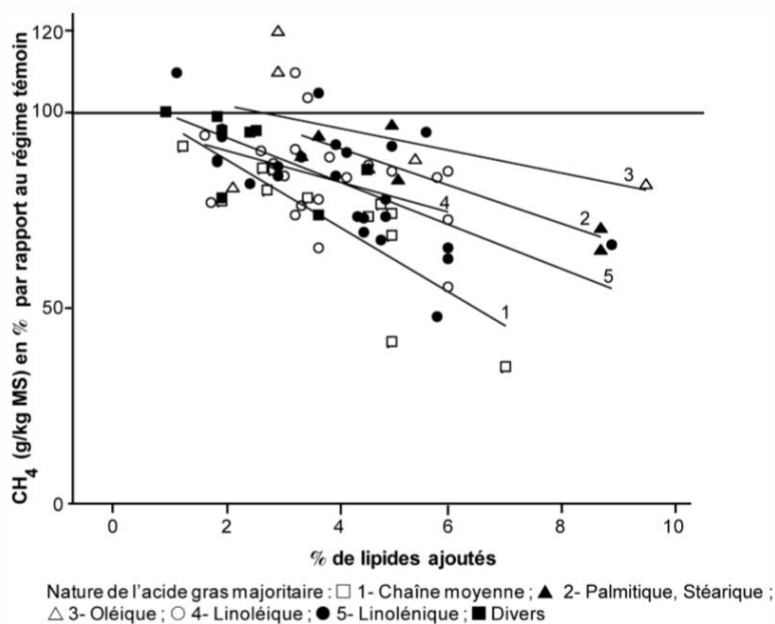


Figure 27 : Effet de la supplémentation lipidique sur la production de méthane, en fonction des acides gras majeurs de la source lipidique (revue de la bibliographie par Doreau et al., 2011a)  
©INRA

Quelques limites à l'utilisation des lipides ont été décrites :

- Le plus souvent, l'ingestion de MS est diminuée par une complémentation en lipides. De ce fait, les conclusions ne sont pas toujours les mêmes si l'on exprime les résultats par animal, par kg de MSI ou par rapport à l'énergie digestible. De plus, si la baisse de MSI est associée à une chute de production, le nombre d'animaux nécessaire pour produire suffisamment de viande sera augmenté, ce qui n'est économiquement et écologiquement pas souhaitable (Hristov et al., 2013a).
- L'apport de lipides peut modifier le fonctionnement du rumen, et en particulier la digestion des fibres glucidiques (Hristov et al., 2013a).
- Certaines sources de lipides peuvent sensiblement faire augmenter le coût de la ration.

Le lin, souvent envisagé pour l'apport de lipides (Doreau et al. (2011a), Eugène et al. (2011)), réduit la PMQ et l'intensité de méthane, et présente l'atout d'être plutôt bénéfique pour la qualité nutritionnelle de la viande, en raison d'un apport en oméga 3 (acide linoléique). Outre les limites présentées précédemment, une quantité ingérée excessive peut résulter en une tendance à la peroxydation des lipides.

En ce qui concerne les AG à chaîne moyenne (contenus par exemple dans le coprah), qui ont des effets marqués sur la méthanogenèse, leur emploi devrait être freiné par leur impact plutôt négatif sur la « valeur santé » des produits animaux (Doreau et al., 2011a), et peut-être par une réduction de digestibilité des rations dans certains cas.

Les drêches de maïs de distillerie, coproduit de la fabrication de bioéthanol, ne contiennent que 10% d'AG environ. Celles-ci peuvent cependant être incorporées en quantités élevées dans la ration et constituent ainsi un moyen d'enrichir la ration en lipides. D'autres coproduits de biodiesels, comme les tourteaux gras de colza, à 10% de lipides, ont le même effet (Moate et al. (2011) cités par Doreau et al. (2011a)). Ces aliments présentent les avantages de réduire considérablement la quantité de résidus inexploités lors de la fabrication de biocarburants, et d'être économiquement envisageables pour les éleveurs. En revanche, ils contiennent davantage d'azote et de phosphore qui vont être éliminés dans les urines et les fèces, et leur teneur élevée en acides gras mono-insaturés, pouvant avoir un impact sur le fonctionnement du rumen, limite leur utilisation à 6-7% de la MSI.

En conclusion, selon Popova et al. (2011b), l'utilisation de lipides est une piste intéressante et facilement applicable en pratique. Il reste encore à étudier plus en profondeur quelles molécules sont les mieux adaptées et efficaces sur le long terme, et quel est l'impact de la composition de la ration sur l'effet de l'apport lipidique (les données sont encore fragmentaires et contradictoires d'après Doreau et al. (2011a)). Dans la publication de Martin et al. (2010), élever d'un point la proportion de lipides dans la MS de la ration permet une diminution moyenne de 3,8% des émissions de méthane. Il pourrait donc être très efficace d'augmenter cette proportion de deux ou trois points, à condition que l'impact sur la production des animaux et sur le coût de la ration soient faibles.

#### *vi. Apport azoté*

L'apport azoté n'est pas réputé pour être un facteur de variation important de la production de CH<sub>4</sub>. Cependant, lorsque 59 expériences portant sur l'influence du taux de Matière Azotée Totale (MAT) ont été exploitées par Sauvante et al. (2011), il est apparu une influence négative significative du taux de MAT sur la production de CH<sub>4</sub> (figure 28). Cela



résulte du fait que l'accroissement de la teneur en MAT est associé à une amélioration significative de la teneur en MOD des rations considérées. Mais lorsque la production de CH<sub>4</sub> est exprimée par rapport à la MSI, il n'y a pas de relation avec la teneur en MAT.

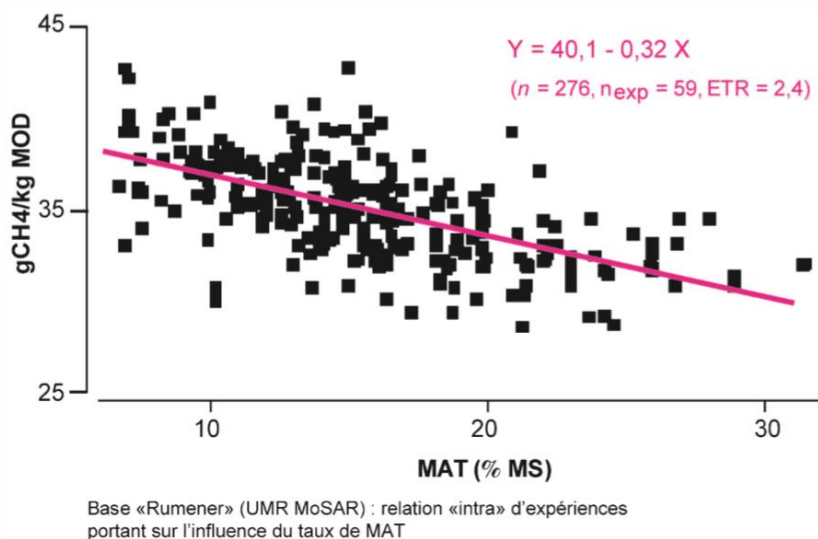


Figure 28 : Influence, calculée en intra-expérience, de la teneur en MAT du régime sur la méthanogenèse (Sauvant et al., 2011)

En définitive, l'effet de la teneur en matière azotée semble très modéré, et ne peut pas être exploité de façon intense.

#### vii. *Utilisation d'algues*

Selon Herrero et al. (2016), l'utilisation d'algues mériterait davantage d'investigations, puisqu'elles pourraient permettre de réduire la surface de terres exploitées tout en diminuant le MY (grâce à leur haute qualité). Cependant, les investissements économiques nécessaires et les difficultés logistiques actuellement rencontrées empêchent pour le moment d'envisager cette option à grande échelle.

#### b) Additifs et biotechnologies

Selon Dollé et al. (2011), les additifs alimentaires et les biotechnologies pourraient constituer une autre voie de réduction des émissions de méthane entérique. Cependant, leur développement est encore sujet à de nombreuses interrogations. Certaines substances sont interdites en Europe (par exemple les antibiotiques ionophores), d'autres sont d'origine chimique et très coûteuses (acides organiques), et d'autres enfin n'ont pas fait preuve d'un effet durable dans le temps (tanins, saponines).

Voici un descriptif des principales pistes étudiées dans ce domaine.

### *i. Extraits de plantes*

Avec des études sur plusieurs centaines de plantes (Bodas et al. (2008), et Garcia-Gonzalez et al. (2008), cités par Doreau et al. (2011a)), seules une dizaine d'entre elles permettaient de fortement réduire la production de méthane sans effet négatif sur la fermentation. L'utilisation potentielle de telles plantes, si elles se montraient efficaces, est bien sûr tributaire de leur aptitude à la culture ainsi que de leur absence de toxicité. De plus, il faudrait chaque fois s'assurer que les plantes utilisées n'ont pas par ailleurs un effet négatif sur les fermentations, car de nombreuses molécules sont présentes dans un organisme végétal.

Ces plantes peuvent parfois avantageusement jouer un rôle dans la quantité et la qualité de production de l'animal (Popova et al., 2011b), et leur utilisation est souvent bien perçue par le consommateur.

#### ❖ Saponines

Ces glycosides présentent une toxicité envers les protozoaires du rumen. Cependant, chez des animaux défaunés, il y a tout de même une baisse de 14% de la production de méthane pour les animaux recevant des saponines (Hess et al. (2003) cités par Popova et al. (2011b)). Donc ces molécules n'agissent pas uniquement sur les protozoaires. Selon Doreau et al. (2011a), il y a diminution de la dégradation des protéines dans le rumen et favorisation de la synthèse de protéines microbiennes, ce qui limite la quantité d'hydrogène disponible pour la méthanogenèse. De plus, Popova et al. (2011b) expliquent que selon les études (type d'alimentation, saponine utilisée...), les saponines ont une activité inhibitrice variable sur les archées. Des études supplémentaires sur la sélection de différentes archées selon la saponine ingérée seraient intéressantes.

Selon la saponine utilisée, certaines études montrent qu'après une diminution des protozoaires atteignant jusqu'à 60%, une adaptation et augmentation de la population de ces micro-organismes est parfois possible, et parfois non (Newbold et al. (1997), et Hristov et al. (1999) cités par Popova et al. (2011b)). De plus, pour une même saponine, la diminution du nombre de protozoaires est variable d'une étude à l'autre.

*In vitro* et à des niveaux d'incorporation suffisants de plantes riches en saponine (4,5 g/kg de MS, Holtshausen et al. (2009) cités par Doreau et al. (2011a)), une diminution de 25% de la production de méthane peut être observée. Les essais *in vivo* sont eux en nombre plus limité. La quantité de données disponibles et concordantes est trop faible pour qu'une conclusion puisse être tirée sur les possibilités d'emploi de certaines plantes riches en saponines

comme agents permettant de réduire la production de méthane. La plupart des études sont à court terme, et les résultats vont d'un effet nul à 15% de réduction selon la dose et l'expérience (Pen et al. (2007), et Wang et al. (2009), cités par Doreau et al. (2011a)).

#### ❖ Tanins

Ces composés hydrosolubles polyphénoliques ont des effets sur les protozoaires contradictoires selon les études. Leur impact sur les archées est prouvé, et peut être bactériostatique ou bactéricide selon la souche pour un même tanin (Tavendale et al. (2005) cités par Popova et al. (2011b)). Cependant, nous manquons d'études effectuées sur le long terme, et la présence de bactéries tanins tolérantes (genre *Streptococcus*) pourrait modifier ou dégrader les tanins, les éliminant du milieu ruminal (Smith et al. (2005) cités par Popova et al. (2011b)).

Sous le nom générique de tanins, sont rangées deux familles très différentes de composés : les tanins condensés, dont l'effet négatif sur la production de méthane a été très bien étudié, et les tanins hydrolysables, dont ce même effet est moins connu mais a été mis en évidence par Jayanegara et al. (2011) cités par Doreau et al. (2011a). Les deux types de tanins ont d'autres effets favorables comme la réduction de la dégradation des protéines dans le rumen, mais également défavorables, comme la diminution fréquente de la digestibilité de la matière organique (Waghorn (2008) cité par Doreau et al. (2011a)).

D'un point de vue pratique, bien que les plantes à tanins soient plus répandues dans les zones tropicales, elles peuvent tout de même être utilisées dans les zones tempérées (lotier, sainfoin), ou alors sous forme d'extraits de tanins ajoutés à la ration. Selon les études et les plantes utilisées, l'efficacité sur le long terme est variable (Doreau et al. (2011a)), et il est difficile de savoir si les différences observées doivent être imputées à la nature des tanins ou aux conditions expérimentales. Nous manquons encore de références *in vivo* sur certaines plantes (par exemple le sainfoin).

#### ❖ Huiles essentielles

Ce sont des liquides concentrés en composés aromatiques volatils, obtenus par distillation ou extraction dans des solvants de plantes. Leur impact sur les protozoaires est contradictoire selon les études (Popova et al. (2011b)). Leur effet sur les méthanogènes est encore peu étudié. Il semble qu'elles entraînent la sélection d'espèces résistantes mais moins efficaces dans la production de CH<sub>4</sub>.

L'interprétation des résultats expérimentaux est difficile car, pour une même plante, il existe une grande variabilité en huiles essentielles, comme par exemple selon la région d'origine (Benchaar et Greathead (2011) cités par Doreau et al. (2011a)).

Nous pouvons citer en exemples le thymol, le carvacrol, le cinnamaldéhyde... Ces composés sont présents dans le thym, l'origan, la cannelle...

Les huiles essentielles présentent l'avantage d'être facilement utilisables sur le terrain. Certaines molécules semblent efficaces, et l'association de deux ou plusieurs huiles essentielles pourrait accroître les chances de succès d'une stratégie de réduction de la production de méthane. Cependant, il existe une multitude de molécules potentiellement intéressantes et les réponses sont divergentes selon les écosystèmes microbiens. Nous manquons donc encore de beaucoup d'études pour identifier les meilleures cibles, notamment sur le long terme et *in vivo*. L'extrait d'ail a par exemple souvent été montré comme très efficace pour réduire la production de méthane *in vitro*, en raison de la présence de composés organosulfurés. *In vivo*, les premiers résultats sont décevants (Klevenhusen et al. (2011), Van Zijderveld et al. (2011), et Staerfl et al. (2012), cités par Doreau et al. (2011a)).

## ii. Composés chimiques

### ❖ Nitrates et Sulfates

Ce sont des accepteurs d'électrons à la place du CO<sub>2</sub>, ce qui évite sa transformation en CH<sub>4</sub>. Après des premiers essais concluants *in vitro*, un essai *in vivo* à court terme sur des moutons a montré des réductions de production de méthane de 32, 16 et 47% par addition de nitrates, de sulfates et de ces deux composés, respectivement (Van Zijderveld et al. (2010a) cités par Doreau et al. (2011a)). Un second essai sur vaches laitières a montré l'efficacité sur le long terme de l'addition de nitrates pour la réduction de production de méthane (Van Zijderveld et al. (2010b) ont observé, pendant 4 mois, une quantité émise inférieure de 16% pour les animaux recevant 22g de nitrate par kg de MSI par rapport à ceux recevant de l'urée). Parallèlement, l'utilisation d'un autre composé azoté, le nitroéthane, a réduit à court terme la production de méthane *in vivo* (Brown et al. (2011) cités par Doreau et al. (2011a)). En plus de la baisse de production de méthane, il y a diminution de la population d'archées (les raisons sont mal connues). Enfin, selon Popova et al. (2011b), l'utilisation de nitrates conduit également à la formation d'ammoniac, qui pourrait servir d'apport en azote lorsque les régimes alimentaires sont pauvres en protéines.

Cependant, si le nitrate est distribué en trop grande quantité (à partir de 18g/kg de MSI selon Duthie et al. (2016)), le nitrite, composé intermédiaire entre nitrate et ammoniac, peut

s'accumuler et être toxique pour les bactéries cellulolytiques (et donc diminuer la capacité à digérer les fibres) et pour l'hôte (en étant absorbé dans le sang, de la méthémoglobine se forme, moins efficace que l'hémoglobine pour le transport d'O<sub>2</sub>). Pour limiter sa toxicité, il est possible d'associer l'apport en nitrate avec celui d'autres composés accepteurs d'électrons, comme les sulfates. Utilisés en trop grande quantité, ces composés peuvent également être à l'origine d'une toxicité en entraînant la formation d'hydrogène sulfuré.

D'après Doreau et al. (2011a), l'utilisation de ce type de molécules se confrontera à l'acceptabilité de telles pratiques par le consommateur, et à leur coût. Bien qu'elles ne soient pas encore commercialisées en France, leur mise sur le marché est toutefois possible si elles se révèlent efficaces, d'autant plus que l'ajout de nitrates semble n'avoir d'impact ni sur la santé ni sur les performances des bovins allaitants lorsqu'ils sont ajoutés dans des proportions inférieures à 14g/kg de MSI (Duthie et al., 2016). Des études supplémentaires sont nécessaires.

#### ❖ Acides organiques

Comme le décrivent Doreau et al. (2011a), ce sont des constituants mineurs de certaines plantes qui sont convertis dans le rumen en fumarate puis succinate avec consommation d'hydrogène. Le succinate est ensuite transformé en propionate. Cependant, Popova et al. (2011b) expliquent que la réduction du fumarate est thermodynamiquement beaucoup moins favorable que la méthanogenèse, et que, de plus, une partie du fumarate est utilisée pour former de l'acétate et donc produit de l'H<sub>2</sub>. Trois acides organiques de synthèse ont été étudiés : le malate, le fumarate et l'acrylate.

Curieusement, l'effet des acides organiques sur la méthanogenèse est souvent plus important *in vivo* que dans des systèmes *in vitro*. Ceci pourrait être dû, selon Doreau et al. (2011a), à une compétitivité plus grande des bactéries utilisant les acides organiques par rapport aux méthanogènes dans des systèmes complexes. Lorsque l'on calcule par stœchiométrie l'amplitude théorique de diminution de la production de méthane liée à l'effet « puits d'hydrogène » des acides organiques, on se rend compte que l'effet strict de l'utilisation d'hydrogène lors du métabolisme des acides organiques ne suffit pas à expliquer les réponses parfois observées : une distribution de 2kg de fumarate par jour à une vache laitière ne diminuerait la production de méthane que de 10% (Newbold et Rode (2006) cités par Doreau et al. (2011a)). D'autres mécanismes conduisant à la réduction de la production de méthane sont donc à rechercher. En outre, d'autres études seraient à envisager pour repérer si les bactéries réductrices de fumarate parviennent à prendre un peu plus de poids face aux archées

méthanogènes sur le long terme, et pour contrôler si les archées ne vont pas elles aussi devenir préférentiellement utilisatrices de formate (Popova et al., 2011b).

Même si les acides organiques se montraient efficaces sur le long terme pour réduire la méthanogenèse, il y a plusieurs freins à leur utilisation pratique d'après Doreau et al. (2011a) : la possible restriction de l'usage de molécules de synthèse en alimentation animale, le fait que des quantités importantes soient nécessaires, ce qui peut entraîner un problème pour l'image des produits et, en corollaire, leur coût élevé.

#### ❖ Composés inhibiteurs de la méthanogenèse

Popova et al. (2011b) décrivent :

- Le chloroforme, connu pour inhiber l'action des enzymes cobalamine dépendantes, telles que la méthyl-CoM réductase qui catalyse l'étape ultime de la méthanogenèse.
- Le bromochlorométhane (BCM), analogue halogéné du méthane qui réagit avec la vitamine B12 (cobalamine) et inhibe ainsi l'étape cobalamine dépendante de la voie métabolique de la méthanogenèse.
- Le bromoéthanesulfonate (BES), analogue de structure de la coenzyme M (= CoM = 2-mercaptoéthanesulfonate), et qui inhibe ainsi la déméthylation réductive de la CH<sub>3</sub>-S-CoM.

Pour les trois molécules, et dans des études *in vitro* et *in vivo*, les réductions de productions de méthane immédiates sont drastiques (entre -86% et près de -100% pour Goel et al. (2009), Guo et al. (2007), et Knight et al. (2011), tous cités par Popova et al. (2011b)). En revanche, sur le long terme, il semble que les archées se multiplient à nouveau beaucoup. Il faut donc encore étudier si la méthanogenèse reste basse (sélection d'espèces moins méthanogènes ?), et également rechercher d'éventuels effets secondaires de l'utilisation du chloroforme sur les performances et le bien-être animal.

Hristov et al. (2013a) décrivent enfin la cyclodextrine (conclusions proches de celles concernant les 3 molécules précédentes), et le 3-nitro-oxypropanol, dont les premiers résultats obtenus par Romero-Perez et al. (2014) sur 8 génisses de race allaitante pendant 5 mois sont prometteurs (réduction de 59% des émissions de méthane en moyenne). Mais l'efficacité de ce dernier composé et ses conséquences sur la qualité et la quantité de production sont à investiguer plus en profondeur, et l'acceptabilité par le consommateur, ainsi que le coût

engendré par l'ajout d'une molécule de synthèse chaque jour dans la nourriture de l'animal, pourraient limiter son utilisation.

#### ❖ Antibiotiques ionophores

Déjà envisagés par Johnson et Johnson (1995), et décrits par Doreau et al. (2011a), les antibiotiques ionophores, principalement le « monensin » et le « lasalocide », sont une catégorie d'antibiotiques dotés de propriétés spécifiques (stimulation du transport actif des cations et réduction de la production d'ATP) qui se traduisent par une toxicité vis-à-vis des bactéries à gram positif (Jouany (1994) cité par Doreau et al. (2011a)). Ils sont interdits dans l'Union Européenne depuis 2006, mais sont toutefois toujours cités comme un moyen possible de réduire les émissions de méthane. D'après la revue de Beauchemin et al. (2008) citée par Doreau et al. (2011a), l'effet dépendrait du niveau d'incorporation. La production de méthane diminuerait en moyenne de 3 à 8% par kg de MS ingérée à des doses élevées (20 à 35 mg par kg de MS ingérée). Cet effet est lié à l'orientation des fermentations ruminales vers l'acide propionique et à une stimulation des bactéries à gram négatif. En outre, la population de protozoaires est réduite.

Sur le long terme, l'effet n'a pas été confirmé avec des bouvillons dans un essai nord-américain effectué par Guan et al. (2006) et cité par Doreau et al. (2011a). La population de protozoaires s'est adaptée aux ionophores. Il est à noter qu'un autre antibiotique promoteur de croissance, la flavomycine, a montré une certaine efficacité *in vivo* pour réduire la production de méthane dans un essai de courte durée (Wang et al. (2009) cités par Doreau et al. (2011a)), mais son emploi est interdit de la même manière que celui des ionophores.

### iii. *Biotechnologies*

#### ❖ Probiotiques

Les probiotiques sont des organismes vivants qui, administrés en quantité appropriée et régulière, ont un effet bénéfique sur l'hôte. Peu d'études ont été réalisées jusqu'à maintenant et les résultats obtenus *in vivo* ne sont pas convaincants pour le moment.

Chaucheyras-Durand et Durand (2010) cités par Popova et al. (2011b) ont par exemple suggéré que *S. cerevisiae* (seule espèce de levure vivante utilisée, dont il existe différentes souches, et qui est parfois ajoutée dans la ration des ruminants pour stimuler la dégradation des fibres, limiter la dégradation des protéines et prévenir l'acidose) pourrait stimuler la croissance des bactéries acétogènes capables d'utiliser l'H<sub>2</sub> dans le rumen (voie de l'acétogénèse

réductrice), et le détourner ainsi de la méthanogenèse. Mais selon les études, pour obtenir des réductions satisfaisantes de la méthanogenèse, il faudrait parallèlement inhiber les méthanogènes.

Doreau et al. (2011a) décrivent l'incorporation de bactéries probiotiques comme additif. Pour les ruminants adultes, celles-ci sont habituellement destinées à prévenir l'acidose, ou à limiter le portage de pathogènes potentiels tels que certaines souches d'*Escherichia coli* et de *Salmonella spp.* Les bactéries les plus communément utilisées sont des utilisatrices de lactate qui accroissent la production de propionate, et des bactéries lactiques. Un travail dans le laboratoire de ces auteurs, utilisant une association de bactéries probiotiques, a permis pour la première fois de diminuer significativement la production de méthane chez la vache sans modification de sa production laitière, mais dans un essai de courte durée. Ce résultat prometteur reste à confirmer par de multiples études. Il existe donc une voie d'exploration, mais il est probable que des probiotiques contenant des bactéries acétogènes puissent être efficaces lorsqu'une stratégie de suppression des méthanogènes est appliquée conjointement.

Enfin, l'effet de microorganismes exogènes sans activité probiotique a également été testé. Une culture fongique de *Monascus sp.* s'est révélée efficace *in vivo* et a conduit à une réduction de la production de méthane de 30% chez le mouton après 2 semaines d'apport. Ce résultat, dû à différents métabolites du champignon, s'explique par une orientation des fermentations vers le propionate et une baisse de la population de méthanogènes (Morgavi et al. (2010) cités par Doreau et al. (2011a)). L'applicabilité de cette technique et la confirmation de l'effet sur le long terme restent à montrer.

Pour conclure, l'avenir de cette solution dépend, selon Popova et al. (2011b), d'une meilleure connaissance et d'un gain en efficacité. De nouvelles pistes pourraient être envisagées, comme par exemple limiter la production d'H<sub>2</sub> avec le développement de bactéries cellulolytiques non productrices de cette molécule (exemple : *F. succinogenes*).

#### ❖ Vaccins et anticorps

Selon Wright et al. (2004) cités par Popova et al. (2011b), les vaccins permettraient de diminuer la production de CH<sub>4</sub> sans altérer la digestion ni la performance animale. La stimulation immunitaire de l'animal aboutit à la production d'anticorps anti-méthanogènes qui rejoignent le rumen via la salive et inhibent les archées. Sur 3 vaccins étudiés par ces auteurs, un seul a réussi à diminuer les émissions de 8%. Ce vaccin ne cible toutefois que 20% des espèces d'archées, il pourrait donc être amélioré en ciblant davantage.



Cependant, il peut y avoir remplacement rapide de ces méthanogènes par d'autres, et donc la diminution de la population n'est que transitoire. De plus, le type de méthanogène présent dépend de beaucoup de facteurs (alimentation, localisation géographique...). Ainsi, pour avoir un vaccin adapté, il faudrait connaître la composition de la communauté des animaux à traiter. Les difficultés sont donc l'adaptation des populations méthanogènes, l'adaptabilité du vaccin à la population d'un animal donné, et la production de formulations facilement utilisables en conditions d'élevage. Malgré tout, comme le décrivent Gerber et al. (2013), les vaccins sont considérés comme prometteurs sur le long terme, et ils présentent l'avantage d'être éventuellement utilisables en élevage extensif.

Pour Popova et al. (2011b), le même raisonnement s'applique avec l'utilisation d'anticorps isolés à partir de matière organique puis administrés à l'animal.

❖ Autres biotechnologies envisagées, mais très peu exploitables pour l'instant

Des enzymes (cellulases et hémicellulases) pourraient être ajoutées dans la ration des animaux, réduisant de 9% la production de CH<sub>4</sub> *in vivo*, peut-être par un impact sur le ratio acétate/propionate (Beauchemin et al. (2008) cités par Eckard et al. (2010)). Cependant, selon Hristov et al. (2013a), les enzymes auraient peu d'effet sur les émissions entériques, et certaines tendraient plutôt à faire augmenter le MY. Quelques enzymes sont largement utilisées dans les industries du papier, du textile et de la production d'aliments, et sont donc disponibles en grande quantité et à faible coût (Eckard et al., 2010). Des études supplémentaires sont encore nécessaires pour déterminer lesquelles permettent d'avoir en plus un effet bénéfique sur la production.

Des bactériophages (et bactériocines) seraient efficaces pour lutter contre la méthanogenèse et rediriger le H<sub>2</sub> vers des bactéries productrices de propionate (McAllister et Newbold (2008) cités par Eckard et al. (2010)). Cependant, la quantité de recherches portant sur l'efficacité de ce levier d'action est très limitée.

Des protocoles visant à orienter la chaîne de réaction vers la voie de l'acétogenèse sont pour le moment encore très conceptuels (Eckard et al., 2010).

c) Améliorer la productivité des élevages

Dès les années 90, Vermorel (1995) décrivait l'intensification de l'élevage comme une solution, mais qui aurait bien sûr des conséquences techniques, économiques et politiques. En

effet, ce levier d'action a pour but d'accroître la rentabilité des exploitations tout en réduisant l'intensité de méthane, mais il serait nécessaire de veiller à ce que la potentielle baisse des prix engendrée n'aboutisse pas à une nette augmentation de la production et de la consommation, ce qui serait en défaveur d'une mitigation des émissions de GES.

*i. Augmenter le niveau de production pendant les « temps productifs »*

Tous les animaux ont besoin d'une quantité d'énergie quotidienne minimale pour vivre, appelée énergie d'entretien. Pour que l'individu produise, il faut en plus lui apporter l'énergie supplémentaire nécessaire à cela. Ces deux consommations d'énergie sont à l'origine d'émissions de méthane. Plus l'animal va être productif, moins il aura besoin de temps pour atteindre la quantité de production souhaitée, et donc moins les quantités émises de méthane dues au régime d'entretien vont être élevées. En élevage allaitant, environ 50% de la nourriture distribuée sert actuellement au régime d'entretien des bovins (Arthur et al., 2009), voire plus de 59% dans les systèmes de production extensifs (Hegarty, 2013). Plus le GMQ augmente (grâce à l'alimentation, la génétique et l'environnement des animaux), plus ce régime d'entretien est dilué dans la quantité totale de MSI. Ainsi, avec une baisse de l'âge à l'abattage, nous pourrions espérer réduire de 34 à 54% les émissions de méthane des animaux à l'engraissement sur toute leur durée de vie (McCrabb et al. (1998) cités par Arthur et al. (2009)).

Dans ce but, des facteurs de croissance (hormones,  $\beta$ -agonistes, etc.) sont par exemple utilisés aux USA. Cependant, dans de nombreux pays, l'utilisation de telles molécules n'est pas acceptable pour le consommateur.

En outre, les émissions de méthane par kg de MS ingérée diminuent lorsque le niveau d'alimentation et le pourcentage de concentrés augmentent, ce qui est souvent pratiqué pour les hauts niveaux de production. Cette tendance est toutefois remise en cause selon la région géographique et le système de production étudié, compte tenu de l'empreinte carbone des intrants, d'une moindre compensation carbone par les champs de céréales en comparaison aux prairies, et d'une priorité à donner à l'Homme en ce qui concerne l'accès aux aliments riches en énergie digestible (en particulier sur certains continents où la sécurité alimentaire n'est pas assurée (Afrique, Amérique du Sud...)). L'augmentation du niveau de production présente donc un intérêt, sous réserve qu'elle ne soit pas associée à un recours aux intrants trop conséquent (Dollé et al., 2011).

L'amélioration du potentiel génétique, et l'accès à des fourrages et à des pâtures de meilleures qualités (en particulier dans les pays en développement, sur lesquels reposent 70%

des possibilités de mitigation des GES en agriculture (GIEC, 2007)), seraient des moyens de réduction des émissions entériques impliquant peu de conséquences écologiques par ailleurs. En revanche, il est à noter que les animaux très producteurs ont souvent une carrière plus courte et des performances de reproduction moins bonnes (Garnsworthy (2004) cité par Doreau et al. (2011a)), ce qui contribue à accroître la proportion des besoins liés aux périodes improductives (croissance et tarissement).

## *ii. Réduire la durée des « temps improductifs »*

Comme nous venons de le voir, une des solutions pour améliorer la productivité serait d'accélérer la vitesse de production des animaux en engraissement et en finition. Cependant, le cheptel mondial n'est pas uniquement composé de bovins destinés à l'abattoir dans un futur proche. Les animaux reproducteurs et ceux de renouvellement sont indispensables pour assurer chaque année la naissance d'un nombre suffisant de bovins, et leurs émissions de méthane sont conséquentes. Il est donc nécessaire d'optimiser la reproduction.

### ❖ Les reproducteurs

L'objectif est d'atteindre une fécondité aussi élevée que possible (c'est-à-dire un maximum de veaux par vache et par an). En effet, lorsque celle-ci diminue, l'éleveur est contraint de garder davantage de reproductrices, pour fournir suffisamment d'animaux à engraisser tout en conservant la taille du troupeau.

La durée de gestation est d'un peu plus de 9 mois chez les bovins. Cependant, quelques variations inter-races et interindividuelles sont observables (par exemple, en France, la durée moyenne est de 296 jours chez la Blonde d'Aquitaine contre 282 jours chez la Blanc Bleu Belge, et 25% des Charolaises ont une durée de gestation inférieure à 286 jours tandis que 25% ont une durée supérieure à 293 jours (Idele<sup>a</sup>, 2013 (Web))). Ces variations peuvent s'expliquer selon le rang de gestation (gestation plus longue de 1 à 2 jours à partir du rang 3), mais l'alimentation, l'environnement et le potentiel génétique de l'animal pourraient également jouer un rôle. Selon Arthur et al. (2009), il serait donc souhaitable de réduire la durée moyenne de gestation.

La rapidité à exprimer les chaleurs, la capacité de l'éleveur à les observer, l'efficacité de la saillie et de l'insémination, l'aptitude à confirmer ou infirmer la gestation, et la lutte contre les avortements sont déterminantes dans le but d'augmenter les chances pour une reproductrice de mettre-bas un veau par an. D'après Garnsworthy 2004 cité par Hristov et al. (2013b), il serait possible de réduire de 24% les émissions de méthane en améliorant la fertilité (c'est-à-dire le

nombre de mises bas par rapport au nombre de saillies et d'inséminations effectuées). Pour cela, il est important de former correctement chacun des acteurs participant à la gestion de la reproduction (les éleveurs pour la détection des chaleurs, les entreprises de sélection pour la qualité des semences, les inséminateurs pour la technique d'insémination, les vétérinaires pour les diagnostics de gestations, etc.), de fournir une alimentation adaptée à l'animal pour l'aider à retrouver rapidement ses fonctions après la mise-bas (oméga-6...), de réduire le stress (transports, accès à une eau saine, etc.), de procurer aux bovins un environnement correspondant autant que possible à leurs besoins, et d'améliorer le potentiel génétique (par croisement (Arthur et al. (1999) cités par Arthur et al. (2009)), sélection en race pure, réduction de la consanguinité (Berman (2011) cité par Hristov et al. (2013b)), etc.) sur les caractères de reproduction, comme par exemple un intervalle vêlage-vêlage court et une bonne capacité à exprimer les chaleurs. L'utilisation de technologies nouvelles (synchronisation des chaleurs, transfert d'embryons, etc. (Garnsworthy, 2004)) ou non (insémination artificielle), permettrait d'accélérer les progrès en reproduction si les gouvernements les favorisaient, que ce soit dans les pays développés ou en développement (Hristov et al., 2013b).

Accroître le pourcentage de gestations gémellaires pourrait augmenter la fécondité, mais cette option reste très discutée, puisque ces dernières entraînent davantage de dystocies, de métrites et de mauvais retours en chaleur (Hristov et al., 2013b).

Enfin, la gestion des veaux est primordiale. D'une part, la mort de l'un d'entre eux équivaut à une année improductive pour sa mère, et, d'autre part, un sevrage tardif implique un retard pour le retour en chaleur (Crowe (2008) cité par Hristov et al. (2013b)). Ainsi, veiller à une prise colostrale de qualité, précoce et suffisante, favoriser la prise d'aliment solide, surveiller les affections fréquemment rencontrées chez le veau et facilement transmissibles (diarrhées, atteintes respiratoires, etc.), et intégrer aux programmes de sélection le caractère « qualité maternelle », sont autant de points essentiels à optimiser dans les élevages allaitants.

Finalement, en ce qui concerne les vaches, accroître leur longévité et leur capacité à produire un veau sevré environ une fois par an limite la nécessité de les remplacer par une génisse de renouvellement. En revanche, lorsque leurs capacités reproductives se dégradent sensiblement, il est préférable de ne pas les conserver.

#### ❖ Les génisses de renouvellement

Durant toute la période précédant le premier vêlage, les génisses de renouvellement émettent du méthane sans avoir produit de veau, ce qui a un impact sur la quantité de méthane

émise par kg de viande produite à l'échelle nationale. Un âge au premier vêlage plus précoce serait donc souhaitable, en particulier chez des races comme la Charolaise qui, en moyenne en France, met bas pour la première fois à un âge proche de 3 ans, alors que l'Angus en Océanie donne naissance dès 24 mois. Là encore, la gestion du troupeau et la génétique pourraient contribuer à favoriser une puberté plus précoce.

### *iii. Maintenir les animaux à leur potentiel*

A l'engraissement, l'augmentation du nombre d'animaux malades diminue l'efficacité de production. A l'abattage, certaines carcasses considérées comme répugnantes ou dangereuses sont retirées de la consommation. Durant la gestation, de nombreuses affections peuvent conduire à un avortement (brucellose, etc.). En péripartum, des complications peuvent aboutir à la mort du veau et/ou à un anœstrus prolongé subséquents. Enfin, d'un point de vue général, toute mortalité représente une perte économique, et des émissions de méthane au cours de la vie d'un animal qui ne sera finalement pas consommé. Ainsi, bien que peu de publications aient analysées l'impact de la santé sur les émissions de GES (Hristov et al. (2013b), Gill et al. (2010)), une bonne gestion sanitaire est logiquement essentielle pour limiter la production de méthane entérique dans tous les types d'élevage. Disposer de soins vétérinaires adaptés (guérir les animaux atteints, prévenir les maladies transmissibles (quarantaine, vaccins...), éviter les blessures et les boiteries, etc.), favoriser l'accès aux médicaments, répertorier dans des fichiers les affections observées, ou encore sélectionner les animaux pour leur résistance aux infections et aux troubles métaboliques, devraient permettre de maintenir un maximum de bovins à leur potentiel de production.

Dans diverses régions du monde, les conditions climatiques sont telles que les animaux ne sont pas en mesure de produire autant qu'ils le feraient dans un environnement plus favorable. Cependant, l'impact du réchauffement climatique sur la production et la fertilité semble varier d'un bovin à l'autre, et la résistance à la chaleur serait héritable (Hayes et al., 2013). Plutôt que d'importer de la génétique à haut potentiel, mais inadaptée aux conditions d'élevage parfois difficiles (désertification, maladies transmissibles, etc.), il serait préférable de sélectionner et favoriser la mise à la reproduction des meilleurs animaux appartenant aux races natives et résistantes dans ce milieu, ou de les croiser avec des bovins de races connues pour leurs performances de production et de reproduction (Hristov et al., 2013b). Bien sûr, favoriser le bien-être animal, par exemple en permettant l'accès des animaux à l'eau et à des zones d'ombre, limite l'impact de la chaleur sur la productivité des animaux.

#### d) Bilan

Des solutions commencent à se révéler efficaces (lipides, nitrates, productivité...), même en tenant compte des éventuels effets sur les émissions d'autres GES, produits par des activités liées à ces leviers d'action. D'après Dollé et al. (2011), chacune des pistes évoquées ci-dessus pour l'alimentation permet une réduction des émissions de GES comprise entre 0 et 7% selon les cas. Les additifs et les biotechnologies peuvent également être envisagés en production intensive. Toutefois, comme le font remarquer Doreau et al. (2011a), se posent les problèmes de leur coût (encore bien souvent très mal connu), de leur acceptabilité lorsqu'ils ne sont pas naturels ou s'ils portent atteinte au bien-être animal (notion devenue indispensable pour la durabilité des élevages selon Llonch et al. (2016)), et, parfois, de leur difficulté d'application (notamment lorsque les animaux sont au pâturage).

D'importants travaux de recherche sont encore nécessaires pour préciser l'intérêt environnemental et technico-économique de tous ces leviers, et leur aptitude à fonctionner *in vivo* sur le long terme. Il est indispensable de considérer en parallèle l'effet possible sur l'ingestion, la digestibilité de la ration et les performances. Dans les conditions du terrain, l'objectif est de réduire les émissions de méthane par exploitation ou par kg de produit. Selon Doreau et al. (2011a), les progrès viendront d'une meilleure compréhension des mécanismes, et donc du rôle des différents micro-organismes du rumen impliqués dans la production et l'utilisation de l'hydrogène.

Sauvant et al. (2011) reviennent sur la diversité d'unités et surtout de modes d'expression de la production de CH<sub>4</sub> dans la littérature, soulevant la question de l'interprétation des résultats publiés. Par exemple, les ruminants dont le potentiel de production est faible à moyen, et qui reçoivent une ration pauvre, produisent bien moins de CH<sub>4</sub> par animal que les ruminants à potentiel de production élevé et alimentés avec des rations riches. En revanche, ils produisent plus de CH<sub>4</sub> par unité de production ou de MSI. Dans un tel contexte, il convient d'être très prudent sur les conclusions à tirer de toutes les études.

Il est enfin évident qu'un unique levier d'action n'apportera sans doute pas à lui seul de solution radicale. Aucun n'a un potentiel de mitigation des émissions de méthane très marqué, sur le long terme, tout en étant peu coûteux, facilement commercialisable, acceptable par le consommateur et bénéfique pour la production (Hristov et al., 2013a). Il est donc nécessaire de continuer d'explorer plusieurs pistes, pour dégager de possibles compatibilités voire synergies entre stratégies.

Dollé et al. (2011) résument les principaux moyens de réduction de méthane en prenant en considération leur impact global sur l'empreinte carbone nette qui en découlera, c'est-à-dire

en tenant compte de la production de GES due aux intrants, de la réduction de l'effet « puit de carbone » des prairies, etc. (tableau 9). Ces données s'appliquent aux élevages bovins laitiers et allaitants sans distinction.

Tableau 9 : Effets potentiels des principaux leviers d'action sur les émissions de GES (Dollé et al., 2011)

Leviers d'action	Méthane	Protoxyde d'azote	Gaz carbonique	Effet potentiel sur la réduction de l'empreinte carbone nette des produits
<b>Alimentation des animaux</b>				
Augmentation de la part de concentrés	↓	-	↑	0 à 5%
Apports de lipides	↓	-	-	3 à 7%
Additifs alimentaires	↓	↓	-	?
<b>Productivité et gestion du troupeau</b>				
Productivité	↓	↓	↓↑	- 5 à 10%
Renouvellement	↓	↓	↓	0 à 5%
Optimisation sanitaire	↓	↓	↓	2 à 5%

Comme nous pouvons l'observer, l'immense majorité de ces principaux moyens est applicable en premier lieu pour les animaux en production intensive, ou du moins élevés en bâtiment (contrôle de l'alimentation et ajout d'additifs, forte productivité...). Pour ces élevages, le choix d'une augmentation de productivité respectueuse de l'environnement va être essentiel, puisque l'on peut constater que selon la manière dont cela va être réalisé, l'empreinte carbone peut être significativement diminuée ou au contraire assez fortement augmentée. L'efficacité de production, obtenue par une meilleure fertilité, une valorisation optimale de la ration, une baisse de la dépense d'entretien (Hegarty (2004) cité par Dollé et al. (2011)) et une sélection génétique sur des caractères de productivité, constitue une voie importante de progrès. De même, une meilleure gestion du troupeau (réforme uniquement des animaux peu productifs, gestion sanitaire efficace, capacité d'adaptation aux modifications de l'environnement...) représente un potentiel de réduction des émissions de GES de l'élevage bovin compris entre 2 et 5% (Cruickshank et al. (2009) cités par Dollé et al. (2011)).

D'autres pratiques touchant davantage à la gestion du troupeau allaitant, comme le choix de la date de mise bas selon la date de pousse maximale de l'herbe pour optimiser le pâturage, doivent encore être évalués.

La recherche d'autres pistes pour la diminution des émissions de méthane représente un grand enjeu pour les productions extensives (notamment au pâturage) et en conditions tropicales et subtropicales, puisqu'elles présentent des contraintes spécifiques. Les recherches sur l'effet

de la nature des fourrages et sur l'influence de leurs métabolites secondaires sur la production de méthane sont à développer.

Actuellement, les races bovines les plus faiblement émettrices ne sont pas précisément identifiées, et il semble que les résultats soient variables selon les conditions environnementales (Fraser et al. (2014), avec des welsh blacks et des croisées limousines). Il paraît d'ailleurs illusoire et peu utile de vouloir comparer les races entre elles sur leurs émissions entériques. Il faudrait mettre en place une expérience de très grande taille, en échantillonnant particulièrement bien les animaux expérimentaux, en maîtrisant parfaitement le milieu, et en effectuant des mesures suffisamment longtemps pour obtenir une mesure précise des émissions. Les différences au sein d'une même race semblant très supérieures aux différences entre races, le coût qui serait engendré par une telle étude ne paraît pas justifié.

Pour Dollé et al. (2011), la sélection génétique intra-race sur le caractère « méthane » représente en revanche une opportunité non négligeable dans le but de réduire les émissions de GES. Doreau et al. (2011a) et Martin et al. (2010) expliquent que l'animal hôte peut intervenir par le biais du temps de séjour des aliments, de sa production salivaire, et surtout par son écosystème (des différences individuelles pour une même ration sont observées, conduisant à des différences d'efficacité digestive d'après Zhou et al. (2010) cités par Doreau et al. (2011a)). Ce levier d'action pourrait être utilisé à la fois pour les animaux en bâtiment, mais également pour ceux à l'extérieur. La proportion de bovins allaitants régulièrement au pâturage étant conséquente, cette piste va être explorée avec attention ci-dessous.

### 3) Apport de la sélection génétique sur le caractère « méthane »

#### a) Rappels et état des lieux

Comme nous l'avons évoqué précédemment, sélectionner des animaux et/ou croiser des races sur des caractères visant à améliorer la production, la reproduction, ou même la santé des animaux et leur capacité d'adaptation aux conditions environnementales, a indirectement un impact bénéfique sur la mitigation des émissions entériques. Pour des raisons économiques, ces objectifs sont voués à être intégrés aux programmes de sélection actuels. Il ne fait aucun doute que, même sans la problématique du climat, l'élevage chercherait à accroître la maîtrise des caractères directement liés à la rentabilité. Wall et al. (2010) proposent des pistes pour la mise en place de programmes de sélection économiquement et écologiquement efficaces, tout en répondant aux attentes du consommateur (bien-être animal, santé, réduction de l'utilisation d'antibiotiques, environnement...). Nous allons préférentiellement nous intéresser aux



nouveaux résultats disponibles concernant un potentiel apport de la génétique sur le caractère « méthane », ou sur des caractères qui lui sont associés.

L'INRA a publié la synthèse d'un rapport d'étude (Pellerin et al., 2013) relatif à la réduction des émissions de GES par l'agriculture française. Dans ce but, l'institut a sélectionné dix solutions au fort potentiel d'atténuation des émissions de GES, et dont l'état des connaissances permet une application dès à présent. L'utilisation de la génétique pour la mitigation des émissions entériques n'a pour l'instant pas été considérée comme l'un de ces leviers d'action. L'INRA reconnaît l'urgence de lutter contre les émissions de méthane chez les ruminants (une des dix solutions retenues repose sur la substitution des glucides par des lipides insaturés, voire sur l'ajout de nitrates, dans les rations), et ne remet pas en cause le potentiel de la génétique pour répondre à cette nécessité. Ce sont le « *manque de recul sur les critères de sélection et [le] manque de connaissances sur la sélection directe sur les émissions de CH<sub>4</sub>* » qui font actuellement défaut.

Ainsi, un point important à retenir, en ce qui concerne l'utilisation de la génétique pour la mitigation des émissions entériques de méthane, est la carence en résultats disponibles. Les moyens humains et financiers à investir pour obtenir la quantité de données suffisante peuvent en partie expliquer ce manque.

Cependant, la génétique serait un levier d'action cumulatif et qui s'ancrerait sur le long terme. De plus, peu de solutions pratiques existent pour diminuer les émissions de méthane des animaux au pâturage (comme c'est souvent le cas des bovins allaitants), et sans réduire leur productivité. Or, nous verrons que la génétique pourrait le permettre. Les publications étudiant l'impact des croisements sur les émissions de méthane restant rares, la possibilité de cloner les bovins faiblement émetteurs n'étant pas encore envisagée, et les autorisations de commercialisation de produits issus d'animaux génétiquement modifiés (transgénèse et/ou mutagénèse artificielles, voire édition génomique) demeurant extrêmement marginales, nous allons exposer les résultats de la recherche relatifs à la stratégie d'amélioration génétique la plus classique : la sélection.

L'amélioration du troupeau est une préoccupation majeure et permanente de la majorité des éleveurs. Bien sûr, l'objectif est avant tout économique. Pour un éleveur de bovins allaitants, par exemple, il s'agira de produire des animaux qui se musclent vite sans trop consommer, dans le but d'augmenter la marge par animal produit. Mais d'autres objectifs peuvent être envisagés : faciliter le travail au quotidien (vêlages faciles, etc.), réduire les risques d'accident (animaux dociles, etc.), et, dorénavant, réduire les émissions de GES. Dans cette optique d'amélioration du troupeau, les éleveurs pratiquent la sélection. Cela consiste à

favoriser la reproduction des animaux présentant de bonnes performances sur les caractères recherchés, en espérant la transmission de ces caractères à la descendance. Ainsi, les éleveurs accouplent (insémination artificielle (IA) ou monte naturelle) les taureaux les plus adaptés à leurs vaches pour les caractères choisis. Avant l'avènement de la génétique, cette sélection ne pouvait se faire qu'à partir d'observations phénotypiques, plus ou moins subjectives, réalisées par les éleveurs sur leurs animaux.

Les généticiens ont alors cherché à définir des caractères quantitatifs qui améliorent les revenus de l'éleveur, et qui soient génétiquement variables et objectivement mesurables. En somme, ils ont rationalisé la sélection traditionnelle opérée par les éleveurs. Le postulat de départ est que la performance  $P$  d'un animal est la somme d'un effet génétique  $G$  propre à l'animal et d'un effet environnemental  $E$ , sans interaction entre les deux ( $P=G+E$ ). Intéressons-nous à l'effet  $G$ . Il se décompose lui-même en  $G=A+D+I$  où  $A$  correspond à la somme des effets additifs des gènes, et  $D$  et  $I$  sont respectivement les effets de dominance et d'épistasie, c'est-à-dire les effets dus aux interactions entre gènes. Le but premier de la sélection en races bovines est d'améliorer la valeur génétique additive  $A$ , qui est directement transmise par les parents.

Pour ce faire, la sélection génétique a nécessité la mise en place d'un contrôle de performances (en fermes et en entreprises de sélection) ainsi que l'établissement des relations de filiation entre les animaux mesurés. A partir de ces informations de performance et de parenté, des index ont pu être calculés pour chaque animal. Nous distinguons des index élémentaires traduisant la valeur génétique sur un seul caractère (comme par exemple l'index DM qui a pour objectif de quantifier le potentiel de Développement Musculaire au sevrage), et des index plus globaux comme l'index ISU (Index de Synthèse Unique), qui est une combinaison linéaire de différents index et qui vise à donner une valeur de l'animal pour diverses aptitudes. Ces index sont accompagnés d'une précision et sont la base sur laquelle s'appuie l'éleveur pour faire ses accouplements.

La précision des Index (CD, pour Coefficient de Détermination) est évidemment primordiale. Pour les taureaux, qui sont utilisés sur de nombreuses femelles chaque année, des normes minimales de  $CD=0.5$  sont pratiquées afin de garantir une corrélation entre valeur génétique additive vraie et prédite supérieure à 0.7.

Avant l'utilisation de la génomique, cette précision suffisante ne pouvait s'obtenir qu'au prix d'un testage sur descendance long et coûteux. Ainsi, avant d'être largement diffusés par insémination, les taureaux, en plus de la prise en compte de leurs propres performances (lorsque cela est possible) et de celles de leurs ascendants, étaient testés sur 20 à 150 descendants afin

de prédire avec précision leur valeur génétique pour de nombreux caractères, en particulier pour tous les caractères mesurés sur les seules femelles. Des performances étaient mesurées sur les produits, ainsi que sur les produits de ces produits, jusqu'à atteindre une précision acceptable pour la diffusion par insémination. En moyenne, il fallait attendre que le taureau soit âgé de 5 à 7 ans pour avoir un nombre suffisant de descendants et obtenir une valeur génétique de  $CD \geq 0.5$ .

Cette méthode de sélection, efficace, a permis une amélioration notable des performances pour certains caractères, en particulier ceux relatifs à la productivité. Pour autant, elle avait des inconvénients importants. En premier lieu, le coût élevé du testage sur descendance (environ 50 000€ par taureau testé, et, en moyenne, seul un taureau testé sur dix est retenu (Colombani, 2012)) a pu entraîner des difficultés de rentabilité. Indirectement, ce coût a conduit à ne tester que peu d'animaux potentiellement intéressants et, finalement, les taureaux obtenant les valeurs génétiques les plus élevées ont été diffusés massivement, conduisant à une consanguinité élevée et à la perte de diversité génétique des populations bovines (principalement en races laitières). Cette pratique a été nommée « *star system* ».

Avec l'avènement de la sélection génomique, la plupart de ces inconvénients peuvent être gommés. L'idée, relativement simple, n'a à priori que des avantages :

- Réduction des coûts d'évaluation de l'animal et de ses apparentés, en particulier pour les caractères difficiles à mesurer (exemple : les émissions de méthane), puisqu'une simple prise de sang est déjà riche en informations.
- Progrès génétique plus rapide : réduction de l'intervalle de génération avec, dès la naissance, une augmentation de la précision de l'estimation des valeurs génétiques, en particulier pour les caractères qui ne sont mesurables que sur les femelles (exemple : la facilité de vêlage), ou après plusieurs années de vie de l'animal (exemple : la qualité de la viande).
- L'économie réalisée sur le testage peut être en partie réinvestie pour génotyper davantage d'animaux, et ainsi diversifier l'offre génétique (ce qui limite la consanguinité et la dérive génétique).

Finalement, afin d'utiliser la sélection génétique, les objectifs de la recherche sont :

- De démontrer que, pour des animaux élevés dans les mêmes conditions, il existe une variabilité interindividuelle à la fois répétable et héritable (l'héritabilité est la part de variation phénotypique qui s'explique par la variation des valeurs génétiques additives. Autrement dit, pour un caractère peu

héritable, les variations de performances interindividuelles observées ne sont pas principalement dues à la valeur génétique transmise par les ascendants).

- D'être en mesure d'évaluer un maximum de reproducteurs (par contrôle de l'animal et/ou de ses apparentés). Trois moyens sont envisageables :
  - Mesurer directement les performances.
  - Utiliser un paramètre « proxy » (par exemple, la RFI est actuellement celui pour lequel nous avons le plus de résultats en ce qui concerne le caractère méthane).
  - Recourir à la génomique.

Selon les études, les émissions de méthane sont exprimées par jour (PMQ), par quantité de masse sèche ingérée (MY), ou par kg de production (intensité de méthane). La sélection génétique sur certains caractères de production a permis de réduire les émissions par unité de production (Capper, 2011). Cependant, les éleveurs peuvent alors augmenter la quantité de MS distribuée aux animaux, dans le but de produire davantage, ce qui accroît la PMQ. Il serait préférable d'avoir des animaux qui réduisent leur PMQ et leur MY en même temps que leur production augmente. En particulier, si l'on considère que les émissions entériques sont consécutives à la perte d'une partie de l'énergie ingérée sous forme de méthane, diminuer le MY serait un moyen d'augmenter l'énergie utilisable par l'animal sans lui fournir davantage de MS. En définitive, le gaspillage et la pollution liés à la production de nourriture pour le bétail seraient réduits, et l'éleveur pourrait faire des économies sur le poste de dépenses « alimentation ».

#### b) Outils de sélection des reproducteurs

##### i. *Performances mesurées directement sur les animaux et/ou sur leurs apparentés*

Une étude de Renand et Maupetit (2016) suggère un CV de 12% pour la PMQ chez 124 génisses charolaises mesurées au GF, et de 14% pour le MY. Chez 40 taurillons Angus en CR, Herd (non publié), cité par Pickering et al. (2013), a obtenu des CV de 10% et 9%, respectivement.

Bien qu'une publication semble ne pas aller dans le sens d'une possible sélection sur le caractère « méthane » (Münger et Kreuzer (2008) cités par Pickering et al. (2015b)), des recherches plus récentes démontrent l'inverse. Nous observons des répétabilités généralement satisfaisantes (avec  $\text{rép}_{\text{PMQ}} = 0,61 ; 0,37 \text{ et } 0,69$ , et  $\text{rép}_{\text{MY}} = 0,58 ; 0,02 \text{ et } 0,34$ , dans des études de Renand (non publiée, sur 18 taurillons charolais au GF), Velazco (non publiée, sur 10 bœufs

Angus au GF), et Herd (non publiée, sur 40 taurillons Angus en CR), respectivement, et toutes citées par Pickering et al. (2013)), et des héritabilités exploitables génétiquement. Par exemple, la publication de Donoghue et al. (2013), réalisée sur 530 bovins viande, aboutit à des premières estimations d'héritabilités correctes des caractères « émissions de méthane par jour » ( $h_{PMQ} = 0,21 \pm 0,11$ ), « émissions de méthane par kg de masse sèche ingérée » ( $h_{MY} = 0,19 \pm 0,10$ ), et « émissions de méthane par gain de poids » ( $h_{\text{intensité de méthane}} = 0,23 \pm 0,10$ ). En étendant cette étude à 1 046 jeunes bovins Angus, Donoghue et al. (2016) ont obtenu des héritabilités plus précises et légèrement supérieures ( $h_{PMQ} = 0,27 \pm 0,07$  ;  $h_{MY} = 0,22 \pm 0,06$ ). Ainsi, à moyen terme, le MY avec l'aliment utilisé est à la fois répétable et héritable, mais moins que la PMQ.

Sur des génisses élevées pour la production de viande, Michal et al. (2013) cités par Pickering et al. (2015b) ont démontré que les animaux sélectionnés pour avoir de faibles ou forts MY avec un régime donné restaient en moyenne de plus faibles ou forts émetteurs avec 2 autres régimes. La différence entre les groupes est d'autant plus marquée que les animaux mangent de l'aliment très digestible. Cependant, nous avons encore trop peu d'informations sur le MY dans de nombreux systèmes de production, et sur la façon dont l'hôte influence la fermentation et donc la production de méthane (Pickering et al., 2015b). L'importance que la génétique peut jouer dans la réduction du MY reste donc encore mal connue, mais, selon ces auteurs, nous pourrions espérer que la sélection génétique permette, sur le long terme, de s'écarter d'environ 2 fois le CV par rapport à la moyenne (soit une diminution d'environ 25% du MY moyen).

Les répercussions que pourrait avoir une sélection d'animaux à faible PMQ (et/ou MY) sur d'autres caractères d'importance (fertilité, croissance...) sont elles aussi encore mal connues (Basarab et al., 2013). Dans une publication de Herd et al. (2013) sur 532 bovins Angus, les corrélations des valeurs génétiques sur le poids de l'animal et sur celui de sa carcasse sont significativement positives avec la PMQ, proches de 0 avec le MY, et significativement négatives avec l'intensité de méthane. Les corrélations entre épaisseur de gras et PMQ sont négatives, alors qu'elles sont proches de 0 pour le MY et l'intensité de méthane. Ces premiers résultats, similaires, en ce qui concerne la PMQ et le MY, à ceux publiés par Donoghue et al. (2016) sur 1 046 bovins Angus, laissent présager qu'une sélection sur le MY aurait un faible impact sur ces caractères de production, mais qu'il serait dans tous les cas nécessaire de veiller à ce que la PMQ n'augmente pas trop fortement.

Finalement, pour les émissions de méthane, la principale limite à la sélection à partir des performances mesurées directement sur les animaux ne réside pas dans la variabilité

interindividuelle, ni dans l'héritabilité, mais plutôt dans la difficulté à évaluer à coût modéré les individus sur le terrain. Ce point avait été expliqué dans la partie « Quantifier les émissions de méthane par les bovins de races allaitantes ». Le recours à des paramètres « proxy » assez facilement mesurables, ou à la génomique, pourrait donc faciliter la sélection sur le caractère « méthane ».

## ii. Paramètres « proxy »

Le principal paramètre « proxy » étudié, et par conséquent le seul vraiment envisagé actuellement, est la RFI. Rappelons qu'elle est définie pour chaque animal comme suit :

$RFI = \text{quantité ingérée} - \text{quantité qui devrait être ingérée pour l'entretien du poids et du GMQ actuels}$

Les différences interindividuelles sur le caractère RFI peuvent hypothétiquement s'expliquer en partie par de plus faibles gaspillages d'énergie ingérée sous forme de chaleur, d'émissions de méthane, ou dans les selles et les urines (Nkrumah et al., 2006), et une meilleure utilisation de l'énergie absorbée selon les activités, le comportement (alimentation, stress, etc.) et le métabolisme tissulaire (Richardson et Herd (2004)).

Ce caractère est modérément héritable ( $h_{RFI}=0,39$  (Arthur et al. (2001) cités par Hegarty et al. (2007), sur 792 charolais)), ce qui, selon Exton et al. (1999) cités par Hegarty et al. (2007), permet la sélection de lignées à haute ou basse RFI, et l'estimation d'une valeur génétique  $RFI_{EBV}$  (pour *Estimated Breeding Value*, ou valeur génétique estimée, sur le caractère RFI). Les bœufs Angus engraisés à l'orge ingèrent 1,17kg de MS de moins lorsque la  $RFI_{EBV}$  est diminuée d'1kg (Hegarty, 2013) et, selon un article de Basarab et al. (2013) qui résume les recherches effectuées jusqu'alors sur la RFI, cette dernière est modérément répétable d'un régime à l'autre (de 0,33 à 0,67).

Malgré certaines publications décrivant une corrélation proche de 0 entre RFI et émissions de méthane (Eugène et al. (2011) et Freetly et Brown-Brandl (2013), sur 52 et 84 BA non sélectionnés pour leur RFI, respectivement), Nkrumah et al. (2006), avec 27 bœufs choisis parmi 306 pour leur consommation résiduelle (8 RFI basses, 8 moyennes et 11 hautes), et Hegarty et al. (2007), sur 76 bœufs Angus nourris à l'orge et sélectionnés à partir de lignées divergentes sur la consommation résiduelle, ont observé qu'à même GMQ, la PMQ et donc l'intensité de méthane pouvaient être plus faibles d'environ 25% pour des bovins à faible RFI. Toutefois, dans le premier essai, les différences d'ingestion entre les deux lots étaient modérées, et la production de méthane par kg de MS ingérée était réduite de 8% pour les bovins à faible ingestion résiduelle, alors que dans le second, les différences d'ingestion étaient très fortes en raison de la sélection divergente, et la production de méthane par kg de MS ingérée était plus

forte de 11% pour les bovins à faible ingestion résiduelle. Hegarty et al. (2007) ont ainsi calculé une possibilité de réduire de 13,38g/j les émissions de méthane pour des bovins ayant une  $RFI_{EBV}$  diminuée de 1kg/j (la  $RFI_{EBV}$  a été calculée à partir de la RFI des parents, réajustée avec la  $RFI_{15j}$  des bœufs, calculée sur 15j).

A partir de valeurs de RFI réajustées en fonction de l'épaisseur du gras dorsal (mesuré par échographie), Basarab et al. (2013) avancent qu'une meilleure consommation résiduelle n'a en moyenne que très peu d'effet sur la fertilité, la qualité de la carcasse et de la viande, la durée de productivité de l'animal, ou encore sur son adaptabilité aux conditions de l'élevage au pâturage. Les répercussions sur les autres caractères d'importance ne devraient donc pas être un frein, d'autant plus que la RFI est associée à une meilleure digestibilité de la MSI et des protéines brutes (Nkrumah et al., 2006).

En définitive, dans l'état actuel des connaissances, nous pouvons penser qu'une sélection sur l'efficacité productive réduit probablement les émissions de méthane par kg de gain de poids. Hegarty (2013) considère qu'une réduction de 11 à 26% en 10 ans serait ainsi possible en sélectionnant les animaux à faibles RFI. De plus, à croissance et poids équivalents, les animaux présentant une valeur de RFI plus basse consomment moins, permettant de consacrer une plus petite surface agricole à la production de leur alimentation, ce qui limite la libération de carbone par les sols (Herrero et al., 2016).

En revanche, quelques limites à l'utilisation de ce paramètre « proxy » existent :

- La RFI n'explique qu'une part des variations de la PMQ (Hegarty et al., 2007). Il est encore nécessaire de vérifier de quelles conditions dépend la relation entre PMQ et RFI. Par exemple, alors qu'Hegarty et al. (2007) ont estimé, à partir d'une équation de Blaxter et Clapperton (1965), que les plus fortes réductions d'émissions de méthane devraient être obtenues avec des aliments à faible digestibilité, Jones et al. (2011) ont observé que des vaches Angus différant par leur  $RFI_{EBV}$  avaient la même PMQ sur un pâturage médiocre en gestation, mais que le groupe sélectionné pour avoir la plus basse consommation résiduelle présentait la plus faible PMQ sur de bons pâturages en lactation. Le stade physiologique et le régime de l'animal pourraient donc être deux éléments ayant un impact sur le rôle de la RFI dans la réduction des émissions.
- A GMQ fixé, les réductions d'émissions de méthane décrites précédemment sont en partie dues à la diminution de la quantité de MSI, ce qui permet à l'éleveur de faire des économies. Pour que la production de méthane par exploitation reste basse, il faut veiller à ce que les éleveurs ne réaugmentent pas la quantité totale

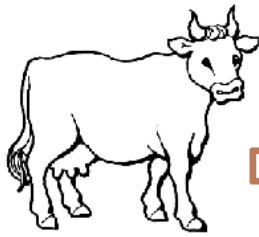
d'aliment distribuée (soit par animal, soit en agrandissant la taille du troupeau), dans le but d'accroître leur production (Pickering et al., 2015b). En effet, économiquement, une tonne d'aliment distribuée en plus devrait générer un coût 30 fois moins important en « prix du carbone » que les gains obtenus sur la carcasse lors de l'abattage (Hegarty et McEwan, 2010). Il serait préférable d'associer à l'amélioration de la consommation résiduelle une sélection visant à réduire le MY (Arthur et al., 2009).

- Le calcul de la RFI de chaque animal impose des pesées des animaux toutes les semaines ou tous les 15j pendant au moins 9 à 10 semaines pour estimer le GMQ (Wang (2006) et Archer et al. (1997), respectivement), en plus de mesurer les quantités quotidiennes de MSI. Bien que ce ne soit pas aussi coûteux que l'évaluation directe des émissions de méthane, la détermination précise de la RFI est peu réalisable en élevage, et contraignante pour les entreprises de sélection. L'estimation d'index génomiques sur ce caractère est également envisageable.
- Il paraît peu réalisable de diminuer la RFI de plus de 25% grâce à la sélection génétique (Herd (non publié) cité par Pickering et al. (2013)).
- Une sélection sur la RFI pourrait avoir un impact sur quelques caractères (par exemple, une très légère réduction du gras (Arthur et Herd, 2012)). Il reste donc indispensable de veiller à ce que, à terme, l'amélioration de la consommation résiduelle n'altère pas les performances de l'animal sur d'autres caractères (en particulier sa rentabilité à l'abattage (Pickering et al., 2013)).
- Le lien entre matériel génétique de l'hôte et méthanogènes présents dans le rumen, et les mécanismes biologiques et comportementaux (flore ruminale, temps passé à s'alimenter, nombre de visites à l'auge, etc.) à l'origine de variations de la MSI pour des animaux présentant des poids et GMQ identiques, ne sont pas encore bien compris (Nkrumah et al., 2006). L'avènement de nouvelles techniques (PCR, séquençage...) devrait faciliter l'étude des micro-organismes difficiles à cultiver (Hayes et al., 2013).

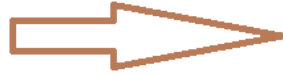
Le recours à la RFI comme indicateur de la capacité d'un animal à être moins émetteur que les autres par rapport à sa production semble donc assez prometteuse. Cependant, des études supplémentaires sont encore indispensables, et il serait souhaitable de réduire dans le même temps le MY. Enfin, les contraintes relatives à l'estimation de ce caractère sont à prendre en considération, ce qui incite la recherche en génétique à envisager d'autres moyens d'évaluer les animaux (autres paramètres « proxy », et génomique). Un schéma bilan du potentiel d'utilisation de la sélection sur le caractère RFI est disponible en figure 29.



### Caractéristiques individuelles de l'animal



Emissions de méthane (g/j)  
Alimentation (kg de MSI/j)  
Production : GMQ (kg/j)



### Evaluation des émissions



- Emissions de méthane par jour de l'animal (g/j).
- = **PMQ**



- Emissions par kg de MSI de l'animal (g/kg de MSI).
- = **MY**



- Emissions par unité de GMQ de l'animal (g/kg de poids gagné).
- = **intensité de méthane**



### Sélection sur la RFI

↕ MSI/GMQ (par définition)

↕ CH<sub>4</sub>/GMQ (multiples publications)

$$MY = CH_4/MSI = (CH_4/GMQ) / (MSI/GMQ) = \text{↕} / \text{↕}$$

⇒ Le MY peut être augmenté ou diminué (par raisonnement mathématique, et selon les publications).



### Avantages d'une sélection sur la RFI

D'un point de vue économique, à production constante, l'animal mange moins.

D'un point de vue écologique, à production constante, et donc pour répondre à une même demande du consommateur, la quantité de méthane émise est diminuée.

La sélection sur la RFI pourrait être efficace pour les animaux au pâturage, donc dans les conditions pour lesquelles les autres leviers d'action sont difficilement applicables.

### Limites

Nous manquons encore de résultats.

La mesure de la RFI est contraignante.

Si l'éleveur profite de l'atout économique pour augmenter sa production, la PMQ pourrait ne pas diminuer.

### Potentiel d'amélioration de la sélection

Une sélection axée à la fois sur la RFI et sur le MY permettrait d'agir encore plus efficacement sur la PMQ.

Figure 29 : Schéma bilan de l'utilisation de la RFI comme paramètre « proxy » pour sélectionner des animaux faiblement émetteurs de méthane

Parmi les autres paramètres « proxy » qui ont été envisagés, la mesure de la concentration en acides gras volatils a par exemple déjà été évoquée précédemment. Les recherches sont encore moins avancées, mais il pourrait être très utile d'identifier un de ces paramètres pour sélectionner les animaux à moindre coût (Pickering et al., 2013).

### iii. La génomique

Selon Pickering et al. (2015b), la génomique semble être le meilleur outil génétique pour la réduction des émissions de méthane, car elle permettrait de réduire la quantité de mesures (difficiles et coûteuses) à effectuer sur le terrain.

#### ❖ Quelques rappels de génomique

Le génome d'un animal est l'ensemble de son matériel génétique, dont les informations sont codées sur l'ADN. Le « gène » est l'unité de base de ces informations, et son emplacement sur le chromosome est appelé « locus ». Un gène peut exister sous différentes versions (à l'origine des variabilités interindividuelles observables), qui sont appelées allèles.

Le « modèle infinitésimal » consiste à considérer que le génome contient un très grand nombre de gènes non identifiés ayant chacun un effet très faible sur les caractères. Ce modèle ne reflète que partiellement la réalité. En effet, nous savons que certains gènes ont un effet bien plus significatif que les autres sur les performances. Pour un caractère donné (par exemple, les émissions de méthane), c'est le fait de posséder les bonnes versions alléliques de ces gènes d'importance qui va majoritairement permettre à un bovin d'émettre moins que les autres.

Naturellement, vient l'idée d'identifier directement, par analyse de l'ADN, les animaux qui possèdent les allèles favorables de ces gènes, afin de les fixer plus rapidement dans la population qu'avec les programmes conventionnels d'amélioration génétique. Cependant, le génotype des individus pour un gène d'intérêt sur l'expression d'un caractère n'est en général pas accessible. D'ailleurs, le gène n'est la plupart du temps même pas identifié. Nous pouvons alors seulement dire qu'il se trouve dans une région plus ou moins précise du chromosome, et nous parlons de « *Quantitative Trait Locus* » ou QTL.

En conséquence, puisque le gène est inaccessible, nous devons nous contenter de génotyper des « marqueurs » de ce gène (ou de ce QTL), révélateurs du portage d'allèles favorables ou défavorables au gène d'importance pour chaque individu. Dans l'idéal, nous souhaitons que ces marqueurs présentent un polymorphisme (donc une variation allélique) qui soit étroitement associé à celui du gène (c'est-à-dire qu'il existe un nombre de versions

alléliques du marqueur suffisant pour rendre compte de la variabilité du gène, que chaque version soit préférentiellement associée à un allèle du gène, et que le marqueur soit aussi proche que possible du gène sur le chromosome). Ainsi, si nous connaissons l'allèle porté au marqueur, nous pouvons alors prévoir, indirectement (donc avec un risque de se tromper), si l'individu est porteur d'un allèle favorable au gène d'intérêt. Cette association préférentielle entre un marqueur et un gène est appelée déséquilibre de liaison. Plus ce déséquilibre est élevé, plus le marqueur sera efficace pour permettre d'identifier avec fiabilité la version allélique du gène des animaux génotypés (figure 30).

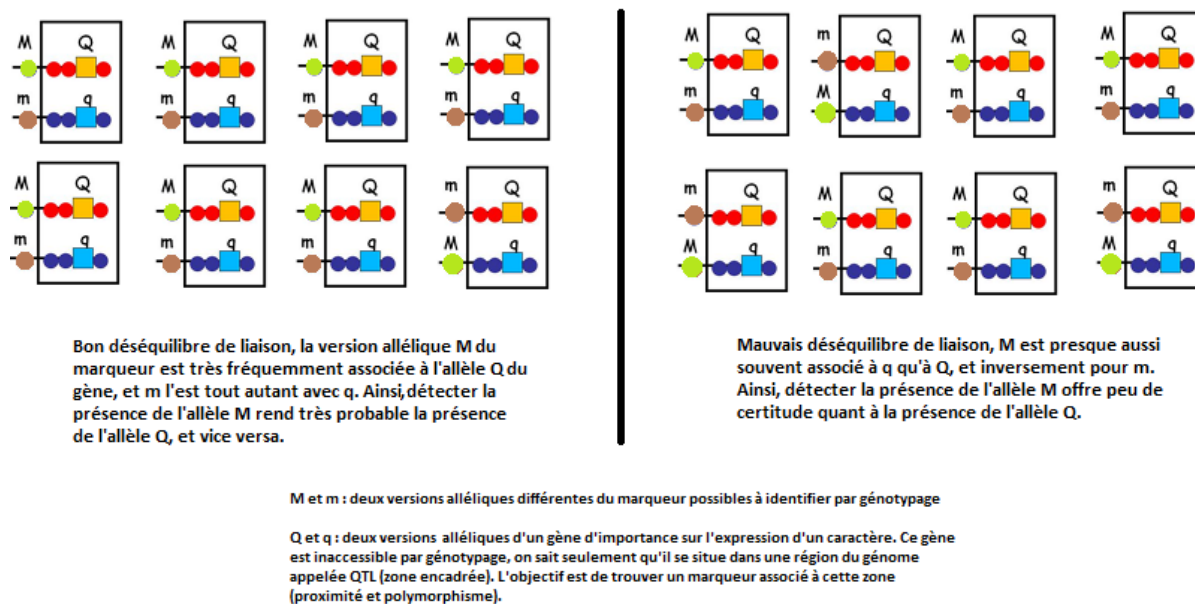


Figure 30 : Illustration de la notion de déséquilibre de liaison

Récemment, les progrès du séquençage des principales espèces domestiques ont permis de découvrir un nouveau type de marqueurs, répartis en nombre extrêmement élevé sur l'ensemble du génome (plusieurs centaines de milliers, voire plusieurs millions de marqueurs sur tout le génome). Il s'agit des marqueurs SNP, dont le polymorphisme consiste en la variation d'une seule base nucléotidique (« *Single Nucleotid Polymorphism* »). Les SNP sont si nombreux qu'il en existe toujours quelques-uns suffisamment proches pour être en déséquilibre de liaison avec un QTL donné. Avec l'utilisation de puces à ADN, capables de détecter 56 000 (voire 778 000) SNP sur le génome d'un individu, nous sommes en mesure d'estimer la valeur génétique de l'animal sur de nombreux caractères.

En effet, au début des années 2000, Meuwissen et al. (2001) ont conceptualisé une nouvelle méthode d'évaluation génétique qu'ils ont appelé la Sélection Génomique. Ils ont ainsi proposé de subdiviser le génome en un très grand nombre de segments contenant un ou plusieurs marqueurs. Ensuite, grâce à un échantillon d'individus (appelé population de

référence), phénotypés et génotypés pour ces marqueurs (dans le but de découvrir quels marqueurs sont associés à de bonnes ou de mauvaises performances sur un caractère donné), les auteurs proposent d'estimer l'effet de chaque segment du génome pour chaque caractère. A partir d'une équation tenant compte des effets associés aux génotypes d'un individu pour tous ces segments, nous pouvons alors disposer d'une estimation précise de sa valeur génétique, et ceci dès sa naissance. Cela permet de limiter les testages sur descendance longs et coûteux des taureaux. Un résumé des différentes étapes aboutissant à l'estimation de l'index génomique d'un animal sur un caractère (ici, les émissions de méthane) est disponible en figure 31.

Depuis 2013 environ, la sélection génomique est utilisée pour les grandes races allaitantes françaises. Cependant, la précision de l'index génomique est tributaire de la taille de la population de référence, ce qui représente encore un frein à l'utilisation de cet outil en races charolaise et limousine, comparativement à certaines races laitières (Prim'Holstein, etc.).



Figure 31 : Résumé des différentes étapes aboutissant à l'estimation de l'index génomique d'un animal sur un caractère

## ❖ Méthodologie d'application la génomique au cas des émissions de méthane

Comme évoqué précédemment, les difficultés et les coûts de mesure des animaux sur le terrain (élevages et entreprises de sélection) sont un frein majeur à la sélection des ruminants sur le caractère « méthane ». En revanche, dans les Unités Expérimentales des organismes de Recherche, des outils assez fiables sont maintenant disponibles (CR, GF, etc.).

Ainsi, malgré un budget initial à engager conséquent, mesurer dès maintenant un nombre suffisant d'individus pour calculer des valeurs génomiques assez précises serait bénéfique sur le long terme. En effet, sur le terrain, de nombreux taureaux reproducteurs sont déjà génotypés en routine dans le but de calculer leur index sur d'autres caractères. L'estimation d'index génomiques sur le caractère « méthane » ne représentera donc quasiment aucun frais supplémentaires.

Une question clé est : pour chaque race allaitante, quelle doit être la taille de la population de référence ? Autrement dit, combien d'animaux doivent être mesurés sur leurs émissions en CH<sub>4</sub>, et génotypés dans le même temps avec un large panel de marqueurs ? Cela dépend à la fois de la précision souhaitée de l'index génomique, de la taille efficace de la population (c'est-à-dire de la diversité génétique au sein de la race considérée), de l'héritabilité du caractère et de la fiabilité du phénotypage (donc de l'appareil de mesure des émissions).

A partir d'une méthode proposée par Hayes et al. (2009) pour estimer la précision de la GEBV (*Genomic Estimated Breeding Value*) selon la taille de la population de référence, la taille de la population efficace et l'héritabilité du caractère, Pickering et al. (2015b) présentent le graphique suivant (figure 32) :

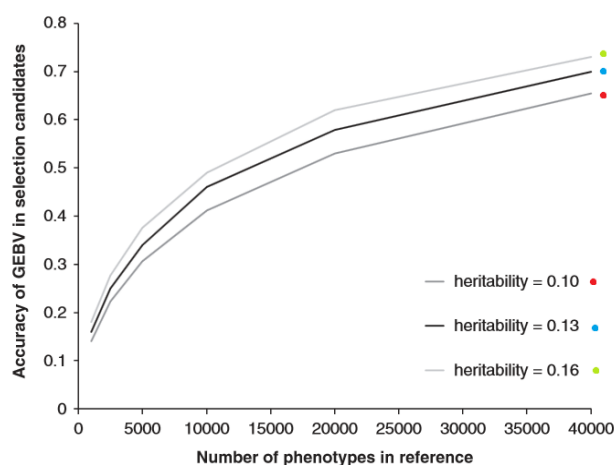


Figure 32 : Estimation de la précision des index génomiques en fonction de la taille de la population de référence et de l'héritabilité, pour une population efficace de 150 animaux, et un déséquilibre de liaison parfait entre les SNP et les QTL (Pickering et al., 2015b)

Pour une population de taille efficace voisine de 150, sans lien de parenté entre les individus, nous pouvons estimer d'après le graphique que, pour des caractères dont l'héritabilité serait proche de 0,2 (ce qui devrait être le cas du MY d'après les premières études), il faudrait une population de référence d'au moins 5 000 à 10 000 animaux afin d'établir des index génomiques modérément fiables (précision d'environ 0,5). Cependant, chez de nombreuses races allaitantes, la population efficace est supérieure à 150 (la race charolaise a la population efficace la plus élevée en France : environ 700). De plus, ce graphique suppose un déséquilibre de liaison parfait entre SNP et QTL, ce qui n'est malheureusement pas complètement possible, même avec les puces actuelles. Pour ces deux dernières raisons, la population de référence devrait encore être augmentée.

Actuellement, dans un pays comme la France, seuls quelques centaines d'individus ont été à la fois génotypés et phénotypés. A l'échelle mondiale, quelques milliers d'animaux ont été testés. Nous remarquons donc la nécessité de réaliser encore de nombreuses études afin d'augmenter le nombre d'animaux dans la population de référence, ainsi que le besoin d'un partage des données entre pays pour espérer un jour être en mesure d'utiliser la génomique sur des caractères comme la PMQ, le MY ou l'intensité de méthane.

#### ❖ Premiers résultats disponibles

Pickering et al. (2015a) étudient, sur environ 400 vaches laitières, la potentielle utilisation de la génomique pour le caractère PEM (Prédiction des Emissions de Méthane), utilisé comme paramètre « proxy » des vraies émissions de méthane. La valeur génétique de cette PEM est calculée à partir de la ration (niveau d'ingestion, quantités ingérées et valeurs énergétiques des aliments), et ajustée par quelques mesures à l'aide d'un détecteur LMD. Avec une puce de 54 001 SNP, certaines régions du génome ont été identifiées comme assez fortement associées aux variations de la PEM. Un SNP en particulier, situé sur le chromosome 7, à proximité d'une dizaine de QTL déjà recensés dans la littérature pour d'autres caractères (épaisseur de gras, etc.), semble avoir un effet plus marqué que les autres. Il n'a cependant pas atteint le seuil de significativité approximé par la correction de Bonferroni (seuil =  $\alpha / n\text{SNP}$ , avec  $\alpha = 0,05$  (soit le risque généralement accepté dans les études scientifiques), et  $n\text{SNP}$  = le nombre de SNP analysés dans cette publication).

En théorie, avec l'utilisation d'une formule proposée par Goddard (2008) cité par Pickering et al. (2015a), la précision de l'index génomique sur le caractère PEM devrait être comprise entre 0,08 et 0,15 selon le stade de lactation. Dans cette étude, elle est comprise entre 0,26 et 0,30 (ce qui est proche de la précision d'un index génétique obtenu par mesures des

performances de l'individu). Des limites quant aux résultats de cette publication sont cependant à signaler :

- La PEM dépend de l'alimentation, et n'est pas adaptable pour tous les régimes.
- Ce caractère s'appuie sur l'hypothèse que les émissions de méthane par unité d'énergie brute ingérée sont indépendantes de la variabilité entre les animaux à fermenter leur nourriture.
- Des bovins laitiers ont été utilisés, mais il n'est pas prouvé que l'on puisse exploiter ces résultats chez les races allaitantes.
- Le SNP du chromosome 7 décrit précédemment n'a pas été identifié lors d'une étude de Haas et al. (2011), qui décrivent une association de la PEM avec d'autres SNP.
- Le seuil approximé par la correction de Bonferroni n'est atteint par aucun SNP.
- Les animaux de la population de validation permettant d'estimer la précision des index génomiques ont des liens familiaux avec l'échantillon évalué.

Une étude encore plus récente d'Hayes et al. (2016), sur près de 1 000 jeunes bovins Angus phénotypés pendant 48h en chambre respiratoire et génotypés pour la grande majorité avec une puce de 777 000 SNP, a abouti à une précision des index génomiques de 0,35 +/- 0,06 sur le caractère PMQ et de 0,29 +/- 0,06 sur le caractère MY. Dans cette publication, aucun SNP n'a été identifié comme ayant une forte probabilité d'avoir un effet beaucoup plus marqué que les autres sur les émissions de méthane (la probabilité la plus élevée est de 8% pour un SNP situé sur le chromosome 12 et ayant un impact sur la PMQ), ce qui suggère que ce caractère dépend d'un grand nombre de gènes différents chez la race Angus.

Finalement, ces résultats sont plutôt encourageants. En effet, Hayes et al. (2016) estiment qu'une réduction de 4% du MY en 10 ans serait déjà envisageable en race Angus grâce à la génomique, avec une intensité de sélection de 1,5 et un intervalle de génération de 3,5 ans. Cependant, des recherches supplémentaires sont indispensables pour espérer pouvoir un jour intégrer le caractère « méthane » aux programmes de sélection génomique.

#### ❖ Perspectives d'avenir

Bien sûr, le premier objectif serait d'être en mesure d'estimer des valeurs génomiques (GEBVs) sur le caractère « méthane », que ce soit sur la PMQ, le MY ou l'intensité de méthane. Nous pourrions en particulier envisager d'associer une évaluation génomique du MY à une estimation de l'index sur le caractère « RFI », afin de réduire plus efficacement les émissions



de méthane sans avoir à mesurer tous les reproducteurs (en CR, au GF, etc.). Malgré une faible précision initiale, les GEBVs devraient devenir de plus en plus utiles.

S'il est trop long et trop coûteux d'établir une population de référence pour le caractère « méthane », et si nous parvenons à déterminer un paramètre « proxy » dont la corrélation avec les émissions de ce GES est très significative, nous pourrions également songer à utiliser la génomique sur ce paramètre « proxy » (potentiellement plus rapidement et plus facilement mesurable), dans le but d'identifier indirectement les animaux faiblement émetteurs de méthane.

Puisqu'avoir une population de référence de taille suffisante au sein d'une même race devrait demander encore du temps, une idée pourrait être la mutualisation entre races des populations de référence, et le développement d'une évaluation génomique multiraciale afin d'étendre la sélection génomique à toutes les races allaitantes et laitières, y compris celles à faibles effectifs. De là est né, par exemple, le projet GEMBAL (GÉnomique Multiraciale des Bovins Allaitants et Laitiers), dirigé par Florence Phocas à l'INRA. L'hypothèse forte sous-jacente à une évaluation génomique multiraciale est que de nombreux QTL et marqueurs se répartissent de la même manière dans plusieurs races bovines, en ayant un effet commun sur les performances à améliorer. Cependant, les premiers résultats concernant une mutualisation entre races sont plutôt décevants (sans doute à cause de déséquilibres de liaisons variables). Le séquençage complet, qui éviterait de localiser indirectement les QTL avec des marqueurs, pourrait être un outil efficace à l'avenir pour la sélection multiraciale (Hayes et al., 2013).

Dans tous les cas, des efforts internationaux et un partage des données (si possible avec standardisation des protocoles) devront être entrepris pour espérer aboutir à des GEBV précis, et d'autres caractères d'importance (comme ceux relatifs à la productivité) seront évidemment toujours à prendre en compte dans les stratégies de sélection.

c) Bilan sur l'utilisation du caractère « méthane » pour la mitigation des émissions entériques de méthane

A l'heure actuelle, la génétique semble être un levier d'action prometteur pour réduire les émissions de méthane sans altérer la viabilité économique des élevages. Selon Pickering et al. (2015b), une sélection des animaux aux plus faibles MY pourrait permettre, sur le très long terme, de réduire de 25% les émissions de méthane par kilogramme de MSI. D'après ces mêmes auteurs, il serait même envisageable de réduire de 40 à 45% la PMQ par combinaison d'une sélection portant à la fois sur le MY et sur la RFI.

Cependant, des précautions par rapport à ce raisonnement doivent être prises :

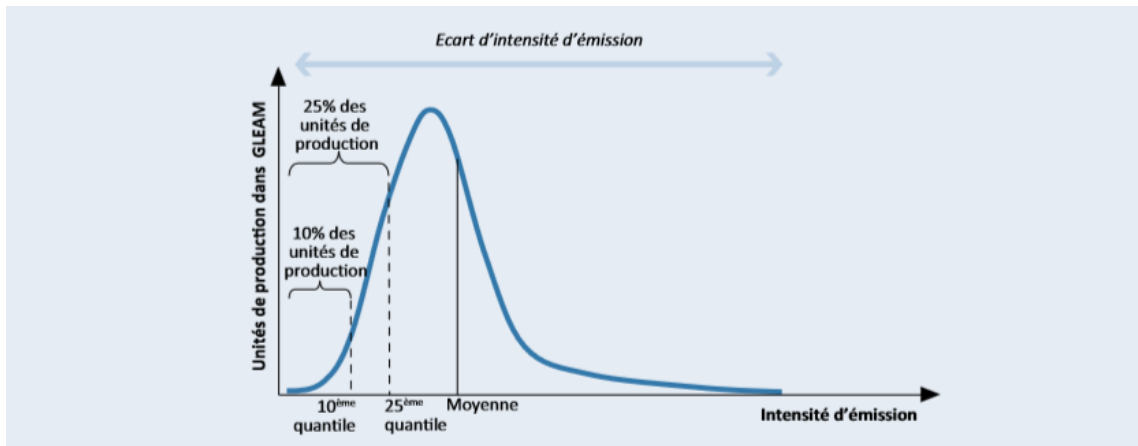
- De très nombreuses recherches sont encore nécessaires, en particulier pour trouver un moyen efficace d'évaluer les reproducteurs.
- Si les éleveurs augmentent beaucoup leurs niveaux de production, les PMQ (par animal ou par exploitation), ainsi que les émissions à l'échelle internationale, pourraient ne pas diminuer comme espéré.
- Seuls certains pays ont un cheptel suffisamment bien organisé pour maîtriser une sélection génétique très efficace.
- Les corrélations entre émissions de méthane et caractères d'importance pour la productivité n'ont pas encore été étudiées pour chacun d'entre eux (Pickering et al., 2013). Une étude récente (Herd et al., 2014), à partir de résultats sur 777 taurillons et génisses de race Angus, interroge à la fois sur le bien-fondé d'une sélection sur la PMQ (qui serait associée, selon cette publication, à une baisse de la vitesse de production et de la qualité de la carcasse), et sur l'efficacité d'une sélection sur le MY (qui revient à sélectionner sur le ratio entre deux caractères (la PMQ et la MSI), ce qui est plus difficile (Gunsett (1984) cité par Herd et al. (2014)). Herd et al. (2014) et Donoghue et al. (2016) estiment que le plus efficace serait de sélectionner les animaux à partir d'une valeur de PMQ résiduelle, obtenue par différence entre le méthane effectivement émis et celui qui « aurait dû être émis » avec ce régime et ce niveau d'alimentation. Pour estimer la valeur réellement émise, des outils de mesures sont utilisés (CR, GF, etc.), et pour calculer la valeur qui « aurait dû être émise », des modèles peuvent être utilisés, ou préférentiellement une régression des émissions sur la MSI (les modèles n'étant pas adaptés à tous les régimes). Ces valeurs résiduelles présentent les avantages d'être très fortement corrélées au MY, d'être fortement corrélées à la PMQ, d'être faiblement corrélées aux caractères de vitesse de croissance et de composition de la carcasse (comme le MY, et contrairement à la PMQ), et de ne demander une sélection que sur un seul caractère (comme la PMQ, et contrairement au MY). De plus, les héritabilités calculées sont correctes (comprises entre 0,19 et 0,29 selon Herd et al. (2014) et Donoghue et al. (2016)), et la précision des index génomiques est de 0,35 +/- 0,06 (Hayes et al., 2016).
- Les éleveurs ne vont pas concentrer toute leur sélection sur les émissions de méthane. L'effort génétique consenti sur ce critère « méthane » conduira

donc à un ralentissement du progrès génétique sur les autres caractères, et inversement (dilution de l'effort de sélection). Un index incluant tous les caractères reliés à la production, aux fonctionnels et à l'écologie devrait donc ralentir l'amélioration de chacun (même si la réponse globale correspondra aux objectifs d'élevage dans leur globalité).

Pour conclure, inclure le caractère « méthane » dans les programmes de sélection pourrait avoir un apport économique, écologique et social. Il devrait être un moyen de lutte efficace sur le long terme (une fois les bons allèles fixés dans la population, nous les retrouverons dans les générations suivantes), en particulier pour les animaux au pâturage, pour lesquels l'alimentation est plus difficile à maîtriser. En revanche, beaucoup de temps et de frais doivent encore être engagés dans la recherche (avec un partage des données et une standardisation des protocoles), seuls quelques pays auront accès à ce levier d'action, et, sans incitation de l'Etat, l'utilisation de certains critères de sélection sera dépendante de la volonté des éleveurs.

#### 4) *Adaptation des leviers d'actions aux situations locales et au contexte international*

D'un point de vue purement statistique, à production mondiale de viande constante et, en prenant en compte tous les GES, si chaque exploitation était optimisée pour arriver au niveau des 10% les meilleures (celles ayant les plus faibles intensités d'émission dans chaque système actuellement), le potentiel de réduction des émissions attribuables au secteur de la production de viande bovine serait de 27% (Gerber et al., 2013 ; Figure 33). Il existe en effet de gros écarts entre intensités d'émissions dans un même système de production (par exemple en système herbager). Cependant, cette analyse statistique a bien sûr des limites (contexte politique, accès aux technologies, etc.).



Remarque : « unités de production dans GLEAM » signifie « nombre d'exploitations correspondant à une intensité d'émission donnée, estimée avec le modèle GLEAM (soit le modèle mondial d'évaluation de l'élevage et de l'environnement, utilisé dans cette publication) ».

Figure 33 : Représentation schématique de la distribution des intensités d'émission et de l'écart des intensités d'émission pour un produit donné, à l'intérieur d'une région, une zone climatique et un système de production (Gerber et al., 2013) ©FAO

En réalité, toute la complexité de la lutte contre le réchauffement climatique réside dans le fait qu'il est essentiel de proposer des solutions adaptées localement, pour des enjeux qui s'étendent à l'échelle planétaire et qui nécessitent une coordination mondiale des politiques. En effet, alors que la quantité de produits issus de l'élevage et s'exportant à l'international est devenue considérable, bien que l'économie d'un pays soit souvent dépendante de celle d'une multitude d'autres Etats, et malgré un réchauffement climatique dont les conséquences devraient concerner l'ensemble de la planète, les effets positifs et négatifs de la mise en place d'un levier d'action vont se répercuter au niveau local. La viabilité économique des élevages de la région et la sécurité alimentaire de la population pourraient être influencées positivement ou négativement par chacun des moyens mis en œuvre pour réduire les émissions entériques de méthane. De plus, comme l'expliquent Herrero et al. (2016), toute action ayant pour effet de diminuer la production de façon marquée dans une région donnée, ou d'entraîner une trop forte hausse des prix, pourrait engendrer une augmentation des importations en provenance d'un pays n'ayant pas opté pour cette même action, à l'origine d'une quantité significative de GES émise pendant le transport et qui viendrait s'ajouter à toutes les autres émissions.

Ainsi, afin d'être efficace dans la lutte contre les GES dus à l'élevage, il apparaît indispensable d'adapter les solutions proposées à la situation spécifique du lieu où celles-ci vont s'appliquer, tout en s'intégrant dans un contexte international qui se doit de reposer sur une implication, une coopération et une coordination des politiques de tous les pays. Pour chaque région, il est nécessaire de prendre en compte la capacité technique des producteurs, les infrastructures, l'économie du pays (voire de la région), les conditions climatiques locales, les échanges internationaux, l'équité, la politique, la société, le bien-être animal, le rôle des

conseillers agricoles et des institutions, la proportion de population vivant de l'élevage, l'accès à la nourriture de la population, etc. Il faudrait également, dans l'idéal, avoir une connaissance aussi précise que possible des coûts et bénéfices découlant de chaque levier d'action envisageable, et de leurs effets secondaires sur l'environnement (positifs ou négatifs, comme par exemple la pollution de l'eau, ou encore l'émission d'un autre GES à la place du méthane...).

Enfin, dans le but d'identifier les priorités d'action concernant les émissions entériques de méthane et les émissions de GES par l'élevage en général, il est essentiel de déterminer quels sont les pays produisant une grande quantité de viande bovine, et quels sont les territoires présentant une intensité d'émission élevée. Nous pouvons alors classer les régions en quatre catégories, puis déterminer, sans modifier la quantité de production, quel est le potentiel de réduction des émissions entériques de méthane (tableau 10) :

Tableau 10 : Catégorisation des régions selon le niveau de production et l'intensité d'émission de méthane entérique (Inspiré de l'étude de Gerber et al. (2013), qui s'applique à tous les élevages et pour tous les GES)

Niveau de production	Emissions par unité de production	Production, optimisation du système pour la réduction des émissions de méthane	Potentiel de réduction
Elevé	Fortes	Très productrices Systèmes non optimisés	<b>Très élevé</b> , les fortes réductions par unité de production vont être renforcées par l'important volume de production.
Elevé	Faibles	Très productrices Systèmes optimisés	<b>Elevé</b> , les faibles réductions par unité de production vont être compensées par l'important volume de production.
Faible	Fortes	Peu productrices Systèmes non optimisés	<b>Elevé</b> , les fortes réductions par unité de production vont s'appliquer à de petits volumes de production.
Faible	Faibles	Peu productrices Systèmes optimisés	<b>Modéré</b> , les faibles réductions par unité de production vont s'appliquer à de petits volumes de production.

Les enjeux et les objectifs ne vont donc pas être les mêmes selon la région. Les catégories vont permettre d'identifier les zones dans lesquelles il est le plus urgent d'apporter des solutions (potentiels de réduction élevées ou très élevées), et le contexte local va nous orienter sur la nature des solutions à apporter. Plusieurs étapes sont essentielles afin d'utiliser des techniques adaptées à un territoire donné :

- Analyser l'activité de la région, son impact environnemental (80% du méthane entérique émis pour la production de viande bovine provient des pays en développement, contre 20% par les pays développés, selon un calcul effectué à partir d'une étude de Gerber et al. (2013)), son climat, ses attentes sociétales...
- Rechercher des moyens de mitigation des émissions entériques de méthane.
- Sensibiliser les gouvernements, les acteurs du secteur de l'élevage et les consommateurs à la nécessité de diminuer les émissions de méthane. Cela passe par la communication sur l'impact de l'élevage sur le réchauffement climatique, et par l'intégration du méthane dans la taxe carbone, les marchés de carbone, les Mécanismes de Développement Propre, les marchés volontaires du carbone, les Mesures d'Atténuations Adaptées au contexte National (MAAN)... L'élevage est encore peu inclus dans toutes ces mesures politiques.
- Partager la connaissance des technologies et pratiques efficaces et déjà disponibles. Dans ce but, des visites d'exploitations par des conseillers agricoles et techniciens, l'utilisation de fermes de démonstration ou encore des formations sur le terrain peuvent être envisagées.
- Développer des méthodes pour rendre le coût de ces pratiques plus abordable dans le pays considéré.
- Enfin, pour contourner l'éventuelle aversion au changement des producteurs et afin de les aider à prendre en charge des investissements initiaux probablement assez lourds, les incitations financières sont des compléments d'action importants. Une alliance entre le domaine privé (par exemple l'Association des éleveurs de bétail des Etats-Unis) et public (la Banque mondiale, le Fonds vert, les banques nationales de développement...) est préférable. Il serait aussi souhaitable de mettre au point des instruments financiers attirant davantage le secteur privé.

En raisonnant à partir d'un travail de Gerber et al. (2013) (qui s'intéresse à tous les GES issus de l'élevage), et en appliquant cela spécifiquement aux émissions entériques de méthane, diverses régions du monde peuvent être étudiées à titre d'exemple :

- Afrique de l'Ouest : faible quantité de production, et forte intensité d'émission. 40 à 78% des revenus des habitants ruraux sont issus de l'agriculture. Il faut également prendre en compte le fait que dans certains systèmes traditionnels, les bovins jouent des rôles annexes à la production (fumier, force de traction, épargne...). Se concentrer seulement sur ce qui améliore l'efficacité pourrait réduire les troupeaux et donc conduire à une baisse des services annexes, à moins

de les remplacer par les engrais artificiels, la mécanisation... La priorité est donc d'améliorer la productivité, tout en assurant l'activité des éleveurs, la viabilité économique des exploitations, et la sécurité alimentaire localement (qualité des fourrages, techniques d'élevage, diminution du stress avec un accès à l'eau et à l'ombre, santé...). Les conduites d'élevage majoritairement pratiquées dans ces régions (système pastoral traditionnel avec transhumance, etc.) limitent fortement les possibilités d'utilisation de biotechnologies, d'additifs alimentaires, ou encore de la sélection génétique.

- Amérique du Sud : forte quantité de production, et assez forte intensité d'émission. La présence de climats variables (aride, tempéré, humide) impose des solutions adaptées à chaque endroit. Les animaux ont une croissance inférieure à la moyenne mondiale, une maturité tardive et une fertilité diminuée. Par contre, il n'y a pas de problème de mortalité, ni de qualité de la ration. Ainsi, en ce qui concerne le méthane, la priorité est d'améliorer les soins, de diminuer le stress (déshydratation, chaleur...), et d'optimiser la reproduction et la croissance (génétique, suivis de reproduction...).
- Pays d'Amérique du Nord, d'Europe et d'Océanie : fortes quantités de production, et assez faibles intensités d'émissions. Le potentiel de réduction des émissions de méthane par unité de production est donc modéré, mais il va s'appliquer à une telle quantité de production que l'effet à l'échelle mondiale peut devenir significatif. La productivité par animal est élevée, et le cheptel bovin allaitant est bien organisé. L'ajout de lipides à la ration, l'utilisation de vaccins ou encore la sélection génétique sont des solutions envisageables à l'avenir. Le recours aux additifs alimentaires dépendra de leur efficacité, de leur sécurité et de leur acceptabilité par le consommateur.

En définitive, bien que l'objectif soit toujours d'améliorer la productivité tout en diminuant l'intensité d'émission de méthane, les moyens à employer pour réaliser cela sont variables.

##### 5) Bilan général sur la place de la génétique animale parmi les solutions envisagées pour la mitigation des émissions entériques de méthane par les bovins allaitants

Comme nous venons de le décrire dans ce sous-chapitre « III. Solutions pour la mitigation », chaque région du monde a ses caractéristiques, et chaque levier d'action se doit d'être adaptable à celles-ci pour être envisagé. A partir de nos connaissances sur la génétique

animale (sélection, voire croisements), nous allons donc détailler un peu plus précisément dans quelle mesure elle pourrait être utilisée selon le territoire considéré.

En plus des objectifs de production et de reproduction, une sélection portant sur la santé, sur l'adaptabilité aux conditions environnementales (choisir les races qui conviennent au milieu, et sélectionner les meilleurs individus au sein de ces races), voire même directement sur les émissions de méthane, serait envisageable. Dans tous les cas, elle permettrait un progrès qui s'ancrerait sur le long terme, et qui serait possible pour les animaux élevés au pâturage. Cependant, les potentiels d'amélioration reposent sur l'intensité de sélection appliquée à chacun des caractères, qui va elle-même dépendre de la volonté de les optimiser, de la possibilité de mettre en place une sélection efficace (qualité des reproducteurs, précision de l'évaluation de leurs performances, etc.), et des corrélations entre ces différents caractères.

En Afrique, seules les races indigènes sont suffisamment résistantes dans leur milieu (chaleur, parasites, etc.), et certains caractères (cornes, couleur de robe, etc.) peuvent être culturellement importants pour les éleveurs locaux (Hristov et al., 2013b). L'organisation de la filière ne permet actuellement pas d'être très efficace pour la sélection génétique en général (pédigrées incomplets, rares mesures de performances, coût des analyses génétiques trop élevé, etc.), et l'intégration d'un caractère spécifique au méthane apparaît extrêmement prématurée. De plus, une forte consanguinité est observable dans les troupeaux. Ainsi, selon Berman (2011) cité par Hristov et al. (2013b), les meilleures solutions seraient de réaliser une sélection à petite échelle (en regroupant les animaux de plusieurs villages pour la reproduction), ou de réaliser des croisements entre races locales et races réputées très performantes. Ces méthodes permettraient d'accroître la productivité tout en s'assurant de conserver des animaux adaptés au milieu, à condition d'améliorer dans le même temps la qualité de l'alimentation (en évitant par exemple de placer beaucoup d'animaux sur une parcelle trop petite et de mauvaise qualité).

Dans des régions comme l'Amérique du Sud ou l'Asie, une amélioration des performances de production et de reproduction est souhaitable (à la fois pour augmenter la productivité et pour diminuer l'intensité d'émission de méthane), et la génétique pourrait contribuer à ce projet (rapidité d'engraissement, fertilité, adaptation aux conditions climatiques, etc.). En revanche, l'intégration d'un caractère « méthane » n'est pas une priorité par rapport à des projets d'amélioration de la gestion des troupeaux, d'optimisation de l'occupation des sols (en particulier en Amérique latine avec la déforestation), ou encore d'augmentation de la qualité de l'alimentation (Asie du Sud).

Dans les pays industrialisés à forte production de viande bovine, et qui ont une bonne maîtrise de la sélection génétique dans leur cheptel de bovins allaitants, l'intégration du



caractère « méthane » à l'index des reproducteurs est envisageable. Pendant longtemps, les caractères liés à la production étaient largement favorisés, aux dépens par exemple de la fertilité (Huang et al. (2010) cités par Hristov et al. (2013b)). Actuellement, davantage de considération est apportée à l'amélioration du potentiel génétique concernant la reproduction. Par exemple, la *Beef Improvement Federation* (BIF), dont l'objectif est de standardiser les programmes d'efficacité, de rentabilité, et de durabilité en bovin viande aux USA, accorde beaucoup d'importance à la production (qualité et quantité), et de plus en plus à la reproduction (fertilité, mortalité des veaux, etc.) et à la santé (dans une moindre mesure). En revanche, le caractère « méthane » n'est pas abordé (Cundiff et al., 2015). Cela peut en partie s'expliquer par la difficulté actuelle à fixer des méthodes et objectifs précis pour la mitigation des émissions entériques de méthane (Hegarty et McEwan, 2010), mais également par le faible prix du carbone appliqué aux émissions de méthane, en comparaison aux bénéfices apportés par une bonne productivité (qui est donc visée en priorité). Pourtant, réduire la PMQ et/ou le MY, tout en favorisant la croissance, la reproduction et la santé des animaux, est indispensable pour espérer relever les challenges écologiques et économiques des prochaines décennies. L'apport de nouvelles techniques génétiques, comme les IA, la génomique (encore mal maîtrisée en BA étant donnée la faible taille des populations de référence), le séquençage, la fertilisation *in vitro*, voire la connaissance des QTL influençant sensiblement la flore ruminale des bovins, devrait contribuer à diminuer les intervalles de génération et/ou les coûts de mesure, et ainsi accroître la capacité des pays industrialisés à améliorer conjointement et rapidement de nombreux caractères.

Les premières publications semblent pour l'instant démontrer que la sélection génétique sur le caractère « méthane », ou sur un caractère qui lui est associé, devrait modérément contribuer à la réduction de l'intensité des émissions entériques. Cette diminution, qui pourrait s'appliquer à un grand nombre d'animaux dans des pays fortement producteurs (comme la France), contribuerait sensiblement à la baisse des émissions mondiales de GES par l'élevage. La recherche ne dispose cependant pas encore de suffisamment de résultats pour intégrer le caractère « méthane » aux index des reproducteurs, et les chercheurs manquent encore de données sur l'utilisation de moyens de mesure du méthane efficaces et moins coûteux. Nous allons donc maintenant apporter de nouvelles informations, obtenues par des mesures au GreenFeed sur des bovins charolais, dans le cadre du projet INRA BVE3 (pour un élevage « Bovin-Viande Economiquement et Ecologiquement Efficace ») auquel j'ai participé.

## Partie II : Etude expérimentale

### Expérimentation de la possibilité de sélectionner les bovins charolais sur le caractère « méthane » à l'aide de mesures effectuées par des GreenFeed

#### I. Intérêts, objectifs et description de l'expérience

1) Sélectionner, à terme, des bovins français faiblement émetteurs de méthane

a) La France, 9<sup>ème</sup> producteur mondial de viande bovine

Parmi les pays fortement impliqués dans l'élevage bovin, nous retrouvons la France, dont voici quelques caractéristiques (INTERBEV (Web) et idele<sub>c</sub> (2014, Web)) :

- Environ 19 millions de têtes :
  - Plus de 50% d'allaitantes (1<sup>er</sup> cheptel européen en nombre de vaches allaitantes).
  - Hors veaux, environ 65% des bovins finis sont d'origine allaitante.
- Près d'1,3 million de tonnes équivalent carcasse produites par an (tous bovins, 1<sup>er</sup> producteur européen) :
  - Exportations = 20% de notre production de viande, et 1,3 million de bovins vivants (dont environ 1 million de brouillards).
  - Importations = 1,25 à 1,35 fois la quantité d'exportations de viande (majoritairement issue de bovin laitiers, étant donné le plébiscite du steak haché en France), 150 mille bovins vivants (dont 120 mille veaux).
- Consommation proche de 24kg/habitant/an en équivalent carcasse (dans les 3 premiers européens), soit 13kg/habitant/an de viande bovine distribuée :
  - 50% d'origine allaitante, 50% d'origine laitière.
  - 75% d'origine française, 22% d'origine européenne (hors France).

En résumé, la France joue un rôle majeur dans l'élevage et la consommation de bovins allaitants. Comme pour toute région pratiquant l'élevage de ruminants, des solutions de mitigation des émissions entériques de méthane vont résider dans l'alimentation (dont l'utilisation de lipides adaptés, Doreau et al. (2011a)), la gestion sanitaire, et l'optimisation de la production et de la reproduction. Mais, sachant que la France est un pays industrialisé, à faible intensité d'émission de méthane, à forte productivité, et au cheptel bien organisé, les leviers d'action à explorer encore à l'avenir vont concerner les biotechnologies (les vaccins sont une piste prometteuse selon Gerber et al. (2013)), l'utilisation d'additifs alimentaires, et la génétique. Un projet de la recherche agronomique française est donc de déterminer des moyens

d'identification des bovins faiblement émetteurs de méthane, afin de favoriser ensuite leur mise à la reproduction.

b) La Charolaise : première race allaitante française



Photographie 5 : 3 bovins de race charolaise (Martin, 2012)

Cette race allaitante (photographie 5) a été sélectionnée depuis le 19<sup>ème</sup> siècle pour la production de bœufs aptes à s'engraisser facilement. Elle se caractérise par un très fort potentiel de croissance (par exemple, d'après Martin (2012), pour faire passer des taurillons charolais à l'engraissement de 320 à 420kg, le GMQ visé se situe entre 1 430 g/j pour une ration à base d'ensilage de maïs et 1 620 g/j pour une ration à base de blé), un indice de consommation généralement très correct (environ 6 pour un jeune bovin d'un an nourri avec uniquement de la paille et du blé), une remarquable conformation et une faiblesse de ses dépôts de gras (environ 10% dans une carcasse de vache classée U3). D'après Dudouet (2010), les taureaux pèsent entre 1000 et 1400kg, les vaches adultes entre 700 et 900kg, les taurillons à 18 mois environ 700kg, et les génisses et bœufs de 24 à 36 mois entre 650 et 800kg. Le rendement de carcasse est lui aussi plutôt bon (autour de 58-60% pour un mâle abattu entre 12 et 24 mois). Globalement, sur chacun de ces paramètres de production, les bovins charolais sont bien positionnés par rapport aux principales autres races allaitantes françaises (Limousine, Blonde d'Aquitaine, Salers, Rouge des Prés, Aubrac).

Concernant les performances de reproduction, selon Dudouet (2010), cette race présente un pourcentage relativement élevé de naissances gémellaires (plus de 3%). Les difficultés de vêlage sont moins marquées depuis quelques années, mais encore présentes (9% de césarienne au premier vêlage, 4% sur l'ensemble des vêlages). Le taux de gestation, la production laitière

et l'intervalle vêlage-vêlage (383j) sont plutôt moyens. Enfin, l'âge au premier vêlage et le pourcentage de mortalité avant sevrage sont assez élevés (34,9 mois et 10,3%, respectivement, *idele<sub>b</sub>* (2013) (Web)).

Cette race s'adapte bien aux conditions de milieux variés, et les animaux sont généralement calmes. Elle peut être utilisée en croisement dans le but d'améliorer les performances productives des autres races.

Ses principales qualités en font une race de choix pour les éleveurs. Malgré une concentration assez marquée dans le Centre-Est, le Centre et les Pays de la Loire, nous retrouvons des troupeaux dans toutes les régions françaises (figure 34).

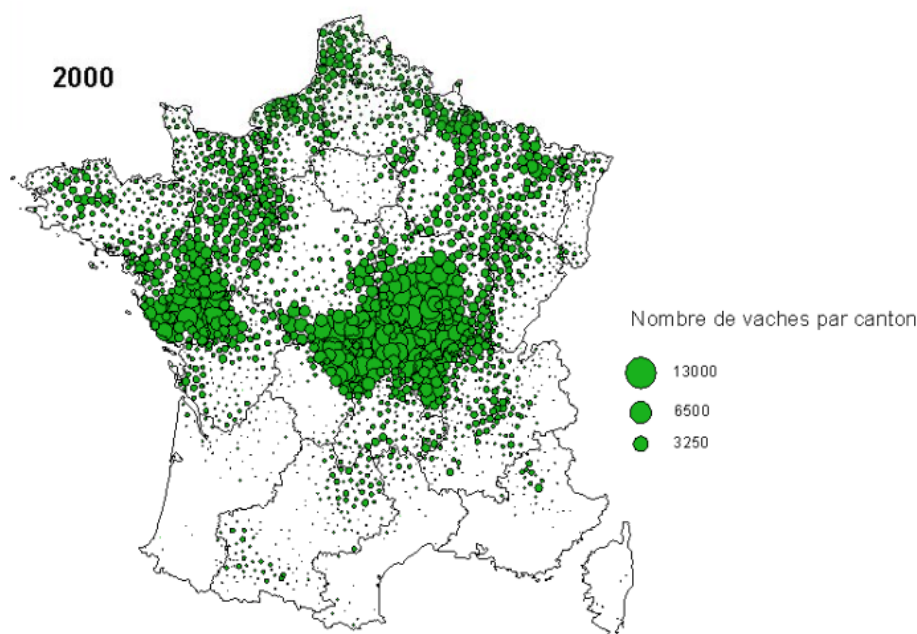


Figure 34 : Répartition des vaches charolaises en France, année 2000 (traitement et cartographie de D. Raboisson (Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse) à partir du recensement agricole 2000 (Service Central des Enquêtes et Etudes Statistiques (Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche)))

En 2008, 46% des vaches allaitantes françaises étaient des Charolaises, soit 1,7 fois plus que la seconde race du pays (Limousine). La race a même été diffusée depuis une vingtaine d'année dans une multitude d'autres territoires, sur tous les continents, et elle a servi à la création de races métisses avec le zébu (par exemple le Canchim au Brésil).

En définitive, afin de diminuer les émissions entériques de méthane par l'élevage bovin allaitant français, la race charolaise est une cible de choix. Ses performances de production sont excellentes, mais une réorientation de la sélection génétique visant à améliorer les paramètres de reproduction pourrait indirectement favoriser la réduction des émissions (en particulier avec des premiers vêlages plus précoces, ou encore avec un taux de mortalité des veaux plus bas, puisqu'une femelle qui ne produit pas de veau à engraisser fait augmenter la moyenne

d'intensité d'émission de méthane du cheptel). Surtout, l'intégration du caractère « méthane » dans les programmes de sélection devrait contribuer à une baisse significative des émissions par les troupeaux au niveau national, voire international. En effet, étant donné l'effectif important de bovins charolais en France (et dans le monde), et avec l'éventuelle possibilité d'utiliser dans les autres races les outils de sélection déterminés pour la race charolaise, ce levier d'action pourrait prendre une place significative parmi les moyens de mitigation des émissions entériques de méthane par les bovins.

Le premier objectif est de mesurer un maximum de bovins charolais, puis d'identifier lesquels sont les moins excréteurs, pour finalement comparer leur niveau d'émission à leur niveau de performance productive.

2) *Réduire les coûts de mesure et augmenter rapidement la quantité d'informations disponibles mondialement*

a) Le projet BVE3 : pour un élevage « Bovin-Viande Economiquement et Ecologiquement Efficace »

En 2006, dans l'UMR GABI (Unité Mixte de Recherche en Génétique Animale et Biologie Intégrative) de l'INRA, un groupe de chercheurs a établi un projet appelé « Précocité », dont le but est d'améliorer la sélection des bovins sur ce caractère. La nécessité de cette étude est apparue car, bien que la précocité soit un caractère assez héritable (0,3), les mesures des caractères liés à celle-ci sont difficilement réalisables et assez coûteuses. Peu d'éleveurs tenaient compte de ces estimations dans le choix de leurs reproducteurs, ce qui explique en partie l'âge au premier vêlage élevé dans la race charolaise.

Cependant, avec l'apparition de la génomique, et surtout avec le réchauffement climatique, une sélection sur la précocité et sur l'adaptabilité à des conditions de vie plus difficiles pourrait redevenir d'actualité.

En 2011, dans le but de compléter cette étude, Gilles Renand a proposé le projet BVE3, qui prend place au sein du projet « Précocité ». Les subventions versées par la région Centre (qui s'est engagée à réduire de 40% ses GES en 2020 par rapport à 1990) ont permis d'une part d'utiliser des animaux de l'Unité Expérimentale INRA de Bourges (photographie 6), et d'autre part d'acquérir trois GreenFeed, appareils de mesure des émissions de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> installés à Bourges et décrits précédemment. Le reste du financement est assuré par l'INRA Bourges et l'INRA GABI.



Photographie 6 : Elevage bovin de l'Unité Expérimentale de Bourges (Présentation PowerPoint de l'Unité Expérimentale de BOURGES effectuée par Frédéric Bouvier et Jean-Claude Thouly)

Les partenaires collaborant à la mise en œuvre de ce projet initialement programmé pour 3 ans sont l'UMR GABI, l'Unité Expérimentale de Bourges, l'UMR BIOEPAR d'Oniris Nantes, l'entreprise Créavia-GENOE de Joué-lès-Tours, et la Chambre d'Agriculture du Centre-Val de Loire (ADEFAC). Dans l'unité GABI, les participants à l'étude sont Gilles Renand (directeur de recherche) et Aurélie Vinet (ingénieure).

Le projet BVE3 peut se décomposer en six tâches :

1. La procréation et l'élevage des animaux expérimentaux (génisses et taurillons charolais).
2. Le phénotypage de l'efficacité économique (poids, croissance, ingestion, consommation résiduelle et précocité).
3. Celui de l'efficacité environnementale (mesures du CH<sub>4</sub> et du CO<sub>2</sub> émis).
4. Le génotypage de tous les animaux expérimentaux.
5. La recherche des liens entre efficacité économique et émissions de méthane.
6. L'analyse génétique des performances afin d'identifier des marqueurs précis pour la détection de QTLs, la détermination des valeurs génétiques et celle de l'héritabilité.

En ce qui me concerne, au Centre de Recherche INRA de Jouy-en-Josas, j'ai participé à l'étude des phénotypes de poids, de croissance, d'ingestion, de consommation résiduelle et d'émissions de méthane à partir des données envoyées par Bourges (une partie des tâches 2 et 3), puis j'ai analysé leurs relations (une partie de la tâche 5). En complément, j'ai étudié le lien

entre les émissions individuelles de méthane et le temps de rumination quotidien, la capacité à digérer la Matière Organique (MO), et « l'épaisseur de gras ». Ce sont tous ces résultats, obtenus au cours de l'été 2013 sur 35 taurillons, puis de l'hiver 2015 sur 119 génisses, qui vont être présentés ci-après.

Bien que le projet ne soit pas encore terminé, il devrait d'ici quelques temps apporter des informations utiles à différents niveaux :

- Régionalement : il fournira des références aux éleveurs bovins de la région Centre, et aidera à répondre aux objectifs de diminution des émissions de GES.
- Nationalement : il offrira des outils pour la sélection des reproducteurs, et va s'ancrer dans les objectifs en faveur d'une agriculture durable.
- Mondialement : le climat et l'optimisation de l'utilisation de l'énergie ingérée par les bovins sont des enjeux internationaux. Les données récoltées seront mises en relation avec celles d'autres pays.

b) Apport de nouvelles données dans le cadre d'un programme international

Une des principales initiatives de la recherche internationale est l'Alliance Mondiale de Recherche (ou *Global Research Alliance* = GRA) sur les GES d'origine agricole. Créée en 2009, elle compte maintenant plus de 30 pays membres soucieux, notamment, de réduire leurs émissions de méthane (Gerber et al., 2013). Des équipes multiculturelles et multidisciplinaires réfléchissent à la mise en place de leviers d'action innovants et pratiques. Les objectifs sont multiples : avancée de la recherche, vulgarisation et information du public, étude de situations agricoles concrètes, déductions fiscales pour les producteurs allant dans le bon sens...

L'Unité Expérimentale de Bourges, avec plusieurs centaines d'animaux mesurés au GreenFeed (appareil moins coûteux que les Chambres Respiratoires), servira de référence française pour les bovins charolais. Le projet BVE3 est donc fortement ancré dans les objectifs internationaux de réduction des émissions entériques de méthane, et la tâche 6 nécessitera une mise en commun des résultats avec de nombreuses autres études.

Rappelons qu'actuellement, beaucoup de recherches sont encore menées afin de déterminer quel appareil de mesure des émissions entériques de méthane serait le plus adapté, selon le type de production et le système d'élevage. Le but de ces études est de minimiser les coûts, tout en fournissant des informations nombreuses et fiables.

D'autres partenariats existent, comme l'Initiative Mondiale sur le Méthane (ou *Global Methane Initiative* = GMI). Mais dans le secteur de l'agriculture, son action se concentre prioritairement sur la digestion anaérobie des effluents d'élevage.

Dans ce contexte, nous allons maintenant décrire les outils utilisés dans notre étude, puis présenter les résultats obtenus.

## **II. Matériels et méthodes**

Cette expérience est menée sous l'autorisation du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, suite à l'évaluation du comité d'éthique et en accord avec les directives 86/609 puis 2010/63.

Toutes les mesures sont réalisées à Bourges, dans la station de contrôle individuel équipée de portillons Calan à ouverture électromagnétique, permettant ainsi de connaître les quantités d'aliment ingérées pour chaque animal par différence entre les quantités distribuées (enregistrées quotidiennement) et les refus (pesés trois fois par semaine). Chaque matin à 8h, une quantité déterminée d'aliment est distribuée individuellement à l'auge, puis, si et seulement si, lors d'un contrôle de refus, il est observé que l'animal a tout consommé, alors cette quantité est augmentée pour les jours suivants. Le but est de maintenir un régime à volonté, afin d'évaluer la consommation résiduelle. L'aliment à l'auge est de composition constante et de qualité bien maîtrisée. Pour les génisses, il s'agit d'un régime « de croissance » avec de l'ensilage d'herbe (Matière Azotée Totale (MAT) = 11% de la MS, Cellulose Brute (CB) = 30%, et la proportion de fibres insolubles dans les détergents neutres (*Neutral Detergent Fiber* = NDF) est de 55%), et pour les taurillons, d'un régime d'engraissement à partir de condensé riche en luzerne déshydratée, blé, pulpe de betterave et son de blé (MAT = 14%, CB = 16% et NDF = 37%). Le terme de « condensé » est utilisé ici car l'aliment est déshydraté et distribué sous forme de granulés, mais il n'est riche ni en protéines, ni en énergie (en comparaison, par exemple, aux grains de blé, de maïs et de soja).

### *1) Les bovins charolais utilisés*

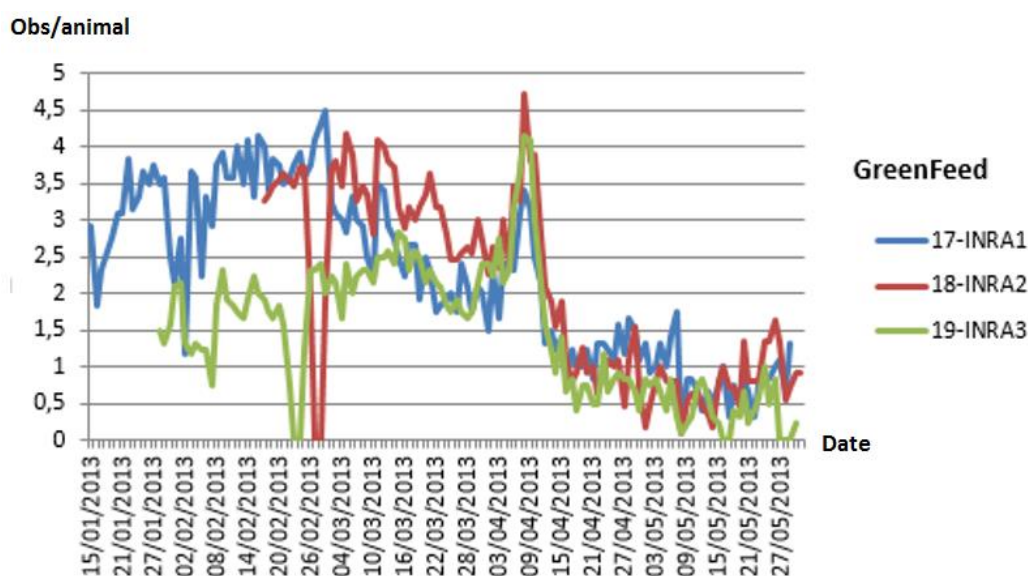
#### *a) Les taurillons*

Ceux-ci sont nés en mars-avril 2012, grâce à la participation de Créavia-GENOE (inséminations artificielles, transfert des embryons et synchronisation des receveuses). Les veaux ont été systématiquement contrôlés par pesées mensuelles, pour suivi de leur croissance, de la naissance jusqu'au sevrage à 33 semaines d'âge. Par la suite, 36 mâles ont été répartis en



3 lots (de 12 individus) ayant débuté l'engraissement avec un intervalle de deux semaines les uns avec les autres, selon que les veaux sont nés au début du mois de mars ou à la fin du mois d'avril. L'engraissement a ainsi débuté le 7 janvier 2013 pour le premier lot né début mars, le 21 pour le deuxième et le 4 février pour le dernier né en avril.

Les contrôles des émissions de méthane ont été effectués par l'Unité Expérimentale de Bourges du 15 janvier 2013 au 31 mai 2013, soit une semaine après l'arrivée des premiers animaux (cependant, les animaux se présentaient trop peu au GreenFeed (GF) lors des quinze premiers jours, cette quinzaine n'a donc pas été analysée). Dans le même temps, des mesures de poids et de quantités d'aliment ingérées ont été effectuées pour chaque animal afin d'évaluer leur efficacité économique (poids, croissance, ingestion, consommation résiduelle). Les taurillons ont fortement diminué leur nombre quotidien de visites au GF sur la fin de la période expérimentale (figure 35). Ainsi, les mesures prises en compte pour analyser la corrélation entre émissions de méthane et efficacité économique ont été celles allant du début de la deuxième quinzaine d'engraissement (ce qui équivaut à la deuxième période de mesures pour le lot, chaque période durant deux semaines) à la fin de la septième quinzaine, c'est-à-dire du 21/01/13 au 15/04/13 pour le premier lot, du 04/02/13 au 29/04/13 pour le deuxième, et du 18/02/13 au 13/05/13 pour le troisième. En revanche, un maximum de données étant souhaitable pour la recherche de la variabilité interindividuelle des émissions de méthane, nous avons conservé celles allant de la 2<sup>ème</sup> à la 9<sup>ème</sup> quinzaine pour cette partie de l'étude.



17-INRA1 = GreenFeed numéro 1 ; 18-INRA2 = GreenFeed numéro 2 ; 19-INRA3 = GreenFeed numéro 3.

Obs = nombre d'observations.

Durant le mois de février, les absences de mesures au GreenFeed 3 puis au GreenFeed 2 au cours de deux journées différentes sont liées à des dysfonctionnement temporaires des appareils.

Figure 35 : Baisse du nombre d'observations par jour et par animal en fin de période expérimentale

L'un des animaux ne s'étant quasiment jamais présenté pour les mesures, celui-ci a été écarté. Trente-cinq taurillons d'un peu moins d'un an à l'entrée ont donc apporté des données utilisables pendant près de 5 mois. Les conditions sont celles de jeunes bovins à l'engraissement. De la paille est utilisée pour la litière.

#### b) Les génisses

Sur le même principe, 130 génisses ont été mesurées à Bourges, après 3 à 4 semaines d'adaptation au GreenFeed. En fonction de leur date de naissance, celles-ci ont été réparties en 4 cohortes (2012 et 2013 A et B, selon que les individus sont nés pendant l'automne ou l'hiver 2012 ou 2013), au sein desquelles les mesures ont débuté au même moment. Dans chacune des cohortes, les animaux ont à nouveau été répartis en trois lots, en fonction de leur poids à l'arrivée.

Les émissions de méthane devaient être mesurées sur 12 semaines pour chacune des cohortes. Cependant, des incidents techniques étant survenus lors des quatre dernières semaines (distributeur de ration en panne pour la 2012B, silo mal tassé pour la 2013B), seules des mesures sur 8 semaines environ (53 jours) ont été retenues pour chaque cohorte.

Finalement, en retirant les 11 individus qui ne se sont pas assez présentés au GreenFeed, les valeurs d'émissions de 119 génisses âgées de presque 2 ans ont été analysées, du 30/09/2013 au 22/11/2013 pour la cohorte 2012A (19 animaux), du 10/02/2014 au 04/04/2014 pour la 2012B (33), du 22/09/14 au 12/11/14 pour la 2013A (32) et du 02/02/15 au 25/03/15 pour la 2013B (35). Les conditions mises en place visaient à mesurer des femelles pubères, mises à la reproduction suite à l'expérience et après leurs 24 mois, comme cela est généralement le cas en France (puberté vers 18 mois et premier vêlage proche des 3 ans). Des copeaux de bois ont été utilisés pour la litière.

Là encore, le poids et l'ingestion étaient connus sur toute la durée et pour chaque génisse.

### 2) *Les mesures*

#### a) Poids et ingestion

Que ce soit chez les taurillons ou chez les génisses, les pesées des animaux (en kg) ont eu lieu à l'entrée, puis tous les 15 jours environ.

Les quantités ingérées (en kg de MS/j) ont été obtenues pour chaque animal par :

- La connaissance des teneurs en MS de l'aliment distribué à l'auge et de celui disponible dans le GreenFeed.

- L'enregistrement des quantités distribuées au GreenFeed.
- La pesée quotidienne de l'aliment donné à l'auge.
- La pesée des refus de chaque individu le lundi (refus sur les rations du vendredi, du samedi et du dimanche), le mercredi (rations du lundi et du mardi) et le vendredi (rations du mercredi et du jeudi).

#### b) Les GreenFeed

Pour mesurer en temps réel le CH<sub>4</sub> émis par les bovins, un nouvel appareil, le GreenFeed (GF), a été utilisé. Il nous a été fourni en trois exemplaires par l'entreprise C-Lock Inc., Rapid City, South Dakota, USA. Les atouts et inconvénients de cet outil assez peu coûteux ont été décrits précédemment, et son emploi au cours de notre expérience a apporté de nouvelles informations sur son potentiel d'utilisation.

Le principe est la mesure d'un flux, l'air absorbé étant analysé uniquement si le bovin est assez proche, assez longtemps, dans des conditions optimales, et s'il a été reconnu grâce à sa boucle auriculaire. Des capteurs contrôlent la température et l'humidité ainsi que la position de la tête du bovin. Le fonctionnement est alors le suivant : un système délivre un aliment aux animaux à proximité de la prise de gaz, selon un protocole bien défini (le bovin se présente, il a accès à une tasse de 28g ou 38g toutes les 30 ou 45 secondes selon les cohortes, et ce pendant 4 minutes, puis il ne peut plus revenir pendant 4 à 6 heures). Ce protocole permet d'une part une présence au GF assez longue pendant chaque visite pour mesurer les émissions, ce qui est nécessaire puisque le méthane est émis de façon pulsatile car éructé (contrairement à un gaz respiratoire comme le CO<sub>2</sub>), d'autre part un temps passé suffisamment court pour laisser les autres animaux venir à leur tour, et enfin une quantité d'aliment ingérée à la machine assez faible pour qu'elle modifie peu la ration de l'individu. Quelques dysfonctionnements se sont produits, mais sans que cela ait eu d'impact sur la capacité du GF à mesurer les taurillons et les génisses.

L'aliment distribué au GF pour les taurillons est le même condensé que celui à l'auge. Pour les génisses, étant donné l'impossibilité de distribuer de l'ensilage au GF, ce condensé a également été utilisé, avec pour objectif d'influencer le moins possible la consommation résiduelle des animaux selon qu'ils se rendent fréquemment au GF ou non (ce qui explique le choix d'un aliment moins riche que les concentrés traditionnels).

Pendant que l'animal s'alimente, il y a capture et déplacement de l'air du mufler au capteur. La ventilation est fixée à 34L/seconde, et le volume du GreenFeed étant de 100L, l'air

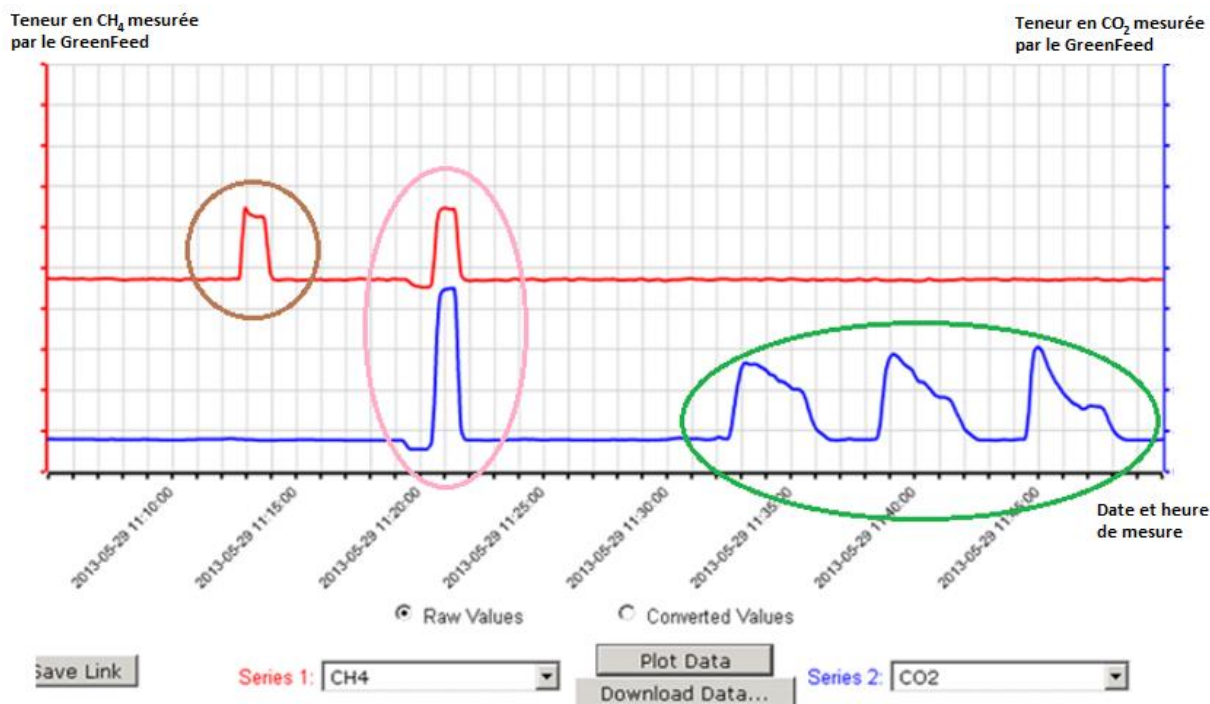
est entièrement renouvelé toutes les 3 secondes environ. Des filtres évitent la poussière, qui abîmerait l'appareil et créerait un biais dans les mesures.

L'émission du CH<sub>4</sub> émis à chaque visite par le bovin est donc estimée à l'aide de mesures ponctuelles, avec l'équation fondamentale suivante :

$$CH4_{débit} = Fc * C_R * \sum_t (\Delta t * (CH4_{mes} - CH4_{amb}) * Q_{air})$$

CH<sub>4</sub><sub>débit</sub> est ramené en g/j à chaque mesure, Fc est un facteur dimensionnel, C<sub>R</sub> est le taux de récupération en %, t la durée de visite par l'animal (en secondes), Δt la période de mesure (=1s), CH<sub>4</sub><sub>mes</sub> la teneur en CH<sub>4</sub> mesurée par le capteur lors de la visite de l'animal, CH<sub>4</sub><sub>amb</sub> la teneur en CH<sub>4</sub> dans l'air ambiant et Q<sub>air</sub> le débit de l'air passant dans la pompe jusqu'au capteur de mesure de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>.

Chacune des composantes de la formule est contrôlée. Le Δt et le Fc sont des constantes, donc fixées. Un capteur de flux mesure la vitesse de l'air. Enfin, des étalonnages sont nécessaires (figure 36). Pour ce faire, il existe des systèmes de contrôle visant à quantifier l'air capturé et l'efficacité du capteur. En plus du CH<sub>4</sub>, un autre gaz, qui n'a pas été utilisé pour cette étude, est évalué : le CO<sub>2</sub>. Le C<sub>R</sub> est alors estimé par le test de récupération, c'est-à-dire en libérant une quantité de CO<sub>2</sub> connue dans l'auge au niveau de la zone de prélèvement des gaz éructés, et la quantité mesurée permet alors, en calculant sa proportionnalité par rapport à la valeur libérée, de connaître le pourcentage capté par la machine. La calibration, quant à elle, consiste notamment en la libération d'azote pur directement au niveau du capteur pour obtenir la ligne de base « CH<sub>4</sub><sub>mes</sub> = 0 », puis en la libération au même endroit d'un mélange avec des concentrations connues de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>, permettant un étalonnage précis.



Nous pouvons remarquer les lignes représentant les teneurs de l'air ambiant en CO<sub>2</sub> (bleu) et en CH<sub>4</sub> (rouge), lorsqu'aucun bovin ne se présente à la machine.

La première observation (cercle marron) est consécutive à un test de calibration au propane, qui est libéré directement au niveau du capteur « CH<sub>4</sub> » et qui permet de vérifier que celui-ci fonctionne correctement.

Les deux suivantes (rose) correspondent à un autre test de calibration. De l'azote pur, puis un mélange connu de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub>, sont successivement libérés directement au niveau du capteur. L'azote permet de faire décroître les deux courbes aux lignes de bases CH<sub>4</sub>mesuré = 0 et CO<sub>2</sub>mesuré = 0. Puis le mélange en proportions connues de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub> libérés permet d'étalonner les valeurs qui seront mesurées.

Les dernières (vert) font suite à un test de récupération. Du CO<sub>2</sub> est libéré en quantité connue au niveau de la zone de récupération du flux d'air, et la valeur mesurée par la machine permet de connaître quelle proportion du gaz a été transférée jusqu'au capteur, reproduisant ce qu'il se passe à partir du mufle des bovins.

Figure 36 : Les tests de calibration et de récupération (Interface développée par C-Lock pour les utilisateurs des GreenFeed)

Dans ce système, les mesures sont réalisées à court terme. Par rapport à une chambre respiratoire dans laquelle la totalité du CH<sub>4</sub> émis pendant la journée est prise en compte, il existe donc une erreur d'estimation des émissions quotidiennes du fait de l'échantillonnage des visites. Celle-ci peut être atténuée en calculant pour chaque animal une moyenne d'émissions à partir de multiples valeurs quotidiennes, récoltées pendant plusieurs mois. Une valeur seule ne peut donc pas être représentative de l'émission quotidienne de l'animal, mais en multipliant les mesures chaque jour et sur de longues périodes, l'ensemble des valeurs devient représentatif.

c) Mesures complémentaires : temps de rumination, capacité à digérer la MO et « épaisseur de gras »

Ces mesures complémentaires ont été réalisées dans le but d'évaluer leur possible lien avec les émissions de méthane, pour éventuellement les utiliser en tant que « proxy » à l'avenir,

ce qui contribuerait à diminuer les coûts d'évaluation des émissions entériques individuelles. Seules certaines génisses ont été évaluées. Les temps de rumination, la capacité à digérer la MO, et « l'épaisseur de gras » ont été respectivement mesurés sur 99 (ceux avec des valeurs disponibles sur au moins 51 jours), 100 (absence de donnée pour la cohorte 2012A) et 118 animaux (un animal non évalué).

Les données utiles ont été acquises par l'analyse d'autres chercheurs de l'équipe, voire d'un autre groupe de recherche. Ainsi, seule une description sommaire des moyens d'obtention de ces informations va être réalisée ici :

- Les temps de ruminations ont été obtenus à l'aide des Ruminacts (photographie 7), fournis par Créavia (colliers équipés d'un microphone positionné au contact du cou, enregistrant les bruits de rumination 24h/24, et dont l'aptitude à effectuer ce type de mesure a été prouvée par Lindgren (2009)). Le coût total du dispositif pour un troupeau est de 9 000 euros environ, selon le nombre de colliers nécessaires.



Photographie 7 : Un taurillon charolais équipé d'un collier Ruminact (Collection personnelle)

- Les capacités individuelles à digérer la MO ont été prédites par Virginie Decruyenaere, du Centre Wallon de Recherches Agronomiques, à partir de spectres dans le proche infrarouge révélant la composition des selles (teneur en fibres, etc.), et en tenant compte de celle de l'aliment. Les échantillons ont été récoltés lorsque les animaux étaient mesurés au GF depuis un peu plus d'un mois (1 échantillon), puis dix jours plus tard (1 échantillon).
- Les estimations « d'épaisseur de gras » ont été acquises au moyen des Notes d'Etat Corporel et des résultats de mesures échographiques effectuées à la fesse, aux lombaires et au niveau des côtes, sur chaque animal à l'âge de 22 mois.

### 3) Utilisation du logiciel SAS et exploitation des mesures

Tous les calculs et analyses statistiques ont été réalisés avec le logiciel SAS® (*Statistical Analysis System*, ou Système d'Analyses Statistiques, SAS Inst. Inc., Cary, NC ; version 9.4).

#### a) Calculs des valeurs corrigées des paramètres d'efficacité économique et des paramètres « proxy »

Suite aux pesées effectuées à Bourges, les GMQ ont pu être obtenus par calcul de la pente de la droite de régression linéaire des poids sur l'âge des animaux. Concernant les génisses, nous avons inclus dans ce calcul les pesées réalisées jusque 5j avant et 7j après la période de mesures du méthane, afin d'augmenter la précision de cette estimation.

A partir de ce GMQ, le poids moyen de chaque animal a été estimé comme étant celui qu'aurait eu l'animal au milieu de la période de mesures, si sa croissance avait été constante sur toute la durée de l'expérience. Par exemple, pour des mesures effectuées sur 8 semaines :

$$\text{Poids moyen (en kg)} = P_{28j} = \text{Poids début de la période de mesures} + 28 * \text{GMQ}$$

Chez les génisses, l'aliment distribué au GF est différent de celui à l'auge. L'influence de la quantité de condensé ingérée sur les émissions de méthane sera donc étudiée (par recherche de la corrélation entre émissions de méthane et quantité de condensé ingérée à un même poids et une même masse sèche ingérée).

A partir des valeurs brutes mesurées, et pour tous les caractères (poids, croissance, ingestion, quantité de condensé, temps de rumination, capacité à digérer la MO et « épaisseur de gras »), les moyennes calculées par lots (et par cohortes) montrent des différences d'un groupe d'animaux à l'autre, ce qui pourrait s'expliquer en partie par l'allotement selon l'âge à l'entrée, ou encore par la conservation de l'aliment. Ainsi, pour les taurillons et pour les génisses, respectivement, les données ont été analysées à l'aide de la procédure « GLM » (*Generalized Linear Model* = Modèle Linéaire Généralisé) de SAS. Celle-ci permet de corriger les valeurs mesurées sur l'animal en fonction du lot (et de la cohorte). Le modèle linéaire suivant a été utilisé pour chacun des caractères mentionnés plus haut :

$$X_{ij} = \mu_X + \text{lot}_i + e_{ij}$$

Avec  $X_{ij}$  la valeur brute mesurée chez l'individu  $j$  contrôlé dans le lot  $i$ ,  $\mu_X$  la moyenne de la population,  $\text{lot}_i$  l'effet estimé du lot  $i$ , et  $e_{ij}$  la résiduelle.

Les valeurs corrigées ( $X_{corr_{ij}} = X_{ij} - lot_i = \mu_X + e_{ij}$ ) ont ainsi pu être exploitées pour calculer les moyennes individuelles sur chaque caractère.

#### b) Calcul des consommations résiduelles

Afin de calculer la consommation résiduelle (RFI), les quantités ingérées corrigées ont été analysées par régression sur le gain moyen quotidien et le poids métabolique moyen. Le principe est d'estimer la quantité de matière sèche que l'individu devrait ingérer, en fonction de son poids et de son GMQ, et la RFI (en kg) est égale à la différence entre la quantité réellement ingérée et celle qui est prédite par régression. Plus la RFI est basse, moins l'animal a mangé par rapport à son poids et sa croissance, et donc plus il est efficace pour digérer puis utiliser l'énergie disponible dans son aliment.

Ainsi, l'intérêt de calculer pour chaque animal la valeur de la consommation résiduelle est double : d'une part, la RFI permet d'identifier quels sont les animaux économes et, d'autre part, elle pourrait servir de paramètre « proxy » pour l'estimation des émissions de méthane si elle est fortement corrélée avec ces dernières. De plus, une corrélation positive significative entre RFI et émissions de méthane signifierait qu'un animal qui émet peu est également efficace pour digérer et utiliser l'énergie de l'aliment qui lui est distribué. Ce constat serait un moyen d'inciter les éleveurs à privilégier la mise à la reproduction des animaux à faibles émissions de méthane.

#### c) Calcul des moyennes d'émissions corrigées de méthane

Les données directement obtenues par les GreenFeed ont été traitées informatiquement aux Etats-Unis par l'entreprise ayant conçu ces machines, C-Lock Inc., et envoyées sous forme de valeurs brutes (mesures, à chaque visite, des concentrations dans le flux d'air exhalé) utilisables par notre équipe de recherche. Une analyse des résultats à partir du logiciel SAS a été effectuée, dans le but de connaître la variabilité interindividuelle concernant les émissions de méthane, et leurs relations avec la consommation résiduelle, les temps de rumination, les capacités à digérer la MO et « l'épaisseur de gras ».

Dans un premier temps, à partir de la distribution de toutes les mesures brutes d'émissions de méthane (5663 pour les taurillons et 23711 pour les génisses), qui a été considérée comme suivant une loi normale, les valeurs qui s'éloignaient de la moyenne de plus



de trois écarts-types ont été jugées incohérentes. Avec les données restantes (5512 et 23 710), il a été possible de réaliser nos calculs.

Pour estimer la variabilité interindividuelle et la répétabilité des émissions de méthane, le calcul a dû prendre en compte le fait que tous les bovins ne sont pas forcément venus aux mêmes moments de la journée, et que certains ont mis plus ou moins de temps à s'habituer à se rendre à la machine de mesure. Or, les valeurs mesurées sont variables selon le moment de la journée et selon la période d'engraissement ou de croissance. De plus, certaines cohortes et certains lots montrent des valeurs moyennes différentes des autres groupes du même sexe (mêmes raisons que pour les autres paramètres). Chez les taurillons et chez les génisses, respectivement, les moyennes d'émissions corrigées de méthane par jour et par individu ont donc été obtenues à l'aide de l'application « lsmeans » (*Least-Squares Means*, ou estimation de la moyenne des moindres carrés) de la procédure « GLM » de SAS, qui permet de corriger les valeurs brutes mesurées sur l'animal selon les effets « lot », « période », « heure », et leurs interactions. Le modèle utilisé était le suivant :

$$CH4_{ijkl} = \mu_{CH4} + lot_i + p_j + h_k + (lot*p)_{ij} + (lot*h)_{ik} + (p*h)_{jk} + (lot*p*h)_{ijk} + a_l/lot_i + e_{ijkl}$$

Avec  $CH4_{ijkl}$  la valeur brute mesurée du méthane émis par l'animal  $l$  contrôlé dans le lot  $i$ , lors de la période  $j$  et durant l'heure  $k$ ,  $\mu_{CH4}$  la moyenne de la population,  $lot_i$  l'effet estimé du lot  $i$  sur les émissions de méthane,  $p_j$  et  $h_k$  les effets estimés de la période  $j$  et de l'heure  $k$ ,  $(lot*p)_{ij}$ ,  $(lot*h)_{ik}$ ,  $(p*h)_{jk}$  et  $(lot*p*h)_{ijk}$  les effets d'interaction,  $a_l/lot_i$  l'effet animal (les génisses et les taurillons sont répartis par lots), et  $e_{ijkl}$  la résiduelle.

Les valeurs corrigées ( $CH4_{corr;ijkl} = \mu_{CH4} + a_l/lot_i + e_{ijkl}$ ) ont ainsi pu être utilisées pour calculer les moyennes individuelles d'émissions de méthane, qui ont ensuite été comparées pour calculer la variabilité interindividuelle.

Des calculs d'émissions de méthane par unité de matière sèche ingérée (kg), par unité de poids vif (PV, en kg) et par unité de GMQ (kg/j) ont également été réalisés.

#### d) Calculs des corrélations entre paramètres

L'application « proc corr » de SAS a été utilisée, mettant en relation chacune des variables après qu'elles aient été corrigées.

Ensuite, chez les génisses, une corrélation partielle a été calculée entre RFI et émissions de méthane, ces dernières étant alors en plus corrigées vis-à-vis du poids et de la masse sèche ingérée. Puisque les émissions entériques de méthane dépendent du poids de l'animal et de son niveau d'ingestion, le but était d'identifier la corrélation entre consommation résiduelle et capacité à peu émettre pour un poids et une quantité ingérée fixés.

### e) Calcul des répétabilités

Rappelons que la répétabilité traduit la corrélation qu'il y a entre deux performances successivement mesurées pour un même caractère chez un même animal. Ainsi, plus la répétabilité est élevée sur un intervalle de temps donné, plus nous augmentons la probabilité qu'un animal considéré comme faiblement émetteur à un instant  $t$  le soit toujours à l'instant «  $t + \text{intervalle}$  ». Avec un appareil comme le GF, et contrairement aux chambres respiratoires, les mesures se font à court terme. Or, la concentration en méthane de l'air exhalé par l'animal est extrêmement variable d'un moment à l'autre au cours de la journée. Cela va avoir un impact négatif sur la répétabilité. Ainsi, une période de mesures suffisamment longue va être nécessaire pour que la moyenne des émissions mesurées par animal soit fiable.

Cependant, plus un lot passe de semaines dans un enclos aménagé avec un GF, moins il sera possible de mesurer rapidement un grand nombre d'autres lots d'animaux. Nous avons donc analysé la fiabilité des moyennes d'émissions corrigées de méthane calculées sur de plus courtes périodes (2 semaines, ou « quinzaine », chez les taurillons, et quatre semaines chez les génisses).

En complément, les répétabilités du temps de rumination et des paramètres d'efficacité économiques ont également été calculées chez les génisses.

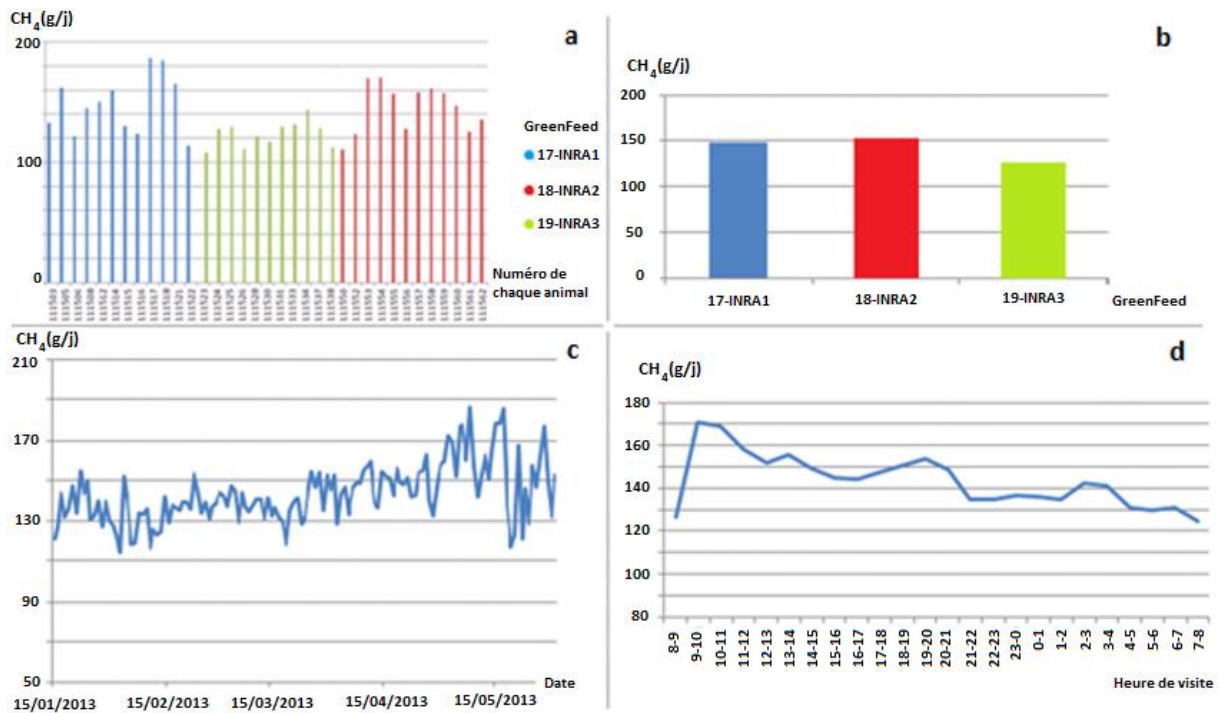
Enfin, toujours chez les génisses, les corrélations entre moyennes corrigées calculées sur 4 semaines et moyennes corrigées sur 8 semaines de chacun des paramètres ont été étudiées.

### **III. Résultats, interprétations et discussion chez les taurillons**

#### *1) Résultats concernant les émissions de méthane*

##### a) Effets « lot », « heure », « période de visite »

La figure 37 nous permet plusieurs observations concernant les moyennes brutes des mesures d'émissions de méthane (par animal, par GF, par jour et par heure de la journée). Les valeurs sont systématiquement ramenées à une expression en g/j, unité utilisée par les GF.



17-INRA1 = GF numéro 1 ou GF1, 18-INRA2 = GF2 et 19-INRA3 = GF3.

Date = date à laquelle le taurillon s'est présenté au GF.

Heure de visite = heure à laquelle le taurillon s'est présenté au GF ; x-y = entre l'heure x et l'heure y.

Figure 37 : Illustration de l'influence sur les émissions de méthane des effets « lot », « heure » et « période de visite »

Les valeurs moyennes brutes de méthane émis par les bovins, à partir de l'ensemble des valeurs cohérentes, montrent une forte variabilité entre individus (figure 37a), mais aussi entre le lot mesuré au GF3 (122g/j) et les deux autres lots (147 et 148 g/j ; figure 37b). Cela peut en partie s'expliquer par la répartition des animaux en fonction de leur âge, les plus jeunes se trouvant dans le lot mesuré au GF3.

D'après la figure 37c, les moyennes brutes de méthane émis augmentent de 136 à 155g/j du mois de janvier au mois de mai (en lien avec l'augmentation du poids vif des taurillons décrite ci-après).

Enfin, les moyennes brutes montrent une décroissance de 170g/j de 9h à 10h jusqu'à 127g/j de 8h à 9h (figure 37d). Cela est à relier au fait que l'aliment est distribué à l'auge à 8h le matin.

Pour toutes ces raisons, effectuer de simples moyennes par animal à partir de chacune de ces mesures fausserait la comparaison entre les individus, puisque cette moyenne dépendrait à la fois du lot dans lequel chaque taurillon se trouve, et de « leurs préférences » individuelles en termes d'heure et de période de visite du GF. Par exemple, nous avons remarqué que seules 1% des visites du taurillon 111528 étaient réalisées entre 9h et 11h, contre 6,2% pour le 111514.

Puisque les émissions sont généralement plus fortes à ce moment de la journée, la production quotidienne de méthane par le taurillon 111528 serait sous-estimée par rapport au 111514 si les analyses avaient été réalisées à partir des valeurs brutes.

Cela nous a amené à l'utilisation de l'application « lsmeans » de la procédure « GLM » de SAS, afin de travailler sur des valeurs corrigées par tous ces effets (« lot », « période », « heure », et leurs interactions). Pour des raisons similaires, la procédure « GLM » a été utilisée pour corriger par rapport au lot les données concernant l'efficacité économique, le temps de rumination, la capacité à digérer la MO et « l'épaisseur de gras ».

Dans la suite, tous les résultats, et leurs interprétations, seront décrits à partir des valeurs moyennes individuelles corrigées.

#### b) Variabilités interindividuelles

La moyenne des moyennes d'émissions par animal sur la période s'étendant de la quinzaine 2 à la quinzaine 9 est de  $143,8 \pm 23,3$  g/j/animal.

Le Coefficient de Variation (CV) est de 16,2%, alors que les CV du poids, du GMQ et de la MSI sont, dans notre expérience, tous inférieurs à 11%.

#### c) Corrélations avec les paramètres d'efficacité économique

Les données utilisées ont été obtenues par calculs sur les quinzaines 2 à 7 incluses.

Comme attendu avec un régime d'engraissement, les individus ont en moyenne pris du poids et augmenté leur quantité ingérée simultanément pendant la durée de l'étude (figure 38).

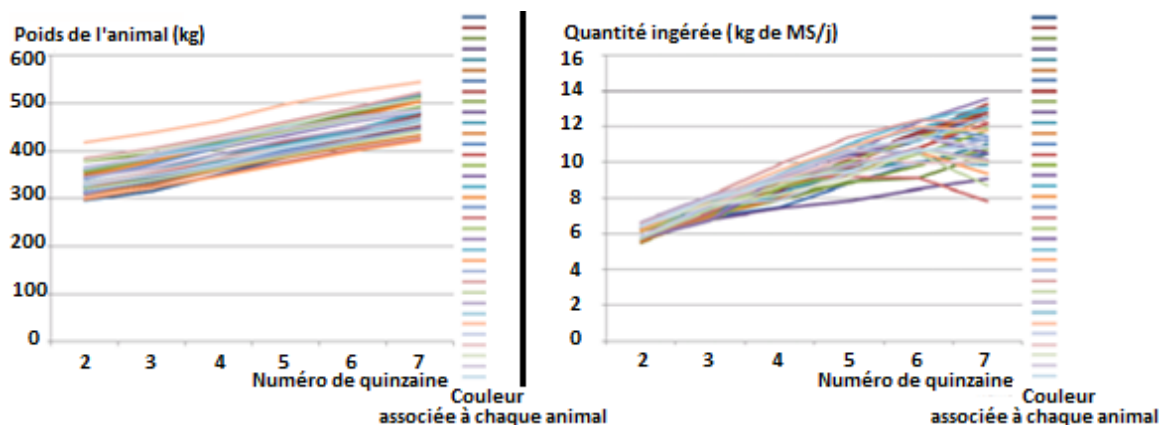


Figure 38 : Evolution du poids (à gauche) et de la quantité d'aliment ingérée (à droite) au cours du temps

D'après le tableau 11 (résumant l'ensemble des corrélations calculées chez les taurillons), les corrélations de la RFI avec le poids et le GMQ sont nulles. Celles de la MSI avec le poids et la RFI sont significativement positives ( $p\text{-value} = 0,02 < \alpha = 0,05$ , et  $p\text{-value} < 0,01$ , respectivement). Enfin, les corrélations du GMQ avec le poids et la MSI ingérée sont positives mais non significatives ( $p\text{-values} = 0,30$  et  $0,10$ , respectivement).

Nous observons une corrélation assez fortement positive entre le poids moyen et les émissions moyennes de  $\text{CH}_4$  :  $r = 0,42$ . Cette corrélation est significative ( $p\text{-value} = 0,01$ ). En revanche, en divisant ces émissions moyennes individuelles par le poids moyen de chaque animal, la corrélation est quasiment nulle :  $r(\text{CH}_4/\text{P};\text{P}) = -0,06$ .

Entre le GMQ et les émissions de  $\text{CH}_4$ , la corrélation est positive dans notre échantillon, mais non significative :  $r = 0,18$  ;  $p\text{-value} = 0,29$ . Cependant, la corrélation devient significativement négative en divisant les émissions par le GMQ :  $r(\text{CH}_4/\text{GMQ};\text{GMQ}) = -0,36$  ;  $p\text{-value} = 0,04$ .

Les émissions de  $\text{CH}_4$  sont, pour les taurillons, corrélées négativement avec leur consommation moyenne individuelle ( $-0,14$ ), mais de façon non significative ( $p\text{-value} = 0,43$ ).

La corrélation avec la consommation résiduelle est assez fortement négative ( $-0,27$ ), mais toujours non significative ( $p\text{-value} = 0,12$ ).

Tableau 11 : Corrélations entre les émissions de méthane et les différents paramètres étudiés chez les taurillons

Variable	Poids	GMQ	MSI	RFI
$\text{CH}_4$	0,42	0,18	-0,14	-0,27
Poids	1	0,18	0,38	0,00
GMQ		1	0,28	0,00
MSI			1	0,81

$\text{CH}_4$  = émissions moyennes de méthane sur la période.

Poids = poids moyen des animaux sur la période.

GMQ = Gain Moyen Quotidien sur la période.

MSI = Matière Sèche Ingérée sur la période.

RFI = consommation résiduelle calculée sur la période.

#### d) Répétabilités

Les mesures de méthane obtenues sur 16 semaines (quinzaines 2 à 9) ont été regroupées par quinzaine pour chaque taurillon, réunissant ainsi 35 valeurs en moyenne par animal et par

quinzaine en début de contrôle, et 11 en fin de contrôle (baisse liée à la chute du nombre de visites déjà décrite précédemment).

Ainsi, 8 valeurs d'émissions moyennes de méthane par taurillon ont été exploitées afin d'étudier la répétabilité des estimations obtenues grâce au GF sur ces périodes. En moyenne, nous constatons une très bonne répétabilité quand les deux quinzaines se suivent : environ 0,64 (tableau 12) ; la corrélation entre quinzaines diminue lorsque l'intervalle augmente, en restant tout de même à des valeurs correctes, comprises entre 0,37 et 0,47. La bonne répétabilité à sept quinzaines d'écart ne concerne que les quinzaines 2 et 9.

En s'intéressant aux moyennes des corrélations de chacune des quinzaines avec les 7 autres, nous remarquons que les quinzaines 7, 8 et 9 sont moins corrélées (0,36 à 0,45) que les quinzaines 2 et 3 (0,48 à 0,50), qui le sont elles-mêmes moins que les autres (de 0,54 à 0,58).

Tableau 12 : Etude des corrélations de mesures d'émissions de CH<sub>4</sub> entre quinzaines

Quinzaine	2	3	4	5	6	7	8	9	Moyenne écart
+1	0,52	0,76	0,82	0,75	0,71	0,52	0,38		0,64
+2	0,50	0,63	0,62	0,34	0,51	0,19			0,47
+3	0,62	0,53	0,40	0,34	0,23				0,42
+4	0,41	0,33	0,27	0,57					0,40
+5	0,63	0,25	0,53						0,47
+6	0,24	0,50							0,37
+7	0,47								0,47
<b>Moyenne quinzaine</b>	0,48	0,50	0,56	0,58	0,54	0,45	0,36	0,41	

Quinzaine « + x » = écart entre la quinzaine 'q' de la colonne et la quinzaine 'q + x'.

Moyenne quinzaine = pour une quinzaine donnée, moyenne de ses 7 corrélations avec les 7 autres quinzaines étudiées.

Moyenne écart = pour un écart entre quinzaines donné, moyenne de toutes les corrélations calculées entre deux quinzaines séparées par cet intervalle de temps.

Bien que certains taurillons ne soient parfois pas venus pendant toute une quinzaine, ces corrélations s'appliquent toujours aux valeurs d'au moins 31 individus.

## 2) Interprétations des résultats présentés et discussion

Le Coefficient de Variation (CV) des émissions de méthane étant assez élevé, 16,2%, alors que les animaux étaient élevés dans les mêmes conditions, cela montre que les émissions ne sont pas complètement fixées par la conduite d'élevage, et que l'animal va lui aussi jouer un rôle dans les variations observées.

Les corrélations nulles de la RFI avec le poids et le GMQ, et significativement positive avec la MSI, viennent du fait que la RFI est calculée par régression de la MSI sur le poids et le GMQ. La corrélation significativement positive entre MSI et poids est l'indicateur d'une consommation généralement plus forte par les animaux plus lourds. Enfin, les corrélations positives, bien que non significatives, du GMQ avec la MSI et le poids, nous orientent vers les hypothèses logiques que les taurillons à plus forte croissance consomment en moyenne plus que les autres, et que les animaux les plus lourds sont ceux qui connaissent la plus forte croissance.

Concernant le lien entre poids et émissions de méthane, la corrélation significativement positive démontre qu'un animal présentant un poids supérieur aux autres va généralement produire plus de méthane par jour que les autres. Cependant, cela ne signifie pas que cette production est plus élevée proportionnellement au poids de l'animal.

La corrélation entre GMQ et émissions de méthane, bien que non significative, tend vers l'hypothèse qu'un taurillon à forte croissance émet davantage dans l'environnement par unité de temps qu'un taurillon à faible croissance. Néanmoins, un animal grossissant plus vite émet significativement moins de méthane par unité de GMQ.

Enfin, bien que la corrélation entre quantité ingérée et émissions de méthane soit non significative, il semblerait que les animaux à faible RFI aient tendance à être plus émetteurs que les autres. Ces premiers résultats, relativement contre-intuitifs, sont en contradiction avec l'hypothèse de départ, selon laquelle les bovins les plus économiquement efficaces seraient aussi les plus écologiquement vertueux, présentant à la fois une faible consommation résiduelle et des émissions de méthane inférieures à celles des autres.

Cependant, cette étude se limite aux données qui étaient disponibles lors de ma présence à l'INRA en 2013. Seuls 35 taurillons avaient été mesurés, donnant lieu à un large intervalle de confiance en ce qui concerne les corrélations entre mesures. D'ici quelques temps, des résultats plus précis, car plus nombreux, pourront être analysés par Gilles Renand.

La corrélation assez forte des mesures de méthane à plusieurs quinzaines d'écart montre que la sélection des bovins pour produire moins de méthane à un instant  $t$  de l'engraissement permettra de diminuer leurs émissions pour les quelques mois suivant cet instant  $t$ . Cependant, étant donné la chute du nombre de visites en quinzaines 7, 8 et 9, et le faible nombre de corrélations calculées à 5, 6 et 7 quinzaines d'écart, les répétabilités sont peu interprétables dans

notre expérience lorsque l'intervalle de temps dépasse 2 mois. Là encore, des résultats plus précis seront disponibles à l'avenir.

Avec les 35 taurillons, cette expérience était menée pour la première fois sur une aussi longue période et avec des GreenFeed comme outils de mesures. En conséquence, quelques erreurs expérimentales ont pu créer un biais ou des difficultés d'interprétations de ces mesures.

Il est par exemple difficilement explicable qu'après un pic de visites le 8 avril 2013, celles-ci aient autant diminué jusqu'à la fin du mois mai. Une hypothèse sur la distribution d'un aliment de mauvaise qualité courant avril a été avancée. Ces faibles nombres de visites limitent nos possibilités d'interprétation des mesures réalisées après le milieu du mois d'avril.

Quelques erreurs sur les distributions d'aliment sont également observables. Le 7 avril, 2kg de nourriture en moins par animal ont été distribués, pouvant expliquer le pic de visites du 8 avril. De plus, nous avons pu observer, à l'Unité Expérimentale de Bourges, qu'il arrive parfois qu'un bovin parvienne à manger à l'auge qui ne lui est normalement pas attribuée, en forçant le système des portillons Calan à ouverture électromagnétique.

Enfin, concernant la MSI, bien que chaque animal ait accès au même aliment, la litière en paille pourrait induire un biais dans les quantités mesurées si les animaux venaient à en consommer. En outre, ce « déchet végétal » est très méthanogène du fait de sa richesse en fibres.

Avant cette expérience, Gilles Renand, avec peu d'animaux et sur une courte période (18 taurillons durant l'automne 2012), avait déjà obtenu quelques résultats. Ceux-ci étaient en partie divergents de ceux de notre étude. La moyenne d'émissions de méthane en automne était de 232,0 g/j/animal, contre 143,8 au printemps, et les taurillons se présentaient plus fréquemment au GF, majoritairement de 10h à 13h, alors qu'au printemps 2013, leur présence était bien plus marquée de 6h à 8h. Nous pouvons en partie expliquer ces variations par une méthode expérimentale différente. En effet, à l'automne, seuls 2kg d'aliments étaient donnés au début des mesures lors de la mise à l'engraissement, contre 5kg dans notre cas. Ceci avait été réalisé dans le but d'inciter les taurillons à se rendre souvent au GF. Ce procédé avait été efficace puisque les taurillons se rendaient 5 fois par jour à l'appareil en moyenne, généralement juste après la distribution de leur ration, celle-ci leur paraissant sans doute insuffisante. Il a cependant été constaté qu'une ration distribuée ad libitum était nécessaire pour minimiser l'ingestion de paille et évaluer la consommation résiduelle. Les expériences au printemps ont donc été menées dans cette optique.

Le travail de l'automne 2012 a ainsi servi d'ajustement pour mener nos expériences du printemps 2013 dans de meilleures conditions, mais, suite à cette nouvelle étude, nous pouvons



observer que plusieurs points restaient à améliorer (éviter les litières en paille, distribuer un aliment de qualité aussi constante que possible...). Nous nous sommes appliqués à respecter ces objectifs lors de l'analyse des lots suivants, dont les résultats explorés en fin d'année 2015 sont exposés ci-dessous pour les génisses.

#### **IV. Résultats, interprétations et discussion chez les génisses**

##### *1) Résultats*

##### a) Illustration des effets « lot », « heure » et « période de visite » sur les émissions de méthane

Le même type de constat que pour les taurillons a été fait pour les génisses. Des exemples de moyennes brutes, calculées selon la cohorte, la quinzaine et l'heure, et donc témoins des effets « lot », « période de visite » et « heure », sont présentés dans le tableau 13.

Tableau 13 : Moyennes d'émissions calculées à partir des valeurs brutes de toutes les génisses

	<b>Mesures moyennes d'émissions de méthane (en g/j), et écarts-types, sur les 119 génisses</b>
<b>Cohorte 2012A</b>	178,6 ± 61,0
<b>Cohorte 2012B</b>	172,2 ± 57,8
<b>Quinzaine 1</b>	174,7 ± 62,6
<b>Quinzaine 4</b>	192,8 ± 56,3
<b>A 8 heures</b>	137,5 ± 52,2
<b>A 10 heures</b>	187,1 ± 53,1

Nous remarquons que les émissions varient en fonction de la cohorte, de la quinzaine et de l'heure de visite. Or, par exemple, la génisse numéro 111919 (cohorte 2012A) n'est jamais venue au GF à 8 heures au cours de la 1<sup>ère</sup> quinzaine, alors que la 122146 (cohorte 2012B) a été mesurée 6 fois à cette heure-là au cours de cette première quinzaine de jours. Ces 6 valeurs ont fait baisser la moyenne brute de la génisse 122146 à cause de son moment de visite à l'appareil, et non en raison de ses émissions réelles sur une journée. Cela justifie la correction des valeurs brutes par les effets « lot », « période », « heure », et leurs interactions, à l'aide de la procédure « GLM » de SAS.

## b) Variabilités interindividuelles des émissions

La moyenne des moyennes d'émissions par animal sur la période de 8 semaines est de  $186,4 \pm 22,3$  g/j/animal (CV=12,0%).

Les émissions par unité de MSI sont de 23,5 g/kg en moyenne sur 8 semaines (cette valeur est stable au cours du temps, 23,5 sur les 4 premières semaines, et 23,7 sur les suivantes). Les émissions par rapport au PV sont de 0,36 g/kg sur toute la période (mêmes valeurs sur les quatre premières semaines et les quatre suivantes). Enfin, en ce qui concerne les émissions par unité de GMQ (kg/j), elles sont peu interprétables, du fait de l'impossibilité de considérer ce dernier paramètre comme suffisamment fiable sur des périodes inférieures à 9 semaines (Wang, 2006).

## c) Corrélations des émissions avec les paramètres d'efficacité économique

Les données utilisées ont été obtenues au cours des 8 semaines.

Comme pour les taurillons, les génisses ont en moyenne pris du poids au cours de l'expérience, et augmenté dans le même temps leur MSI par jour (7,8 kg/j en moyenne sur les 4 premières semaines, contre 8,4 kg/j sur les 4 suivantes). Le GMQ est resté stable (autour de 1 030 g/j).

D'après le tableau 14 (résumant l'ensemble des corrélations calculées chez les génisses), les corrélations entre poids, GMQ et MSI sont toutes significativement positives (les p-values sont toutes inférieures à 0,01). Celles de la RFI avec le poids et le GMQ sont nulles. La MSI et la RFI sont significativement et positivement corrélées, avec une valeur de 0,83.

La corrélation entre le poids et les émissions de méthane est très significativement positive : ( $r = 0,49$  ; p-value < 0,01).

Entre le GMQ et les émissions de CH<sub>4</sub>, la corrélation est de 0,36 avec une p-value inférieure à 0,01. Cependant,  $r(\text{CH}_4/\text{GMQ}; \text{GMQ}) = -0,79$  avec une p-value inférieure à 0,01.

Les émissions de CH<sub>4</sub> sont, pour les génisses, corrélées positivement et significativement avec la consommation (0,27 ; p-value < 0,01), mais  $r(\text{CH}_4/\text{MSI}; \text{MSI}) = -0,82$  avec une p-value inférieure à 0,01. Précisons que la corrélation entre proportion de condensé ingérée (PCI = quantité de condensé ingérée/MSI) et émissions de méthane est

significativement négative dans notre échantillon de 119 individus, avec  $r(\text{CH}_4;\text{PCI}) = -0,20$  et  $p\text{-value} = 0,03$ . Cependant, le poids et la MSI sont très significativement corrélés négativement avec la PCI (- 0,46 et - 0,89, respectivement), et positivement avec les émissions de méthane. Par régression de la quantité de condensé ingérée et des émissions de méthane sur le poids et la MSI, la corrélation partielle qui en résulte est proche de 0 ( $r = 0,03$  ;  $p\text{-value} = 0,76$ ).

Enfin, la corrélation des émissions de méthane avec la RFI est quasiment nulle (- 0,004), et donc non significative ( $p\text{-value} = 0,97$ ). La corrélation partielle entre consommation résiduelle, et émissions de méthane corrigées par régression sur le poids et la quantité de MSI, aboutit à une valeur encore plus faible, de 0,001.

Tableau 14 : Corrélations entre les émissions de méthane, les différents paramètres d'efficacité économique étudiés chez les génisses, et la proportion de condensé ingérée

Variable	Poids	GMQ	MSI	RFI	PCI
CH <sub>4</sub>	0,49	0,36	0,27	0,00	- 0,20
Poids	1	0,52	0,56	0,00	- 0,46
GMQ		1	0,28	0,00	
MSI			1	0,83	- 0,89

CH<sub>4</sub> = émissions moyennes de méthane sur la période.

Poids = poids moyen des animaux sur la période.

GMQ = Gain Moyen Quotidien sur la période.

MSI = Matière Sèche Ingérée sur la période.

RFI = consommation résiduelle calculée sur la période.

PCI = Proportion de Condensé Ingérée sur la période.

#### d) Corrélations des émissions avec les potentiels paramètres « proxy »

Dans notre échantillon de 99 génisses, les corrélations des temps de rumination avec les paramètres d'efficacité économique ( $r = 0 \pm 0,15$  selon le paramètre, avec une  $p\text{-value}$  toujours supérieure à 0,05), ainsi qu'avec les émissions de méthane ( $r = 0,004$ ), étaient quasiment nulles.

Les corrélations entre capacité à digérer la MO et l'ensemble des autres paramètres étudiés (émissions de méthane et paramètres d'efficacité économique) étaient également toutes proches de 0 ( $r = 0 \pm 0,05$  selon le paramètre).

Enfin, « l'épaisseur de gras » était corrélée positivement mais non significativement avec les émissions de méthane ( $r = 0,14$  ;  $p\text{-value} = 0,13$ ). En corrigeant ces paramètres à la fois par rapport au poids, au GMQ et à la MSI, la corrélation partielle obtenue n'est pas plus significative ( $r = -0,12$  ;  $p\text{-value} = 0,21$ ).

e) Répétabilité

A partir des moyennes calculées sur 2 fois 4 semaines, reposant sur des valeurs de nouveau corrigées par rapport aux lots (pour tous les paramètres) et aux heures et périodes de visite (pour les mesures au GF), nous avons obtenu les répétabilités retranscrites dans le tableau 15 :

Tableau 15 : Répétabilités entre les valeurs obtenues sur les quatre premières semaines et celles obtenues sur les quatre suivantes

	<b>Poids</b>	<b>MSI</b>	<b>RFI</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>CH<sub>4</sub>/MSI</b>	<b>Rum</b>
<b>Répétabilités</b>	0,99	0,85	0,78	0,56	0,74	0,89

Rum = temps de rumination.

La plupart des paramètres ont une répétabilité supérieure à 0,7. Les moyennes de mesures d'émissions de méthane par animal sur les quatre premières semaines ont une corrélation de 0,56 avec celles obtenues sur les quatre semaines suivantes. Enfin, toutes les répétabilités calculées sur des paramètres impliquant le GMQ sont ininterprétables, pour les raisons indiquées plus haut.

f) Corrélations entre mesures sur 4 semaines et mesures sur 8 semaines

Tableau 16 : Corrélations entre les moyennes calculées sur 8 semaines et celles calculées sur chacune des périodes de 4 semaines

	<b>Poids</b>	<b>MSI</b>	<b>RFI</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>CH<sub>4</sub>/MSI</b>	<b>Rum</b>
<b>4 premières semaines</b>	1,00	0,94	0,92	0,92	0,93	0,96
<b>4 dernières semaines</b>	1,00	0,97	0,96	0,84	0,93	0,98

Rum = temps de rumination.

Les corrélations entre mesures sur 4 semaines et sur 8 semaines sont supérieures à 0,84 pour tous les paramètres ci-dessus (tableau 16). Celles calculées sur des paramètres impliquant le GMQ sont ininterprétables.

2) *Interprétations des résultats présentés et discussion*

En comparaison avec l'expérience menée sur les 35 taurillons, davantage d'individus ont été mesurés ici (119 génisses) et de la litière à base de copeaux de bois a été utilisée. En ce

qui concerne l'alimentation, aucune erreur de ration n'a été référencée, mais des problèmes de conservation ont réduit à 8 semaines la durée des observations analysées.

Le Coefficient de Variation (CV) des émissions de méthane était légèrement inférieur à celui des taurillons (12% contre 16,2%), mais les écart-types étaient très proches (22,3 contre 23,3 g/j). La différence entre les émissions moyennes des deux échantillons peut en grande partie s'expliquer par l'aliment distribué, les génisses ayant reçu à l'auge un ensilage plus riche en fibres que le condensé exclusif des taurillons.

Là encore, alors que les génisses étaient élevées dans les mêmes conditions, la variabilité interindividuelle observée montre que les émissions ne sont pas complètement fixées par la conduite d'élevage. Si la capacité d'un animal à émettre moins que les autres est transmissible à sa descendance, nous pourrions espérer sélectionner des individus « écologiques » pour la mise à la reproduction.

Les corrélations nulles de la RFI avec le poids et le GMQ, et significativement positive avec la MSI, viennent du fait que la RFI est calculée par régression de la MSI sur le poids et le GMQ. Les corrélations significativement positives entre MSI, poids et GMQ sont logiquement dues au fait qu'un animal présentant une croissance rapide va généralement plus consommer et peser plus lourd que les autres.

Concernant les liens entre poids, MSI et émissions de méthane, les corrélations significativement positives démontrent que la production de méthane quotidienne augmente lorsqu'une génisse pèse plus lourd, et mange davantage. Cependant, la production de CH<sub>4</sub> par kg de MSI est plus faible lorsqu'elle consomme plus.

La corrélation entre émissions de méthane et proportion de condensé dans la ration, négative et significative, pourrait laisser penser que le choix de cet aliment distribué au GF par rapport à celui donné à l'auge biaisait l'expérience, puisqu'un animal se rendant plus souvent au GF que les autres aurait consommé davantage de condensé et aurait émis moins de méthane en partie du fait de son alimentation. Cependant, les corrélations très significatives, et négatives, entre MSI ingérée et PCI d'une part, et entre poids et PCI d'autre part, démontrent que les variations de PCI entre individus s'expliquent surtout en raison d'une plus forte ingestion à l'auge des animaux de poids élevé. Finalement, pour des valeurs corrigées par rapport au poids et à la MSI, la quantité de condensé ingérée et les émissions de méthane ne sont pas liées. Il n'y a donc pas eu d'impact de l'utilisation d'un aliment différent au GF par rapport à l'auge.

La corrélation positive entre GMQ et émissions de méthane, significative, démontre qu'une génisse à forte croissance émet davantage dans l'environnement par unité de temps qu'une génisse à faible croissance. Néanmoins, en moyenne, un animal grossissant plus vite émet moins que les autres par unité de GMQ.

D'après nos résultats sur les génisses, les performances de consommation résiduelle ne sont pas significativement liées aux émissions de méthane (corrélation nulle, voir tableau 14). Ces résultats sont relativement incohérents avec notre hypothèse initiale de relation favorable entre consommation résiduelle et émissions de méthane, et pourraient correspondre à un gaspillage de l'énergie sous d'autres formes que le méthane par les animaux à RFI élevée (CO<sub>2</sub>, chaleur, moins bonne utilisation des AGV absorbés dans le sang, etc.). De plus, le souhait d'utiliser la RFI comme paramètre « proxy » ne paraît pas envisageable ici. Ces conclusions vont dans le sens d'un grand nombre d'études récentes (Renand et al. (non publiée b) chez 153 génisses charolaises (en prolongement de notre travail), Mercadante et al. (2015) et Mc Donnell et al. (2016)), qui mettent même en évidence une corrélation significativement négative entre MY et RFI, en particulier lorsque les teneurs en fibres cellulosiques de la ration sont élevées. Cependant, d'autres publications décrivent une corrélation positive de la RFI avec les émissions de méthane (Nkrumah et al. (2006), Hegarty et al. (2007), Fitzsimons et al. (2013) cités par Renand et al. (non publiée b)), témoignant de l'importance de réaliser encore de nombreux travaux de recherches. Si cette corrélation proche de 0 devait être confirmée au cours des années à venir, l'incitation des éleveurs à sélectionner des génisses « écologiques » serait tout de même envisageable, puisque leurs performances d'efficacité économique ne seraient pas altérées (notons que l'effort génétique consenti sur le caractère « émissions de méthane » conduirait tout de même à un ralentissement du progrès génétique sur les autres caractères, par dilution de l'effort de sélection).

Les autres paramètres « proxy » étudiés ne sont pas suffisamment corrélés avec les émissions de méthane, dans notre expérience, pour espérer les utiliser dans le but de sélectionner à moindre coût des individus « écologiques ».

La corrélation assez forte des mesures de méthane entre les deux périodes consécutives de quatre semaines montre que la sélection des génisses pour produire moins de méthane à un instant t de leur croissance devrait permettre de diminuer leurs émissions pour les quelques semaines suivant cet instant t. En revanche, des études de répétabilité menées sur le plus long terme, par exemple une fois que celles-ci auront vélé, pourraient être intéressantes.

De plus, en dehors du GMQ pour lequel des mesures sur 4 semaines ne sont pas suffisamment fiables, les paramètres d'efficacité économique présentent eux aussi une bonne répétabilité. Ainsi, les individus à la fois « écologiques » et « économiques » à un instant  $t$  devraient encore l'être les semaines suivantes.

Enfin, toujours en dehors du GMQ, les fortes corrélations entre les moyennes individuelles calculées sur 4 semaines et celles calculées sur 8 semaines laissent penser que des mesures sur un mois seraient suffisantes pour identifier les individus « écologiques » et « économiques ». Par la suite, seules des pesées supplémentaires afin d'augmenter la fiabilité du GMQ calculé seraient nécessaires.

En définitive, avec les génisses, de nombreuses mesures ont pu être obtenues sur toute la durée de l'expérience. Les résultats démontrent qu'il est possible d'identifier des individus moins émetteurs de méthane, en 4 semaines de mesures, et avec une répétabilité correcte. La consommation résiduelle et les autres paramètres « proxy » étudiés ne sont en revanche pas corrélés aux émissions de méthane sur les 119 génisses. Des mesures supplémentaires effectuées sur de nouveaux individus permettraient de confirmer ou d'infirmer certains de nos résultats. Les travaux réalisés auparavant sur les taurillons ont donc surtout permis de déterminer les conditions expérimentales optimales pour les cohortes suivantes, et notamment pour celles des génisses, dans le but d'augmenter la fiabilité des résultats.

## **V. Discussion générale et perspectives suite à cette expérience**

Différentes solutions de mitigation des émissions entériques de méthane par les génisses et les taurillons charolais en France peuvent être envisagées. L'utilisation de la sélection génétique nécessite que les six conditions détaillées ci-dessous soient remplies. Notre étude apporte des éléments de réponse pour certaines d'entre elles, mais de nombreux travaux doivent encore être réalisés pour documenter précisément l'ensemble de ces points :

- Une capacité à évaluer les individus sur leurs performances :
  - Avec le GF, quatre semaines de mesures seraient suffisantes pour évaluer efficacement plus d'une dizaine d'animaux.
  - Les répétabilités sont correctes sur les durées de notre expérience.
  - En revanche, les potentiels paramètres « proxy » étudiés, afin de réduire encore les coûts de mesures, ne semblent pas suffisamment corrélés aux émissions de méthane.

- L'existence d'une variabilité interindividuelle entre performances pour des animaux élevés dans les mêmes conditions :
  - Notre expérience a mis en évidence cette variabilité, avec des écarts-types de 22,3 et 23,3 g/j chez les génisses et chez les taurillons, respectivement.
- La possibilité de déterminer précisément la valeur génétique des animaux :
  - Cela peut être réalisé à partir des performances de l'animal et/ou de ses apparentés, ou grâce à l'utilisation de la génomique.
  - Dans les deux cas, des analyses sur davantage d'individus sont encore indispensables.
  - En ce qui concerne la génomique, le génotypage des animaux est en cours (tâche 4 du projet BVE3), mais l'identification de marqueurs précis pour la détection de QTLs impliqués dans la réduction des émissions de méthane (tâche 6) va nécessiter un partage des données avec d'autres équipes de recherche.
- Une aptitude à estimer de façon précise l'héritabilité, qui doit être suffisamment élevée (tâche 6) :
  - Elle est définie, dans une population, comme la part de variation interindividuelle des performances mesurées pouvant être imputée aux différences interindividuelles de valeurs génétiques additives. Ainsi, pour une variabilité de la quantité d'émissions de méthane entre individus donnée, plus l'héritabilité sera élevée, plus la sélection de reproducteurs faiblement émetteurs sera efficace.
  - Pour que l'estimation de l'héritabilité soit précise, il faudra là encore augmenter le nombre de données disponibles.
- Une volonté des éleveurs de favoriser la mise à la reproduction des animaux faiblement émetteurs :
  - Une corrélation positive entre RFI et émissions de méthane aurait donc été préférable, puisque la sélection d'un animal « écologique » aurait dans le même temps augmenté la probabilité qu'il soit « économique ».
  - Dans le cas des résultats obtenus chez les génisses ( $r \approx 0$ ), des incitations de l'Etat à sélectionner les bovins en partie sur le caractère « méthane » seraient efficaces.



- En ce qui concerne les taurillons, trop peu d'individus ont été évalués pour l'instant, mais si la corrélation est effectivement négative, les incitations de l'Etat devront être encore plus persuasives.
- Une « base de sélection » suffisante, et une organisation du cheptel adaptée pour la mise en place d'une intensité de sélection et de plans d'accouplement correspondant aux objectifs de mitigation des émissions entériques de méthane :
  - En France, comme cela a été décrit auparavant, le cheptel est bien organisé.
  - En revanche, la « base de sélection » sur laquelle un contrôle de performances des émissions de méthane pourrait être effectué est pour le moment réduite. Le GF semble actuellement être l'outil le plus efficace pour mesurer ces émissions à coût modéré, mais il est peu envisageable d'utiliser cette machine directement sur le terrain, d'où l'intérêt de rechercher encore des paramètres « proxy », ou d'établir des index génomiques sur le caractère « méthane ».

Nous remarquons donc la nécessité globale d'études supplémentaires. Il est ainsi prévu que de nouvelles cohortes soient évaluées jusqu'en avril 2017 dans l'Unité Expérimentale de Bourges (environ 70 taurillons (dont 23 qui ont déjà été mesurés) et 130 génisses (36 ont déjà été mesurées, dont les résultats vont dans le sens de ceux décrits dans ce chapitre (Renand et al., non publié b))). Gilles Renand, coordinateur du projet BVE3, envisage également un partage de ses données, comme par exemple avec celles obtenues par une équipe australienne dirigée par Paul Félix Arthur. Pour ce faire, les possibilités d'interprétations de résultats obtenus dans des conditions expérimentales différentes devront être maîtrisées.

Il pourrait également être intéressant de compléter ce travail avec des analyses sur des groupes d'animaux différents (vaches, bœufs, autres races...), avec l'utilisation d'autres aliments (maïs, foin...), et dans des environnements variés (au pâturage par exemple). De plus, l'étude des répétabilités avec un intervalle de temps beaucoup plus long entre les périodes de mesures pourrait être envisagée.

Enfin, à terme, d'autres résultats du projet pourront éventuellement contribuer à l'utilisation de la génétique pour la réduction des GES par les bovins charolais. Cela devrait être le cas, par exemple, de l'analyse des émissions de CO<sub>2</sub> également mesurées au GF, ou encore de l'acquisition de données concernant la précocité des animaux.

## Conclusion

Le méthane est le deuxième GES le plus impliqué dans le réchauffement climatique d'origine anthropique, dont les conséquences à venir pourraient être considérables. La fermentation entérique chez les ruminants, et tout particulièrement chez les bovins, est sa principale source. Les émissions mondiales des cheptels laitier et allaitant sont proches.

L'exceptionnelle capacité des ruminants à digérer les glucides pariétaux des végétaux est à l'origine d'un gaspillage énergétique modéré, sous forme de méthane. Les rejets qui s'ensuivent se font principalement par éructations, entraînant de fortes variations des émissions d'un instant à l'autre. Ce phénomène complique les estimations individuelles, qui doivent ainsi être effectuées soit sur le long terme, soit à court terme et en multipliant les mesures pendant de longues périodes, soit par corrélation avec un paramètre « proxy », ou alors par prédiction à partir de modèles statistiques. Aucun outil n'est encore considéré comme parfaitement adapté pour évaluer avec fiabilité et à faible coût un grand nombre d'animaux.

Les solutions envisagées pour la mitigation des émissions entériques de méthane sont de plus en plus abondantes, en témoigne l'augmentation de 15% par an depuis 1990 du nombre d'articles publiés chaque année et disponibles sur le « Web of Science » avec l'association des mots-clés « méthane » et « ruminants » (Sauvant et al., 2011). L'alimentation (concentrés, lipides, etc.), l'ajout d'additifs (nitrates, antibiotiques, etc.), le recours à des biotechnologies (vaccins, probiotiques, etc.), l'amélioration de la productivité (gestion de troupeau, génétique, etc.), et la sélection sur le caractère « méthane », sont autant de leviers d'action actuellement analysés par la recherche. Dans tous les cas, beaucoup d'études sont encore nécessaires (coûts occasionnés, efficacité *in vivo* et sur le long terme, absence de danger pour le consommateur, impact sur la qualité et la quantité de production, etc.), et nombre de ces moyens sont difficilement applicables pour les bovins au pâturage, ce qui est souvent pratiqué avec les races allaitantes.

La génétique présente les atouts de pouvoir solidement s'ancrer sur le long terme, et d'être utilisable pour des animaux élevés en extérieur. A condition d'adapter la sélection (et les éventuels croisements) à chaque région géographique, nous pourrions augmenter la productivité des cheptels tout en réduisant leur impact écologique. En revanche, principalement en ce qui concerne les émissions de méthane, la difficulté est d'évaluer les performances des reproducteurs. L'enjeu pour les pays industrialisés est donc de rechercher des outils de mesures fiables et peu coûteux, d'identifier des paramètres « proxy » adaptés (la RFI est actuellement celui le plus étudié), et/ou d'établir des index génomiques suffisamment précis. Les investissements engendrés sont actuellement le principal frein à l'utilisation de la génétique

comme moyen de réduction des émissions de méthane, mais les premiers résultats obtenus sont assez encourageants.

Le projet INRA BVE3 auquel j'ai participé apporte de nouvelles informations sur la variabilité interindividuelle des émissions de méthane observée chez des charolais élevés dans les mêmes conditions, sur la répétabilité des mesures effectuées au GreenFeed, et sur la corrélation entre ces émissions et divers paramètres « proxy » (RFI, temps de rumination etc.). En partageant nos résultats à l'international, nous espérons pouvoir un jour évaluer assez précisément la valeur génétique des reproducteurs et l'héritabilité du caractère « méthane ».

Bien sûr, d'autres moyens de mitigation des émissions entériques de méthane par les BA seraient envisageables (baisse de la consommation de viande bovine, réduction du gaspillage alimentaire, élevage de races mixtes (dilution des émissions de méthane par kilogramme de viande et de lait produits), voire production de viande de synthèse, etc.). Cependant, selon Gerber et al. (2013), les solutions à proposer doivent tenir compte des multiples rôles de l'élevage (entretien des paysages, produits annexes (cuir, etc.), source de revenus pour des centaines de millions d'éleveurs, capacité à digérer des produits végétaux non utilisables par l'Homme, etc.), et la demande des consommateurs à l'international ne va actuellement pas dans le sens d'une décroissance du nombre de ruminants (entre 2005 et 2050, la population mondiale devrait s'urbaniser, s'enrichir, et atteindre 9,6 milliards de personnes, à l'origine d'une augmentation de la demande en viande de plus de 70%). En conséquence, pour satisfaire le consommateur, tout en freinant l'augmentation des émissions mondiales et en garantissant l'accès à l'eau et aux céréales dans les zones défavorisées (l'accroissement du nombre total de bovins et la désertification pourraient entraîner une forte compétition dans l'utilisation des ressources entre l'animal d'élevage et l'Homme), il est primordial que les organismes de recherche, les gouvernements, les organisations intergouvernementales et non gouvernementales, les entreprises privées et les producteurs mettent en place des actions conjointes adaptées et coordonnées :

- Recherche : la grande quantité de conférences dédiées au climat et auxquelles j'ai pu assister lors des 22<sup>èmes</sup> journées 3R (Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants) est un témoin de l'implication croissante des chercheurs dans cette problématique des émissions entériques.
- Gouvernements : au cours d'une journée passée à la COP21 et consacrée aux thèmes de l'agriculture et de la forêt, j'ai pu constater que le manque de connaissances et de maîtrise des leviers d'action entrave encore la mise en place de mesures politiques visant à réduire les émissions entériques de méthane. Les difficultés à attribuer les

responsabilités (par exemple, lors d'une exportation, doit-on considérer que les émissions sont imputables au producteur ou à l'importateur ?), et à établir des règles permettant à tous les pays de rester compétitifs, représentent une autre limite à l'avancée des décisions administratives (Gerber et al., 2013).

- Organisations intergouvernementales et non gouvernementales : les rapports du GIEC et les nombreuses actions menées par AVSF (Agronomes et Vétérinaires Sans Frontières) sont des exemples des rôles joués par les associations.
- Entreprises privées : l'intérêt actuellement porté sur mon travail par un producteur d'aliment, espérant démontrer que l'intégration de son produit réduit les émissions de méthane, est encourageant dans l'espoir d'observer à l'avenir divers acteurs du secteur privé investir dans le développement de leviers d'actions efficaces.
- Producteurs : l'impact du secteur agricole sur l'environnement est régulièrement montré du doigt. Dans le contexte économique difficile que connaissent de nombreux éleveurs actuellement, orienter les choix vers des solutions permettant à la fois d'augmenter la productivité tout en améliorant l'image des élevages aux yeux du consommateur pourrait favoriser la rentabilité des exploitations.

Pour espérer la mise en place de moyens visant à réduire les émissions entériques de méthane, il est donc nécessaire de prolonger les recherches sur certaines pistes prometteuses (comme c'est le cas de la génétique), et d'approfondir la compréhension des interactions entre l'animal hôte et le microbiome (Morgavi et al. (2013) et Zhang et al. (2016)). Une grande partie de la population des méthanogènes reste encore inconnue (Popova, 2011b), malgré une multiplication des études et des protocoles proposés (métagénomique (Wallace et al., 2015), etc.). Par exemple, nous savons maintenant que le genre *Methanobrevibacter* est plus abondant chez les animaux fortement émetteurs (Wallace et al., 2015). L'avancée de nos connaissances pourrait à terme permettre de déployer suffisamment de technologies économiquement viables pour compenser l'augmentation des émissions liées à la croissance de la demande en viande bovine (Gerber et al., 2013), et certains leviers d'action devraient être transposables à la filière lait.

Bien sûr, la lutte contre la production entérique de méthane ne doit pas être isolée des autres enjeux écologiques liés à l'agriculture. La gestion des déjections (méthaniseurs, etc.) et des sols (forêts, prairies permanentes, etc.) sont des pistes de réduction des émissions de GES. La lutte contre le réchauffement climatique, qu'elle soit à l'échelle de l'agriculture ou de l'ensemble des activités humaines, doit reposer sur une approche globale et multisectorielle.

**AGREMENT SCIENTIFIQUE**

**En vue de l'obtention du permis d'imprimer de la thèse de doctorat vétérinaire**

Je soussigné, DUCOS Alain, Enseignant-chercheur, de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, directeur de thèse, certifie avoir examiné la thèse de **HEGER Simon** intitulée « **Piace de la génétique animale parmi les solutions envisagées pour la mitigation des émissions entériques de méthane par les bovins de races allaitantes.** » et que cette dernière peut être imprimée en vue de sa soutenance.



Fait à Toulouse, le 3 octobre 2016  
Professeur DUCOS Alain  
Enseignant chercheur  
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Vu :  
La Directrice de l'Ecole Nationale  
Vétérinaire de Toulouse  
Isabelle CHMITELIN



Vu :  
Le Président du jury :  
Professeur Patrick CALVAS

Vu et autorisation de l'impression :  
Président de l'Université  
Paul Sabatier  
Monsieur Jean-Pierre VINEL

Le Président de l'Université Paul Sabatier  
par déléation,  
La Vice-Présidente de la CFVU



Régine ANDRE-OBRECHT

M. HEGER Simon  
a été admis(e) sur concours en : 2011  
a obtenu son diplôme d'études fondamentales vétérinaires le : 25/06/2015  
a validé son année d'approfondissement le : 08/07/2016  
n'a plus aucun stage, ni enseignement optionnel à valider.

## Bibliographie

- ANDERSON, K.L., NAGARAJA, T.G., MORRILL, J.L., AVERY, T.B., GALITZER S.J., BOYER, J.E. (1987). Ruminant microbial development in conventionally or early-weaned calves. *Journal of Animal Science*, **64**, 1215-1226.
- ARCHER, J.A., ARTHUR, P.F., HERD, R.M., PARNELL, P.F., PITCHFORD, W.S. (1997). Optimum postweaning test for measurement of growth rate, feed intake, and feed efficiency in British breed cattle. *Journal of Animal Science*, **75**, 2024-2032.
- ARCHIMEDE, H., EUGENE, M., MARIE MAGDELEINE, C., BOVAL, M., MARTIN, C., MORGAVI, D.P., LECOMTE, P., DOREAU, M. (2011). Comparison of methane production between C3 and C4 grasses and legumes. *Animal Feed Science and Technology*, **166-167**, 59-64.
- ARTHUR, P.F., HEARNSHAW, H., STEPHENSON, P.D. (1999). Direct and maternal additive and heterosis effects from crossing *Bos indicus* and *Bos taurus* cattle : cow and calf performance in two environments. *Livestock Production Science*, **57**, 231-241.
- ARTHUR, P.F., RENAND, G., KRAUSS, D. (2001). Genetic and phenotypic relationships among different measures of growth and feed efficiency in young Charolais bulls. *Livestock Production Science*, **68**, 131-139.
- ARTHUR, P.F., DONOGHUE, K.A., HERD, R.M., HEGARTY, R.S. (2009). The role of animal genetic improvement in reducing greenhouse gas emissions from beef cattle. Proceedings of the 18th Biennial Conference of the Association for the Advancement of Animal Breeding and Genetics, Septembre 2009, à Barossa Valley, South Australia. New South Wales, Australia : Primary Industries, Science and Research : Association for the Advancement of Animal Breeding and Genetics, 4 p.
- ARTHUR, P.F., HERD, R.M. (2012). Genetic Improvement of Feed Efficiency. *Feed Efficiency in the Beef Industry*, **7**, 93-103.
- BASARAB, J.A., BEAUCHEMIN, K.A., BARON, V.S., OMINSKI, K.H., GUAN, L.L., MILLER, S.P., CROWLEY, J.J. (2013). Reducing GHG emissions through genetic improvement for feed efficiency : effects on economically important traits and enteric methane production. *Animal*, **7**, 303-315.
- BEAUCHEMIN, K.A., KREUZER, M., O'MARA, F., MCALLISTER, T.A. (2008). Nutritional management for enteric methane abatement : a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, **48**, 21-27.
- BENCHAAR, C., GREATHEAD, H. (2011). Essential oils and opportunities to mitigate enteric methane emissions from ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, **166-167**, 338-355.
- BERMAN, A. (2011). Invited review : Are adaptations present to support dairy cattle productivity in warm climates ? *Journal of Dairy Science*, **94**, 2147-2158.
- BHATTA, R., TAJIMA, K., TAKUSARI, N., HIGUCHI, K., ENISHI, O., KURIHARA, M. (2006). Comparison of sulfur hexafluoride tracer technique, rumen simulation technique and *in vitro* gas production techniques for methane production from ruminant feeds. *International Congress Series*, **1293**, 58-61.
- BHATTA, R., ENISHI, O., KURIHARA, M. (2007). Measurement of methane production from ruminants. *Journal of Animal Science*, **20**, 1305-1318.

- BLAXTER, K.L., CLAPPERTON, J.L. (1965). Prediction of the amount of methane produced by ruminants. *British Journal of Nutrition*, **19**, 511-522.
- BLAXTER, K.L. (1989). *Energy Metabolism in Animals and Man*. New York : Cambridge University Press, 336p, ISBN 0521369312, 9780521369312.
- BODAS, R., LOPEZ, S., FERNANDEZ, M., GARCIA-GONZALEZ, R., RODRIGUEZ, A.B., WALLACE, R.J., GONZALEZ, J.S. (2008). *In vitro* screening of the potential of numerous plant species as antimethanogenic feed additives for ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, **145**, 245-258.
- BROUCEK, J. (2014). Production of Methane Emissions from Ruminant Husbandry : A Review. *Journal of Environmental Protection*, **5**, 1482-1493.
- BROWN, E.G., ANDERSON, R.C., CARSTENS, G.E., GUTTIEREZ-BANUELOS, H., MCREYNOLDS, J.L., SLAY, L.J., CALLAWAY, T.R., NISBET, D.J. (2011). Effects of oral nitroethane administration on enteric methane emissions and ruminal fermentation in cattle. *Animal Feed Science and Technology*, **166-167**, 275-281.
- CAPPER, J.L. (2011). The environmental impact of beef production in the United States : 1977 compared with 2007. *Journal of Animal Science*, **89**, 4249-4261.
- CAPPER, J.L., CADY, R.A., BAUMAN, D.E. (2009). The environmental impact of dairy production : 1944 compared with 2007. *Journal of Animal Science*, **87**, 2160-2167.
- CHAGUNDA, M.G.G., YAN, T. (2011). Do methane measurements from a laser detector and an indirect open-circuit respiration calorimetric chamber agree sufficiently closely ? *Animal Feed Science and Technology*, **165**, 8-14.
- CHAGUNDA, M.G.G. (2013a), Opportunities and challenges in the use of the Laser Methane Detector to monitor enteric methane emissions from ruminants. *Animal*, **7**, 394-400.
- CHAGUNDA, M.G.G., ROSS, D., ROOKE, J., YAN, T., DOUGLAS, J.-L., PORET, L., MCEWAN, N.R., TEERANAVATTANAKUL, P., ROBERTS, D.J. (2013). Measurement of enteric methane from ruminants using a hand-held laser methane detector. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A - Animal Science*, **63**, 68-75.
- CHAUCHEYRAS-DURAND, F., DURAND, H. (2010). Probiotics in animal nutrition and health. *Beneficial Microbes*, **1**, 3-9.
- COLOMBANI, C. (2012). *Modèles de prédiction pour l'évaluation génomique des bovins laitiers français : application aux races Holstein et Montbéliarde*. Thèse de doctorat universitaire, Pathologie, Toxicologie, Génétique et Nutrition, INP Toulouse, 219 p.
- CONVENTION-CADRE SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (2015). Proceedings of the 21<sup>ème</sup> session de la Conférence des Parties. Proposition du Président. Accord de Paris. 39 p.
- CORBETT, J.L., FARRELL, D.J., LENG, R.A., MCCLYMONT, G.L., YOUNG, B.A. (1971). Determination of the energy expenditure of penned and grazing sheep from estimates of carbon dioxide entry rate. *British Journal of Nutrition*, **26**, 277-291.
- CROWE, M.A. (2008). Resumption of ovarian cyclicity in post-partum beef and dairy cows. *Reproduction in Domestic Animals*, **43**, 20-28.

- CRUICKSHANK, G., THOMSON, B., MUIR, P. (2009). Effect of management change on methane output within a sheep flock. *New Zealand Society of Animal Production*, **69**, 170-173.
- CUNDIFF, L.V., VAN VLECK, L.D., HOHENBOKEN, W.D., SILCOX, R., BOWMAN, B., GOLDEN, B., GOULD, L., HOUGH, R., PONDER, K., WILLIAMS, R.E., HYDE, L., CREWS, D., DIKEMAN, M., NORTHCUTT, S.L., GARRICK, D., MARSTON, T.T., MACNEIL, M., OLSON, L.W., PASCHAL, J.C, ROUSE, G., WEABER, B., WHEELER, T., SHACKELFORD, S., WILSON, D.E., DENISE, S., FEUZ, B., GREEN, R.D., TOM HOLM, T., KACHMAN, S.D., MICHAEL TESS, M., BERTRAND, K., QUAAS, R., BULLOCK, D., ENNS, M., MOSER, D., RUPP, G.P., HOUGH, D. (2015). *Guidelines For Uniform Beef Improvement Programs*. Ninth Edition. North Carolina State University, USA : Beef Improvement Federation. 183 p.
- CZERKAWSKI, J.W. (1986). *An introduction to rumen studies*. Oxford, England : Pergamon Press. 236 p. ISBN 008025487X, 9780080254876.
- DE HAAS, Y., WINDIG, J.J., CALUS, M.P.L., DIJKSTRA, J., DE HAAN, M., BANNINK, A., VEERKAMP, R.F. (2011). Genetic parameters for predicted methane production and potential for reducing enteric emissions through genomic selection. *Journal of Dairy Science*, **94**, 6122-6134.
- DEIGHTON, M.H., WILLIAMS, S.R.O., ECKARD, R.J., BOLAND, T.M., MOATE, P.J. (2013). High concordance of CH<sub>4</sub> emissions is possible between the SF<sub>6</sub> tracer and respiration chamber techniques. *Advances in animal biosciences*, **4**, 411.
- DEMEYER, D., FIEVEZ, V. (2000). Ruminants et environnement : la méthanogenèse. *Annales de Zootechnie*, **49**, 95-112.
- DESSUS, B., LAPONCHE, B., LE TREUT, H. (2008). Effet de serre, n'oublions pas le méthane. *La Recherche*, **417**, 46-49.
- DOLLE, J.B., AGABRIEL, J., PEYRAUD, J.-L., FAVERDIN, P., MANNEVILLE, V., RAISON, C., GAC, A., LE GALL, A. (2011). Les gaz à effet de serre en élevage bovin : évaluation et leviers d'action. *INRA Productions Animales*, **24**, 415-432.
- DONOGHUE, K.A., HERD, R.M., BIRD, S.H., ARTHUR, P.F., HEGARTY, R.F. (2013). Preliminary genetic parameters for methane production in Australian beef cattle. *Association for the Advancement of Animal Breeding and Genetics*, **20**, 290-293.
- DONOGHUE, K.A., BIRD-GARDINER, T., ARTHUR, P.F., HERD, R.M., HEGARTY, R.F. (2016). Genetic and phenotypic variance and covariance components for methane emission and postweaning traits in Angus cattle. *Journal of Animal Science*, **94**, 1438-1445.
- DOREAU, M., FERLAY, A. (1995). Effect of dietary lipids on nitrogen metabolism in the rumen: a review. *Livestock Production Science*, **43**, 97-110.
- DOREAU, M., MARTIN, C., EUGENE, M., POPOVA, M., MORGAVI, D.P. (2011a). Leviers d'action pour réduire la production de méthane entérique par les ruminants. *INRA Productions Animales*, **24**, 461-474.
- DOREAU, M., BAUMONT, R., PEREZ, J.-M. (2011b). Gaz à effet de serre en élevage bovin : le méthane. *INRA Productions Animales*, **24**, 411-413.



- DOREAU, M., VAN DER WERF, H.M.G., MICOL, D., DUBROEUCQ, H., AGABRIEL, J., ROCHETTE, Y. (2011c). Enteric methane production and greenhouse gases balance of diets differing in concentrate in fattening phase of a beef production system. *Journal of Animal Science*, **89**, 2518-2528.
- DUDOUE, C. (2010). *La production des bovins allaitants*. 3<sup>ème</sup> édition. Editions France Agricole. 62 p. ISBN : 978-285557-170-6.
- DUTHIE, C.A., ROOKE, J.A., TROY, S., HYSLOP, J.J., ROSS, D.W., WATERHOUSE, A., ROEHE, R. (2016). Impact of adding nitrate or increasing the lipid content of two contrasting diets on blood methaemoglobin and performance of two breeds of finishing beef steers. *Animal*, **10**, 786-795.
- ECKARD, R.J., GRAINGER, C., DE KLEIN, C.A.M. (2010). Options for the abatement of methane and nitrous oxide from ruminant production : A review. *Livestock Science*, **130**, 47-56.
- ELIA, M., LIVESSEY, G. (1988). Theory and validity of indirect calorimetry during net lipid synthesis. *The American Journal of Clinical Nutrition*, **47**, 591-607.
- ELLIS, J.L., KEBREAB, E., ODONDO, N.E., MCBRIDE, B.W., OKINE, E.K., FRANCE, J. (2007). Prediction of methane production from dairy and beef cattle. *Journal of Dairy Science*, **90**, 3456-3467.
- EUGENE, M., MARTIN, C., MIALON, M.M., KRAUSS, D., RENAND, G., DOREAU, M. (2011). Dietary linseed and starch supplementation decreases methane production of fattening bulls. *Animal Feed Science and Technology*, **166-167**, 330-337.
- EXTON, S.C., ARTHUR, P.F., ARCHER, J.A., HERD R.M. (1999). Strategies for industry adoption of genetic improvement of net feed efficiency in beef cattle. *Association for the Advancement of Animal Breeding and Genetics*, **13**, 424-427.
- FITZSIMONS, C., KENNY, D.A., DEIGHTON, M.H., FAHEY, A.G., MCGEE, M. (2013). Methane emissions, body composition, and rumen fermentation traits of beef heifers differing in residual feed intake. *Journal of Animal Science*, **91**, 5789-5800.
- FRANCE, J., BEEVER, D.E., SIDONS, R.C. (1993). Compartmental schemes for estimating methanogenesis in ruminants from isotope dilution data. *Journal of Theoretical Biology*, **164**, 207-218.
- FRANCEAGRI-MER (2014). *Les filières de l'élevage français*. Edition août 2014. Les cahiers de FranceAgriMer. 88 p.
- FRASER, M.D., FLEMING, H.R., MOORBY, J.M. (2014). Traditional vs Modern : Role of Breed Type in Determining Enteric Methane Emissions from Cattle Grazing as Part of Contrasting Grassland-Based Systems. *Plos One*, **9**, 1-8.
- FREETLY, H.C., BROWN-BRANDL, T.M. (2013). Enteric methane production from beef cattle that vary in feed efficiency. *Journal of Animal Science*, **91**, 4826-4831.
- GAC, A., MANNEVILLE, V., RAISON, C., CHARROIN, T., FERRAND, M. (2010). L'empreinte carbone des élevages d'herbivores : présentation de la méthodologie d'évaluation appliquée à des élevages spécialisés lait et viande. *Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants*, **17**, 335-342.

- GARCIA-GONZALEZ, R., LOPEZ, S., FERNANDEZ, M., BODAS, R., GONZALEZ, J.S. (2008). Screening the activity of plants and spices for decreasing ruminal methane production *in vitro*. *Animal Feed Science and Technology*, **147**, 36-52.
- GARDINER, T.D., COLEMAN, M.D., INNOCENTI, F., TOMPKINS, J., CONNOR, A., GARNSWORTHY, P.C., MOORBY, J.M., REYNOLDS, C.K., WATERHOUSE, A., WILLS, D. (2015). Determination of the absolute accuracy of UK chamber facilities used in measuring methane emissions from livestock. *Measurement*, **66**, 272-279.
- GARNSWORTHY P.C. (2004). The environmental impact of fertility in dairy cows : a modelling approach to predict methane and ammonia emissions. *Animal Feed Science and Technology*, **112**, 211-223.
- GARNSWORTHY, P.C., CRAIGON, J., HERNANDEZ-MEDRANO, J.H., SAUNDERS, N. (2012). On-farm methane measurements during milking correlate with total methane production by individual dairy cows. *Journal of Dairy Science*, **95**, 3166-3180.
- GERBER, P.J., VELLINGA, T., OPIO, C., STEINFELD, H. (2011). Productivity gains and greenhouse gas emissions intensity in dairy systems. *Livestock Science*, **139**, 100-108.
- GERBER, P.J., STEINFELD, H., HENDERSON, B., MOTTET, A., OPIO, C., TEMPIO, G. (2013). *Tackling climate change through livestock : a global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 139 p. ISBN 978-92-5-107920-1.
- GIEC : BOLIN, B.T., HOUGHTON, J.T., FILHO, G.M., WATSON, R.T., ZINYOWERA, M.C., BRUCE, J., LEE, H., CALLANDER, B., MOSS, R., HAITES, E., MORENO, R.A., BANURI, T., DADI, Z., GARDNER, B., GOLDEMBERG, J., HOURCADE, J.-C., JEFFERSON, M., MELILLO, J., MINTZER, I., ODINGO, R., PARRY, M., PERDOMO, M., QUENNET-THIELEN, C., VELLINGA, P., SUNDARARAMAN, N. (1995). *Document de synthèse des informations scientifiques et techniques relatives à l'interprétation de l'article 2 de la convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques*. Genève, Suisse : GIEC. 74 p.
- GIEC : PENMAN, J., GYTARSKY, M., HIRAISHI, T., IRVING, W., KRUG, T. (2006). *Guidelines for national greenhouse gas inventories : overview*. Genève, Suisse : GIEC. 12 p.
- GIEC, EQUIPE DE REDACTION : PACHAURI, R.K., REISINGER, A. (2007). *Climate Change 2007 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Genève, Suisse : GIEC. 104 p. ISBN 92-9169-222-0.
- GIEC (2013). *Changements climatiques 2013. Les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs. Résumé technique et foire aux questions. Contribution du groupe de travail I au cinquième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Genève, Suisse : GIEC. 222 p. ISBN 978-92-9169-238-5.
- GIEC, PART A : FIELD, C.B., BARROS, V.R., DOKKEN, D.J., MACH, K.J., MASTRANDREA, M.D., BILIR, T.E., CHATTERJEE, M., EBI, K.L., ESTRADA, Y.O., GENOVA, R.C., GIRMA, B., KISSEL, E.S., LEVY, A.N., MACCRACKEN, S., MASTRANDREA, P.R., WHITE, L.L. ; PART B : BARROS, V.R., FIELD, C.B., DOKKEN, D.J., MASTRANDREA, M.D., MACH, K.J., BILIR, T.E., CHATTERJEE, M., EBI, K.L., ESTRADA, Y.O., GENOVA, R.C., GIRMA, B., KISSEL, E.S., LEVY, A.N., MACCRACKEN, S., MASTRANDREA, P.R., WHITE, L.L. (2014). *Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK, et New

York, USA : Cambridge University Press. 1820 p. ISBN (part A) : 9781107641655 ; ISBN (part B) : 9781107683860.

GILL, M., SMITH, P., WILKINSON, J.M. (2010). Mitigating climate change : the role of domestic livestock. *Animal*, **4**, 323-333.

GODDARD, M.E. (2008). Genomic selection : prediction of accuracy and maximisation of long term response. *Genetica*, **136**, 245-257.

GOEL, G., MAKKAR, H.P.S., BECKER, K. (2009). Inhibition of methanogens by bromochloromethane : effects on microbial communities and rumen fermentation using batch and continuous fermentations. *British Journal of Nutrition*, **101**, 1484-1492.

GOOPY, J.P., DONALDSON, A., HEGARTY, R., VERCOE, P.E., HAYNES, F., BARNETT, M., ODDY, V.H. (2014). Low-methane yield sheep have smaller rumens and shorter rumen retention time. *British Journal of Nutrition*, **111**, 578-585.

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**, 2755-2766.

GRAINGER, C., BEAUCHEMIN, K.A. (2011). Can enteric methane emissions from ruminants be lowered without lowering their production ? *Animal Feed Science and Technology*, **166-167**, 308-320.

GREGORINI, P. (2012). Diurnal grazing pattern : its physiological basis and strategic management. *Animal Production Science*, **52**, 416-430

GUEGAN, E. (thèse en cours). *Les pistes pour la réduction de la production de méthane par les vaches laitières*. Thèse de doctorat vétérinaire, Production animales, ENVA.

GUAN, H., WITTENBERG, K.M., OMINSKI, K.H., KRAUSE, D.O. (2006). Efficacy of ionophores in cattle diets for mitigation of enteric methane. *Journal of Animal Science*, **84**, 1896-1906.

GUNSETT, F.C. (1984). Linear index selection to improve traits defined as ratios. *Journal of Animal Science*, **59**, 1185-1193.

GUO, Y.Q., LIU, J.X., ZHU, W.Y., MCSWEENEY, C. (2007). Shifts of rumen microbial population detected by real-time PCR when methanogenesis is inhibited. *Journal of Animal and Feed Sciences*, **16**, 107-112.

HAALAND, G.L. (1978). *Protected fat in bovine rations*. Ph.D. Dissertation, University Microfilms, Colorado State University, Fort Collins. 115 p.

HAYES, B.J., VISSCHER, P.M., GODDARD, M.E. (2009). Increased accuracy of artificial selection by using the realized relationship matrix. *Genetics Research*, **91**, 47.

HAYES, B.J., LEWIN, H.A., GODDARD, M.E. (2013). The future of livestock breeding : genomic selection for efficiency, reduced emissions intensity, and adaptation. *Trends in Genetics*, **29**, 206-214.

HAYES, B.J., DONOGHUE, K.A., REICH, C.M., MASON, B.A., BIRD-GARDINER, T., HERD, R.M., ARTHUR, P.F. (2016). Genomic heritabilities and genomic estimated breeding values for methane traits in Angus cattle. *Journal of Animal Science*, **94**, 902-908.

- HEGARTY, R.S. (2004). Genotype differences and their impact on digestive tract function of ruminants : a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, **44**, 459-467.
- HEGARTY, R.S., GOOPY, J.P., HERD, R.M., MCCORKELL, B. (2007). Cattle selected for lower residual feed intake have reduced daily methane production. *Journal of Animal Science*, **85**, 1479-1486.
- HEGARTY, R.S., MCEWAN, J.C. (2010). Genetic Opportunities to Reduce Enteric Methane Emissions from Ruminant Livestock. In : *9th World Congress of Genetics Applied to Livestock Production*, Juin 2010, Leipzig, Allemagne. Leipzig : Genetics Applied to Livestock Production, 8 p.
- HEGARTY, R.S. (2013). Applicability of short-term emission measurements for on-farm quantification of enteric methane. *Animal*, **7**, 401-408.
- HERD, R.M., BIRD, S.H., DONOGHUE, K.A., ARTHUR, P.F., HEGARTY, R.S. (2013). Phenotypic associations between methane production traits, volatile fatty acids and animal breeding traits. *Association for the Advancement of Animal Breeding and Genetics*, **20**, 286-289.
- HERD, R.M., ARTHUR, P.F., DONOGHUE, K.A., BIRD, S.H., BIRD-GARDINER, T., HEGARTY, R.S. (2014). Measures of methane production and their phenotypic relationships with dry matter intake, growth, and body composition traits in beef cattle. *Journal of Animal Science*, **92**, 5267-5274.
- HERD, R.M., VELAZCO, J.I., ARTHUR, P.F., HEGARTY, R.S. (2016). Proxies to adjust methane production rate of beef cattle when the quantity of feed consumed is unknown. *Animal Production Science*, **56**, 231-237.
- HERRERO, M., HENDERSON, B., HAVLIK, P., THORNTON, P.K., CONANT, R.T., SMITH, P., WIRSENIUS, S., HRISTOV, A.N., GERBER, P., GILL, M., BUTTERBACH-BAHL, K., VALIN, H., GARNETT, T., STEHFEST, E. (2016). Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. *Nature Climate Change*, **6**, 452-461.
- HESS, H.D., KREUZER, M., DIAZ, T.E., LASCANO, C.E., CARULLA, J.E., SOLIVA, C.R., MACHMÜLLER, A. (2003). Saponin rich tropical fruits affect fermentation and methanogenesis in faunated and defaunated rumen fluid. *Animal Feed Science and Technology*, **109**, 79-94.
- HEYWOOD, L.H., WOOD, A.K.W. (1985). Thoracic oesophageal motor activity during eructation in sheep. *Q. Journal of Experimental Physiology*, **70**, 603-613.
- HINDRICHSEN, I.K., WETTSTEIN, H.R., MACHMULLER, A., KREUZER, M. (2006). Methane emission, nutrient degradation and nitrogen turnover in dairy cows and their slurry at different milk production scenarios with and without concentrate supplementation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **113**, 150-161.
- HOLTSHAUSEN, L., CHAVES, A.V., BEAUCHEMIN, K.A., MCGINN, S.M., MCALLISTER, T.A., ODONGO, N.E., CHEEKE, P.R., BENCHAAR, C. (2009). Feeding saponin-containing *Yucca schidigera* and *Quillaja saponariata* decrease enteric methane production in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, **92**, 2809-2821.
- HRISTOV, A.N., MCALLISTER, T.A., VAN HERK, F.H., CHENG, K.J., NEWBOLD, C.J., CHEEKE, P.R. (1999). Effect of *Yucca schidigera* on ruminal fermentation and nutrient digestion in heifers. *Journal of Animal Science*, **77**, 2554-2563.

HRISTOV, A.N., OH, J., FIRKINS, J.L., DIJKSTRA, J., KEBREAB, E., WAGHORN, G., MAKKAR, H.P.S., ADESOGAN, A.T., YANG, W., LEE, C., GERBER, P.J., HENDERSON, B., TRICARICO, J.M. (2013a). Special topics—Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations : I. A review of enteric methane mitigation options. *Journal of Animal Science*, **91**, 5045-5069.

HRISTOV, A.N., OTT, T., TRICARICO, J., ROTZ, A., WAGHORN, G., ADESOGAN, A., DIJKSTRA, J., MONTES, F., OH, J., KEBREAB, E., OOSTING, S.J., GERBER, P.J., HENDERSON, B., MAKKAR, H.P.S., FIRKINS, J.L. (2013b). SPECIAL TOPICS—Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations : III. A review of animal management mitigation options. *Journal of Animal Science*, **91**, 5095-5113.

HUANG, W., KIRKPATRICK, B.W., ROSA, G.J.M., KHATIB, H. (2010). A genome-wide association study using selective DNA pooling identifies candidate markers for fertility in Holstein cattle. *Animal Genetics*, **41**, 570-578.

HUTCHESON, J.P. (1994). *Anabolic implant effects on body composition, visceral organ mass and energetics of beef steers*. Ph.D. Dissertation, Colorado State University, Fort Collins, 242 p.

ITABASHI, H., KOBAYASHI, T., MATSUMOTO, M. (1984). The effects of rumen ciliate protozoa on energy metabolism in some constituents in rumen fluid and blood plasma of goats. *Japanese Journal of Zoo and Wildlife Medicine*, **55**, 248-256.

JAYANEGARA, A., WINA, E., SOLIVA, C.R., MARQUARDT, S., KREUZER, M., LEIBER, F. (2011). Dependence of forage quality and methanogenic potential of tropical plants on their phenolic fractions as determined by principal component analysis. *Animal Feed Science and Technology*, **163**, 231-243.

JARVIS, G.N., STRÖMPL, C., BURGESS, D.M., SKILLMAN, L.C., MOORE, E.R.B., JOBLIN, K.N. (2000). Isolation and identification of ruminal methanogens from grazing cattle. *Current Microbiology*, **40**, 327-332.

JOHNSON, D.E., BRANINE, M., WARD, G.M., CARMEAN, B., LODMAN, D. (1991). *Beef Program Report*. Colorado, USA : Colorado State University, Department of Animal Science, 8 p.

JOHNSON, K., HUYLER, M., WESTBERG, H., LAMB, B., ZIMMERMAN, P. (1994). Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a sulfur hexafluoride tracer technique. *Environmental Science and Technology*, **28**, 359-362.

JOHNSON, K.A., JOHNSON, D.E. (1995). Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*, **73**, 2483-2492.

JONES, F.M., PHILLIPS, F.A., NAYLOR, T., MERCER, N.B. (2011). Methane emissions from grazing Angus beef cows selected for divergent residual feed intake. *Animal Feed Science and Technology*, **166-167**, 302-307.

JOUANY, J.P. (1994). Les fermentations dans le rumen et leur optimisation. *INRA Productions Animales*, **7**, 207-225.

JUDD, M.J., KELLIER, F.M., ULYATT, M.J., LASSEY, K.R., TATE, K.R., SHELTON, D., HARVEY, M.J., WALKER, C.F. (1999). Net methane emissions from grazing sheep. *Global Change Biology*, **5**, 647-657.

- KANDEL, P.B., SOYEURT, H., GENGLER, N. (2012). Estimation of genetic parameters for methane indicator traits based on milk fatty acids in dual purpose Belgian blue cattle. *Communications in Agricultural and Applied Biology Science*, **77**, 21-25.
- KIRCHGESSNER, WINDISCH, W., MÜLLER, H.L. (1994) Nutritional Factors for the Quantification of Methane Production. Proceedings of the 8th International Symposium on Ruminant Physiology, Willingen, Germany. Stuttgart, Germany : Ferdinand Enke Verlag, 16 p.
- KLEVENHUSEN, F., ZEITZ, J.O., DUVAL, S., KREUZER, M., SOLIVA, C.R. (2011). Garlic oil and its principal component diallyl disulfide fail to mitigate methane, but improve digestibility in sheep. *Animal Feed Science and Technology*, **166-167**, 356-363.
- KNIGHT, T., RONIMUS, R.S., DEY, D., TOOTILL, C., NAYLOR, G., EVANS, P., MOLANO, G., SMITH, A., TAVENDALE, M., PINARES-PATIÑO, C.S., CLARK, H. (2011). Chloroform decreases rumen methanogenesis and methanogen populations without altering rumen function in cattle. *Animal Feed Science and Technology*, **166**, 101-112.
- LAMB, B.K., WESTBERG, H.H., ALLWINE, G. (1986). Isoprene emission fluxes determined by an atmospheric tracer technique. *Atmospheric Environment*, **20**, 1-8.
- LASSEN, J., LOVENDAHL, P., MADSEN, J. (2012). Accuracy of noninvasive breath methane measurements using fourier transform infrared methods on individual cows. *Journal of Dairy Science*, **95**, 890-898.
- LASSEN, J., LOVENDAHL, P. (2016). Heritability estimates for enteric methane emissions from Holstein cattle measured using noninvasive methods. *Journal of Dairy Science*, **99**, 1959-1967.
- LEEDLE, J.A., GREENING, R.C. (1988). Postprandial changes in methanogenic and acidogenic bacteria in the rumens of steers fed high- or low-forage diets once daily. *Applied and Environmental Microbiology*, **54**, 502-506.
- LIANG, J.B., TERADA, F., HAMAGUCHI, I. (1989). Efficacy of using the face mask technique for the estimation of daily heat production of cattle. In : *Energy Metabolism of farm Animals*, 18-24 Sep 1988, Lunteren, Pays-Bas. Wageningen, Pays-Bas : Van Der Honing et Close, 4 p.
- LINDGREN, E. (2009). *Validation of rumination measurement equipment and the role of rumination in dairy cow time budgets*. Master's thesis in animal science, Swedish University of Agricultural Sciences, 40 p.
- LLONCH, P., HASKELL, M.J., DEWHURST, R.J., TURNER, S.P. (2016). Current available strategies to mitigate greenhouse gas emissions in livestock systems : an animal welfare perspective. *Animal*, **FirstView Article**, 1-11.
- LOVETT, D.K., LOVELL, S., STACK, L., CALLAN, J., FINLAY, M., CONOLLY, J., O'MARA, F.P. (2003). Effect of forage/concentrate ratio and dietary coconut oil level on methane output and performance of finishing beef heifers. *Livestock Production Science*, **84**, 135-146.
- MACHMÜLLER, A., SOLIVA CARLA, R., MICHAEL, K. (2003). Effect of coconut oil and defaunation treatment on methanogenesis in sheep. *Reproduction Nutrition Development*, **43**, 41-55.
- MAO, H.L., WANG, J.K., ZHOU, Y.Y., LIU, J.X. (2010). Effects of addition of tea saponins and soybean oil on methane production, fermentation and microbial population in the rumen of growing lambs. *Livestock Science*, **129**, 56-62.

- MARTIN, C., MORGAVI, D., DOREAU, M., JOUANY, J.P. (2006). Comment réduire la production de méthane chez les ruminants ? *Fourrages*, **187**, 283-300.
- MARTIN, C., MORGAVI, D.P., DOREAU, M. (2010). Methane mitigation in ruminants : from microbe to the farm scale. *Animal*, **4**, 351-365.
- MARTIN, C., POMIES, D., FERLAY, A., ROCHETTE, Y., MARTIN, B., CHILLIARD, Y., MORGAVI, D.P., DOREAU, M. (2011). Methane output and rumen microbiota in dairy cows in response to longterm supplementation with linseed or rapeseed of grass silage or pasture based diets. *New Zealand Society of Animal Production*, **71**, 243-247.
- MARTIN, J. (2012). *L'engraissement de taurillons : oui, à condition que...* Communication des Réseaux d'Élevage, février 2012. Charleville-Mézières : Chambre d'Agriculture Ardennes, 5 p.
- MATHERS, J.C., WALTERS, D.E. (1982). Variation in methane production by sheep fed every two hours. *Journal of Agricultural Science*, **98**, 633-638.
- MCALLISTER, T.A., NEWBOLD, C.J. (2008). Redirecting rumen fermentation to reduce methanogenesis. *Australian Journal of Agricultural Research*, **48**, 7-13.
- MCCARTNEY, C.A., BULL, I.D., DEWHURST, R.J. (2013). Chemical markers for rumen methanogens and methanogenesis. *Animal*, **7**, 409-417.
- MCCAUGHEY, W.P., WITTENBERG, K., CORRIGAN, D. (1999). Impact of pasture type on methane production by lactating beef cows. *Canadian Journal of Animal Science*, **79**, 221-226.
- MCCAULEY E.H., DZIUK H.E. (1965). Correlation of motility and gas collection from goat rumen. *American Journal of Physiology*, **209**, 1152-1154.
- MCCRABB, G.J., KURIHARA, M., HUNTER, R.A. (1998). The effect of finishing strategy on lifetime methane production for beef cattle in northern Australia. *Nutrition Society of Australia*, **22**, 55 p.
- MCCRABB, G.J., HUNTER, R.A. (1999). Prediction of methane emissions from beef cattle in tropical production systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, **50**, 1335-1339.
- MCDONNELL, R.P., HART, K.J., BOLAND, T.M., KELLY, A.K., MCGEE, M., KENNY, D.A. (2016). Effect of divergence in phenotypic residual feed intake on methane emissions, ruminal fermentation, and apparent whole-tract digestibility of beef heifers across three contrasting diets. *Journal of Animal Science*, **94**, 1179-1193.
- MCGINN, S.M., BEAUCHEMIN, K.A., IWAASA, A.D., MCALLISTER, T.A. (2006). Assessment of the sulfur hexafluoride (SF6) tracer technique for measuring enteric methane emissions from cattle. *Journal of Environmental Quality*, **35**, 1686-1691.
- MCLEAN, J.A., TOBIN, G. (1987). *Animal and human calorimetry*. New York : Cambridge university press. 356 p. ISBN 9780521048859.
- MERCADANTE, M.E.Z., CALIMAN, A.P., CANESIN, R.C., BONILHA, S.F.M., BERNDT, A., FRIGHETTO, R.T.S., MAGNANI, E., BRANCO, R.H. (2015). Relationship between residual feed intake and enteric methane emission in Nelore cattle. *Revista Brasileira de Zootecnia*, **44**, 255-262.
- MEUWISSEN, T.H., HAYES, B.J., GODDARD M.E. (2001). Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps. *Genetics*, **157**, 1819-1829.

- MICHAL, J.J., WHITE, R.R., GUEROUALI, A., JOHNSON, K.A. (2013). An examination of the ranking of methane emissions measurements from growing beef heifers fed different forage diets over time. *Advances in Animal Biosciences*, **4**, 536 p.
- MILLER, T.L., WOLIN, M.J. (1985). *Methanosphaera stadtmaniae* gen. nov., sp. nov. : a species that forms methane by reducing methanol with hydrogen. *Archives of Microbiology*, **141**, 116-122.
- MILLER, T.L., LIN, C. (2002). Description of *Methanobrevibacter gottschalkii* sp. nov., *Methanobrevibacter thaueri* sp. nov., *Methanobrevibacter woesei* sp. nov. and *Methanobrevibacter wolinii* sp. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, **52**, 819-822.
- MOATE, P.J., WILLIAMS, S.R.O., GRAINGER, C., HANNAH, M.C., PONNAMPALAM, E.N., ECKARD, R.J. (2011). Influence of cold-pressed canola, brewers grains and hominy meal as dietary supplements suitable for reducing enteric methane emissions from lactating dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*, **166-167**, 254-264.
- MOE, P.W., TYRRELL, H.F. (1979). Methane production in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, **62**, 1583-1586.
- MOHAMMED, N., AJISAKA, N., LILA, Z.A., HARA, K., MIKUNI, K., HARA, K., KANDA, S., ITABASHI, H. (2004). Effect of Japanese horseradish oil on methane production and ruminal fermentation *in vitro* and in steers. *Journal of Animal Science*, **82**, 1839-1846.
- MORGAVI, D.P., MARTIN, C., BOUDRA, H. (2010). Fungal secondary metabolites reduce rumen methane production *in vitro* and *in vivo*. In : *Greenhouse Gases and Animal Agriculture Conference*, du 3 au 8 octobre 2010. Banff, Canada. Clermont-Ferrand, France : INRA Productions Animales, p. 164-165.
- MORGAVI, D.P., KELLY, W.J., JANSSEN, P.H., ATTWOOD, G.T. (2013). La (méta) génomique des microorganismes du rumen et ses applications à la production des ruminants. *INRA Productions Animales*, **26**, 347-362.
- MORTOLA, J.P., LANTHIER, C. (2005). Breathing frequency in ruminants : a comparative analysis with non-ruminant mammals. *Respiratory Physiology and Neurobiology*, **145**, 265-277.
- MOSONI, P., MARTIN, C., FORANO, E., MORGAVI, D.P. (2011). Long-term defaunation increases the abundance of cellulolytic ruminococci and methanogens but does not affect the bacterial and methanogen diversity in the rumen of sheep. *Journal of Animal Science*, **89**, 783-791.
- MOSS, A., JOUANY, J.P., NEWBOLD, C.J. (2000). Methane production by ruminants : its contribution to global warming. *Annales de Zootechnie*, **49**, 231-253.
- MÜNGER, A., KREUZER, M. (2008). Absence of persistent methane emission differences in three breeds of dairy cows. *Animal Production Science*, **48**, 77-82.
- MURRAY, R.M., BRYANT, A.M., LENG, R.A. (1976). Rates of production of methane in the rumen and large intestine of sheep. *British Journal of Nutrition*, **36**, 1-14.
- MURRAY R.M., BRYANT A.M., LENG R.A. (1978). Methane production in the rumen and lower gut of sheep given lucerne chaff : effect of level of intake. *British Journal of Nutrition*, **39**, 337-345.



- NEWBOLD C.J., LASSALAS B., JOUANY J.P. (1995). The importance of methanogens associated with ciliate protozoa in ruminal methane production *in vitro*. *Letters in Applied Microbiology*, **21**, 230-234.
- NEWBOLD, C.J., EL HASSAN, S.M., WANG, J., ORTEGA, M.E., WALLACE, R.J. (1997). Influence of foliage from African multipurpose trees on activity of rumen protozoa and bacteria. *British Journal of Nutrition*, **78**, 237-249.
- NEWBOLD, C.J., RODE, L.M. (2006). Dietary additives to control methanogenesis in the rumen. *International Congress Series* **1293**, 138-147.
- NKRUMAH, J.D., OKINE, E.K., MATHISON, G.W., SCHMID, K., LI, C., BASARAB, J.A., PRICE, M.A., WANG, Z., MOORE, S.S. (2006). Relationships of feedlot feed efficiency, performance, and feeding behavior with metabolic rate, methane production, and energy partitioning in beef cattle. *Journal of Animal Science*, **84**, 145-153.
- OUWERKERK, D, TURNER, A.F., KLIEVE, A.V. (2008). Diversity of methanogens in ruminants in Queensland. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, **48**, 722–725.
- PELLERIN, S., BAMIÈRE, L., ANGERS, D., BELINE, F., BENOIT, M., BUTAULT, J.P., CHENU, C., COLNENNE-DAVID, C., DE CARA, S., DELAME, N., DOREAU, M., DUPRAZ, P., FAVERDIN, P., GARCIA-LAUNAY, F., HASSOUNA, M., HENAULT, C., JEUFFROY, M.H., KLUMPP, K., METAY, A., MORAN, D., RECOUS, S., SAMSON, E., SAVINI, I., PARDON, L. (2013). *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques*. Synthèse du rapport d'étude. Paris, France : INRA. 92 p.
- PEN, B., TAKAURA, K., YAMAGUCHI, S., ASA, R., TAKAHASHI, J. (2007). Effects of *Yucca schidigera* and *Quillaja saponaria* with or without  $\beta$  1-4 galacto-oligosaccharides on ruminal fermentation, methane production and nitrogen utilization in sheep. *Animal Feed Science and Technology*, **138**, 75-88
- PICCIONE, G., CAOLA, G., MORTOLA, J.P. (2004). Day/night pattern of arterial blood gases in the cow. *Respiratory Physiology and Neurobiology*, **140**, 33-41.
- PICKERING, N.K., DE HAAS, Y., BASARAB, J., CAMMACK, K., HAYES, B., HEGARTY, R.S., LASSEN, J., MCEWAN, J.C., MILLER, S., PINARES-PATIÑO, S., SHACKELL, P., VERCOE, P., ODDY, V.H. (2013). *Breeding ruminants that emit less methane – development of consensus methods for measurement of methane*. White Paper. Animal Selection, Genetics and Genomics Network. 57 p.
- PICKERING, N.K., ODDY, V.H., BASARAB, J., CAMMACK, K., HAYES, B., HEGARTY, R.S., LASSEN, J., MCEWAN, J.C., MILLER, S., PINARES-PATIÑO, C.S., DE HAAS, Y. (2015a). Animal board invited review : genetic possibilities to reduce enteric methane emissions from ruminants. *Animal*, **9**, 1431-1440.
- PICKERING, N.K., CHAGUNDA, M.G.G., BANOS, G., MRODE, R., MCEWAN, J.C., WALL, E. (2015b). Genetic parameters for predicted methane production and laser methane detector measurements. *Journal of Animal Science*, **93**, 11-20.
- PINARES-PATIÑO, C.S., MCEWAN, J.C., DODDS, K.G., CARDENAS, E.A., HEGARTY, R.S., KOOLAARD, J.P., CLARK, H. (2011). Repeatability of methane emissions from sheep. *Animal Feed Science and Technology*, **166-167**, 210-218.

- PINARES-PATIÑO, C.S., LASSEY, K.R., MARTIN, R.J., MOLANO, G., FERNANDEZ, M., MACLEAN, S., SANDOVAL, E., LUO, D., CLARK, H. (2011b). Assessment of the sulphur hexafluoride (SF6) tracer technique using respiration chambers for estimation of methane emissions from sheep. *Animal Feed Science and Technology*, **166-167**, 201-209.
- PINARES-PATIÑO, C.S., HICKEY, S.M., YOUNG, E.A., DODDS, K.G., MACLEAN, S., MOLANO, G., SANDOVAL, E., KJESTRUP, H., HARLAND, R., PICKERING, N.K., MCEWAN, J.C. (2013). Heritability estimates of methane emissions from sheep. *Animal*, **7**, 316-321.
- POPOVA, M., MARTIN, C., ROCHETTE, Y., GRAVIOU, D., MORGAVI, D.P. (2010). Methane emissions and rumen methanogens in sheep harbouring or not protozoa. In : *7th Joint Symposium of Rowett. Gut Microbiology : new insights into gut microbial ecosystems*, Juin 2010, Aberdeen, Royaume-Uni. Clermont-Ferrand-Theix : INRA, 1p.
- POPOVA, M. (2011a). Structure et activité de la communauté des Archaea méthanogènes du rumen en relation avec la production de méthane par les ruminants. Thèse de doctorat universitaire, nutrition et science des aliments, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 264 p.
- POPOVA, M., MORGAVI, D.P., DOREAU, M., MARTIN, C. (2011b). Production de méthane et interactions microbiennes dans le rumen. *INRA Productions Animales*, **24**, 447-460.
- POPOVA, M., MARTIN, C., EUGENE, M., MIALON, M.M., DOREAU, M., MORGAVI, D.P. (2011). Diet composition influences methanogenic archaea diversity and activity in the rumen of feedlot bulls. *Animal Feed Science and Technology*, **166**, 113-121.
- PRIEUR, D. (2008). Jusqu'où la vie se niche-t-elle ? *Pour la Science*, **60**, p41.
- RENAND, G., MAUPETIT, D. (2016). Assessing individual differences in enteric methane emission among beef heifers using the GreenFeed Emission Monitoring system : effect of the length of testing period on precision. *Animal Production Science*, **56**, 218-223.
- RENAND, G., FOUILLOUX, M.N., MENISSIER, F. (non publié a). Genetic improvement of beef production traits by performance testing beef bulls in France.
- RENAND, G., VINET, A., MAUPETIT, D. (non publié b). Relations entre émissions de méthane entérique et efficacité alimentaire chez des génisses charolaises en croissance.
- RODHE, H. (1990). A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect. *Science*, **249**, 1217-1219.
- RICCI, P., CHAGUNDA, M.G.G., ROOKE, J., M HOUDIJK, J.G., DUTHIE, C.-A., HYSLOP, J., ROEHE, R., WATERHOUSE, A. (2014). Evaluation of the laser methane detector to estimate methane emissions from ewes and steers. *Journal of Animal Science*, **92**, 5239-5250.
- RICHARDSON, E.C., AND HERD, R.M. (2004). Biological basis for variation in residual feed intake in beef cattle. 2. Synthesis of results following divergent selection. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, **44**, 431-440.
- ROBINSON, D.L. (2009). Improving the accuracy of selecting animals for reduced methane emissions. In : *18th Conference of the Association for the Advancement of Animal Breeding and Genetics*, du 28 septembre au 1 octobre 2009, Barossa Valley, South Australia. New South Wales, Australia : Primary Industries, Science and Research, 644-647.
- ROGER, P., LE MER, J., JOULIAN, C. (1999). L'émission et la consommation de méthane par les sols : mécanismes, bilan, contrôle. *Académie d'Agriculture de France*, **85**, 193-210.

- ROMERO-PEREZ, A., BEAUCHEMIN, K.A., KINDERMANN, M., MCGINN, S.M., OKINE, E.K., GUAN, L.L., OBA, M., DUVAL, S.M. (2014). The potential of 3-nitrooxipropanol to lower enteric methane emissions from beef cattle. *Journal of Animal Science*, **92**, 4682-4693.
- SAUVANT, D., GIGER-REVERDIN, S., SERMENT, A., BROUDISCOU, L. (2011). Influences des régimes et de leur fermentation dans le rumen sur la production de méthane par les ruminants. *INRA Productions Animales*, **24**, 433-446.
- SEJIAN, V., LAL, R., LAKRITZ, J., EZEJI, T. (2011) Measurement and Prediction of Enteric Methane Emission. *International Journal of Biometeorology*, **55**, 1-16
- SMITH, A.H., ZOETENDAL, E., MACKIE, R.I. (2005). Bacterial mechanisms to overcome inhibitory effects of dietary tannins. *Microbial Ecology*, **50**, 197-205.
- SMITH, P., HABERL, H., POPP, A., ERB, K., LAUK, C., HARPER, R., TUBIELLO, F.N., DE SIQUEIRA PINTO, A., JAFARI, M., SOHI, S., MASERA, O., BÖTCHER, H., BERNDES, G., BUSTAMANTE, M., AHAMMAD, H., CLARK, H., DONG, H., ELSIDDIG, E.A., MBOW, C., RAVINDRANATH, N.H., RICE, C.W., ROBLEDOR ABAD, C., ROMANOVSKAYA, A., SPERLING, F., HERRERO, M., HOUSE, J.I., ROSE, S. (2013). How much land based greenhouse gas mitigation can be achieved without compromising food security and environmental goals ? *Global Change Biology*, **19**, 2285-2302.
- STAERFL, S.M., ZEITZ, J.O., KREUZER, M., SOLIVA, C.R. (2012). Methane conversion rate of bulls fattened on grass or maize silage as compared with the IPCC default values, and the longterm methane mitigation efficiency of adding acacia tannin, garlic, maca and lupine . *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **148**, 111-120.
- STEHFEST, E., BOUWMAN, L., VAN VUUREN, D.P., DEN ELZEN, M.G., EICKHOUT, B., KABAT, P. (2009). Climate benefits of changing diet. *Climatic change*, **95**, 83-102
- STORM, I.M.L.D., HELLWING, A.L.F., NIELSEN, N.I., MADSEN, J. (2012). Methods for Measuring and Estimating Methane Emission from Ruminants. *Animals*, **2**, 160-183.
- TAKENAKA, A., ITABASHI, H. (1995). Changes in the population of some functional groups of rumen bacteria including methanogenic bacteria by changing the rumen ciliates in calves. *The Journal of General and Applied Microbiology*, **41**, 377-387.
- TAVENDALE, M.H., MEAGHER, L.P., PACHECO, D., WALKER, N., ATTWOOD, G.T., SIVAKUMARAB, S. (2005). Methane production from *in vitro* rumen incubations with *Lotus pedunculatus* and *Medicago sativa*, and effects of extractable condensed tannin fractions on methanogenesis. *Animal Feed Science and Technology*, **123-124**, 403-419.
- TEATHER, R.M., MAHADEVAN, S., ERFLE, J.D., SAUER, F.D. (1984). Negative correlation between protozoal and bacterial levels in rumen samples and its relation to the determination of dietary effects on the rumen microbial population. *Applied and Environmental Microbiology*, **47**, 566-570.
- TEKIPPE, J.A., HRISTOV, A.N, HEYLER, K.S., CASSIDY, T.W., ZHELJAZKOV, V.D., FERREIRA, J.F.S, KARNATI, S.K., VARGA, G.A. (2011). Rumen fermentation and production effects of *Origanum vulgare L.* leaves in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, **94**, 5065-5079.
- THORNTON, P.K. (2010). Livestock production : recent trends, future prospects. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, **365**, 2853-2867.
- TOMASULA, P.M., NUTTER, D.W. (2011). Mitigation of greenhouse gas emissions in the production of fluid milk. *Food and Nutrition Research*, **62**, 42-88.

- TORRENT, J. (1994). *Autotrophic acetogenesis in ruminants*. Ph.D. Dissertation, Colorado State Univ., Fort Collins, 221 p.
- TUBIELLO, F.N., SALVATORE, M., ROSSI, S., FERRARA, A., FITTON, N., SMITH, P. (2013). The FAOSTAT database of greenhouse gas emissions from agriculture. *Environmental Research Letters*, **8**, 10 p.
- ULYATT, M.J., BAKER, S.K., MCCRABB, G.J., LASSEY, K.R. (1999). Accuracy of SF<sub>6</sub> tracer technology and alternatives for field measurements. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, **50**, 1329-1334.
- UNEP (2012). *The emissions gap report 2012*. A UNEP Synthesis Report. Nairobi : United Nations Environment Programme. 62 p. ISBN : 978-92-807-3303-7.
- URBAN, M.C. (2015). Accelerating extinction risk from climate change. *Science*, **348**, 571-573.
- VAN KESSEL, J.A.S., RUSSELL, J.B. (1996). The effect of pH on ruminal methanogenesis. *Federation of European Microbiological Societies, Microbiology Ecology*, **20**, 205-210.
- VAN ZIJDERVELD, S.M., GERRITS, W.J.J., APAJALAHTI, J.A., NEWBOLD, J.R., DIJKSTRA, J., LENG, R.A., PERDOK, H.B. (2010a). Nitrate and sulfate : Effective alternative hydrogen sinks for mitigation of ruminal methane production in sheep. *Journal of Dairy Science*, **93**, 5856-5866.
- VAN ZIJDERVELD, S.M., DIJKSTRA, J., GERRITS, W.J.J., NEWBOLD, J.R., PERDOK, H.B. (2010b). Dietary nitrate persistently reduces enteric methane production in lactating dairy cows. In : *4th international conference on greenhouse gases and animal agriculture*, du 3 au 8 octobre 2010, Banff, Canada. Banff, Canada : Greenhouse Gases and Animal Agriculture, p. 127.
- VAN ZIJDERVELD, S.M., FONKEN, B., DIJKSTRA, J., GERRITS, W.J.J., PERDOK, H.B., FOKKING, W., NEWBOLD, J.R. (2011). Effects of a combination of feed additives on methane production, diet digestibility, and animal performance in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, **94**, 1445-1454.
- VELAZCO, J.I., MAYER, D.G., ZIMMERMAN, S., HEGARTY, R.S. (2016). Use of short-term breath measures to estimate daily methane production by cattle. *Animal*, **10**, 25-33.
- 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**, 265-272.
- VERMOREL, M., JOUANY, J.P., EUGENE, M., SAUVANT, D., NOBLET, J., DOURMAD, J.-Y. (2008). Evaluation quantitative des émissions de méthane entérique par les animaux d'élevage en 2007 en France. *INRA Productions Animales*, **21**, 403-418.
- VLAMING, J.B., LOPEZ-VILLALOBOS, N., BROOKES, I.M., HOSKIN, S.O., CLARK, H. (2008). Within- and between-animal variance in methane emissions in non-lactating dairy cows. *Animal Production Science*, **48**, 124-127.
- WAGHORN, G. (2008). Beneficial and detrimental effects of dietary condensed tannins for sustainable sheep and goat production - Progress and challenges. *Animal Feed Science and Technology*, **147**, 116-139.
- WALL, E., SIMM, G., MORAN, D. (2010). Developing breeding schemes to assist mitigation of greenhouse gas emissions. *Animal*, **4**, 366.

- WALLACE, R.J., ROOKE, J.A., MCKAIN, N., DUTHIE, C.-A., HYSLOP, J.J., ROSS, D.W., WATERHOUSE, A., WATSON, M., ROEHE, R. (2015). The rumen microbial metagenome associated with high methane production in cattle. *BioMed Central, Genomics*, **16**, 839-852.
- WANAPAT, M., PILAJUN, R., KONGMUN, P. (2009). Ruminant ecology of swamp buffalo as influenced by dietary sources. *Animal Feed Science and Technology*, **151**, 205-214.
- WANG, Z. (2006). Test duration for growth, feed intake, and feed efficiency in beef cattle using the GrowSafe System. *Journal of Animal Science*, **84**, 2289-2298.
- WANG, C.J., WANG, S.P., ZHOU, H. (2009). Influences of flavomycin, ropadiar, and saponin on nutrient digestibility, rumen fermentation, and methane emission from sheep. *Animal Feed Science and Technology*, **148**, 157-166.
- WESTBERG, C., ZIMMERMAN, P., LAMB, B.K. (1990). *Preliminary measurements of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emission rates from cattle, swine and poultry production facilities*. Final report to U.S. EPA. Chicago, USA : EPA #68-02-4601.
- WHITELAW, F.G., EADIE, W.J., BRUCE, L.A., SHAND, W.A. (1984). Methane formation in faunated and ciliate-free cattle and its relationship with rumen volatile fatty acid proportions. *British Journal of Nutrition*, **52**, 261-275.
- WILLIAMS, Y.J., POPOVSKI, S., REA, S.M., SKILLMAN, L.C., TOOVEY, A.F., NORTHWOOD, K.S., WRIGHT, A.D. (2009). A vaccine against rumen methanogens can alter the composition of archaeal populations. *Applied and Environmental Microbiology*, **75**, 1860-1866.
- WRIGHT, A.D.G., KENNEDY, P., O'NEILL, C.J., TOOVEY, A.F., POPOVSKI, S., REA, S.M., PIMM, C.L., KLEIN, L. (2004). Reducing methane emissions in sheep by immunization against rumen methanogens. *Vaccine*, **29-30**, 3976-3985.
- XUE, B., YAN, T., FERRIS, C.F., MAYNE, C.S. (2011). Milk production and energy efficiency of Holstein and Jersey-Holstein crossbred dairy cows offered diets containing grass silage. *Journal of Dairy Science*, **94**, 1455-1464.
- YAN, 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*, **1293**, 123-126.
- ZHANG, C.M., GUO, Y.Q., YUAN, Z.P., WU, Y.M., WANG, J.K., LIU, J.X., ZHU, W.Y. (2008). Effect of octadeca carbon fatty acids on microbial fermentation, methanogenesis and microbial flora *in vitro*. *Animal Feed Science and Technology*, **146**, 259-269.
- ZHANG, Z., XU, D., WANG, L., HAO, J., WANG, J., ZHOU, X., WANG, W., QIU, Q., HUANG, X., ZHOU, J., LONG, R., ZHAO, F., SHI, P. (2016). Convergent Evolution of Rumen Microbiomes in High-Altitude Mammals. *Current Biology*, **26**, 1873-1879.
- ZHOU, M., HERNANDEZ-SANABRIA, E., GUAN, L.L. (2010). Characterization of variation in rumen methanogenic communities under different dietary and host feed efficiency conditions, as determined by PCR-Denaturing Gradient Gel Electrophoresis analysis. *Applied and Environmental Microbiology*, **76**, 3776-3786.

## Webographie

ACTU-ENVIRONNEMENT<sup>a</sup>, « *Il y a comme une dérive lente dans l'usage du terme "équivalent CO<sub>2</sub>"* » [en ligne]. Disponible sur : [http://www.actu-environnement.com/ae/news/derive\\_usage\\_equivalent\\_carbone\\_herve\\_le\\_treut\\_4720.php4](http://www.actu-environnement.com/ae/news/derive_usage_equivalent_carbone_herve_le_treut_4720.php4) (consulté le 19/06/2016).

ACTU-ENVIRONNEMENT<sup>b</sup>, *Réduire les émissions de méthane améliorerait l'efficacité de la lutte à court terme* [en ligne]. Disponible sur : [http://www.actu-environnement.com/ae/news/emission\\_methane\\_9465.php4](http://www.actu-environnement.com/ae/news/emission_methane_9465.php4) (consulté le 19/06/2016).

BIODIS, *Organogénèse vertébrés* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.vdsciences.com/pages/sciences-biologiques/biologie-animale/organogenese/organogenese-vertébres-10.html> (consulté le 19/06/2016).

CNRS<sup>a</sup>, *Température moyenne à la surface de la Terre et effet de serre* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim1/sysfacte/effetserre/index.htm#causerayon> (consulté le 14/06/2016).

CNRS<sup>b</sup>, *Les résultats : les températures* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.insu.cnrs.fr/environnement/climat-changement-climatique/les-resultats-les-temperatures> (consulté le 19/06/2016).

DAIRY ESSENTIALS, *Digestion in the dairy cow* [en ligne]. Disponible sur : <https://kb.wisc.edu/dairynutrient/page.php?id=52745> (consulté le 19/06/2016).

ENS LYON, *Le bilan radiatif de la Terre* [en ligne]. Disponible sur : <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/bilan-radiatif-terre3.xml> (consulté le 18/06/2016).

EPA<sup>a</sup>, *Global Anthropogenic Emissions of Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases : 1990-2020* [en ligne]. Disponible sur : [www.epa.gov/climatechange/economics/international.html](http://www.epa.gov/climatechange/economics/international.html) (consulté le 19/06/2016).

EPA<sup>b</sup>, *Climate Change Indicators in the United States* [en ligne]. Disponible sur : <https://www3.epa.gov/climatechange/science/indicators/ghg/ghg-concentrations.html> (consulté le 19/06/2016).

FAO, *Rappels sur l'anatomie du tube digestif des ruminants et l'utilisation digestive des fourrages pauvres* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.fao.org/docrep/w4988f/w4988f03.htm> (consulté le 19/06/2016).

GLOBAL METHANE INITIATIVE, *Émissions mondiales de méthane et mesures de réduction possibles* [en ligne]. Disponible sur : [https://www.globalmethane.org/documents/analysis\\_fs\\_fr.pdf](https://www.globalmethane.org/documents/analysis_fs_fr.pdf) (consulté le 19/06/2016).

IDELE<sup>a</sup>, *Durée de gestation pour les principales races de l'espèce bovine : Moyenne et variabilité* [en ligne]. Disponible sur : <http://idele.fr/recherche/publication/idelesolr/recommends/duree-de-gestation-pour-les-principales-races-de-lespece-bovine.html> (consulté le 22/06/2016).

IDELE<sup>b</sup>, *Résultats 2013 des élevages BV suivis par Bovins Croissance. Focus sur la mortalité des veaux avant sevrage* [en ligne]. Disponible sur : <http://idele.fr/domaines-techniques/ameliorer-le-troupeau/performances-et-phenotypes/publication/idelesolr/recommends/resultats-2013-des-elevages-bv-suivis-par-bovins-croissance.html> (consulté le 22/06/2016).

IDELEc, *Chiffres-clés Bovins 2014. Productions bovines lait et viande* [en ligne]. Disponible sur : <http://idele.fr/presse/publication/idelesolr/recommends/chiffres-cles-bovins-2014.html> (consulté le 22/06/2016).

INTERBEV, *Les exportations françaises de bétail et viande* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.interbev.fr/wp-content/uploads/2015/02/LES-EXPORTATIONS-FRAN%C3%87AISES-DE-B%C3%89TAIL-ET-VIANDE.pdf> (consulté le 22/06/2016).

MANICORE, *Quels sont les gaz à effet de serre ?* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.manicore.com/documentation/serre/gaz.html> (consulté le 19/06/2016).

MEEM, *Emissions gaz à effet de serre : Union européenne* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/199/1080/emissions-gaz-effet-serre-lunion-europeenne.html> (consulté le 25/09/2015).

SENAT, *Exclusion du méthane entérique du champ d'application de la stratégie nationale bas carbone* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.senat.fr/questions/base/2015/qSEQ150415655.html> (consulté le 14/06/2016).





## **Place de la génétique animale parmi les solutions envisagées pour la mitigation des émissions entériques de méthane par les bovins de races allaitantes**

### **Résumé**

Le méthane est un gaz à effet de serre dont la principale origine anthropique est la fermentation entérique des ruminants. Des moyens de quantification des émissions par les bovins allaitants sont aujourd'hui proposés, bien qu'aucun ne soit parfaitement adapté. Certaines solutions de mitigation semblent prometteuses, mais de nombreuses études sont encore nécessaires pour tenir compte des situations locales. La génétique a les atouts de pouvoir s'ancrer sur le long terme et d'être utilisable pour des animaux élevés en extérieur. Des mesures réalisées au GreenFeed® chez 35 taurillons et 119 génisses de race Charolaise ont montré une assez bonne répétabilité sur quelques semaines, et une variabilité interindividuelle ( $143,8 \pm 23,3$  et  $186,4 \pm 22,3$  g/j/animal, respectivement) non significativement corrélée avec des paramètres « proxy » tels que la consommation résiduelle. A terme, des partages de données à l'échelle internationale devraient donner du poids à la piste « sélection génétique ».

Mots-clés : génétique, mitigation, émissions entériques, méthane, bovins, races allaitantes

## **Place of animal genetics among the solutions envisaged for the mitigation of enteric methane emissions from beef cattle**

### **Abstract**

Methane is a greenhouse gas whose main anthropogenic source is enteric fermentation in ruminants. Various means of quantifying emissions from beef cattle are now available, although none is perfectly suited. Some mitigation techniques seem promising, but numerous studies are still needed to take the local situations into account. The main advantages of the "genetics strategy" are its long-term results, and its applicability to outdoor reared animals. GreenFeed® measures carried out on 35 yearling bulls and 119 heifers, all from the Charolais breed, showed a fairly good repeatability over several weeks, and inter-individual variability ( $143.8 \pm 23.3$  and  $186.4 \pm 22.3$  g/day/animal, respectively) which is not significantly correlated with "proxy" parameters such as residual feed intake. Ultimately, sharing international data should give weight to the "genetic breeding" solution.

Keywords : genetics, mitigation, enteric emissions, methane, beef cattle