



HAL
open science

Mesures d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre en élevage bovin lait et viande

Jean-Baptiste Dolle, Hélène Chambaut, Remy Delagarde, Nadège Edouard, Maguy Eugène, S. Foray, Elise Lorinquer, V. Manneville

► **To cite this version:**

Jean-Baptiste Dolle, Hélène Chambaut, Remy Delagarde, Nadège Edouard, Maguy Eugène, et al.. Mesures d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre en élevage bovin lait et viande. *Innovations Agronomiques*, 2017, 55, pp.301-315. 10.15454/1.513779191662847E12 . hal-01607224

HAL Id: hal-01607224

<https://hal.science/hal-01607224>

Submitted on 26 May 2020

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Mesures d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre en élevage bovin lait et viande

Dolle J.-B.¹, Chambaut H.¹, Delagarde R.², Edouard N.², Eugene M.³, Foray S.⁴, Lorinquer E.⁴, Manneville V.⁵

¹ Institut de l'Élevage, F-62051 Saint-Laurent-Blangy

² PEGASE, Agrocampus Ouest, INRA, F-35590 Saint-Gilles

³ INRA - VetAgro Sup, UMR 1213 Unité Mixte de Recherche sur les Herbivores. Centre de recherche de Lyon-Clermont-Ferrand-Theix, F-63122 Saint-Genès-Champanelle

⁴ Institut de l'Élevage, F-35652 Le Rheu

⁵ Institut de l'Élevage, F-63170 Aubière

Avec la participation Jean Paul Couthard – Ferme expérimentale de Thorigné d'Anjou, de Pascal Dhour et Florence Fournier - Ferme de Marcenat, de Jean Pierre Farrié – Institut de l'Élevage pour la Ferme expérimentale de Jalogny, de Marc Fougère - Ferme expérimentale de Derval et Bernard Houssin, Céline Pacary – Ferme expérimentale de la Blanche Maison.

Correspondance : jean-baptiste.dolle@idele.fr

Résumé

De nombreux travaux sont nécessaires pour préciser la contribution des systèmes d'élevage aux émissions de gaz à effet de serre, déterminer l'empreinte carbone du lait et de la viande bovine et identifier les leviers de réduction. Les travaux conduits dans le cadre du projet MAGES confirment qu'une incorporation de légumineuses et de chicorée à hauteur de 40 % dans le régime permet de réduire jusqu'à 20 % les émissions de méthane entérique. En bâtiment, le logement des animaux sur litière accumulée se traduit par des émissions plus élevées de méthane et de gaz carbonique. A l'échelle du système, les évaluations mettent en évidence que l'empreinte carbone brute du lait et de la viande oscillent respectivement entre 823 et 1 067 kg CO₂/1 000 kg lait et 16,8 et 11,4 kg CO₂/kg viande vive. Les différences observées ont trait au système fourrager, à la conduite du troupeau et de leur alimentation (suppléments lipidiques, fourrages, ...) ou encore aux pratiques agronomiques (gestion des déjections, ...). Enfin le stockage de carbone qui compense jusqu'à 80 % des émissions, reste sensible aux modes de gestion des prairies et aux conditions climatiques. Les résultats obtenus et la variabilité observée illustre que la réduction de la contribution de l'élevage bovin au changement climatique est envisageable, même si des travaux de recherche complémentaires sont nécessaires pour préciser les mécanismes biologiques et les leviers.

Mots clés : Elevage bovin, gaz à effet de serre, stockage de carbone

Abstract: Reduction measurement of greenhouse gas emissions in milk cow and beef cow farming

Many research works are needed to figure out the contribution of animal production systems to greenhouse gas emissions, evaluate carbon footprint of milk and beef cow and identify levers of reduction. The work led within the framework of MAGES project confirmed that an incorporation of legumes and chicory up to 40% in the diet leads to a reduction of up to 20% of enteric methane emissions. In the livestock buildings, housing of animals on an accumulated litter leads to higher emissions of methane and carbon dioxide. At the scale of the system, the assessment demonstrated that the gross carbon footprint of milk and meat fluctuates between respectively 823 and 1 067 kg CO₂/1 000 kg of milk and 16.8 and 11.4 kg CO₂/kg of meat. The differences noticed are linked to feed system,

cattle management and diet (lipid additives, feed,...) or agronomic practices (dejection management,...). Finally, the storage of carbon, which compensates the emissions up to 80%, is sensitive to grassland management and to climatic conditions. The results provided and the observed variability illustrate that the reduction of the contribution of livestock farming to climate change is possible, even though complementary research work is needed in order to precise the biological mechanisms and the levers.

Keywords: livestock farming, greenhouse gas, carbon storage

Introduction

La prise en compte des préoccupations environnementales en élevage herbivore est un enjeu stratégique majeur. Au niveau national, la contribution aux émissions de gaz à effet de serre de l'élevage est évaluée à 11 % (CITEPA, 2014). En lien avec le changement climatique, l'élevage herbivore doit notamment construire un plan d'action pour les années futures afin de réduire ses émissions de gaz à effet de serre. Par ailleurs, la prairie, indissociable de l'élevage herbivore, est reconnue pour son rôle positif sur le stockage de carbone et sa contribution à la compensation des émissions du secteur. Alors que le méthane entérique représente 50 à 55 % des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle d'une exploitation, différentes stratégies de réduction des émissions de méthane par le biais de l'alimentation ont été étudiées. La supplémentation en lipides a donné des résultats positifs (Martin et al, 2010) ; l'utilisation d'additifs alimentaires est en développement, mais jusqu'à présent aucun d'entre eux n'a fourni de résultats probants à long terme. L'introduction de légumineuses, mise en œuvre dans le cadre de cette expérimentation, constitue une troisième voie pouvant offrir de l'intérêt. Le bâtiment d'élevage bovin, qui recouvre une diversité importante de modes de logement associant ou non des apports de paille et des types de déjections variés, est associé à des émissions gazeuses très variables, dont les mécanismes ne sont pas encore totalement compris (Hassouna et al, 2010). Ce constat a mis en évidence la nécessité 1/ d'approfondir les connaissances sur les mécanismes d'émission dans des conditions standardisées et 2/ de mettre en œuvre des mesures en conditions réelles pour l'acquisition des flux d'émission de gaz à effet de serre. Pour cela, deux expérimentations ont été conduites de manière à acquérir des références sur les émissions en bâtiment et évaluer l'effet croisé du régime alimentaire et du mode de logement, ainsi que les pistes de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) en bâtiments. Cette question des GES et du stockage de carbone relance aussi la discussion sur l'élevage d'animaux alimentés exclusivement en bâtiment vs la production basée sur l'herbe avec une productivité par vache sans doute plus faible mais associée à une capacité de préservation du carbone du sol importante. Elle relance également la discussion autour de l'autonomie alimentaire des exploitations, et en particulier de l'introduction de légumineuses. Dans ce contexte, il apparaît important d'approfondir les connaissances sur les facteurs explicatifs de la variabilité des impacts environnementaux observés au sein des différents systèmes lait et viande, d'étudier plus précisément les leviers d'action et de positionner les pratiques à mettre en œuvre dans les exploitations bovines face à ces nouveaux questionnements.

Le projet MAGES, piloté par l'Institut de l'Élevage en partenariat avec trois équipes INRA spécialisées dans le domaine des émissions de GES, l'UMR Pegase, l'UMR SAS, l'UMR Herbivores, et plusieurs fermes expérimentales lait et viande, a ainsi couplé des évaluations sectorielles (méthane entérique, émissions en bâtiment) à des évaluations à l'échelle des systèmes de production. Le projet a pour objectif :

- d'acquérir des références précises sur la capacité de certaines pratiques à réduire les émissions de gaz à effet de serre par une meilleure fermentation ruminale ainsi que par une optimisation de la gestion des déjections en bâtiments,
- d'évaluer les moyens d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre et les pratiques d'augmentation du stockage de carbone à l'échelle du système d'élevage en s'assurant de leur

faisabilité technico-économique, ceci dans le but d'obtenir des produits lait et viande à faible impact carbone.

Cet article précise les investigations conduites grâce aux expérimentations menées sur les émissions de méthane entérique et en bâtiment d'élevage. Il fait état également des résultats obtenus sur l'évaluation à l'échelle du système d'exploitation dans les fermes expérimentales lait et viande mobilisées dans le projet.

1 Matériels et méthodes

1.1 *Evaluation des émissions de méthane entérique et leviers d'atténuation*

Afin de préciser les émissions entériques et les leviers possibles de réduction de ces émissions, deux expérimentations ont été réalisées afin de comparer les émissions de méthane selon le taux de légumineuses dans la prairie.

La première expérimentation a été mise en œuvre en zone de plaine à la station expérimentale de l'INRA de Méjusseume, Ille et Vilaine, afin de tester des prairies temporaires pures et de mélanges, implantés en 2010 suite au projet européen FP7-Multisward. Ces mélanges ont permis de tester deux espèces de dicotylédones, une légumineuse, le trèfle blanc, et une astéracée, la chicorée. Trois natures de prairies ont ainsi été comparées :

- traitement RGA : ray-grass anglais pur
- traitement TRE : ray-grass anglais et trèfle blanc (objectif 30 % de trèfle blanc)
- traitement CHI : ray-grass anglais et chicorée (objectif 30 % de chicorée)

Six vaches ont été utilisées selon un schéma expérimental en double carré latin 3 × 3 équilibré des effets rémanents, chaque carré latin tournant dans un sens contraire (succession opposée des traitements). Les vaches reçoivent successivement les trois régimes alimentaires (aussi appelés « traitement ») au cours de 3 périodes de 17 jours, dont 10 jours d'adaptation au traitement et 7 jours de mesures précises et de prélèvements. Les vaches, affouragées en vert avec les trois régimes testés, sont réparties dans 3 salles closes à ventilation dynamique. La répartition des traitements dans les salles a été faite de manière à ce que chaque traitement passe dans toutes les salles pour éviter la confusion entre un éventuel effet salle et l'effet du traitement.

La seconde expérimentation concernait deux prairies naturelles contrastées étudiées dans le cadre de deux systèmes d'élevage innovants et extrêmes en zone de montagne à la station expérimentale de l'INRA à Marcenat, Cantal :

- Un système économe en intrants (Bota) avec un chargement limité (0,6 UGB/ha) sur des prairies permanentes, riches en biodiversité (riche en espèces diverses mais avec peu de légumineuses). Les vaches vèlent à 3 ans et n'ont pas de concentré de production. Les surfaces fourragères ne reçoivent pas d'engrais minéral et sont récoltées en majorité en fauche tardive avec séchage au sol,
- Un système visant à maximiser le potentiel de production des vaches (Pépi), avec un chargement plus élevé (1,1 UGB/ha) sur d'anciennes prairies temporaires présentant une biodiversité modérée. Les vaches mettent bas à 2 ans et une partie du foin est séchée en grange.

La gestion en pâturage tournant mise en place à l'intérieur de chacun des deux systèmes (Bota et Pépi) a permis de faire pâturer les vaches dans chacun des deux systèmes sur les mêmes parcelles durant deux périodes expérimentales (P1 et P2). Toutes les mesures ont été réalisées au cours de deux périodes expérimentales de deux semaines.

Pour les deux expérimentations, la production de CH₄ entérique a été déterminée à l'échelle individuelle par la technique du gaz traceur SF₆ (Johnson et Johnson, 1994) développée par l'INRA de Theix.

1.2 *Evaluation des émissions de GES et d'ammoniac en bâtiments vaches laitières et leviers d'action*

Pour évaluer les émissions de GES en bâtiment d'élevage, deux expérimentations ont été réalisées, l'une en conditions expérimentales et l'autre en fermes commerciales.

La première expérimentation a consisté à acquérir des données sur les émissions gazeuses pour deux modes de logement et deux niveaux de nutrition azotée en salles expérimentales de l'Installation Expérimentale en Production Laitière de Méjusse (Le Rheu – 35). Deux modes de gestion des déjections (lisier/fumier) ont été croisés avec deux régimes alimentaires contrastés : un régime déficitaire en azote dégradable (N-) et un régime excédentaire en azote dégradable (N+). Pour cela, deux groupes de trois vaches laitières se sont vues offrir deux types de logement dans des salles expérimentales à ventilation dynamique (une litière paillée accumulée plusieurs semaines (LA) et une étable libre avec logettes (LL)) en interaction avec les deux rations durant quatre périodes de quatre semaines en inversion. Les régimes offerts *ad libitum* étaient composés de 80 % d'ensilage de maïs et 20 % de concentrés et apportaient plus ou moins d'azote dégradable (12 et 18 % MAT respectivement pour N- et N+). Les productions laitières et les quantités ingérées ont été mesurées chaque jour pour chaque lot d'animaux. Les concentrations de NH₃, CO₂, CH₄ et N₂O ont été mesurées en semi-continu à l'aide d'un analyseur de gaz infrarouge photo-acoustique (INNOVA 1412). Des tubes de prélèvement étaient placés dans les gaines d'entrée d'air et d'extraction des salles et à l'extérieur du bâtiment. Les taux de ventilation ont été évalués par la méthode du gaz traceur (SF₆) à la fin de l'expérimentation (Baptista et al, 1999).

La seconde expérimentation a concerné la mesure des émissions gazeuses en conditions réelles dans des élevages laitiers commerciaux. L'objectif principal de cette tâche était de tester une méthode simplifiée de mesure de gaz (NH₃ et GES) dans 20 élevages bovins lait commerciaux et ainsi d'acquérir des références d'émissions gazeuses en conditions d'élevage commercial. Les élevages ont été choisis afin d'être représentatifs des principaux élevages français à la fois pour le mode de logement des animaux, le mode de gestion des effluents et l'alimentation. Au total, 22 exploitations laitières ont fait l'objet de mesures d'émissions de gaz, dont 3 fermes expérimentales spécialisées bovin lait (Trévez, Derval et La Blanche Maison). Deux séries de mesures ont été effectuées pour cette étude respectivement en conditions hivernale et estivale.

1.3 *Evaluation des émissions de GES à l'échelle du système d'élevage et leviers d'action*

1.3.1 **Méthodologie de calcul des émissions de GES**

La méthodologie employée pour calculer les émissions de GES des systèmes d'élevage est issue de la norme ISO 14040 et basée sur la méthodologie GES-TIM (Gac et al, 2009) (Figure 1). Le stockage de carbone a été déterminé conformément à la méthodologie développée par Dollé et al (2013). L'évaluation des émissions de GES et du stockage de carbone ont ainsi permis de déterminer respectivement l'empreinte carbone brute et l'empreinte carbone nette du lait et de la viande produite. A titre exploratoire, le modèle Pasim (Graux et al, 2010) a également été mobilisé sur plusieurs parcelles de l'exploitation de Jalogny afin d'apprécier plus finement le stockage/déstockage de carbone et son incidence sur l'empreinte carbone nette des systèmes de production.

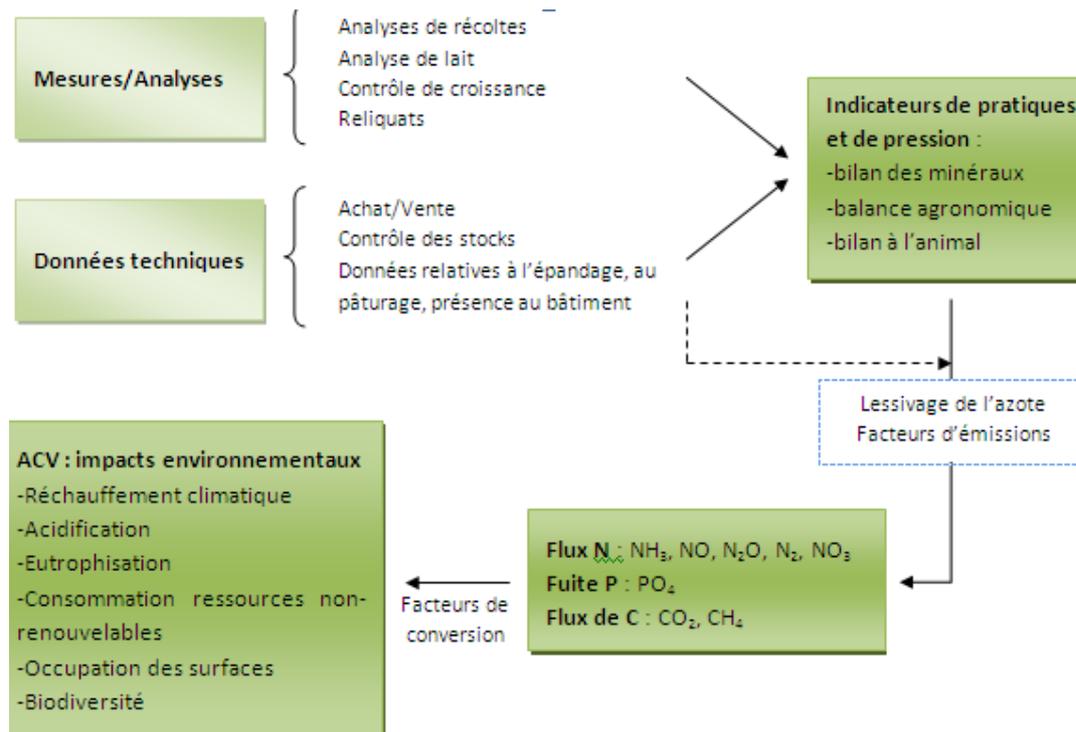


Figure 1 : Etapes de la méthodologie d'analyse environnementale

1.3.2 Caractéristiques des systèmes d'élevage analysés

Cinq fermes expérimentales ont fait l'objet d'une analyse environnementale comparative conformément à la méthodologie décrite précédemment. Les cinq fermes expérimentales retenues (3 exploitations laitières et 2 exploitations viande) couvrent huit systèmes d'élevage distincts (Tableau 1).

Dans le cadre de travaux antérieurs conduits sur l'exploitation de DERVAL pour améliorer l'efficacité technique et environnementale de l'exploitation, plusieurs pratiques sont mises en œuvre :

- Augmentation du pâturage en lien avec le fonctionnement du robot de traite (passage de 25 à 38 ares/vache)
- Remplacement du tourteau de soja par du tourteau de colza
- Réduction de la fertilisation minérale en azote et phosphore
- Allongement du pâturage d'automne

Les techniques innovantes mises en place sur l'exploitation de la Blanche Maison concernent également la gestion du troupeau et des surfaces :

- Ajustement de la ration en protéines et en phosphore aux besoins des animaux et à leur production,
- Valorisation optimale des déjections animales et implantation de légumineuses (trèfle blanc) par semis ou sur semis, afin de réduire les achats d'azote minéral,
- Mise en place systématique de cultures intermédiaires entre céréales et maïs fourrage ou entre deux cultures de maïs,
- Conduite du pâturage calée sur la production d'herbe.

Sur l'exploitation bovin viande de Jalogny, deux systèmes comprenant chacun 50 vèlages sont mis en place :

- Le système de printemps (vèlages en février-mars-avril) vise à caler au maximum les besoins du troupeau sur le cycle de l'herbe avec une conduite animale modérée en phase d'élevage qui s'adapte à la ressource alimentaire disponible. Cela se traduit par une livraison de mâles maigres

en été à 16-18 mois avec un deuxième passage à l'herbe et des rations à base de foin et enrubannage en hiver. Le choix de l'utilisation de l'enrubannage, plus énergétique que le foin, a été fait dans le but de réduire le recours aux concentrés.

- Le système d'automne (vêlages en août-septembre-octobre) vise à satisfaire la demande alimentaire animale de manière régulière avec des besoins plus élevés des animaux en hiver. Cela se traduit par une conduite plus intensive en phase d'élevage avec la vente des broutards maigres à 9-10 mois en été, une stratégie de sécurisation des stocks fourragers, des rations à base d'ensilage d'herbe et de foin en hiver et une utilisation plus importante de concentrés.

La ferme expérimentale de Thorigné d'Anjou est quant à elle une exploitation bovin viande biologique qui optimise le couplage culture-élevage. Le chargement moyen de la ferme sur la période est de 1,12 UGB/ha SFP. L'assolement, qui comporte 75 % d'herbe, 4 % de luzerne et 22 % de cultures annuelles, vise l'autonomie alimentaire du troupeau en fourrages et en concentrés. Le troupeau de limousines fonctionne en double saisons de vêlages, en mars-avril et septembre-octobre, ce qui répartit les besoins du troupeau sur l'année, facilite la valorisation de l'herbe pâturée par les animaux, tout en étalant les ventes d'animaux.

	Derval	Blanche Maison		Marcenat		Thorigné d'Anjou	Jalogny		
Production	Laitière					Viande			
Localisation	Loire Atlantique	Manche		Cantal		Maine et Loire	Saône et Loire		
Type de sol	Limono-argileux	Argilo-limoneux		Volcaniques acides		Sablo-limoneux	Limono-argileux		
Pluviométrie (mm)	750	800		1100		685	830		
Mode de production	Conventionnel	Conventionnel		Conventionnel		Agrobiologie	Conventionnel		
Système	/	Maïs	Herbe	PEPI	BOTA	/	Aut.	Ptps	
% SFP/SAU	86	86	100	100	100	85	95	95	
% prairies/SFP	65	50	100	100	100	90	100	100	
Type de prairie dominant	RGA-TB	RGA-TB PME	RGA-TB, PME et PP	Prairie perm.	Prairie perm. diversifiée	Prairies multi espèces graminées + légumineuses	Prairies permanentes		
Chargement (UGB/ha SFP)	1,5	1,8	1,6	1,1	0,6	1,12	1,2	1,1	
Production lait/viande	8 540 l lait/VL	6 100 l lait/VL	5 280 l lait/VL	5 200 l lait/VL	5 000 l lait/VL	310 kg vv/UGB	305 kg vv/UGB	260 kg vv/UGB	
Apport de concentrés annuel	1 310 kg/VL	950 kg/VL	700 kg/VL	1 000 kg/VL	0 kg/VL	370 kg/UGB	311 kg/UGB	170 kg/UGB	
Type de déjections produites	Lisier pailleux et fumier	Fumier et lisier		Fumier		Fumier/compost	Fumier/compost		

Tableau 1 : Caractéristiques des fermes expérimentales

2 Résultats

2.1 Evaluation des émissions de méthane entérique et leviers d'atténuation

Dans le cadre de l'expérimentation conduite en zone de plaine à l'INRA de Méjusse, la production journalière de méthane par vache a été en moyenne de 438 g. Elle a été identique entre RGA et TRE, mais a eu tendance à être inférieure sur CHI ($P < 0,10$) (Tableau 2). En revanche, lorsqu'elle est exprimée par kg de lait, par kg de matière sèche (MS) ingérée ou par kg de matière organique (MO) digestible ingérée, la production de méthane a été nettement inférieure sur CHI comparativement à RGA (- 24 %, -21 % et -19 %, respectivement) mais non significativement différente entre CHI et TRE. Par kg lait ou par kg MSI, la production de méthane du régime TRE a eu tendance à être inférieure à celle observée sur RGA ($P < 0,10$), avec une réduction de 12 et 18 %, respectivement). Le trèfle et la chicorée représentaient respectivement 40 % et 39 % de la MS ingérée dans les régimes TRE et CHI.

Variable	Traitement			Effet traitement (P<)
	RGA	TRE	CHI	
Production de méthane				
- g/j	459	465	389	ns
- g/kg lait	22,8 ^b	18,6 ^{ab}	17,3 ^a	0,071
- g/kg MS ingérée	31,3 ^b	26,7 ^{ab}	24,6 ^a	0,049
- g/kg MO ingérée	34,8 ^b	29,9 ^{ab}	28,2 ^a	0,071
- g/kg MO digestible ingérée	41,5 ^b	36,4 ^{ab}	33,5 ^a	0,076

Sur une même ligne, des lettres différentes indiquent des moyennes ajustées des différents traitements qui diffèrent au seuil de 5 %

Tableau 2 : Effet de l'introduction de trèfle ou de chicorée sur la production de méthane entérique chez la vache laitière alimentée à volonté à l'auge avec du ray-grass anglais en vert

Ces résultats corroborent les observations faites par plusieurs auteurs (Eugène et al, 2014 ; Archimède et al, 2011 ; Waghorn et Clark, 2006 ; Beever et al, 1985) selon lesquelles les légumineuses et certaines dicotylédones induisent une moindre production de méthane que les graminées, probablement en raison d'une digestion plus rapide dans le cas des légumineuses et dicotylédones tempérées.

Dans le cadre de l'expérimentation en zone de montagne à la station expérimentale de l'INRA à Marcenat, les émissions de CH₄ ne sont pas différentes significativement entre les deux lots Bota et Pépi en P1 (402,9 vs 401,7 g/j, $P=0,99$), mais elles tendent à être plus élevées en P2 sur le lot Bota comparativement au lot Pépi ($P=0,07$) (400,3 vs 330,5 g/j, respectivement) (Eugène et al, 2016) (Tableau 3). Pour le lot Pépi, les émissions de CH₄ sont significativement différentes ($P < 0,001$) entre les deux périodes, avec notamment une différence d'émissions de 71,4 g/j, soit une diminution de 17,7 % entre P1 et P2. Pour le lot Bota, il n'y a pas de différence entre les deux périodes. Lorsque l'on exprime les émissions de CH₄ par rapport à la production laitière des vaches, il n'y a pas de différence significative ($P=0,26$) entre les deux lots quelle que soit la période considérée.

	P1		P2		Effet traitement Période (P<)
	BOTA	PEPI	BOTA	PEPI	
Production de méthane					
CH ₄ (g/j)	402,9	401,7	400,3	330,5	0.001
CH ₄ / lait (g/kg lait)	15,4	16,1	17,3	15,3	ns

Tableau 3 : Emissions de CH₄ (g/j) et de CH₄/kg de lait (g/kg) des lots Bota et Pépi pour les 2 périodes

L'absence de différence significative d'émission entre les lots Bota et Pépi pourrait être liée au fait que la composition botanique des prairies à cette saison (mai-juin) n'était pas très différente, de même que le niveau de production laitière à ce stade de lactation. D'autre part, la quantité de concentré reçue par les vaches de Pépi n'était pas suffisante (4 kg de concentré par jour soit 17 % de concentré) pour modifier sensiblement les paramètres de digestion des vaches et ainsi réduire la production de CH₄ (Sauvant et al, 2011).

2.2 Evaluation des émissions de GES en bâtiments d'élevage et leviers d'action

Dans le cadre de la première expérimentation en conditions contrôlées, les émissions d'azote ammoniacal ont été largement supérieures sur la ration N+ par rapport à la ration N-, et ce d'autant plus pour le système litière accumulée (Tableau 4). De plus, pour le système LA, les émissions d'ammoniac ont doublé entre la 1^{ère} semaine et la 4^{ème} semaine d'accumulation pour le régime excédentaire en azote dégradable, alors que cette augmentation n'est pas visible sur N-. Les émissions de NH₃ sont ainsi très liées à l'apport en azote de la ration. Les émissions de N-NH₃ représentent environ 5 % de l'azote ingéré sur la ration N- quel que soit le mode de logement alors qu'elles s'élèvent à 10 % pour la ration N+ en système lisier et 12 % de l'azote ingéré en système fumier. Au-delà de la quantité d'azote ingérée, la forme de l'azote apporté par la ration (azote très dégradable dans le cas de la ration N+) influence donc fortement les émissions d'ammoniac des déjections (Tableau 4). Les émissions du système fumier sont sans doute amplifiées par un effet température de la litière (autour de 29-30°C en semaine 1, atteignant 35-37°C à 10 cm de profondeur en semaine 4, pas de différence entre les 2 régimes). Contrairement à la température, l'humidité de la litière n'a pas été mesurée en continu. Les taux d'humidité des échantillons prélevés au moment du curage ne sont pas différents entre N+ et N-. A noter, que le périmètre de mesure est différent entre les systèmes lisier et fumier, car en litière accumulée, on stocke les déjections dans le bâtiment sur toute la période d'accumulation (4 semaines) alors qu'en système lisier les déjections sont évacuées quotidiennement. Il faut donc en tenir compte dans la comparaison.

Les émissions de C-CH₄ n'ont pas été influencées par l'azote de la ration. En revanche, elles ont été plus élevées en système litière qu'en système logettes lisier (+ 23 %), du fait des émissions directes par la litière. Ici encore, les émissions de méthane ont augmenté au cours du temps d'accumulation de la litière, de la même manière pour les 2 régimes azotés. Les émissions de méthane ont ainsi été stimulées par les apports quotidiens de carbone de la paille et par les fermentations au sein de la litière compactée par le couchage et le piétinement des vaches.

		N-NH ₃ (g/j/vache)		C-CH ₄ (g/j/vache)	
		N-	N+	N-	N+
LL	Moyenne	22 ±6	68 ±19	326 ±19	321 ±17
LA	Moyenne	20 ±4	80 ±22	389 ±48	389 ±37
	Semaine 1	21 ±5	48 ±24	340 ±40	358 ±42
	Semaine 2	18 ±2	75 ±8	385 ±51	364 ±30
	Semaine 3	19 ±4	88 ±11	398 ±32	398 ±20
	Semaine 4	22 ±5	99 ±6	426 ±20	424 ±16

Tableau 4 : Emissions de N-NH₃ (g/j/vache), C-CH₄ (g/j/vache) pour les systèmes logettes lisier (LL) et litière accumulée (LA) et les 2 rations (N- et N+) en moyenne sur les périodes de mesure et en moyenne par semaine d'accumulation (S1 à S4) pour le traitement LA.

Les émissions de protoxyde d'azote ($\text{N-N}_2\text{O}$) ont été faibles ($< 0,5 \text{ gN-N}_2\text{O/j/vache}$) et très variables (jusqu'à 100 % de variation), ce qui est assez classique en bâtiment d'élevage bovin. Aucun effet des facteurs testés ici ne peut être mis en évidence dans ces conditions.

Quant aux performances animales, aucune différence n'a pu être mise en évidence entre régimes et modes de logement en termes d'ingestion de matière sèche (22 à 23 kg SM/j/vache) ou de production laitière (18 à 20 kg/j/vache).

Les mesures mises en œuvre dans les bâtiments commerciaux vaches laitières mettent en évidence une très forte variabilité des émissions. Lorsque les vaches laitières sont en stabulation permanente ou quasi-permanente, les émissions de C- CO_2 sont en moyenne de 5,6 kg C- CO_2 /VL/jour pour des systèmes avec une litière accumulée et en moyenne de 4 kg C- CO_2 /UGB/jour en système logettes. Les émissions de C- CO_2 obtenues en période de pâturage sont beaucoup plus faibles et sont de l'ordre de 1 kg/UGB/jour quel que soit le mode de logement.

En ce qui concerne les émissions de C- CH_4 , elles sont en moyenne de 0,46 kg/UGB/jour en système litière accumulée et de 0,34 kg/UGB/jour en système logettes. Comme pour les émissions de C- CO_2 , les émissions estivales de C- CH_4 sont beaucoup plus faibles, de l'ordre de 75 à 84 g/UGB/jour.

L'effet de chaque mode de logement n'était pas significatif mais lorsque les systèmes sont regroupés en deux classes « présence de litière accumulée ou non », les résultats montrent que les émissions carbonées semblent être sensibles à l'existence d'une litière accumulée avec la présence d'un fumier très compact potentiellement émetteur de CO_2 et CH_4 . En effet, les émissions de carbone sous forme de CO_2 sont significativement plus élevées ($p < 0,01$) dans les bâtiments où il y a une litière accumulée. La significativité n'est pas observée pour les émissions de CH_4 ($p = 0,18$) mais la même tendance est remarquable (Figure 2). En période hivernale, les émissions azotées sous forme de N- NH_3 sont en moyenne de 18,6 g N- NH_3 /UGB/jour dans les systèmes « litière accumulée » et de 29 g N- NH_3 /UGB/jour en systèmes « logettes » ; en période de pâturage plein, elles sont de l'ordre de 2,3 g et 3,9 g N- NH_3 /UGB/jour pour les systèmes « litière accumulée » et « logettes » respectivement. En période hivernale, les modes de logement en logettes présentent des émissions significativement plus élevées ($p = 0,01$) par rapport aux bâtiments avec une litière accumulée.

Emissions de C- CH_4 en fonction du mode de logement et du temps de stabulation Emissions de N- NH_3 en fonction du mode de logement et du temps de stabulation

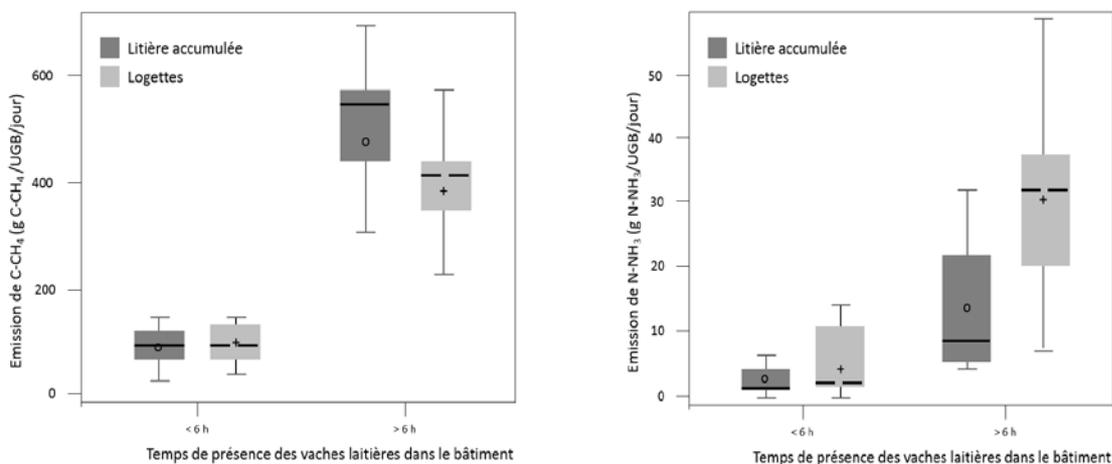


Figure 2 : Emissions de C- CH_4 et N- NH_3 en g/UGB/j pour les systèmes logettes et litière accumulée

2.3 Evaluation des émissions de GES à l'échelle du système d'élevage et leviers d'action

2.3.1 Les fermes expérimentales en production laitière

Les émissions brutes de GES des 5 systèmes d'élevage (Tableau 5) comprises entre 823 et 1 067 (kg eq CO₂/1 000 L lait) sont conformes aux évaluations conduites sur des systèmes bovin lait français (Dollé et al, 2013). Le système bas intrants de Marcenat (Bota) qui ne consomme pas de concentrés et d'engrais minéraux, possède l'empreinte carbone brute la plus faible. Malgré le faible niveau de production par vache, le faible recours aux intrants suffit à obtenir une empreinte carbone inférieure aux autres systèmes. Le système d'élevage de Derval, système productif sur l'animal à forte dominance maïs possède une empreinte carbone brute de 932 kg eq CO₂/1000 L de lait, proche de celle observée sur le système maïs de La Blanche Maison (958 kg eq CO₂). Malgré un excédent du bilan azoté inférieur aux systèmes maïs (75 vs 105 kg N/ha SAU), les 2 systèmes herbagers de La Blanche Maison (1 005 kg eq CO₂) et Pépi à Marcenat (1 067 kg eq CO₂), dont la production laitière par vache est plus faible, possèdent des empreintes carbone brutes légèrement plus élevées au litre de lait.

La compensation liée au stockage de carbone est à l'opposé plus importante dans les systèmes herbagers ou à plus forte proportion de prairies. En terme d'empreinte nette du carbone, qui intègre le stockage de carbone, les systèmes d'élevage de La Blanche Maison et celui de Derval présentent des valeurs quasiment identiques entre 911 et 920 kg eq CO₂/1 000 L lait.

	Derval	La Blanche Maison	Marcenat		
	Robot et pâturage productif	Dominante Maïs	Herbager	Bota	Pépi
Empreinte carbone brute (kg eq CO ₂ /1 000L lait)	932	958	1 005	823	1 067
Stockage de carbone (kg eq CO ₂ /1 000L lait)	19	38	94	717	397
Empreinte carbone nette (kg eq CO ₂ /1 000L lait)	913	920	911	106	670

Tableau 5 : Empreinte carbone du lait des 5 systèmes laitiers

2.3.2 Les fermes expérimentales en production viande

A Jalogny, les systèmes associés à des vêlages d'automne et avec une conduite plus intensive et une consommation plus importante d'intrants (azote minéral, concentrés) possèdent une empreinte carbone à l'UGB plus élevée sur les années 2011 et 2012 (Tableau 6). Cette différence s'estompe dès lors que les émissions de GES sont exprimées par kg de viande vive produit. Ainsi, les empreintes carbone des deux systèmes ne sont pas significativement différentes. Le stockage de carbone, supérieur pour le système Printemps du fait d'un linéaire de haies plus élevé, confère une empreinte carbone nette inférieure au système Automne. Grâce au stockage de carbone, il est important de relever que les 2 systèmes présents sur l'exploitation de Jalogny compensent leurs émissions de GES entre 42 % et 48 % pour le système d'automne et 49 % et 54 % pour le système de printemps. Il convient de noter également une dégradation de l'empreinte carbone de la viande produite à Jalogny en 2012, pour les deux lots, du fait du faible rendement en viande associé cette année à des problèmes sanitaires sur les veaux.

L'exploitation biologique de Thorigné, du fait du non recours aux engrais de synthèse, de la gestion performante du troupeau (âge au premier vêlage de 30 mois, intervalle vêlage-vêlage, faible mortalité des veaux) et des surfaces (variétés fourragères adaptées au potentiel agronomique,

légumineuses, ...), pour une production de viande vive similaire au système Automne de Jalogny, possède la plus faible empreinte carbone au kg de viande vive.

	Jalogny				Thorigné
	2011		2012		2012
	Automne	Printemps	Automne	Printemps	
Empreinte carbone brute (kg eq CO ₂ /UGB)	4873	4512	5005	4319	3 534
Empreinte carbone nette (kg eq CO ₂ /UGB)	2829	2231	2634	2005	1767
Empreinte carbone brute (kg eq CO ₂ /kg vv)	14,2	14,7	16,4	16,8	11,4
Empreinte carbone nette (kg eq CO ₂ /kg vv)	8,2	7,3	8,6	7,8	5,7

Tableau 6 : Empreinte carbone de la viande à Jalogny et Thorigné

Parallèlement à l'évaluation forfaitaire du stockage de carbone des prairies (570 kg C/ha/an) pour les systèmes étudiés à Jalogny, le modèle PaSim a été mis en œuvre sur des parcelles possédant des modes d'exploitation contrastés et a mis en évidence une forte variabilité des flux de carbone (Tableau 7).

	P	1C	2C
2011	741	394	-638
2012	3058	199	310

P = pâture ; 1C = 1ere coupe de printemps + pâture ; 2C = 1ere coupe de printemps + 2eme coupe regain

Tableau 7 : Stockage moyen de carbone (kg/ha/an) pour les différents types de conduite des prairies à Jalogny selon les simulations PaSim

On constate une forte influence de la saison climatique, notamment l'année 2011 caractérisée par une sécheresse précoce associée à une perte de rendement de 15 à 30 % sur les parcelles fauchées. Cette année 2011 se traduit par un potentiel de stockage de carbone inférieur voire par un relargage de carbone pour les prairies fauchées à deux reprises.

Par extrapolation, le résultat de ces simulations a été appliqué aux surfaces des deux systèmes et pour chaque campagne (Tableau 8). La projection de ces estimations PaSim à l'échelle du système montre que le stockage de carbone peut aller jusqu'à compenser l'ensemble des émissions des systèmes en 2012 où les niveaux de stockage ont été les plus élevés.

	Jalogny			
	A 2011	P 2011	A 2012	P 2012
Stockage de carbone (kg carbone/ha)	413	560	1822	1780
Empreinte carbone brute (kg eq CO ₂ /kg vv)	14,2	14,7	16,4	16,8
Empreinte carbone nette (kg eq CO ₂ /kg vv)	9,4	6,5	- 5,8	- 8,3

Tableau 8 : Emissions de GES en fonction du stockage carbone des données de PaSim extrapolées (haies incluses) aux deux systèmes

3 Discussion

3.1 *Evaluation des émissions de méthane entérique et leviers d'atténuation*

Les mesures des émissions de méthane entérique ont permis de mettre en évidence que l'apport de 40 % de trèfle ou de 40 % de chicorée dans la ration de vaches laitières nourries à l'herbe verte (régime de base ray-grass anglais) permettait à la fois d'améliorer les performances individuelles (stimulation de l'ingestion, augmentation de la production laitière) et de réduire les émissions de méthane par kg de lait produit ou par kg de MS ingéré. Il est possible de relier ces effets à la composition chimique du régime, et notamment la teneur en fibres, qui est faible à très faible sur le trèfle et la chicorée. Conformément à d'autres travaux déjà conduits sur l'effet de légumineuses (Doreau et al, 2011), cette étude confirme l'intérêt des légumineuses et montre le fort potentiel de la chicorée pour réduire les productions de méthane, pour des taux d'incorporation assez élevés (40 %).

L'absence de différence significative d'émission observée entre les lots Bota et Pépi peut être liée à deux éléments explicatifs. Le premier a trait à la part de concentrés dans la ration. La quantité de concentré reçue par les vaches de Pépi n'était en effet pas suffisante (4 kg de concentré par jour soit 17 % de concentré) pour modifier sensiblement les paramètres de la digestion des vaches et ainsi réduire la production de CH₄ (Sauvant et al, 2011). Une autre hypothèse pour expliquer cette absence de différence repose sur l'examen de la composition botanique des bouchées sélectionnées par les vaches des deux lots. Sur le dispositif, nous n'avons pas mis en évidence de différences significatives de pourcentage de légumineuses dans les bouchées des vaches entre les deux lots du fait notamment de l'existence de variations d'abondance interannuelles importantes de trèfle blanc (Farruggia et al, 2014 ; Loiseau et al, 2002) alors qu'il faudrait plus de 30 % de légumineuses dans la ration pour observer une différence significative.

3.2 *Evaluation des émissions de GES en bâtiments d'élevage et leviers d'action*

Sur le segment du bâtiment d'élevage, il ressort clairement que l'alimentation azotée est un levier permettant de réduire de façon importante les émissions d'ammoniac sans conséquence majeure pour la production des vaches laitières. Le mode de logement sur paille, représentatif de nombreux bâtiments d'élevage bovin français, peut par contre s'avérer la source d'émissions importantes d'ammoniac et de méthane du fait des émissions de la litière elle-même, notamment en cas d'apport excédentaire en azote dans la ration. La forte variabilité des émissions, notamment due à l'augmentation progressive des émissions au cours du temps, met en avant la difficulté d'établir un facteur d'émissions pour ce type de système. Il est par ailleurs évident que ces émissions ne s'arrêtent pas aux portes du bâtiment et que la conséquence des pratiques ou des options de mitigation doit être considérée à l'échelle du continuum intégrant l'ensemble des étapes de la gestion des déjections.

Par ailleurs, les résultats d'émissions obtenus sur les fermes laitières commerciales ont permis de confirmer l'influence du temps de stabulation des vaches dans le bâtiment. Par conséquent, la différence de fonctionnement des bâtiments bovins en fonction de la saison est un élément important à prendre en compte pour étudier des facteurs d'émission à l'échelle de l'année. Même si les émissions carbonées sont principalement dues aux animaux présents dans le bâtiment au moment des mesures, la présence d'une litière accumulée semble être une source supplémentaire de CO₂ et de CH₄. D'autre part, les émissions de NH₃ sont aussi sensibles au mode de logement avec des émissions accrues en système logettes lisier pour la méthode simplifiée alors qu'on constate le contraire en conditions expérimentales où la litière accumulée apparaît d'autant plus émettrice que la ration est excédentaire en azote dégradable. La variabilité observée au sein d'un même type de logement rend difficile la mise en évidence de l'influence de paramètres plus fins et nécessiterait plus de données pour obtenir des facteurs d'émissions de chaque mode de logement étudié. Enfin, les résultats présentés sont focalisés sur le poste bâtiment pour pouvoir préciser les références d'émissions de ce segment. Néanmoins, ces

résultats doivent être replacés dans le contexte du système d'exploitation où il existe d'autres postes d'émissions, comme le stockage et l'épandage des déjections.

3.3 *Evaluation des émissions de GES à l'échelle du système d'élevage et leviers d'action*

Sur les émissions de GES, qu'il s'agisse de systèmes laitiers ou viande, une forte variabilité de l'empreinte carbone du lait et de la viande est observée selon l'année de référence et les pratiques mises en œuvre. Cette variabilité dépend de plusieurs facteurs structurels ou de fonctionnement :

- la conduite du troupeau qui impacte le nombre d'animaux improductifs (âge au vêlage, santé des animaux, reproduction, mortalité des veaux, réforme des vaches, ...) et la productivité (lait/vache, gain de poids vif).
- les pratiques d'alimentation du troupeau avec l'optimisation des apports de concentrés, le type de concentrés achetés, la place du pâturage, la qualité des fourrages en lien avec le stade de récolte, la part de légumineuses, l'efficacité de l'azote (azote ingéré et excrété), ...
- les pratiques mises en œuvre sur les cultures et les prairies : rotation, optimisation de la fertilisation azotée, présence de légumineuses, cultures intermédiaires pièges à nitrates, semis de culture sous couvert, réduction du travail du sol, présence de prairies temporaires, ...
- le mode de gestion des effluents : les émissions de GES sont dues principalement à la phase de stockage et varient en fonction du type de déjections (fumier ou lisier) et de leur gestion.
- la structure des fermes (parcellaire, type de bâtiment, mécanisation, ...), leur potentiel de production et les conditions pédoclimatiques.

Cette variabilité met en évidence le lien entre les pratiques d'élevage, les performances environnementales et les gains potentiels atteignables par un nombre important d'éleveurs. Cela signifie également qu'une amélioration de l'efficacité technique des exploitations permettra de réduire l'empreinte environnementale avec une incidence favorable sur les résultats économiques.

Sur le stockage de carbone, ces résultats illustrent l'importance des flux de carbone annuels pour la compensation des émissions de GES des systèmes d'élevage bovin (Dollé et al, 2013). De même la mobilisation du modèle Pasim met en évidence la fragilité des références utilisées en particulier du forfait mobilisé pour caractériser le stockage de carbone des prairies. Au vue de la variabilité interannuelle et de la variabilité liée aux pratiques (pâturage vs fauche, niveau de fertilisation, ...), il est important de mieux apprécier les flux de carbone annuels des systèmes de production. Par conséquent, des travaux sur le stockage de carbone restent à engager pour mieux préciser l'empreinte carbone nette du lait et de la viande des systèmes fourragers fortement basés sur la valorisation de prairies.

Conclusion

Les travaux expérimentaux ont apporté des références précieuses et déterminé le potentiel de réduction pour plusieurs postes d'émission. Certains postes d'émission doivent encore être étudiés afin d'en comprendre plus finement le fonctionnement mais de réelles pistes d'amélioration du bilan carbone de l'élevage sont disponibles. L'implication des fermes expérimentales a permis de co-construire une réflexion pour la mise en place d'actions innovantes dans leurs exploitations et de mettre en évidence qu'un gain est aujourd'hui possible par une amélioration de l'efficacité des systèmes de production.

Les résultats de ces travaux sont très précieux aux filières de ruminants. Même si des travaux de recherche doivent se poursuivre, ils ont permis de mettre en évidence des orientations stratégiques permettant aux systèmes d'élevage de ruminants de réduire leur empreinte carbone. Ces avancées ont ainsi permis d'initier de larges programmes nationaux comme CARBON DAIRY et BEEF CARBON dont

les objectifs sont de réduire les empreintes carbone des produits lait et viande de l'élevage bovin de 15 à 20 % à échéance de 10 ans.

Ainsi, le projet CASDAR MAGES a permis de mettre en avant des systèmes d'élevage et des pratiques innovantes afin de structurer une dynamique nationale associant les éleveurs, les conseillers agricoles, ainsi que toute la filière en faveur de la production de lait et de viande bovine à faible impact carbone.

Références bibliographiques

- Archimède H., Eugène M., Marie Magdeleine C., Martin C., Morgavi D.P., Lecomte P., Doreau M., 2011. Comparison of methane production between C3 and C4 grasses and legumes. *Anim. Feed Sci. Tech.*, 166:59-64.
- Baptista F.J., Bailey B.J., Randall J.M., Meneses J.F., 1999. Greenhouse Ventilation Rate: Theory and Measurement with Tracer Gas Techniques. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(4), 363-374.
- CITEPA, 2014. Rapport national d'inventaire. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Séries sectorielles et analyses étendues. Format SECTEN. Avril 2014. Citepa, Paris.
- Devun J., Manneville V., Morel K., Moreau S., Farrié J.P., Renon J., Agabriel J., 2016. Concilier production et environnement dans les systèmes bovin viande du Centre de la France *Innovations Agronomiques* 49 (2016), 203-214.
- Dollé J.-B., Faverdin P., Agabriel J., Sauvant D., Klumpp K., 2013. Contribution de l'élevage bovin aux émissions de GES et au stockage de carbone selon les systèmes de production. *Fourrages*, 215, 181-191.
- Eugène M., Archimède H., Giger Reverdin S., Doreau M., Sauvant D., 2014. Effect of feeding forages on enteric methane emissions from ruminants: a meta-analysis. *Proceedings of the Australian Society of Animal Production*, 30. Presented at Joint ISNH/ISRP International Conference 2014 : Harnessing the Ecology and Physiology of Herbivores, Canberra, AUS (2014-09-08 - 2014-09-12).
- Eugène M., Danglard A., Fournier F., Rochette Y., Pomies D., Farruggia A., 2016. Enteric methane emissions of cows in two contrasted low input dairy grassland-based systems. Presented at 67. Annual Meeting of the European Association for Animal Production (EAAP), Belfast, GBR (2016-08-29 - 2016-09-02). NLD : Wageningen Academic Publishers.
- Farruggia et al, 2014. *Agriculture Ecosystems and environnement*, p 1.
- Graux A.-I., Gaurut M., Agabriel J., Baumont R., Delagarde R., Delaby L., Soussana J.-F., 2010. Development of the Pasture Simulation Model for assessing livestock production under climate change. *Agriculture, Ecosystems and Environment*.
- Hassouna M., Eglin T. et al, 2015. Mesurer les émissions gazeuses en élevage : gaz à effet de serre, ammoniac et oxydes d'azote. Diffusion INRA-ADEME. 314p. ISBN : 2-7380-1375-9.
- Loiseau P., Louault F., Carrère P., Assmann T., Soussana J.F., 2002. Flux de carbone et d'azote dans les associations de graminées et de trèfle blanc conduites en pâturage simulé. *Fourrages*, 169, 25-46.
- Martin C., Morgavi D.P., Doreau M., 2010. Methane mitigation in ruminants: from microbe to the farm scale. *Animal* 4:351-365.
- Morel K., Farrie J.P., Renon J., Manneville V., Agabriel J., Devun J., 2014. Compromis production - environnement de deux systèmes bovins naisseurs herbagers aux stratégies fourragères et zootechniques contrastées.
- Morel K., Farrie J.P., Renon J., Manneville V., Agabriel J., Devun J., 2016. Environmental impacts of cow-calf beef systems with contrasted grassland management and animal production strategies in the Massif Central, France *Agricultural Systems* 144 (2016) 133–143.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL)