



Ferme expérimentale de AgroParisTech – 2013 – Essai CH₄ COOP DE FRANCE Déshydratation

Thiverval-Grignon 78850

Evaluation des effets de deux modalités alimentaires différentes incluant de l'ensilage de graminées comparé à de l'enrubannage de luzerne sur les émissions de méthane entérique par des vaches laitières en production

Yves PYTHON¹, Sylvain MORVAN² et Dominique TRISTANT², Ferme expérimentale de AgroParisTech - Août 2013

¹ Projet Grignon Energie Positive

² Ferme expérimentale de AgroParisTech

Table des matières

Résumé	4
1. Introduction	4
2. Matériel et Méthode	4
2.1. Animaux	4
2.2. Planning général de l'essai	5
2.3. Ration	6
2.4. Mesure des émissions de méthane	9
3. Résultats	11
3.1. Qualité des mesures et problèmes rencontrés	11
3.2. Résultats bruts	13
3.3. Ratios relatifs aux émissions de méthane	19
4. Résultats statistiques	20
5. Conclusions	22
Annexes	24
Références bibliographiques	24

Table des illustrations

Figures :

Figure 1 : Planning général de l'essai	6
Figure 2 : Diagramme de fibrosité.....	8
Figure 3 : Emissions brutes moyennes de CH ₄ par vache et par traitement (gr.CH ₄ .j ⁻¹)	14
Figure 4 : Ingestion individuelle par vache et par traitement (Kg.MSI.VL ⁻¹ .j ⁻¹)	15
Figure 5 : Production laitière corrigée sur l'énergie par vache et par traitement (Kg.j ⁻¹).....	16
Figure 6 : Taux butyreux par vache et par traitement (g.l ⁻¹)	16
Figure 7 : Taux protéiques par vache et par traitement (g.l ⁻¹)	17
Figure 8 : Taux en lactose par vache et par traitement (g.l ⁻¹)	18
Figure 9 : Taux en Urée par vache et par traitement (g.l ⁻¹).....	18
Figure 10 : Corrélation entre l'ingestion quotidienne de MS et les émissions de méthane.....	19
Figure 11 : Emissions de méthane par matière sèche ingérée (gr.CH ₄ .KgMSI ⁻¹).....	19
Figure 12 : Emissions de méthane par lait produit (gr.CH ₄ .KgLait ⁻¹)	20

Photos :

Photo 1 : Tube à perméation SF6.....	9
Photos 2 et 3 : Vaches équipées pour la collecte des gaz	10
Photo 4 : Vaches équipées dans le dispositif d'ingestion individuelle	10

Tableaux :

Tableau 1 : Caractéristiques laitières des animaux de l'essai	5
Tableau 2 : Ingestion quotidienne théorique et composition théorique de la ration de base.....	7
Tableau 3 : Résultats d'analyses sur les fourrages.....	7
Tableau 4 : Taux d'émissions et distribution des tubes	9
Tableau 5 : Note de qualité données durant l'essai.....	12
Tableau 6 : Coefficientst de variations moyens	12
Tableau 7 : Ingestion et composition réelles sur la totalité de l'essai	13
Tableau 8 : Ingestion et composition réelles en fonction des campagnes de mesure	13
Tableau 9 : Résultats statistiques	21

Résumé

Deux essais ont été réalisés sur la ferme de Grignon de janvier à mai 2013 en vue de caractériser d'une part les performances zootechniques et d'autre part les émissions de méthane entérique de vaches laitières selon deux traitements alimentaires incluant de l'ensilage de graminées (traitement **EG**) comparé à de l'enrubannage de luzerne (traitement **EL**). Les mesures d'émission de CH₄ ont été appliquées à 12 vaches pour lesquelles les paramètres suivants ont fait l'objet de mesures individuelles : les émissions de méthane brutes, les niveaux d'ingestion et de production laitière, la qualité laitière ainsi que l'évolution des poids vifs. Les émissions de CH₄ ont été mesurées à l'aide de la technique du traceur SF₆ (Johnson *et al.* 2007 [1]). L'essai a permis de mettre en évidence de nombreux effets statistiquement significatifs du traitement EL avec notamment une réduction sensible des émissions de CH₄ exprimées en brutes ou rapportées à l'ingestion ou à la production laitière. Ce document offre une description détaillée de la méthodologie appliquée et du déroulement de l'essai CH₄ ainsi qu'une présentation des résultats obtenus.

1. Introduction

Le méthane (CH₄) est un gaz à effet de serre dont la concentration atmosphérique a considérablement augmenté depuis la fin du dernier siècle. Juste après le dioxyde de carbone et avant le protoxyde d'azote, le méthane est un très gros contributeur au potentiel de réchauffement global. Environ 70% des émissions de méthane sont associées à des activités humaines et les ruminants en sont l'une des principales sources. Selon le rapport publié par la FAO en 2006 [2], les activités d'élevage et en particulier la fermentation entérique, seraient à l'origine de près de 40 % des émissions de méthane anthropiques mondiales.

Les ruminants produisent naturellement des quantités importantes de méthane lors de leur digestion qui est basée sur un processus de fermentation microbienne dite de fermentation entérique. Le méthane constitue un sous produit de ce processus, il est principalement émis par éructation ainsi que par les voies respiratoires. 3 à 12 % de l'énergie brute ingérée est ainsi perdue sous forme de méthane. Il existe différentes techniques qui permettent d'évaluer les émissions de méthane entérique. La technique au SF₆ utilisée pour l'essai présente l'avantage de laisser les animaux libres de se déplacer et donc d'être applicable dans des conditions similaires à celles que l'on retrouve dans les élevages commerciaux.

2. Matériel et Méthode

2.1. Animaux

12 vaches multipares ont été sélectionnées pour participer à l'essai sur la base de différents critères comprenant des données zootechniques (parité et stade), l'état sanitaire global des animaux ainsi que des données relatives au caractère et au comportement de chacune des vaches. Ces derniers critères de type comportementaux sont indispensables au bon déroulement des mesures et de l'essai en général, les animaux doivent en effet présenter une bonne tolérance aux manipulations et aux équipements de prélèvement du méthane, être

capables d'utiliser le dispositif d'ingestion individuelle et ne pas refuser l'ingestion des traitements alimentaires.

Les 12 vaches ainsi sélectionnées ont été réparties entre 2 lots de 6 vaches en vue d'obtenir la meilleure homogénéité entre les lots sur les critères suivants : stade, production laitière, taux butyreux et taux protéique. Pour des raisons pratiques liées aux dimensions des équipements d'ingestion individuelle, chacun des 2 lots a été subdivisé en 2 blocs pour obtenir finalement 4 groupes de 3 vaches chacun. Les principales caractéristiques laitières des 12 vaches sélectionnées à la mise en lot (Semaine -1 du planning) sont présentées dans le Tableau 1 ci-dessous.

Lot	Bloc	VL	Parité	Stade (j)	Lait 7j (kg/j)	TB (g/L)	TP (g/L)	Lactose (g/L)	Urée (g/L)	Cellules
1	1	156	4	166	35,0	45,0	37,0	47,4	0,27	62
		316	3	281	32,7	46,2	36,3	50,5	0,26	58
		513	2	130	29,7	47,9	36,0	50,3	0,23	77
	2	257	4	64	54,0	30,5	29,3	54,2	0,19	10
		403	3	82	45,4	40,8	32,9	51,4	0,23	9
		487	2	222	30,4	29,8	36,2	50,8	0,19	98
Moyenne		3,0	158	37,8	40,0	34,6	50,8	0,23	52	

Lot	Bloc	VL	Parité	Stade (j)	Lait 7j (kg/j)	TB (g/L)	TP (g/L)	Lactose (g/L)	Urée (g/L)	Cellules
2	1	102	4	238	31,6	38,6	36,8	49,3	0,25	122
		118	5	128	47,3	33,5	29,8	48,5	0,31	47
		324	3	169	28,1	44,2	37,1	49,5	0,25	421
	2	237	3	57	46,3	38,3	27,7	53,6	0,21	25
		458	2	71	39,0	38,7	28,7	51,5	0,26	19
		463	2	251	29,3	46,3	37,9	51,6	0,25	100
Moyenne		3,2	152	36,9	39,9	33,0	50,7	0,25	122	

Tableau 1 : Caractéristiques laitières des animaux de l'essai

4 vaches ont été sélectionnées par ailleurs en vu d'assurer l'éventuel remplacement d'une des 12 vaches du groupe. A aucun moment de l'essai nous n'avons jugé opportun de remplacer une des 12 vaches sélectionnées initialement, ces 4 vaches n'ont donc pas été mobilisées pour l'essai.

2.2. Planning général de l'essai

La totalité de l'essai s'est déroulée sur 13 semaines durant lesquelles différentes mesures ont été appliquées à l'ensemble ou à une partie des animaux en essai avec des fréquences de suivi variables. La première partie de la figure 1 ci-dessous illustre le programme alimentaire suivi par les vaches sur la durée de l'essai en fonction des différents lots constitués (Cf. 2 lots de 6 vaches divisés en 2 blocs). La seconde partie de la figure présente le planning d'application des différentes mesures réalisées.

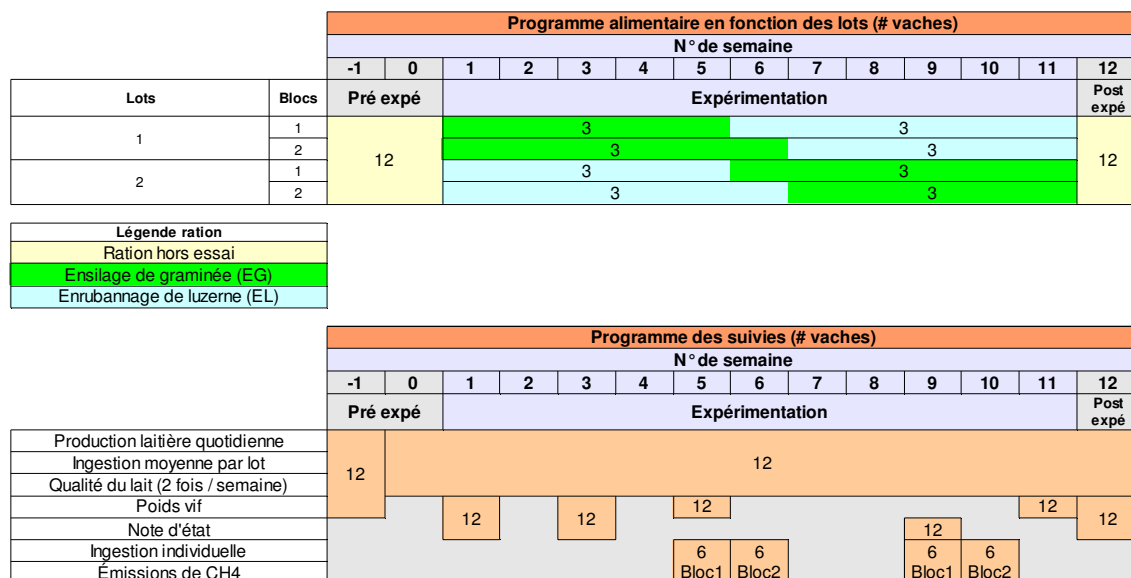


Figure 1 : Planning général de l'essai

Comme l'indique la première partie de la figure, les animaux ont suivi un programme alimentaire marqué par une alternance entre les deux traitements (EG et EL) afin d'obtenir un schéma expérimental de type carré latin complet. Ce genre de schéma permet d'intégrer les effets liés aux individus dans le modèle statique. Il est indiqué ici compte tenu du nombre restreint d'animaux et de la forte variabilité inter-individus qui caractérise les émissions de méthane.

Deux campagnes de mesure de méthane et d'ingestion individuelle d'une semaine ont été appliquées aux animaux en Semaines 5 et 9 pour le Bloc 1 et en Semaines 6 et 10 pour le Bloc 2. Ces deux campagnes ont été précédées par des périodes de transition alimentaire de 4 semaines. Le programme suivi par les animaux de l'essai a donc consisté en deux périodes de 5 semaines comprenant 4 semaines de transition et 1 semaine de mesure. L'ensemble des résultats présentés au chapitre 3 sont tirés des mesures réalisés sur les Semaines 5, 6, 9 et 10.

2.3. Ration

Les rations ont été distribuées tous les matins par un bol mélangeur sur la base d'un refus journalier minimum de 3%. Deux bols différents étaient distribués chaque jour avec les rations correspondant aux traitements EG et EL. Les deux rations EG et EL sont composées d'une base commune à laquelle ont été ajoutés les traitements.

Ration théorique

Les niveaux d'ingestion quotidiens théoriques de la fraction commune des rations sont présentés dans le tableau 2 ci-dessous avec le détail de composition en matière brute et sèche. La ration théorique contenant de la luzerne (EL) est complétée par 3.6 kg de MS d'enrubannage de luzerne (5.5 kg brut) fourni par Désialis, tandis que la ration théorique témoin (EG) est complétée par 3.2 kg de MS d'ensilage d'herbe récolté le 25 mai 2012 à l'autochargeuse (10 kg brut) et de 400 g d'un correcteur azoté formulé spécifiquement pour équilibrer les deux rations (composé de 64% de soja, de 26% de colza et de 10% d'urée).

Aliments	Ingestion moyenne brute (Kg.VL ⁻¹ .j ⁻¹)	Ingestion moyenne de MS (Kg.VL ⁻¹ .j ⁻¹)
Ensilage de maïs	23,0	8,5
Pulpes surpressées	7,0	2,0
Pommes de terre	5,0	1,0
Tourteau de colza gras	4,0	3,5
Tourteau de colza industriel	1,5	1,4
Blé	1,0	0,9
Maïs grain humide	2,5	1,7
Mélasse	1,00	0,73
Urée retard	0,05	0,05
Minéraux, sel, bicarbonate	0,35	0,35
Total base	45,4	20,1

Tableau 2 : Ingestion quotidienne théorique et composition théorique de la ration de base

Les rations et les ingestions effectives sont présentées dans la partie 3.2 *Résultats bruts*.

Analyses chimiques des fourrages

Afin de vérifier au cours du temps les valeurs nutritionnelles prises en compte dans le calcul de la ration, des analyses régulières de fourrages ont été effectuées sur l'ensilage de maïs, l'ensilage de graminées et l'enrubannage de luzerne. Les résultats de ces analyses sont présentés dans le tableau 3 ci-dessous.

Semaine d'échantillonnage	Ensilage de Maïs			Ensilage Graminées			Enrubannage Luzerne		
	S-1	S1	S10	S-1	S7	S9	S9	S10	S12
MS (%)	39,7	36,5	37,2	32,4	33,2	38,5	63,2	66,4	68
MAT (%)	8,3	8,7	8,0	11,3	11,0	10,7	19,3	20,7	16,2
Amidon (%)	28,1	25,8	28,2	-	-	-	-	-	-
CB (%)	21,2	21,4	21,3	34,3	34,7	34,1	30,0	29,4	26,0
NDF (%)	46,4	47,3	44,5	63,4	63,3	61,9	47,2	-	34,8
ADF (%)	25,4	25,4	24,4	37,0	38,1	36,0	31,3	-	25,0
UF lait	0,95	0,94	0,95	0,61	0,60	0,58	0,60	0,72	0,78
PDIN (g/kg)	51	53	49	66	64	62	109	117	104
PDIE (g/kg)	71	71	71	48	47	50	71	74	85
PDIA (g/kg)	17	18	16	21	20	19	32	35	40

Tableau 3 : Résultats d'analyses sur les fourrages

On note des différences de composition marquées entre EG et EL. L'ensilage de graminées présente notamment une teneur en azote totale plus faible que la luzerne (EG = 11, EL = 19) et une fibrosité chimique plus importante avec des teneurs en cellulose, en NDF et en ADF plus élevées. Ces différences de qualités s'expliquent vraisemblablement par la date tardive (25 mai) de l'ensilage de EG et donc par le stade avancé des graminées à ce moment.

Fibrosité physique de la ration

Les fibrosités physiques des rations EG et EL ont été comparées à plusieurs reprises au cours de l'essai à l'aide d'un tamis Penn State. Les mesures ont été effectuées toutes les deux semaines environ sur les deux rations avec trois répétitions par ration et par mesure. Le tamis

est composé de 3 grilles superposées de diamètre 0,75 pouce (1,9 cm), 0,31 pouce (0,79 cm), et 0,05 pouce (0,13 cm).

Les résultats sont présentés dans la figure 2 ci-dessous. Chaque point indique le pourcentage de particules (sur le poids de matières fraîches, en ordonnée) dont la taille est inférieure au diamètre du pore (en abscisse). La ration EG apparaît plus fibreuse que la ration EL. En effet la part de particules dont la longueur est supérieure à 1.90 cm (le plus gros pore du tamis) représente près de 50% de EG et moins de 20% de EL. Tandis que les particules de la classe de taille suivante (comprises entre 1.90 et 0.79 cm) ne représentent que 24% de EG contre 45% de EL. En définitive la part prépondérante de EG est au dessus de 1.90 cm tandis que celle de EL est située entre 0.79 et 1.90 cm.

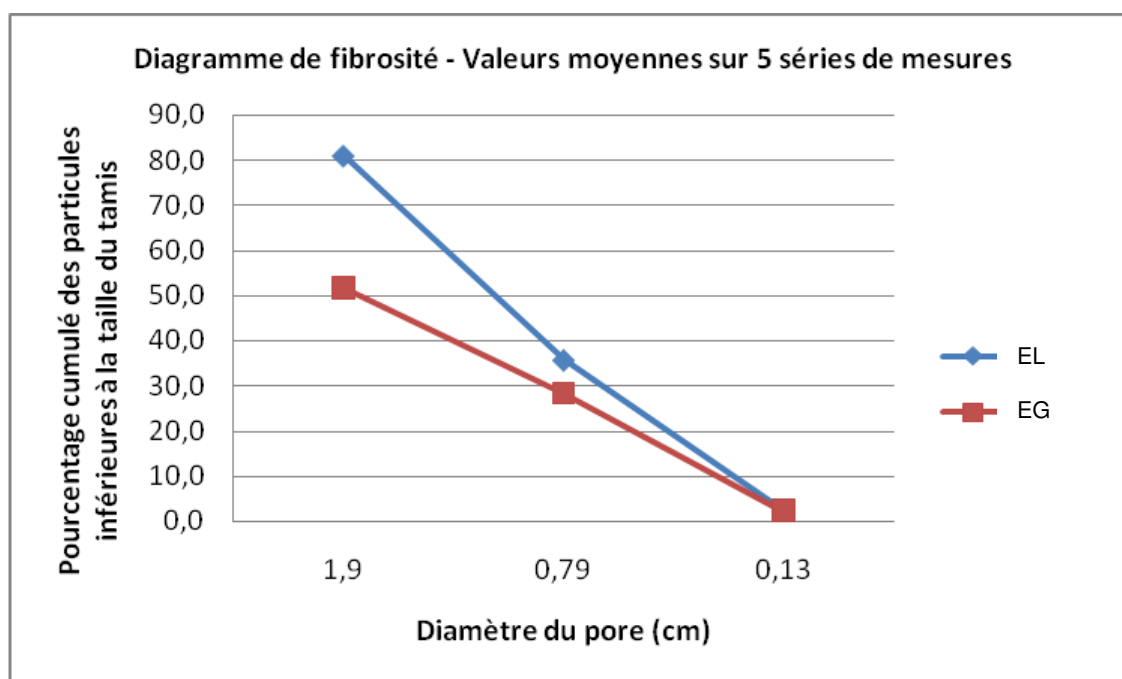


Figure 2 : Diagramme de fibrosité. (Chaque point est une valeur moyenne issue de 5 mesures)

Là encore la différence de fibrosité s'explique par les conditions de récolte de l'ensilage de graminées. D'une part, et comme on l'a vu précédemment, l'ensilage a été réalisé tardivement, et d'autre part il a été réalisé à l'aide d'une autochargeuse et non d'une ensileuse. Bien que l'autochargeuse soit équipée de couteaux, les brins de fourrages autochargés sont généralement plus longs que pour des fourrages ensilés.

On notera que la variabilité observée entre les mesures réalisées toutes les deux semaines était importante, avec des écarts type de l'ordre de 20 à 30% pour les grosses particules, plus encore pour les petites particules. L'élaboration des rations, en particulier le temps et la vitesse de mixage des ingrédients, peuvent en effet varier d'un jour sur l'autre et d'un opérateur à l'autre. En revanche la variabilité observée entre les répétitions pour une même mesure était relativement faible (écart type autour de 10%), ce qui indique une bonne homogénéité de la ration et une bonne fiabilité de la mesure.

2.4. Mesure des émissions de méthane

Description générale de la technique au gaz traceur SF₆

La technique du gaz traceur à l'hexafluorure de soufre (SF₆) a été utilisée pour mesurer les émissions de méthane entérique. Celle-ci repose sur l'insertion, dans le rumen des individus suivis, de petits tubes à perméation relarguant du SF₆ sous forme gazeuse avec un taux d'émission constant et connu. Les gaz éructés sont ensuite collectés à l'aide d'un collier sous vide porté par l'animal et branché à un tube capillaire dont l'extrémité libre est positionnée au-dessus des naseaux. La longueur et le diamètre du tube capillaire conditionnent le débit d'entrée de l'échantillon de manière à obtenir une aspiration constante durant 24 h. Une fois l'échantillon gazeux collecté, les colliers sont placés en légère surpression à l'aide d'un gaz neutre (N₂) afin d'en soutirer les volumes nécessaires à l'analyse. Les concentrations en CH₄ et en SF₆ sont ensuite déterminées par chromatographie en phase gazeuse. Le taux d'émission de méthane par la vache est calculé comme le produit entre le taux d'émission du tube à perméation et le ratio entre les concentrations en CH₄ et SF₆ de l'échantillon.

Équipements

Les tubes à perméation

Les tubes à perméation (Cf. Photo 1) utilisés pour l'essai ont été importés depuis la Nouvelle-Zélande par l'institut national de recherche du pays (NIWA) [3], avant d'être calibrés pour leurs taux d'émissions en France. La calibration des taux d'émissions a été réalisée par pesées hebdomadaires des tubes sur une période de 12 semaines durant laquelle les tubes étaient placés en étuve à une température de 39°C. Le taux d'émission en SF₆ des tubes est connu pour avoir un certain impact sur les émissions de méthane évaluées, il constitue ainsi un biais potentiellement non négligeable de la technique au SF₆. Afin de supprimer les risques liés à ce biais, les tubes ont été répartis entre les deux lots de vache de manière à obtenir la meilleure homogénéité possible des taux d'émissions (Cf. Tableau 4).



Photo 1 : Tube à perméation SF₆

Lot	Bloc	VL	Émission SF6 (ng.min-1)
1	1	156	4 910
		316	4 608
		513	4 476
	2	257	4 462
		403	4 415
		487	4 332
Moyenne			4 534

Lot	Bloc	VL	Émission SF6 (ng.min-1)
2	1	102	4 681
		118	4 632
		237	4 460
	2	324	4 628
		458	4 447
		463	4 316
Moyenne			4 527

Tableau 4 : Taux d'émissions et distribution des tubes

Collier de collecte et tube capillaire

L'équipement nécessaire à la collecte d'un échantillon gazeux représentatif des émissions quotidiennes d'une vache comprend un collier de collecte et un jeu de tuyaux de petits

diamètres branchés au collier et fixés à un licol qui sera porté par l'animal (Cf. Photos 2 et 3). Le collier est fabriqué sur place à partir de PVC de qualité pression. Il assure l'aspiration et le stockage de l'échantillon. Le jeu de tuyaux et les connexions sont montés sur place à partir d'éléments de la marque Swagelock. Ils limitent le débit d'entrée de l'échantillon et en assurent le filtrage et le transport depuis les naseaux jusqu'au collier.



Photos 2 et 3 : Vaches équipées pour la collecte des gaz

Le dispositif de mesure de l'ingestion individuelle

Le dispositif utilisé pour la mesure de l'ingestion individuelle et quotidienne est dimensionné pour accueillir 6 vaches. Il est constitué de 6 couloirs individuels au bout de chacun desquels se trouve un portillon qui donne accès à la ration et dont l'ouverture est conditionnée par une identification électronique de l'animal (Cf. Photo 4). Une phase d'habituation a été réalisée antérieurement pour que chaque vache connaisse bien le dispositif et mange spontanément dans le bon couloir. Comme ce dispositif ne permet pas de travailler avec plus de 6 bêtes en même temps, les 12 animaux ont été séparés en 2 blocs utilisant successivement le dispositif.



Photo 4 : Vaches équipées dans le dispositif d'ingestion individuelle

Analyse des gaz

Les concentrations en CH_4 et en SF_6 ont été déterminées par chromatographie en phase gazeuse à l'unité mixte de recherche (UMR) AgroParisTech/INRA EGC à Grignon. Le chromatographe est équipé de deux détecteurs : un détecteur à capture d'électron (ECD) et un détecteur à ionisation par flamme (FID) utilisés respectivement pour mesurer les concentrations en SF_6 et en CH_4 . Les tubes soutirés des colliers ont été systématiquement analysés dans les 3 jours qui suivaient la collecte. A chaque séquence d'analyse la réponse du chromatographe a été calibrée à l'aide d'une série de trois mélanges étalons (CH_4 , SF_6 et N_2 de concentrations connues). La série d'étalon a été importée de Nouvelle Zélande où elle a été spécialement préparée par NIWA.

3. Résultats

3.1. Qualité des mesures et problèmes rencontrés

Qualité des mesures

Une procédure de suivi de la qualité des mesures a été appliquée à l'essai. La procédure en question couvre les deux points les plus sensibles du système de mesure à savoir le prélèvement de l'échantillon gazeux et l'ingestion individuelle. La qualité de chaque échantillon gazeux a été caractérisée par une note comprise entre 0 et 3 dont la valeur dépend d'observations faites sur les équipements de collecte (dommages visibles, suspicions de fuites...) ainsi que de la pression mesurées dans le collier de collecte après les 24 h de prélèvement. Cette pression doit idéalement être d'une demi-atmosphère, et si ce n'est pas le cas cela traduit des problèmes de fuites ou d'obstruction du tube capillaire. De la même manière, la qualité de l'ingestion individuelle est caractérisée par une note égale à 0 ou 1. Cette caractérisation permet d'identifier et d'éliminer les cas où l'ingestion a été perturbée pour une raison ou une autre (principalement à cause de coupures électriques ou dans le cas d'animaux en chaleur peu motivés par l'ingestion).

Le Tableau 5 ci-dessous offre une description détaillée des critères de qualité utilisés et des notes données durant l'essai. Sur la totalité des mesures entreprises (120) durant l'essai, 81 % des échantillons ont obtenu la note de qualité 3. Vis-à-vis de l'ingestion seulement 5 % des cas ont obtenu une note de qualité 0. Pour l'analyse statistique, seules les données ayant reçu une note de 2 ou 3 sur la qualité de l'échantillon et une note de 1 sur l'ingestion ont été utilisées. Une procédure de pondération a permis de prendre en compte des différences de qualité 2 et 3 dans l'analyse statistique (procédure WEIGHT sous SAS).

Qualité de l'échantillon gazeux				
Note	0	1	2	3
Description du critère	Pas d'échantillon	Suspicion forte sur la qualité de l'échantillon	Suspicion faible sur la qualité de l'échantillon	Échantillon de bonne qualité
%	7%	4%	8%	81%
Utilisation dans l'analyse statistique	Non	Non	Oui	Oui

Qualité de l'ingestion individuelle		
Note	0	1
Description du critère	Plus de 30 % de différence entre la MSI du jour et la moyenne sur la période	Moins de 30 % de différence entre la MSI du jour et la moyenne sur la période
%	5%	95%
Utilisation dans l'analyse statistique	Non	Oui

Tableau 5 : Note de qualité données durant l'essai

CVs individuels moyens par traitement et par vache	
CH4 Brut	7.7%
MSI	7.0%
CH4/MSI	7.4%
CH4/Lait cor.	8.9%

Tableau 6 : Coefficients de variations moyens

La variabilité des résultats observés pour un animal donné entre les différents jours d'une campagne offre par ailleurs un critère intéressant sur la qualité globale et en particulier sur la répétabilité des mesures. Les coefficients de variation moyens (CVs = Ecart type/Moyenne, calculés pour chaque vache à chaque période pour obtenir une moyenne) observés pour différents facteurs mesurés sont présentés dans le Tableau 6 ci-dessus. Les coefficients de variation intra-individu observés sur les critères relatifs aux émissions de méthane durant l'essai sont compris entre 7.4 et 8.9 % ce qui correspond à un ordre de grandeur fréquemment rapporté pour des mesures avec la technique au SF₆ [4].

Problèmes rencontrés

L'essai a été perturbé par deux problèmes indépendants. En premier lieu une erreur dans les fichiers d'alimentation a modifié de manière significative la ration du groupe EL en semaine 4 (3.2 kilos en plus, soit : 1.9 kg de tourteau gras, 0.94 kg de correcteur azoté, 95 g de minéral, 46 g de bicarbonate, 23 g d'urée retard, 23 g de sel). Des mesures d'émissions de méthane étaient alors en cours sur cette semaine et l'ensemble des résultats a été écarté. L'erreur a été corrigée en fin de semaine 4 et les 6 vaches concernées ont fait l'objet de nouvelles mesures d'émissions en semaine 6, ce qui leur a laissé une dizaine de jour pour s'adapter à la correction.

Le deuxième problème rencontré concerne la vache 237 dont un trayon a été sectionné (probablement par une autre vache) en tout début de semaine 5. Nous avons alors jugé la vache apte à poursuivre l'essai, pensant que son état pouvait se stabiliser, et nous avons fait le choix de ne pas la remplacer. Malheureusement le trayon s'est infecté durant la période de transition alimentaire (semaines 6, 7 et 8) et son état sanitaire global s'est dégradé assez rapidement avec un impact fort sur l'ingestion, la production de lait et le poids vif. L'ensemble des résultats obtenus pour cet animal a été écarté de l'analyse statistique.

3.2. Résultats bruts

Ingestion et composition de la ration

Les niveaux d'ingestion et les compositions de ration observés sont présentés dans les tableaux 7 et 8 ci-dessous selon les traitements pour l'ensemble de la durée de l'essai (Tableau 7) ou pour chacune des campagnes de mesure considérées (Tableau 8).

Totalité de l'essai		
Aliments	EL Ingestion moyenne de MS (Kg.VL ⁻¹ .j ⁻¹)	EG Ingestion moyenne de MS (Kg.VL ⁻¹ .j ⁻¹)
Ensilage de maïs	8,78	8,11
Tourteau de colza gras	3,60	3,64
Pulpes surpressées	1,98	1,96
Correcteur azoté	1,76	1,78
Maïs grain humide	1,78	1,73
Pommes de terre	1,42	1,40
Concentré DAC	0,88	0,88
Minéraux, sel, bicarbonate	0,35	0,35
Mélasse	0,31	0,32
Urée retard	0,05	0,05
Enrubannage luzerne	3,69	0,00
Ensilage Graminées	0,00	3,53
Correcteur azoté d'équilibre	0,00	0,36
Total	24,6	24,1

Tableau 7 : Ingestion et composition réelles sur la totalité de l'essai

Aliments	1ère campagne		2ème campagne	
	EL Ingestion moyenne de MS (Kg.VL ⁻¹ .j ⁻¹)	EG Ingestion moyenne de MS (Kg.VL ⁻¹ .j ⁻¹)	EL Ingestion moyenne de MS (Kg.VL ⁻¹ .j ⁻¹)	EG Ingestion moyenne de MS (Kg.VL ⁻¹ .j ⁻¹)
Ensilage de maïs	9,38	8,11	8,19	8,26
Tourteau de colza gras	3,73	3,64	3,45	3,62
Pulpes surpressées	2,13	1,96	1,84	2,01
Correcteur azoté	1,82	1,78	1,69	1,77
Maïs grain humide	1,88	1,73	1,68	1,78
Pommes de terre	1,53	1,40	1,32	1,42
Concentré DAC	0,88	0,88	0,88	0,88
Minéraux, sel, bicarbonate	0,36	0,35	0,33	0,35
Mélasse	0,32	0,32	0,29	0,32
Urée retard	0,05	0,05	0,05	0,05
Enrubannage luzerne	3,80	0,00	3,57	0,00
Ensilage Graminées	0,00	3,53	0,00	3,87
Correcteur azoté d'équilibre	0,00	0,36	0,00	0,36
Total	25,9	24,1	23,3	24,7

Tableau 8 : Ingestion et composition réelles en fonction des campagnes de mesure

Méthane

Ci-dessous, les résultats obtenus pour chacun des facteurs expérimentaux (méthane, ingestion, lait...) sont présentés vache par vache et traitement par traitement dans les Figures 3 à 9. Les écarts types observés entre les répétitions pour une vache avec un traitement (Cf.

différents jours d'une même campagne de mesure) sont représentés sur les figures sous forme de barres d'erreurs.

Chaque figure est accompagnée de quelques commentaires avec pour chacun des facteurs expérimentaux une moyenne inter-vache globale et un écart type inter-vache global concernant (i) l'ensemble des mesures, (ii) les mesures avec traitement EG et (iii) les mesures avec traitement EL. Ces moyennes et écarts type inter-vache globaux sont calculés en faisant la moyenne des moyennes et la moyenne des écarts types observés pour chacune des vaches entre les répétitions. Les ratios relatifs aux émissions de méthane sont exposés en 3.3 selon le même mode de présentation.

Les émissions brutes de méthane mesurées sont données dans la Figure 3 ci-dessous. Le niveau d'émission moyen est de 424 (+/-32) gr.CH₄.VL⁻¹.j⁻¹ avec pour le traitement EG 440 (+/-32) et pour EL 408 (+/-32) gr.CH₄.VL⁻¹.j⁻¹.

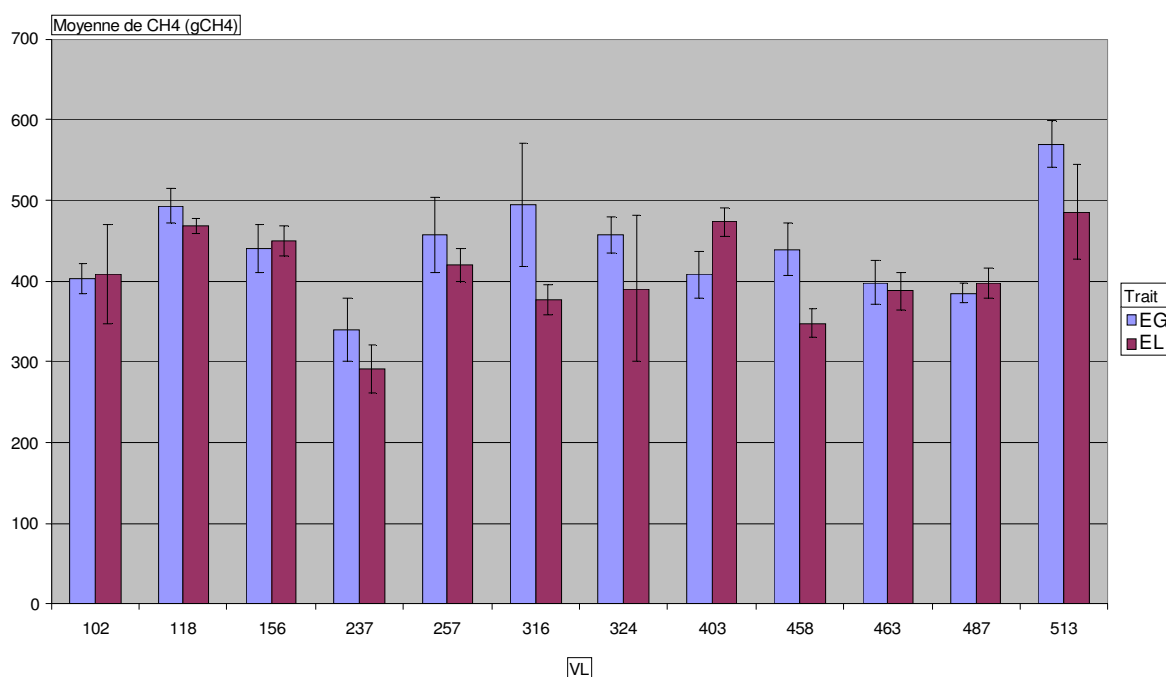


Figure 3 : Emissions brutes moyennes de CH₄ par vache et par traitement (gr.CH₄.j⁻¹)

Ingestion individuelle

Les ingestions individuelles moyennes mesurées traitement par traitement et vache par vache sont données par la figure 4. Pour l'ensemble l'ingestion moyenne est de 24.4 (+/-1.7) Kg.MSI.VL⁻¹.j⁻¹, avec EG à 24.1 (+/-1.6) et EL à 24.6 (+/-1.8) Kg.MSI.VL⁻¹.j⁻¹.

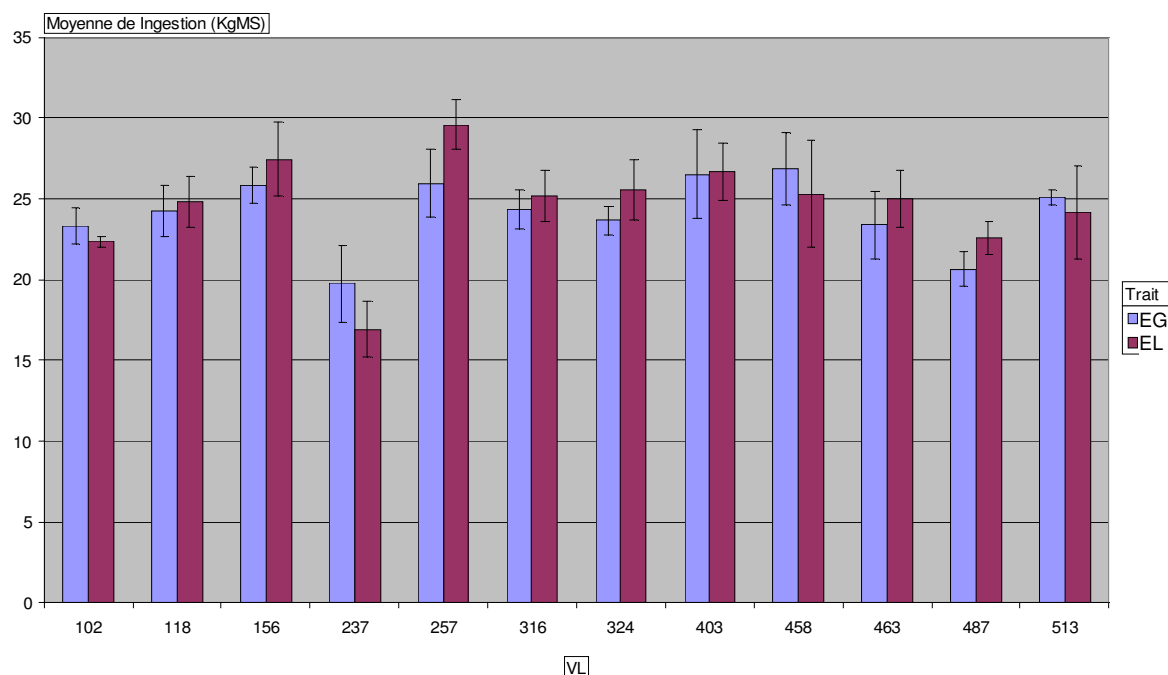


Figure 4 : Ingestion individuelle par vache et par traitement (Kg.MSI.VL⁻¹.j⁻¹)

Production laitière

La production laitière corrigée sur l'énergie (lait cor NRJ = 38‰ MG, 32‰ Prot. et Lactose 50‰) observée sur les périodes de suivi méthane est présentée vache par vache et traitement par traitement sur la Figure 5. La correction énergétique prend en compte les taux en matière grasse, en protéine et en lactose mesurés lors des contrôles laitiers bi hebdomadaires selon la formule suivante :

$$\text{Lait cor. NRJ} = \frac{\text{Lait (Kg)} * (9.6 * \text{MG (g.kg}^{-1}) + 5.6 * \text{Protéine (g.kg}^{-1}) + 4.2 * \text{Lactose (g.kg}^{-1}))}{(38 * 9.6 + 32 * 5.6 + 50 * 4.2)}$$

La production moyenne quotidienne est de 31.9 (+/-2.2) kg.j⁻¹ sur l'ensemble des données avec 30.9 (+/-2.9) pour EG et 33.0 (+/-1.5) pour EL. On note sur la figure les données relatives à la vache 237 avec une production extrêmement faible en traitement EG suite au problème sanitaire mentionné au point 3.1 *Problèmes rencontrés*.

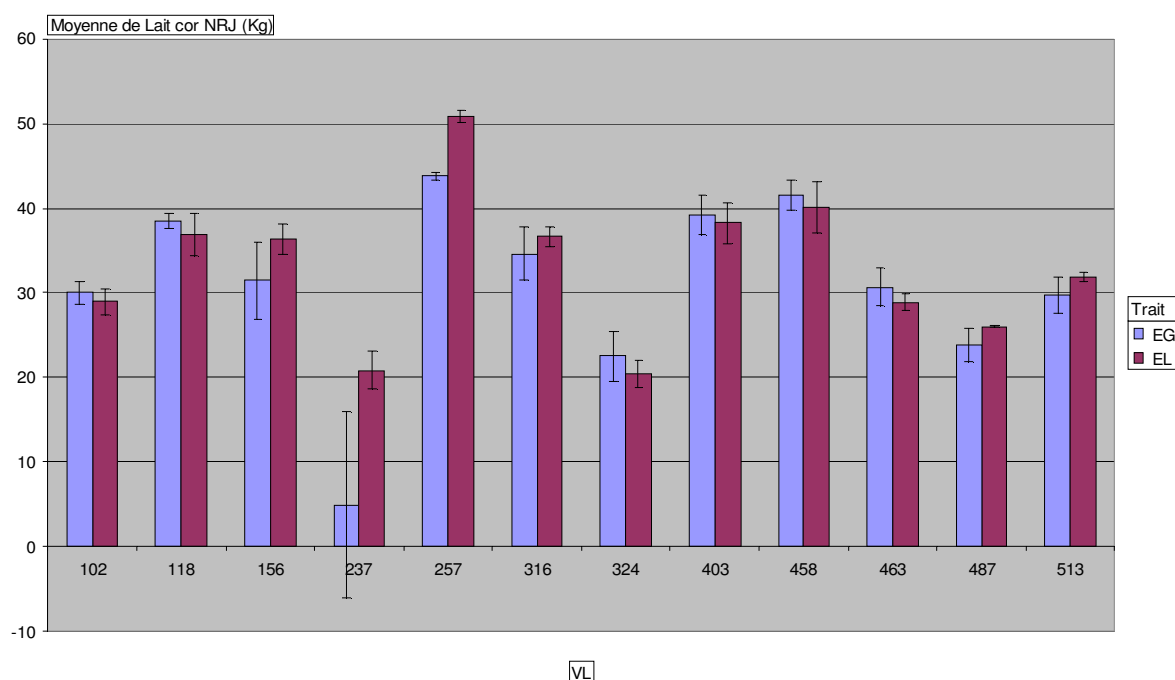


Figure 5 : Production laitière corrigée sur l'énergie moyenne par vache et par traitement (Kg.j^{-1})

Qualité du lait

Pour les mesures de qualité du lait, le nombre de répétitions par vache et par traitement est limité à 2 (2 contrôles laitiers par semaine soit 2 contrôles laitiers par campagne de mesure CH_4), c'est pourquoi les écarts types n'apparaissent pas sur les Figures 6, 7, 8 et 9.

Taux butyreux

Les Taux butyreux observés vache par vache et traitement par traitement durant les périodes de mesure CH_4 sont représentés en Figure 6. Sur l'ensemble des mesures présentées le taux butyreux moyen est de 40.8 g.l^{-1} (avec EG : 41.7 et EL : 39.9).

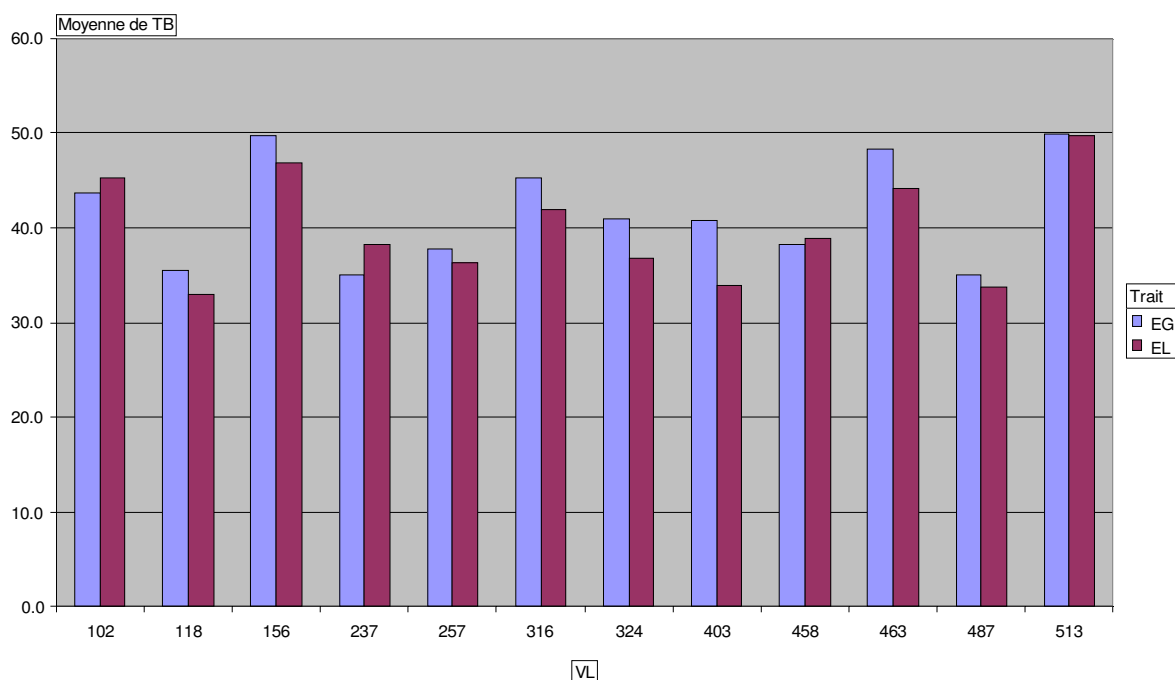


Figure 6 : Taux butyreux par vache et par traitement (g.l^{-1})

Taux protéiques

Les Taux protéiques observés vache par vache et traitement par traitement durant les périodes de mesure CH₄ sont représentés en Figure 7. Sur l'ensemble des mesures présentées le taux protéique moyen est de 34.6 g.l⁻¹ (avec EG : 34.5, et EL : 34.7).

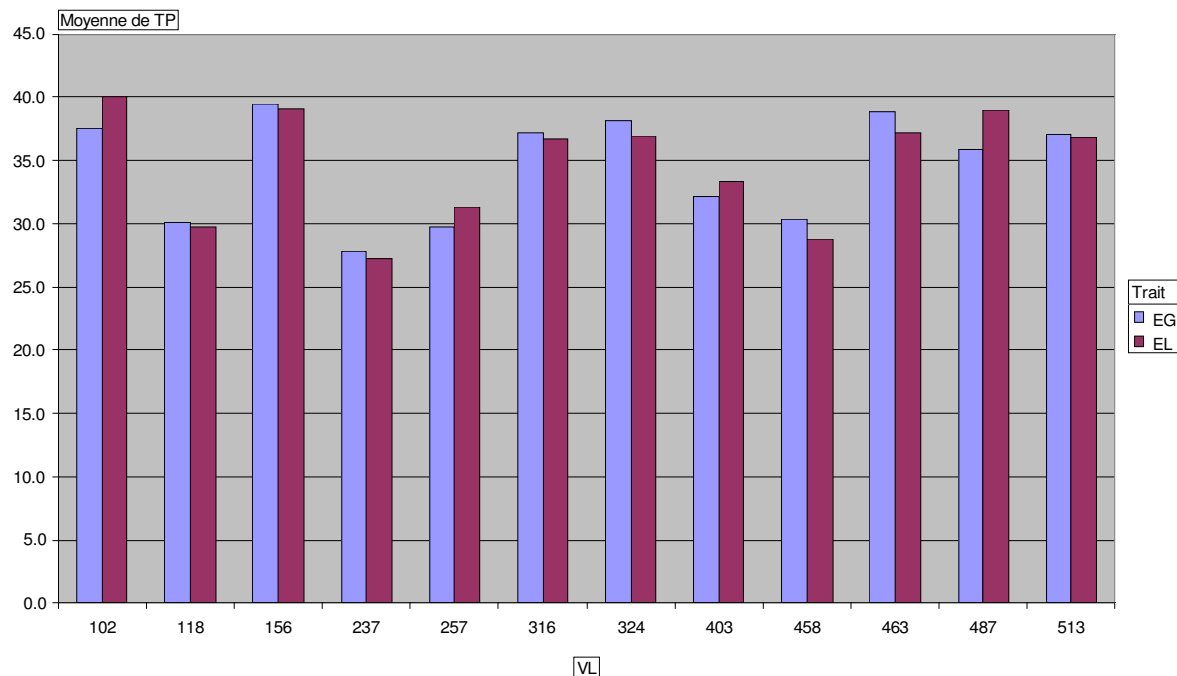


Figure 7 : Taux protéiques par vache et par traitement (g.l⁻¹)

Lactose

Les Taux en lactose observés vache par vache et traitement par traitement durant les périodes de mesure CH₄ sont représentés en Figure 8. Sur l'ensemble des mesures présentées le taux en lactose moyen est de 50.3 g.l⁻¹ (avec EG : 49.9 et EL : 50.6).

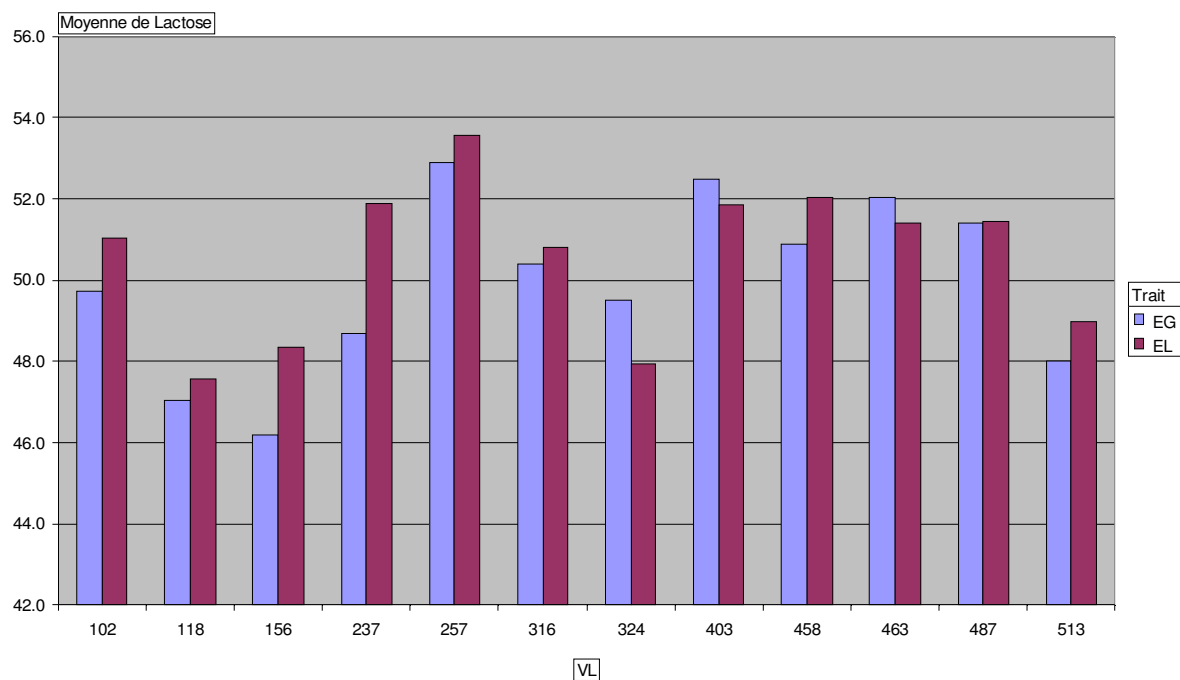


Figure 8 : Taux en lactose par vache et par traitement (g.l⁻¹)

Urée

Les Taux en urée observés vache par vache et traitement par traitement durant les périodes de mesure CH₄ sont représentés en Figure 9. Sur l'ensemble des mesures présentées le taux en Urée moyen est de 244 mg.l⁻¹ (avec EG : 255 et EL : 233).

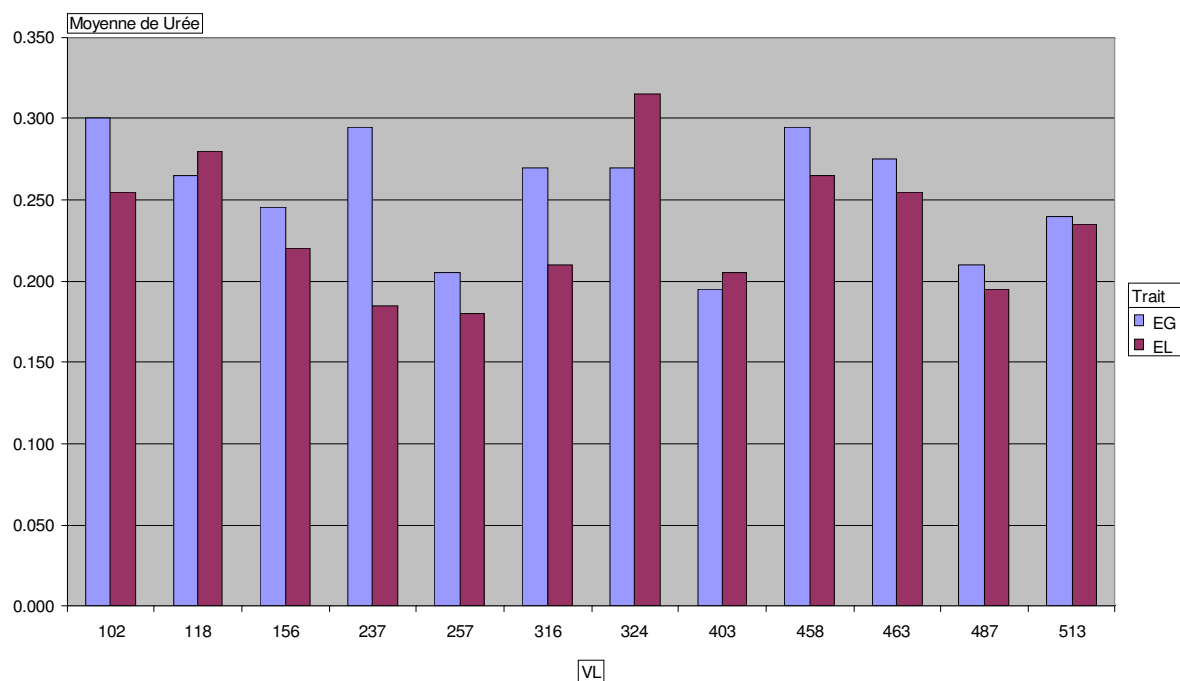


Figure 9 : Taux en Urée par vache et par traitement (g.l⁻¹)

3.3. Ratios relatifs aux émissions de méthane

La Figure 10 ci-dessous montre la corrélation observée entre les émissions de méthane et l'ingestion quotidienne de matière sèche. On y observe une corrélation linéaire entre les émissions et l'ingestion. Cette corrélation est classique et rappelle que l'ingestion de matières sèches est un des premiers facteurs influant l'émission. Le R^2 est de 0.22 ce qui est relativement faible du fait principalement de la forte variabilité inter-individus du phénomène.

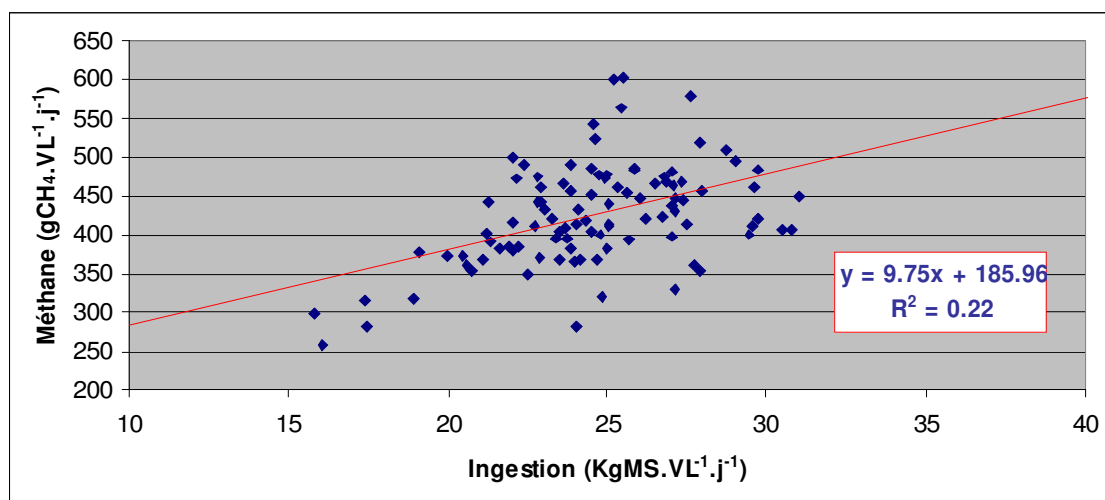


Figure 10 : Corrélation entre l'ingestion quotidienne de MS et les émissions de méthane

Les émissions de méthane mesurées et rapportées à l'ingestion de matière sèche et à la production de lait corrigée sur l'énergie sont présentées en Figures 11 et 12. Les résultats relatifs à l'ingestion montrent en moyenne une émission de 17.5 (+/-1.3) gr.CH₄.KgMSI⁻¹ avec EG : 18.3 (+/-1.1) et EL : 16.7 (+/- 1.5). L'émission moyenne de méthane par kilogramme de lait corrigé est de 13.5 (+/-1.3) gr.CH₄.KgLait⁻¹ avec EG : 13.9 (+/-1.1), et EL : 13.0 (+/- 1.4).

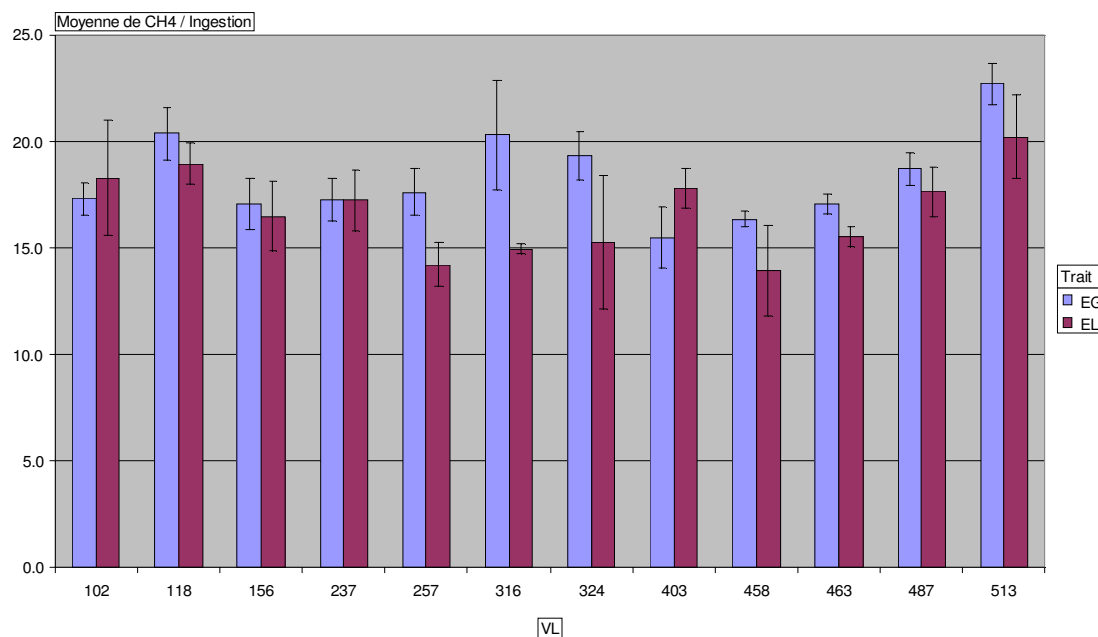


Figure 11 : Emissions de méthane par matière sèche ingérée (gr.CH₄.KgMSI⁻¹)

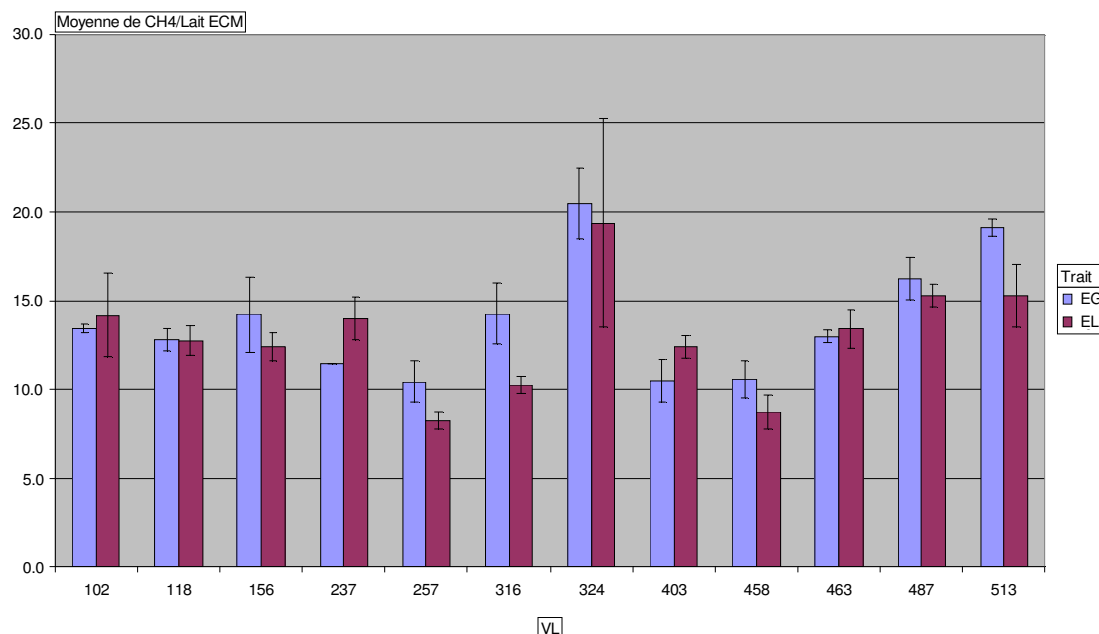


Figure 12 : Emissions de méthane par lait produit (gr.CH₄.KgLait⁻¹)

4. Résultats statistiques

Le modèle statistique utilisé a permis de tester indépendamment les effets des individus (vache), des périodes (en lien avec les deux campagnes de mesure CH₄) et des traitements expérimentaux (EG et EL) sur 26 variables regroupées en 3 groupes :

- 4 variables relatives à l'ingestion et au poids vif : ingestion quotidienne exprimée en matière sèche (kg.j⁻¹) et en énergie brute (kcal.j⁻¹), poids vif des animaux (kg) et gain moyen quotidien (GMQ en g.VL⁻¹.j⁻¹) calculé entre les semaines S1 et S5 ainsi que S5 et S11.
- 18 variables relatives au lait : production quotidienne de lait brute (kg.j⁻¹) et corrigée selon l'énergie (kg.j⁻¹) ; synthèse de matières grasses (g.j⁻¹) (c.-à-d. Production de lait x Taux butyreux) ; synthèse de matières protéiques (g.j⁻¹) (c.-à-d. Production de lait x Taux protéique) ; synthèse de matières utiles (g.j⁻¹) (c.-à-d. Matières grasses + Matières protéiques) ; taux butyreux (g.L⁻¹) ; taux protéique (g.L⁻¹) ; lactose (g.L⁻¹) ; cellules (log.10) ; urée (mg.L⁻¹) ; production de lait corrigée ramenée à l'ingestion de matière sèche (kg.kg⁻¹) et enfin un ensemble de facteurs relatifs aux teneurs en acides gras du lait mesurées à l'Infra Rouge : acides gras saturés (%AGtot) ; acides gras insaturés (%AGtot) ; acides gras mono-insaturés (%AGtot) ; acides gras poly-insaturés (%AGtot) ; C16:0 (%AGtot) ; C18:0 (%AGtot) et C18:1 (%AGtot).
- 4 variables relatives à l'émission de méthane : émission quotidienne de CH₄ (g.j⁻¹) ; émission de CH₄ ramenée à l'ingestion de matière sèche (g.kg⁻¹), à la production de lait corrigée (g.kg⁻¹) et à l'énergie brute ingérée (facteur pour lequel l'émission de CH₄ est exprimée en kcal et le ratio en % d'énergie).

Le détail des résultats statistiques obtenus est présenté dans le tableau 9 ci-dessous. La significativité des effets des individus, des périodes et des traitements est donnée à travers les

valeurs P . Les quatre colonnes situées à droite des valeurs P ne concernent plus que les effets des traitements expérimentaux (EG vs EL). On trouve dans ces colonnes :

- La significativité de l'effet Traitement pour chacune des variables exprimée selon les seuils statistiques suivants : $P > 0.05$: **NS** ; $0.05 > P > 0.01$: ***** ; $0.01 > P > 0.001$: ****** et $0.001 > P$: *******.
- Les moyennes des moindres carrés (MMC) calculées par traitement pour chacune des variables.
- Et le pourcentage de différence observé sur les MMC entre les deux traitements (sur la base du MMC EG).

Variables testées		Valeurs <i>P</i> relatives aux trois facteurs testés			Résultats propres au facteur Traitement			
		Vache	Période	Traitement	Significativité	MMC		Effet EL (% diff. vs EG)
						EG	EL	
Ingestion et Poids vif	Ingestion MS (kgMS.VL ⁻¹ .j ⁻¹)	<0.0001	0.12	0.04	*	24.5	25.4	+4 %
	Ingestion énergie brute (kcal.VL-1.j-1)	<0.0001	0.23	0.04	*	108 349	112 096	+3 %
	Poids Vif (kg)	<0.0001	0.001	0.001	**	699	709	+1 %
	GMQ (g.VL ⁻¹ .j ⁻¹)	<0.0001	0.001	0.1	NS	77	475	
Lait	Lait (Kg.VL ⁻¹ .j ⁻¹)	<0.0001	<0.0001	0.0008	***	33.4	33.9	+1 %
	Lait corrigé NRJ (Kg.VL ⁻¹ .j ⁻¹)	<0.0001	<0.0001	0.08	NS	33.3	34.2	
	Synthèse matières grasses (g.VL ⁻¹ .j ⁻¹)	<0.0001	0.003	0.65	NS	1 304	1 295	
	Synthèse matières protéiques (g.VL ⁻¹ .j ⁻¹)	<0.0001	<0.0001	0.0004	***	1 075	1 132	+5 %
	Synthèse matières utiles (g.VL ⁻¹ .j ⁻¹)	<0.0001	<0.0001	0.15	NS	2 379	2 428	
	TB (g.l ⁻¹)	<0.0001	0.11	<0.0001	***	42.3	40.1	-5 %
	TP (g.l ⁻¹)	<0.0001	<0.0001	0.3	NS	35.2	35.3	
	Lactose (g.l ⁻¹)	<0.0001	0.02	0.001	**	50.1	50.5	+1 %
	Cellules (échelle Log10)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	***	2.15	1.92	-11 %
	Urée (mg.l ⁻¹)	<0.0001	0.01	0.001	**	251	239	-5 %
	Lait corrigé NRJ / Ingestion (kg.kgMsi ⁻¹)	<0.0001	0.004	0.9	NS	1.35	1.35	
	Acides Gras Saturés (% AGtot)	<0.0001	<0.0001	0.45	NS	66.5	66.3	
	Acides Gras Inaturés (% AGtot)	<0.0001	<0.0001	0.45	NS	33.5	33.5	
	Acides Gras Mono-insaturés (% AGtot)	<0.0001	<0.0001	0.16	NS	28.7	28.5	
	Acides Gras Poly-insaturés (% AGtot)	<0.0001	<0.0001	<0.0001	***	4.7	5.0	+6 %
	Acides Gras C16:0 (% AGtot)	<0.0001	<0.0001	0.65	NS	27.3	27.3	
	Acides Gras C18:0 (% AGtot)	<0.0001	0.27	<0.0001	***	9.5	9.9	+4 %
	Acides Gras C18:1 (% AGtot)	<0.0001	0.05	0.42	NS	25.2	25	
Méthane	Emission CH ₄ (gCH ₄ .VL ⁻¹ .j ⁻¹)	<0.0001	0.38	0.002	**	450	418	-7 %
	CH ₄ / Ingestion (gCH ₄ .kgMsi ⁻¹)	<0.0001	0.87	<0.0001	***	18.4	16.6	-10 %
	Pertes d'énergie ingérée en CH ₄ (%)	<0.0001	0.86	<0.0001	***	4.98	4.49	-10 %
	CH ₄ / Lait corrigé NRJ (gCH ₄ .kg ⁻¹)	<0.0001	0.11	0.007	**	14.1	12.9	-9 %

Tableau 9 : Résultats statistiques

Comme on pouvait s'y attendre étant donné la forte variabilité inter-individu inhérentes aux variables testées, l'effet du facteur **Vache** est partout très significatif. L'effet du facteur **Période** est également significatif sur la plupart des variables testées hormis les ingestions, le TB, le C18:0 et l'ensemble des variables Méthane. Cela indique d'une part que le modèle a été sensible à l'évolution normale de la quantité et de la qualité des laits produits sur les deux campagnes de mesure et d'autre part que les comportements d'ingestion et d'émission n'ont statistiquement pas été influencés par un effet **Période** (Ce qui aurait pu être le cas si un

événement technique ou climatique avait modifié les niveaux d'ingestion entre les deux campagnes).

Le facteur **Traitement** a eu des effets statistiquement significatifs sur 15 des 26 variables testées. On note en particulier que l'ensemble des variables d'ingestion, de poids vif et de méthane ont été affectées par le **Traitement**. Les moyennes des moindres carrés (MMC) calculées par le modèle permettent de quantifier les effets spécifiques de l'enrubannage de luzerne (EL) vis-à-vis de l'ensilage de graminées (EG). Ainsi le traitement EL a entraîné de manière statistiquement significative les effets suivants : une augmentation de l'ingestion (3 à 4 %, EG : 24.5 ; EL : 25.4 kgMS.VL⁻¹.j⁻¹), une légère différence de poids vif, un léger gain de lait brut (EG : 33.4 ; EL : 33.9 kg.VL⁻¹.j⁻¹), une augmentation de la synthèse de matières protéiques (EG : 1075 ; EL : 1132 g.VL⁻¹.j⁻¹), une diminution du TB (-5%, EG : 42.3 ; EL : 40.1 g.l⁻¹), une légère augmentation du lactose (EG : 50.1 ; EL : 50.5 g.l⁻¹), une réduction du nombre de cellules (EG : 2.15 ; EL : 1.92 sur log10), une réduction du taux d'urée (EG : 251 ; EL : 239 g.l⁻¹), une augmentation de la teneur en acides gras polyinsaturés (EG : 4.7 ; EL : 5.0 %), et en C18:0 (EG : 9.5 ; EL : 9.9 %), une réduction de l'émission de méthane exprimée en brute (EG : 450 ; EL : 418 gCH₄.VL⁻¹.j⁻¹), ramenée à l'ingestion de MS (EG : 18.4 ; EL : 16.6 gCH₄.kgMSI⁻¹), ramenée à l'énergie ingérée (EG : 4.98 ; EL : 4.49 %), ou ramenée à la production de lait corrigé (EG : 14.1 ; EL : 12.9 gCH₄.kg⁻¹). La totalité de ces effets hormis ceux sur l'ingestion bénéficient d'une valeur *P* inférieure à 5%, indiquant une bonne significativité des effets. Enfin on note un effet en limite de significativité pour la variable lait corrigé en énergie (*P* = 0.08) avec une augmentation pour le traitement EL (EG : 33.3 ; EL : 34.2 kg.VL⁻¹.j⁻¹).

5. Conclusions

L'essai a permis de mettre en évidence un nombre important d'effets statistiquement significatifs de l'enrubannage de luzerne sur les performances de vaches laitières hautes productrices par rapport à de l'ensilage de graminées dans le contexte de cette étude.

L'enrubannage de luzerne a entraîné une augmentation de 3% de la productivité laitière corrigée sur l'énergie qui est passée de 33.3 kg.VL⁻¹.j⁻¹ pour les graminées à 34.2 kg.VL⁻¹.j⁻¹ pour la luzerne (en limite de significativité, *P* = 0.08). On observe en parallèle une augmentation significative (*P* = 0.04) de l'ingestion de l'ordre de 1 Kg de MS par jour soit 4 % de plus qu'avec l'ensilage de graminées. L'efficacité de conversion de la matière ingérée en lait ne semble donc pas être améliorée par l'enrubannage de luzerne comme le confirme les résultats statistiques relatifs au ratio lait par ingéré pour lesquels l'effet du traitement n'est pas significatif (*P* = 0.9 avec 1.35 kg Lait.kgMSI⁻¹ pour les deux traitements). D'un point de vue qualitatif, la luzerne est à l'origine d'une augmentation de la synthèse de matières protéiques (+57 gr.VL⁻¹.j⁻¹), d'une baisse des taux butyreux et uréique et d'une modification sensible du profil en acide gras du lait avec notamment plus de poly-insaturées.

Les résultats relatifs au CH₄ montrent que l'enrubannage de luzerne a permis de réduire sensiblement les émissions de CH₄ dans notre contexte. Malgré l'augmentation d'ingestion, le niveau d'émission brute est en effet passé de 450 grCH₄.VL⁻¹.j⁻¹ pour les graminées à 418 grCH₄.VL⁻¹.j⁻¹ pour la luzerne soit une baisse de 7% statistiquement significative (*P* = 0.002). On retrouve logiquement cette baisse des émissions lorsque celles-ci sont rapportées à

l'ingestion avec environ 1.8 g de CH₄ en moins par kilogramme de MSI, soit une baisse statistiquement très significative de 10% ($P < 0.0001$). L'émission de CH₄ par kilogramme de lait produit est également réduite de manière sensible et significative par l'utilisation de l'enrubannage de luzerne avec une baisse de l'ordre de 9% ($P = 0.007$) qui correspond à une économie de 1.2 grCH₄.kg de lait⁻¹.

Ce carbone supplémentaire disponible ne semble pourtant pas valorisé en lait (seulement 0.9 kg de lait standard avec 0.9 kg MS ingéré en plus). Dans cet essai, même si la différence n'est pas statistiquement significative, la reprise de poids a été plus importante pour le lot luzerne, avec une amélioration du GMQ de l'ordre de 400 g/jour.

Besoins en UFL	LUZERNE	HERBE
variation de poids	1,66	0,27
entretien	6,20	6,13
production laitière	14,88	14,49
Besoins totaux	21,1	20,6
Apports en UFL	LUZERNE	HERBE
UFL / kg MS	0,96	0,95
MS ingérée (kg)	25,4	24,5
Total Apports	24,4	23,3
Efficacité des UFL	86%	89%
Efficacité alimentaire (lait / kg Msi)	1,35	1,36

Ainsi, tout comme pour l'essai zootechnique réalisé en parallèle de cet essai, et malgré la meilleure performance du lot luzerne vis-à-vis des émissions de CH₄, nous ne pouvons pas conclure à une amélioration de la digestibilité de cette luzerne comparativement aux valeurs des tables INRA. Nous pouvons supposer, à la vue de ces résultats, à une quantité de carbone supplémentaire dans les fécès, pouvant malheureusement générer du méthane lors du stockage, notamment en système litière accumulée.

Annexes

Deux fichiers annexes ont été fournis à ce document :

- Le fichier Excel .xls [Annexe_Resultat_CH4_CoopFranceDeshy_final](#) dans lequel les chiffres bruts sont fournis
- Le fichier SAS .lst [Annexe_SortiesSAS_CH4_CoopFranceDeshy_final](#) dans lequel se trouvent les données de l'analyse statistique

Références bibliographiques

- 1.- Johnson K.A, Westberg H.H, Mical J.J and Cossalman M.W. 2007. THE SF₆ TRACER Technique: Methane measurement from ruminants. *Department of animal Sciences. Laboratory for atmospheric research, Washington State, Pullman, WA*. Book Makkar and Vercoe 1402011325 Proof 2, June 15, **2007**. Chapter 3 pp. 33-67.
- 2.- FAO, Food and Agriculture Organization. Livestock's long shadow: Environmental issues and options. 978-92-5-105571. Rome [Italie] : FAO, 2006.
- 3.- Lassey Keith R., Ulyatt M.J., McMillan A.M.S., Walker C.F. 2001. On the performance of SF₆ permeation tubes used in determining methane emission from grazing livestock *in Chemosphere > Volume 3, Issue 4 (October 2001)* . - Pages 367-376
- 4.- Storm Ida, Hellwing Anne Louise F., Nielsen Nicolaj I., Madsen Jørgen. 2012. Methods for Measuring and Estimating Methane Emission from Ruminants *in Animals > Volume 2, Issue 2 (June 2012)* . - Pages 160-183.