

Coût de la modification du régime alimentaire des vaches laitières permettant de réduire les émissions de méthane entérique dans les élevages

Fanny Le Gloux, Marie Laporte, Pierre Dupraz, Sabine Duvaleix, Elodie Letort¹

¹ SMART-LERECO, INRAE, AGROCAMPUS OUEST, 35000 Rennes, France

fanny.le-gloux@inrae.fr

pierre.dupraz@inrae.fr

Résumé

L'introduction de fourrages riches en oméga 3 comme l'herbe ou le lin dans la ration alimentaire des vaches laitières permet à la fois d'améliorer le profil nutritionnel du lait et de réduire les émissions de méthane entérique par litre de lait. Ce levier est intéressant dans la lutte contre le changement climatique mais peut également engendrer des coûts supplémentaires pour les exploitations. La démarche Eco-Méthane, portée par l'association Bleu-Blanc-Cœur, encourage cette modification du régime alimentaire dans les élevages laitiers français en valorisant la réduction des émissions de méthane. L'efficacité d'un tel dispositif passe par un fort taux de participation des éleveurs, et donc en partie par un paiement suffisamment incitatif pour compenser les éventuels surcoûts associés. Cette étude évalue quel serait le surcoût de production laitière d'une augmentation des surfaces en herbe dans l'assolement fourrager des exploitations. L'estimation d'une fonction de coût variable à partir des données du Réseau d'Information Comptable Agricole met en évidence un surcoût de 82c/1000l par hectare d'herbe supplémentaire pour la France. On observe un surcoût légèrement plus faible (73c/1000l) dans le bassin de production des plaines du grand ouest, et 88c/1000l dans les autres plaines hors grand ouest. Le surcoût le plus important semble être pour les exploitations de montagne et de piémont (1€30/1000l). Nous trouvons un surcoût négatif (-3€13/1000l) pour les exploitations des plaines dont l'assolement fourrager comprend plus de 30% de maïs ensilage.

Mots-clés

Paiements pour services environnementaux. Réduction des émissions de gaz à effet de serre. Production laitière. Coût marginal.

1. Introduction

Les activités humaines exercent une forte influence sur le climat en libérant de grandes quantités de gaz à effet de serre (GES) qui s'ajoutent à celles naturellement présentes dans l'atmosphère. Afin de réduire l'effet de ces activités anthropiques, l'Union européenne s'est engagée vers la limitation du réchauffement de la planète à 1,5°C par signature de l'accord de Paris en 2015, puis vers la neutralité carbone en 2050 par la présentation du pacte vert en 2019 (Commission européenne, 2019; Nations Unies, 2015).

Le secteur agricole est une source importante de GES puisqu'il représentait 19% des émissions françaises en 2018 (Citepa, 2020a). La particularité des émissions agricoles est qu'elles sont majoritairement liées à des processus biologiques, et non énergétiques (Pellerin et al., 2013). Les fermentations entériques et les déjections animales issues de l'élevage sont ainsi à l'origine de 48% des GES du secteur (Citepa, 2020a). Mettre en place des pratiques d'élevage moins émettrices présente donc un intérêt majeur dans l'atténuation du changement climatique.

Le méthane est un important GES dont le pouvoir de réchauffement global sur 100 ans est 28 fois plus élevé que le dioxyde de carbone. Entre 80 et 90% des émissions de méthane du secteur agricole sont issues de l'élevage bovin (Citepa, 2020a). En 2007, les vaches laitières contribuaient aux émissions de méthane entérique des animaux d'élevage français à hauteur de 32% et en représentaient la principale source (Vermorel et al., 2008). Les émissions entériques sont directement liées à la composition de la ration alimentaire et à la part de glucides qu'elle contient (Jouany & Thivend, 2008). Ainsi, si plusieurs leviers peuvent être employés pour diminuer les émissions de l'élevage, cette étude s'intéresse plus particulièrement à la diminution d'émissions de méthane entérique par la modification du régime alimentaire des vaches laitières.

Pour un même niveau de productivité, les émissions de méthane entérique déclinent à mesure que l'alimentation des vaches laitières est enrichie en acides gras insaturés oméga 3 (Bleu-Blanc-Coeur, 2011). D'autre part, plus la productivité par vache augmente, plus le potentiel de réduction des émissions par unité de lait devient important (Martin, Morgavi, Doreau, & Jouany, 2006). Pour estimer et diminuer les émissions de méthane des élevages laitiers, il est donc important de prendre en compte ces deux dimensions que sont la productivité et l'alimentation.

Des travaux ont été menés pour comprendre ce lien entre l'apport de lipides et les émissions de méthane (Dong, Bae, McAllister, Mathison, & Cheng, 1997; Grainger & Beauchemin, 2011; Martin et al., 2006; Martin, Morgavi, & Doreau, 2010; Martin et al., 2011; Martin, Rouel, Jouany, Doreau, & Chilliard, 2008). Ces études ont permis d'identifier une formule reliant les émissions de méthane par litre de lait au profil d'acides gras du lait (Chilliard, Martin, Rouel, & Doreau, 2009), et ont donné lieu au développement d'une méthodologie Eco-Méthane de calcul des émissions. L'équation utilisée, co-inventée par les équipes de l'entreprise de fabrication d'aliments pour animaux Valorex (P. Weill et G. Chesneau) et de l'INRA de Theix – Clermont (Y. Chilliard, M. Doreau et C. Martin), a été brevetée en 2009 sous le titre « Procédé d'évaluation de la quantité de méthane produite par un ruminant laitier et procédé pour diminuer et contrôler cette quantité » (dépôt de brevet priorité France 08 54230

du 25 juin 2008 et dépôt PCT/EP2009/057919 du 24 juin 2009). Les résultats de ces recherches suggèrent que la réduction des émissions est rendue possible par l'enrichissement de la ration des vaches laitières en Acide Alpha Linoléique ALA (acide gras polyinsaturé de la famille des oméga 3) dont les principales sources naturelles sont les graines de lin et l'herbe (Bleu-Blanc-Coeur, 2011; Martin et al., 2006).

Le programme Eco-Méthane, mis en place par l'association Bleu-Blanc-Coeur, vise à appliquer la méthodologie éponyme dans le cadre d'un dispositif de Paiement pour Service Environnementaux rémunérant des éleveurs pour la réduction de leurs émissions de méthane. Il est reconnu par les Nations Unies comme projet de réduction des émissions de GES permettant l'obtention de crédits carbone (UNFCCC, 2016). Eco-Méthane réunit près de 800 éleveurs dont la réduction des émissions était estimée à 11% en moyenne en 2017 (Bleu-Blanc-Coeur, 2020). Ce dispositif a pour force la fiabilité scientifique de sa méthode de quantification des émissions et la facilité de l'engagement pour les éleveurs. Chaque signataire du contrat s'engage à fournir une analyse mensuelle de son lait et à apporter des aliments riches en sources d'oméga-3 dans la ration alimentaire de son troupeau (luzerne, graines de lin extrudées, herbe). Le service environnemental d'une exploitation engagée est défini chaque mois à partir de la différence entre ses émissions et les valeurs d'un scénario de référence qui lui est attribué à l'entrée dans le dispositif (Bleu-Blanc-Coeur, 2012). Le scénario dépend à la fois de la localisation de l'exploitation et de son système fourrager. Bleu-Blanc-Coeur valorise la quantité de méthane non émise en $\text{t}\text{éqCO}_2$ par rapport au scénario de référence à partir de dons provenant de financeurs privés. Le montant de la somme allouée par les financeurs est volontaire et variable d'une année à l'autre, en fonction de leur budget et de leur politique de Responsabilité Sociétale des Entreprises (RSE). L'association répartit ensuite l'enveloppe budgétaire nationale entre les éleveurs adhérents au programme en fonction des $\text{t}\text{éqCO}_2$ à financer.

Pour être efficace, le niveau de paiement devrait être égal au niveau d'une taxe carbone optimale (first best solution). La Contribution Climat Energie (CCE), proportionnelle au contenu en dioxyde de carbone des produits énergétiques (énergies fossiles) et entrant dans le calcul des taxes intérieures de consommation à l'exception de celle sur la consommation finale d'électricité, est l'outil financier se rapprochant le plus d'une taxe carbone en France (Rogissart, Postic, & Grimault, 2018). En 2017, son montant était de 30€50/ $\text{t}\text{éqCO}_2$ (avant de passer à 40€60 en 2018-19). En comparaison, les agriculteurs du dispositif Eco-méthane percevaient en moyenne 15€/t éqCO_2 non émise cette même année (2017), suggérant que le paiement est sous-optimal et peu incitatif. Or, si de multiples motivations comme l'amélioration de la qualité du lait et de l'environnement, de l'image du secteur agricole ou encore des performances zootechniques du troupeau peuvent encourager les éleveurs à intégrer le programme, l'intérêt économique est certainement un facteur crucial. Le changement de régime alimentaire pour améliorer le profil d'acides gras du lait peut engendrer un surcoût de production qui n'est aujourd'hui pas encore évalué.

Notre objectif est de déterminer le besoin de financement des éleveurs pour la modification du régime alimentaire des troupeaux. Cette information permettrait d'annoncer la quantité de dons nécessaire pour atteindre un objectif d'émissions de méthane évitées, et de rendre le montant du paiement aux agriculteurs moins incertain. Dans la première partie de cet article, nous mettons en évidence l'impact de la prise en compte de l'alimentation sur le calcul des émissions de méthane entérique d'un panel d'exploitations laitières du Réseau d'Information Comptable Agricole (RICA) par la comparaison de deux indicateurs: un indicateur construit à partir de la méthodologie Eco-Méthane prenant en compte la productivité laitière et l'alimentation, et un indicateur ne prenant en compte que la productivité laitière. Dans une deuxième partie, nous estimons une fonction de coût marginal du lait pour ce même échantillon, afin d'évaluer le surcoût associé à un engagement à Eco-Méthane. La composition de la ration alimentaire des vaches et la composition du lait n'étant pas renseignées dans le RICA, étudier l'effet d'un changement d'alimentation n'est pas possible directement. Nous faisons donc une hypothèse sur l'évolution de l'assolement fourrager. L'herbe étant un fourrage riche en acides gras oméga 3 dont l'utilisation est fortement encouragée par Eco-Méthane, nous supposons qu'un engagement au programme entraînerait une amélioration de la qualité de la ration par une augmentation de la surface en herbe dans les exploitations. Cette hypothèse est très forte et induit que notre estimation du surcoût ne prend en compte ni les stratégies de complémentation de la ration par d'autres aliments riches en oméga-3 tels que le lin, ni de l'optimisation de la gestion du pâturage qui permet d'augmenter le rendement et la qualité de l'herbe sans nécessairement augmenter sa surface.

2. Données

Nous réalisons notre étude à partir des données d'un panel cylindré de 735 élevages laitiers du RICA pour les années 2016 à 2018 (Agreste, 2020). Cette base de données comptables est représentative des moyennes et grandes exploitations françaises et son utilisation est particulièrement pertinente pour évaluer les besoins de financement

des élevages laitiers français pour un programme national tel qu'Eco-Méthane. La composition de la ration alimentaire et la composition du lait n'étant pas renseignées, les données sur l'alimentation des vaches laitières sont limitées. Nous avons en revanche accès aux assolements fourragers des exploitations. Quelques statistiques descriptives de notre échantillon sont présentées en annexe 1.

3. Impact de la prise en compte de l'alimentation sur le calcul des émissions de méthane entérique des exploitations laitières françaises

3.1. Emissions de méthane entérique de référence par la méthodologie Eco-Méthane

En suivant la méthodologie Eco-Méthane, les émissions de méthane entérique (gCH₄/l) sont calculées à partir des données de productivité laitière (kg/vache/an) et le ratio entre la somme des acides gras avec 16 atomes de carbone et moins ($AG \leq C16$), et la quantité totale d'acides gras (AG totaux). Ce ratio présente une relation de causalité biologique forte avec la méthanogenèse dans le rumen, et est significativement réduit par des apports en oméga 3.

$$\text{Méthane entérique} = 11,368 * \text{Productivité laitière}^{-0,4274} * \frac{AG \leq C16}{AG \text{ totaux}} \quad (1)$$

Ce calcul des émissions de méthane entérique par unité de produit prend en compte la productivité laitière et l'alimentation. Les données du RICA sont trop limitées pour permettre d'estimer directement les émissions de méthane entérique individuelles des exploitations de notre échantillon selon cette méthode. En revanche, elles sont suffisantes pour identifier à quel scénario et donc à quelles émissions de référence ces élevages seraient rattachés en s'engageant dans le programme Eco-Méthane.

La méthodologie Eco-Méthane définit onze scénarii de référence en fonction de grands bassins de production et de l'assolement fourrager (Tableau 1). Ces scénarii correspondent aux onze systèmes fourragers des élevages spécialisés lait français caractérisés en 2009 par des travaux du Centre National Interprofessionnel de l'Economie Laitière en collaboration avec l'Institut de l'Élevage (CNIEL, 2015). Les valeurs de référence des émissions de méthane entérique utilisées pour l'année 2019 ont pu être collectées auprès de Valorex et Bleu-Blanc-Cœur. Les émissions de chaque scénario sont disponibles pour tous les mois de l'année. L'indicateur des émissions Eco-Méthane que nous gardons est la moyenne annuelle.

N° scénarios	Systèmes fourragers		Emissions de référence (gCH ₄ /l) (moyenne annuelle)
	Surface fourragère	Bassin de production	
1	Plus de 30% de maïs	Plaines hors grand ouest	15,75
2		Plaines du grand ouest	15,92
3	De 10 à 30% de maïs	Plaines hors grand ouest	15,83
4		Plaines du grand ouest	16,43
5	Moins de 10% de maïs	Plaines hors grand ouest	16,56
6		Plaines du grand ouest	17,38
7	Plus de 10% de maïs	Montagnes et piémont	15,96
8	Moins de 10% de maïs	Montagnes et piémonts du Massif Central	17,13
9		Montagnes et piémonts des Alpes du nord	17,83
10		Montagnes et piémonts de Franche Comté	16,22
11		Autres montagnes et piémonts	17,20

Tableau 1 Caractéristiques des 11 scénarii de référence du programme Eco-Méthane (données fournies par l'association Bleu-Blanc-Cœur).

Un scénario de référence individuel a été attribué à chaque exploitation de notre échantillon en fonction de deux critères : la localisation et l'assolement fourrager de l'exploitation. Dans le RICA, la variable de localisation des exploitations correspond aux anciennes régions françaises (avant 2015). Or, les scénarii d'Eco-Méthane sont définis en fonction de grands bassins de production construits à partir des départements. Il a donc fallu attribuer chaque ancienne région à un bassin de production. Pour les régions dont les départements appartiennent à des bassins de production différents, nous avons attribué le bassin pour lequel les volumes de lait produits sont les plus importants à l'ensemble de la région à partir de l'enquête annuelle laitière 2018 (Agreste, 2019) (annexe 2). Ainsi, notre attribution de scénario est moins fine que celle du dispositif Eco-méthane.

3.2. Emissions de méthane entérique selon la méthode de rang GIEC 2 (Tier 2)

Afin d'obtenir un indicateur des émissions de méthane entérique individuelles des exploitations de l'échantillon à partir des données disponibles dans le RICA, nous utilisons la méthode de calcul de rang GIEC 2 actuellement utilisée par le Citepa pour la réalisation de l'inventaire des émissions de GES en France (Citepa, 2020b). Le facteur d'émissions FE de méthane entérique (kgCH₄/vache laitière/an) peut être obtenu à partir de la production de lait du troupeau (l/an) de la manière suivante :

$$FE = 0,0105 \times \frac{\text{Production du troupeau} \times 0,97}{\text{Nombre de vaches laitières}} + 48,971 \quad (2)$$

Ce qui permet d'obtenir un indicateur « GIEC » des émissions par litre de lait de la même unité que les émissions de référence Eco-Méthane (gCH₄/l) à partir de la productivité des vaches laitières (l/vache).

$$\text{Indicateur GIEC} = \frac{FE \times 1000}{\text{Productivité}} \quad (3)$$

A la différence de la méthodologie d'estimation Eco-Méthane, le calcul du facteur d'émission ne prend pas en compte le système d'alimentation du troupeau.

3.3. Attribution des scénarii de référence et distinction de trois zones de production laitière

Suite à l'attribution des scénarii de référence Eco-Méthane aux exploitations de l'échantillon, il est possible d'observer leur proportion au sein de chaque ancienne région de la métropole (Figure 1). Les exploitations des régions du bassin de production du grand ouest sont caractérisées par une forte dominance de maïs ensilage. A titre d'exemple, 68% des exploitations de Bretagne se verraient attribuer le scénario des plaines du grand ouest avec plus de 30% de maïs dans l'assolement fourrager, et 28% celui avec 10 à 30%. Nous remarquons que le Nord-Pas de Calais présente un profil similaire à la Bretagne. Les régions des bassins de production de la plaine hors grand ouest et des zones montagneuses sont assez différentes les unes des autres. Toutes les observations de notre échantillon de la région Languedoc-Roussillon correspondent à un système herbager avec moins de 10% de maïs dans l'assolement fourrager, tandis que celles de la région Midi-Pyrénées présente une relative faible proportion (32%) d'herbagers.

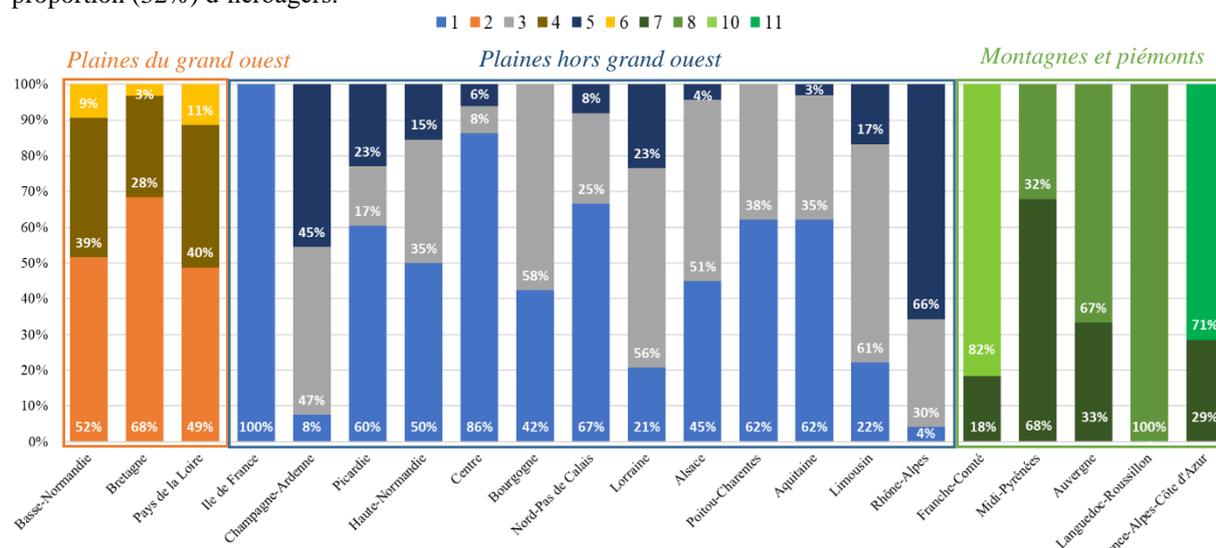


Figure 1 Répartition des scénarii de référence Eco-Méthane au sein des anciennes régions.

Dans le reste de l'étude, nous choisissons de travailler à l'échelle des trois grands bassins de production que sont les plaines du grand ouest, les plaines hors grand ouest et les montagnes.

3.4. Emissions de méthane selon les deux indicateurs et lien avec la productivité et l'alimentation

La moyenne de l'indicateur de rang GIEC 2 pour l'ensemble de notre échantillon est de 18,5 gCH₄/l tandis que celle des références Eco-Méthane est de 16,3 gCH₄/l. Cela montre que la prise en compte de l'alimentation dans le calcul permet de revoir à la baisse les émissions de méthane entérique.

Les deux formules de calcul d'émissions de méthane montrent une diminution des émissions par litre de lait à mesure que la productivité laitière augmente (Tableau 2). Les exploitations de montagnes et piémonts émettent significativement plus de méthane par litre de lait selon l'indicateur tier 2 que celles des plaines, ce qui s'explique par leur plus faible productivité. Le même constat est fait avec l'indicateur Eco-Méthane, mais la différence entre les groupes est nettement moins importante (Tableau 2 et Figure 2). Cela vérifie l'hypothèse qu'une alimentation dominée par les fourrages riches en oméga-3 (notamment l'herbe dans les montagnes et les piémonts) permet effectivement de réduire les émissions par litre de lait.

Bien que les émissions de méthane calculées selon la méthode de rang GIEC 2 ne soient pas significativement différentes entre les exploitations du grand ouest et les autres exploitations de plaine, leurs références Eco-Méthane le sont (Tableau 2). En prenant en compte l'alimentation, les émissions de méthane entérique sont plus importantes

dans les plaines du grand ouest. La productivité des deux groupes n'étant pas significativement différente, c'est l'alimentation des vaches laitières qui semble expliquer la meilleure performance environnementale des exploitations des plaines hors grand ouest. Comme le suggère la distribution des scénarii Eco-Méthane (Figure 1), on retrouve davantage de maïs fourrage dans le bassin de production des plaines du grand ouest (32% de la surface fourragère en moyenne) que dans celui des autres plaines (21%). On peut donc supposer que la ration des vaches laitières intègre davantage d'herbe ou d'autres fourrages riches en oméga 3 dans les plaines hors grand ouest. On peut ainsi observer que la différence d'émissions fournies par les deux indicateurs est d'autant plus grande que la part de maïs dans l'assolement fourrager diminue (et donc que la part des fourrages d'herbe augmente).

Scénario Eco-Méthane	Part de maïs dans la surface fourragère	Bassin de production	Productivité laitière (l/vache)		Indicateur GIEC (gCH ₄ /l)		Référence Eco-Méthane (gCH ₄ /l)		Différence d'émissions en prenant en compte l'alimentation	
1	> 30%	Plaines hors grand ouest	7654,6	6986,2	17,35	18,48	15,75	16,07	-9%	-13%
3	10 à 30%		6944,4		18,14		15,83		-13%	
5	< 10%		5717,8		19,75		16,56		-16%	
2	> 30%	Plaines du grand ouest	7331,8	6976,0	17,70	18,14	15,92	16,24	-10%	-10%
4	10 à 30%		6789,3		18,30		16,43		-10%	
6	< 10%		5586,5		20,20		17,38		-14%	
7	≥ 10%	Montagnes et piémonts	6910,1	6201,8	18,10	19,01	15,96	16,55	-12%	-13%
8 à 11	< 10%		5943,8		19,35		16,69		-14%	

Tableau 2 Emissions de méthane entérique moyennes par scénario Eco-Méthane selon les deux indicateurs.

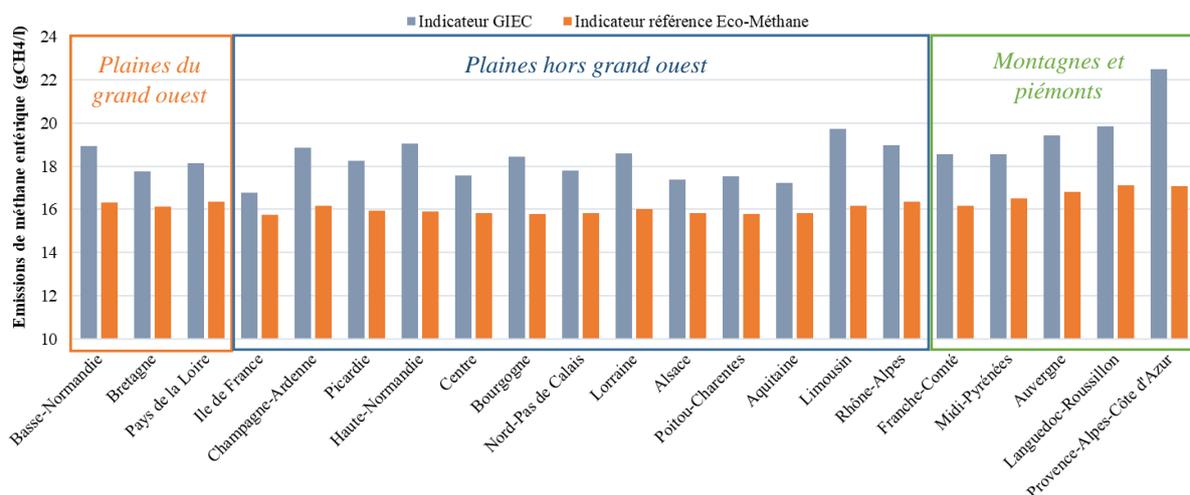


Figure 2 Emissions de méthane entérique moyennes par ancienne région selon les deux indicateurs.

Nous rappelons que les données ne permettent pas de calculer les émissions de méthane individuelles des exploitations du RICA selon la méthode Eco-Méthane. Nous ne pouvons donc observer l'effet de l'alimentation qu'au travers des références des 11 systèmes fourragers. En particulier, la construction des références est basée sur la localisation et la part de maïs dans la surface fourragère. Elles contiennent donc une information sur l'importance de l'herbe dans l'alimentation des vaches laitières, mais pas sur l'utilisation de d'autres fourrages riches en oméga-3 tels que le lin. Or, alors que l'effet positif des oméga-3 de l'herbe sur les émissions de méthane est sûrement en partie compensé par une baisse de la productivité, le lin présente l'atout de diminuer les émissions par un fort apport d'oméga-3 tout en maintenant un bon niveau de productivité.

4. Estimation d'une fonction de coût marginal du lait

L'objectif de l'étude est d'évaluer le surcoût associé à une augmentation de la surface en herbe pour les exploitations laitières françaises. Pour cela, nous cherchons à estimer une fonction de coût qui décrit les dépenses en facteurs de production qui minimisent le coût variable selon la quantité de lait produit visée par l'éleveur.

$$C(w, y, z) = \min_x wx \mid y \leq f(x, z) \quad (4)$$

Cette fonction de coût variable dépend du prix des intrants (w), et des objectifs de production (y) que nous supposons être fixés par l'exploitant avant qu'il ne détermine les quantités d'intrants (x) à acheter. Certains facteurs de production (z) sont supposés fixes à court terme et donc également prédéterminés comme la terre, le travail et

les équipements. Le coût variable est une fonction concave et non décroissante dans les prix des intrants, décroissante avec les facteurs de production fixes, et convexe selon le niveau des productions y . La fonction présente également une homogénéité de degré 1 dans les prix des intrants.

4.1. Modèle économétrique

Nous estimons une fonction quadratique :

$$CV_{it} = a_0 + a_1Y_{1it} + a_2Y_{2it} + b_1W_{1it} + b_2W_{2it} + c_1Z_{1it} + c_2Z_{2it} + c_3Z_{3it} + \frac{1}{2}d_1Y_{1it}^2 + \frac{1}{2}d_2Z_{1it}^2 + d_3Y_{1it}Z_{1it} \quad (5)$$

i et t sont respectivement les indices de l'individu et de l'année. Le coût variable CV correspond aux consommations intermédiaires. Les exploitations laitières produisent deux outputs, Y_1 la quantité de lait de vache produite par an (*Production laitière*) et Y_2 agrégeant le volume des productions des autres ateliers de l'exploitation (*Autres productions*). Cette variable est calculée comme la valeur de la production de l'exercice nette des achats d'animaux à laquelle est soustraite la valeur de la production de lait de vache, déflatée par l'indice IPPAP de prix des produits agricoles à la production de l'année correspondante. Nous considérons deux intrants variables, le carburant X_1 et l'aliment des vaches laitières X_2 . Le prix du carburant W_1 (*Prix carburant*) est calculé à partir des charges en gazole non routier. Le prix des aliments n'étant pas disponible dans les données, le prix W_2 (*Prix aliment*) est mesuré par l'indice IPAMPA du prix d'achat des aliments pour gros bovins de l'année précédente, disponible par année et par grande région. Enfin, les facteurs de production supposés quasi-fixes sont l'ensemble des surfaces en prairies permanentes, prairies temporaires, luzerne pour déshydratation et autres fourrages artificiels Z_1 (*Herbe*), les immobilisations en matériel et outillage Z_2 (*Matériel*), et le travail Z_3 (*UTA*). Les termes d'interaction ajoutés concernent nos variables d'intérêt par rapport à notre problématique, c'est-à-dire la production laitière et les surfaces en herbe (*Lait²*, *Herbe²*, *Lait*Herbe*). Les statistiques descriptives des variables utilisées sont présentées en annexe 3.

Pour corriger le problème d'endogénéité des surfaces en herbe (Z_1) et de la production laitière (Y_1) qui sont choisies simultanément avec l'utilisation des intrants et potentiellement corrélées au terme d'erreur de l'équation (5), nous adoptons la méthode d'estimation des doubles moindres carrés ordinaires. La procédure d'estimation est donc réalisée en deux étapes. La première étape est d'estimer les paramètres des régressions des variables endogènes par les variables exogènes déjà intégrées dans le modèle de coût variable et des variables instrumentales que nous supposons corrélées aux variables endogènes mais non corrélées au terme d'erreur de (5).

$$Y_{1it} = \alpha_0 + \sum_{r=1}^{20} \alpha_r D_{ri} + \alpha_1 P_{1it} + \alpha_2 Z_{4it} + \alpha_3 Z_{5it} + \alpha_4 Z_{6it} + \frac{1}{2} \alpha_5 P_{1it}^2 + \frac{1}{2} \alpha_6 Z_{4it}^2 + \frac{1}{2} \alpha_7 Z_{5it}^2 + \frac{1}{2} \alpha_8 Z_{6it}^2 + \alpha_9 P_{1it} Z_{4it} + \alpha_{10} P_{1it} Z_{5it} + \alpha_{11} P_{1it} Z_{6it} + \delta_1 W_{1it} + \delta_2 W_{2it} + \delta_3 Z_{2it} + \delta_4 Z_{3it} \quad (6)$$

$$Z_{1it} = \beta_0 + \sum_{r=1}^{20} \beta_r D_{ri} + \beta_1 P_{1it} + \beta_2 Z_{4it} + \beta_3 Z_{5it} + \beta_4 Z_{6it} + \frac{1}{2} \beta_5 P_{1it}^2 + \frac{1}{2} \beta_6 Z_{4it}^2 + \frac{1}{2} \beta_7 Z_{5it}^2 + \frac{1}{2} \beta_8 Z_{6it}^2 + \beta_9 P_{1it} Z_{4it} + \beta_{10} P_{1it} Z_{5it} + \beta_{11} P_{1it} Z_{6it} + \eta_1 W_{1it} + \eta_2 W_{2it} + \eta_3 Z_{2it} + \eta_4 Z_{3it} \quad (7)$$

Les variables instrumentales sont le prix de vente du lait P_1 , la surface agricole utile (SAU) Z_4 , la surface en prairies permanentes Z_5 , l'effectif Z_6 des vaches laitières de l'exploitation et D_{ir} des dummies régionales approximant les conditions pédoclimatiques. D_{ir} vaut 1 si l'exploitation est localisée dans l'ancienne région r et 0 sinon. Nous supposons que la SAU et la surface en prairies permanentes (installées depuis au moins 5 ans) sont exogènes sur la période étudiée (3 ans). De plus, nous avons observé qu'il y a très peu de variabilité intra-individuelle pour le nombre de vaches laitières d'une année sur l'autre. Nous pouvons donc considérer que c'est une décision quasi-fixe sur le court terme, ce qui justifie notre choix de l'inclure comme variable instrumentale.

La dérivée du premier ordre du programme de minimisation de la fonction de coût variable nous donne la fonction de coût marginal:

$$\frac{\partial CV_{it}}{\partial Y_{1it}} = a_1 + d_1 Y_{1it} + d_3 Z_{1it} \quad (8)$$

Le paramètre d_3 correspond à l'effet de la surface en herbe sur le coût marginal du lait et nous permet d'estimer le surcoût lié à une augmentation de cette surface.

4.2. Impact de la surface en herbe sur le coût marginal du lait par bassin de production laitière et système fourrager

Les résultats des régressions par bassin de production laitière et système fourrager sont présentés dans les tableaux 3 et 4, et détaillés en annexe 4 et 5.

Bassin de production laitière	Indicateur d'émissions de référence Eco-méthane (gCH ₄ /l)	Productivité laitière (l/vache laitière/an)	Coût marginal (€/1000l)	Surcoût par hectare d'herbe (€/1000l)
France	16,26	6708	208,6	0,82 ^{***}
Plaines hors grand ouest	16,07	6720	222,7	0,88 ^{***}
Montagnes et piémonts	16,55	6202	242,9	1,30 ^{***}
Plaines grand ouest	16,24	6976	199,7	0,73 [*]

* seuil de significativité à 10% ; ** seuil de significativité à 5% ; *** seuil de significativité à 1%

Tableau 3 Surcoût de la production laitière par une augmentation de la surface en herbe par bassin de production.

Notre modèle à l'échelle de la France suggère que produire plus de lait avec de l'herbe augmente légèrement mais significativement le coût variable (82c/1000l par hectare supplémentaire), ce qui justifierait le besoin d'un paiement pour encourager plus d'herbe dans l'assolement fourrager des exploitations laitières. La tendance à un surcoût positif se confirme dans l'ensemble des bassins de production. Nous trouvons un surcoût de l'ordre de 73 centimes pour 1000l de lait pour les plaines du grand ouest, 88 centimes pour les plaines hors grand ouest et 1€30 pour les zones de montagnes et piémonts. Les régressions effectuées ont permis d'obtenir une fonction de coût marginal propre à chaque bassin de production en fonction des paramètres estimés (Tableau 3). Le coût marginal du lait est en moyenne plus élevé dans les exploitations de montagne et piémont, où la productivité est la plus faible et le surcoût de la production de lait avec de l'herbe le plus élevé. Au contraire, le coût marginal moyen le plus faible est pour les exploitations de la plaine du grand ouest, avec la productivité la plus élevée et le surcoût par hectare d'herbe le plus faible.

Nous trouvons également des surcoûts différents en fonction du système fourrager. Le tableau 4 présente les résultats pour les exploitations de plaine (dans le grand ouest et hors grand ouest), dont le nombre d'observations dans l'échantillon est important et permet de comparer celles dont la part de maïs ensilage dans la surface fourragère principale est supérieure ou inférieure à 30%. Les résultats suggèrent que le surcoût est nettement plus faible lorsque la part de maïs est importante. En effet, nous trouvons un gain de 3€13/1000l par hectare supplémentaire d'herbe pour les exploitations avec plus de 30% de maïs dans la surface fourragère, et un surcoût positif de 1€22/1000l par hectare d'herbe supplémentaire pour celles avec moins de 30%. Nous trouvons de nouveau que le surcoût de production par hectare d'herbe est plus faible pour les exploitations avec une forte productivité et un faible coût marginal.

% maïs dans la surface fourragère	Indicateur d'émissions de référence Eco-méthane (gCH ₄ /l)	Productivité laitière (l/vache laitière/an)	Coût marginal (€/1000l)	Surcoût par hectare d'herbe (€/1000l)
≥30%	15,87	7427,4	175,3	-3,13 ^{**}
< 30%	16,41	6422,2	204,9	1,22 ^{***}

* seuil de significativité à 10% ; ** seuil de significativité à 5% ; *** seuil de significativité à 1%

Tableau 4 Surcoût de la production laitière par une augmentation de la surface en herbe par système fourrager en plaine.

Ces résultats suggèrent que les besoins financiers des élevages pour intégrer plus d'herbe dans leur assolement fourrager sont différents d'un système à l'autre, et qu'il serait pertinent de prendre cela en compte dans l'établissement d'un paiement pour service environnementaux optimal. Cela augmenterait l'attractivité économique du programme, la participation, et donc la réduction des émissions de méthane entérique.

5. Discussion

En allouant une aide financière fixe par unité de réduction des émissions de méthane entérique des vaches laitières, le risque serait de « surpayer » certaines exploitations dont le surcoût de la modification alimentaire serait inférieur au paiement, et au contraire de « sous-payer » d'autres exploitations pour qui cette même modification serait plus contraignante financièrement. Au travers de la définition de différents scénarii, le dispositif Eco-méthane présente l'intérêt de prendre en compte les différences entre les bassins de production et les systèmes d'alimentation pour valoriser la réduction des émissions plutôt que les exploitations émettant le moins par unité de produit (ce qui favoriserait globalement les exploitations les plus productives). Notre étude montre qu'il y aurait un intérêt à

prendre en compte la variabilité du surcoût de la modification de l'assolement fourrager (augmentation de la surface en herbe) dans la définition du paiement pour engager davantage d'éleveurs et de litres de lait.

Pour l'ensemble des bassins de production, l'augmentation de la surface en herbe semble impliquer un surcoût par litre de lait. Ce surcoût peut s'expliquer par l'augmentation de la mécanisation pour entretenir les prairies et les autres fourrages d'herbe et donc des besoins en énergie, et de certaines charges en lien avec la gestion des surfaces en herbe (semences, engrais...). Cela valide notre hypothèse selon laquelle l'augmentation de la surface en herbe peut représenter un surcoût, et peut être un facteur expliquant la faible attractivité d'un programme tel qu'Eco-Méthane. Nous trouvons que les exploitations des plaines, caractérisées par une forte productivité, ont un surcoût relativement faible (moins de 1€/1000l) par rapport à celles localisées en montagne ou piémont (1€30/1000l). Derrière le faible surcoût dans les plaines se cache une différence entre les systèmes fourragers, et notamment en fonction de la part de maïs ensilage dans la surface fourragère principale. Nos estimations suggèrent en effet un surcoût négatif pour les exploitations avec une part de maïs supérieure à 30%, et un surcoût positif pour les exploitations avec une part inférieure à 30%. Pour les exploitations des plaines avec les systèmes les plus intensifs, il y aurait donc un gain à produire du lait avec une plus grande surface en herbe, en remplaçant des hectares de céréales par de l'herbe ou en augmentant la surface fourragère avec des nouvelles parcelles en herbe. Une hypothèse que nous émettons est que l'assolement actuel de ces exploitations implique de fortes dépenses en intrants liés à la culture du maïs (semences, herbicides...) et en correcteurs azotés (soja, colza) pour équilibrer la ration des vaches laitières. Introduire un peu plus d'herbe permettrait donc de diminuer les charges pour des postes de dépenses très lourds.

Au-delà d'un surcoût par unité de production de lait, un hectare supplémentaire en herbe peut engendrer un effet direct sur le coût à l'échelle de l'exploitation. En particulier, pour que le paiement Eco-méthane finance effectivement la réduction des émissions de méthane entérique par l'augmentation de la surface en herbe, il devra compenser à la fois le surcoût par litre de lait et les autres coûts supplémentaires par hectare d'herbe. De plus, nous n'analysons ici que le coût variable. Il peut également exister des coûts fixes (matériel pour la culture et le stockage de l'herbe) ou d'autres contraintes (accès au foncier) au changement qui augmenteraient ou diminueraient le surcoût.

D'un point de vue économique, trois profils d'élevages sont susceptibles d'intégrer Eco-Méthane (i) ceux répondants déjà aux exigences du dispositif et qui pourraient d'ores-et-déjà bénéficier d'un paiement sans changer leurs pratiques (surcoût de participation nul ou négatif), (ii) ceux ayant un potentiel de réduction des émissions mais dont le changement de pratiques nécessite un faible appui financier (faible surcoût de participation), et (iii) ceux dont la réduction des émissions nécessite un appui financier important (fort surcoût de participation). Au vu du faible montant du paiement pour service environnemental, il semble raisonnable de faire l'hypothèse que les exploitations faisant actuellement partie du programme Eco-méthane possédaient déjà une bonne rentabilité économique ou des pratiques alimentaires compatibles avec les réductions d'émissions au moment de leur adhésion (et donc correspondent aux profils (i) ou (ii)). Notre étude qui se concentre sur l'augmentation de la surface en herbe suggèrent que les besoins financiers du programme seraient plus importants pour engager les exploitations des zones de montagnes et des piémonts que pour engager celles des plaines. Nous trouvons également que les exploitations des plaines avec un système fourrager dominé par le maïs ensilage pourraient d'ores et déjà bénéficier du programme tout en diminuant leurs coûts de production.

Notre modèle empirique présente des limites et devra faire l'objet d'améliorations sur plusieurs aspects. Il est important de vérifier que les fonctions obtenues respectent les propriétés de fonctions de coût. La non-décroissance avec les prix des intrants (b_1 et b_2 non significativement négatifs) est vérifiée, ainsi que la décroissance pour au moins un des facteurs de production fixe (c_1 , c_2 et/ou c_3 significativement négatif). Il faudrait également s'assurer de la concavité dans les prix des intrants et de la convexité selon le niveau des productions. Pour cela, il sera nécessaire d'estimer une fonction quadratique complète, avec l'ensemble des termes du second ordre et d'interactions nécessaires. L'homogénéité de degré 1 n'est pas vérifiée. Enfin, les estimations présentent un problème d'hétéroscédasticité et donc un manque de précision.

Le choix des variables intégrées dans le modèle, et notamment celui des variables instrumentales corrigeant l'endogénéité de la surface en herbe et de la production laitière, peut être discuté. En particulier, nous avons fait des hypothèses quant à l'exogénéité de certaines variables, comme le nombre de vaches laitières. L'intégrer ou non dans nos variables instrumentales ne change pas les conclusions de l'étude. Ainsi, et au vu de la faible variabilité intra-individuelle d'une année sur l'autre, nous avons décidé de garder cette variable dans notre modèle.

6. Conclusion

Le dispositif Eco-Méthane mis en place par l'association Bleu-Blanc-Cœur et Valorex rémunère les éleveurs laitiers engagés dans la modification de l'alimentation des vaches laitières vers une ration réduisant les émissions de méthane entérique par litre de lait. La réduction des émissions est favorisée d'un côté par l'amélioration de la productivité des vaches, et d'un autre côté par l'intégration de fourrages riches en acides gras oméga-3, tels que l'herbe et les graines de lin extrudées. Au travers de l'étude de deux indicateurs, notre étude vérifie que les émissions de méthane entérique par litre de lait sont plus élevées dans les exploitations de montagnes et piémonts en comparaison avec celles plus productives des plaines, mais que cette différence est atténuée par la prise en compte du régime alimentaire des vaches laitières qui est plus riche en oméga-3.

Le dispositif Eco-méthane, s'il n'a pas été qualifié de paiement pour service environnemental (PSE) par ses initiateurs, répond à sa définition. Il permet de rémunérer « les agriculteurs pour des actions qui contribuent à restaurer ou maintenir des écosystèmes dont la société tire des avantages (les biens et services écosystémiques) » (Duval, Binet, Colle, Dupraz, & Pech, 2019, p. 3), en l'occurrence un service de régulation stabilisant le climat. Le financement d'Eco-Méthane, basé sur la collection de dons venant d'acteurs privés, n'est pour le moment pas suffisant pour entraîner une adhésion massive des exploitants à l'échelle du territoire, limitant ainsi les résultats environnementaux du programme. Dans l'optique d'évaluer le niveau de paiement optimal des éleveurs, il est nécessaire de connaître le surcoût de la réduction des émissions de méthane par litre de lait, et donc de la modification du régime alimentaire des vaches laitières.

Dans cette étude, nous avons estimé une fonction de coût variable, dont la spécification reste encore à améliorer, à partir des données du Réseau d'Information Comptable Agricole. Nous avons ainsi évalué le surcoût marginal par litre de lait des élevages laitiers français lié à une augmentation de la surface en herbe dans l'assolement fourrager. A production donnée, produire du lait avec plus d'herbe fourrager induit un surcoût allant de 70c à 1€3/1000l par hectare d'herbe supplémentaire selon le bassin de production. Il est plus élevé dans les zones de montagnes que dans les plaines. Le surcoût varie également selon le système fourrager. Ainsi, nous trouvons un surcoût négatif pour les exploitations des plaines dont l'assolement fourrager est dominé par le maïs ensilage.

Ces premiers résultats visent à être complétés par une analyse des données économiques des exploitations engagées dans la démarche Eco-Méthane, qui permettrait de faire le lien entre surfaces en herbe, coût marginal du lait et réduction des émissions de méthane entérique. Une collaboration avec Valorex et l'association Bleu-Blanc-Cœur permettra d'affiner l'évaluation du surcoût de la modification du régime alimentaire par la prise en compte de la complémentation de la ration par des graines de lin extrudées et d'estimer une fonction de coût de réduction des émissions de méthane entérique par litre de lait, à partir des données comptables et de l'assolement des exploitations engagées dans Eco-Méthane.

La connaissance de la relation entre les coûts de production des élevages et les émissions de méthane permettrait alors de valoriser plus justement et durablement l'abattement de méthane des exploitations. Cela diminuerait l'incertitude des éleveurs par rapport à la somme qu'ils percevront par le programme d'une part, et des donateurs par rapport à la quantité d'émissions de GES abattues par leurs contributions d'autre part.

Remerciements

Cette étude est financée par le programme Horizon 2020 de l'Union Européenne (UE) dans le cadre de la convention de subvention No.817949 (projet CONSOLE , <https://console-project.eu/>).

Références

- Agreste. (2019). *Enquête annuelle laitière 2018*. Retrieved from <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd1913/Chd1913.pdf>
- Agreste. (2020). *Rica France - Tableaux standard 2018*. Retrieved from [https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd2020-1/cd2020-1_Rica\(1\).pdf](https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd2020-1/cd2020-1_Rica(1).pdf)
- Bleu-Blanc-Coeur. (2011). *Méthodologie spécifique aux projets de réduction des émissions de méthane d'origine digestive par l'alimentation des ruminants laitiers*. Retrieved from [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Méthodologie spécifique aux projets de réduction des émissions de méthane d'origine digestive par l'alimentation des ruminants laitiers.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Méthodologie%20spécifique%20aux%20projets%20de%20réduction%20des%20émissions%20de%20méthane%20d'origine%20digestive%20par%20l'alimentation%20des%20ruminants%20laitiers.pdf)
- Bleu-Blanc-Coeur. (2012). *Dossier Descriptif de Projet programmatique (JPoA-DD)*. Retrieved from

<https://ji.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/2UBFSTZH53G1NVL4QW0IDKPMRCE867>

- Bleu-Blanc-Coeur. (2020). Démarche environnementale : la démarche éco-méthane de Bleu-Blanc-Coeur. Retrieved September 1, 2020, from <https://www.bleu-blanc-coeur.org/a-propos/demarche-environnementale/>
- Chilliard, Y., Martin, C., Rouel, J., & Doreau, M. (2009). Milk fatty acids in dairy cows fed whole crude linseed, extruded linseed, or linseed oil, and their relationship with methane output. *Journal of Dairy Science*, 92(10), 5199–5211.
- Citepa. (2020a). *Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France - Format Secten*. Retrieved from https://www.citepa.org/wp-content/uploads/Citepa_Rapport-Secten_ed2020_v1_09072020.pdf
- Citepa. (2020b). *Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France OMINEA - 17^{ème} édition*. Retrieved from https://www.citepa.org/wp-content/uploads/Citepa_Ominea_ed2020.pdf
- CNIEL. (2015). *Observatoire de l'alimentation des vaches laitières. Description des 8 principaux systèmes d'élevage. Edition 2015-2018*. Retrieved from <http://idele.fr/domaines-techniques/publication/idelesolr/recommends/observatoire-de-l'alimentation-des-vaches-laitiere-edition-2015-2018.html>
- Commission européenne. (2019). *Communication de la Commission au Parlement Européen, au Conseil Européen, au Conseil, au Comité Economique et Social Européen et au Comité des Régions: Le pacte vert pour l'Europe*. Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0022.02/DOC_1&format=PDF
- Dong, Y., Bae, H. D., McAllister, T. A., Mathison, G. W., & Cheng, K. J. (1997). Lipid-induced depression of methane production and digestibility in the artificial rumen system (RUSITEC). *Canadian Journal of Animal Science*, 77(2), 269–278.
- Duval, L., Binet, T., Colle, A., Dupraz, P., & Pech, M. (2019). *Guide à destination des collectivités territoriales: déployer des paiements pour services environnementaux (PSE) en agriculture. Etude réalisée pour le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation*. Retrieved from <https://agriculture.gouv.fr/les-paiements-pour-services-environnementaux-en-agriculture>
- Grainger, C., & Beauchemin, K. A. (2011). Can enteric methane emissions from ruminants be lowered without lowering their production? *Animal Feed Science and Technology*, 166–167, 308–320.
- Jouany, J.-P., & Thivend, P. (2008). La production de méthane d'origine digestive chez les ruminants et son impact sur le réchauffement climatique. *Management & Avenir*, 20(6), 259–274.
- Martin, C., Morgavi, D., Doreau, M., & Jouany, J. P. (2006). Comment réduire la production de méthane chez les ruminants? *Fourrages*, 187, 283–300.
- Martin, C., Morgavi, D. P., & Doreau, M. (2010). Methane mitigation in ruminants: from microbe to the farm scale. *Animal*, 4(3), 351–365.
- Martin, C., Promiès, D., Ferlay, A., Rochette, Y., Martin, B., Chilliard, Y., ... Doreau, M. (2011). Methane output and rumen microbiota in dairy cows in response to long-term supplementation with linseed or rapeseed of grass silage or pasture based diets. *Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production*.
- Martin, C., Rouel, J., Jouany, J. P., Doreau, M., & Chilliard, Y. (2008). Methane output and diet digestibility in response to feeding dairy cows crude linseed, extruded linseed, or linseed oil. *Journal of Animal Science*, 86(10), 2642–2650.
- Nations Unies. (2015). *Accord de Paris*. Retrieved from https://unfccc.int/sites/default/files/french_paris_agreement.pdf
- Pellerin, S., Bamière, L., Angers, D., Béline, F., Benoit, M., Butault, J. P., ... Pardon, L. (2013). *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Résumé du rapport d'étude*. Retrieved from https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/88555_synthese-agriculture-francaise-reduction-

gaz-effet-serre.pdf

Rogissart, L., Postic, S., & Grimault, J. (2018). *La Contribution Climat Energie en France : fonctionnement, revenus et exonérations*. Retrieved from https://www.i4ce.org/wp-core/wp-content/uploads/2018/10/Contribution-Climat-Energie-en-France-_VF2-4.pdf

UNFCCC. (2016). FR1000365: Réduction des émissions de méthane d'origine digestive par l'apport dans l'alimentation des vaches laitières de sources naturelles en Acide Alpha Linoléique (ALA). Retrieved September 4, 2020, from UNFCCC Joint Implementation website: <https://ji.unfccc.int/JIITLProject/DB/RYA082JD926GFUJ7UB83321G0YBBPX/details>

Vermorel, M., Jouany, J. P., Eugène, M., Sauvant, D., Noblet, J., & Dourmad, J.-Y. (2008). Evaluation quantitative des émissions de méthane entérique par les animaux d'élevage en 2007 en France. *Productions Animales*, 21(5), 403–418.

Annexe 1: Statistiques descriptives de l'échantillon (2205 observations)

Variable²	1^{er} quartile	Médiane	Moyenne	3^{ème} quartile
Surface agricole utile (ha)	50,0	80,0	87,4	110,0
Superficie fourragère principale (ha)	40,0	60,0	67,4	80,0
Surface en maïs fourrage (ha)	1,0	10,0	14,1	20,0
Surfaces prairies (permanentes et temporaires) (ha)	26,0	40,0	50,3	61,0
Productivité (l/vache)	5593,4	6676,4	6707,9	7851,1
Nombre de vaches laitières	35	55	58	70
UTA	1,0	2,0	1,8	2,1
Achats en concentrés pour bovins (€)	14326,0	24996,5	32853,2	43645,0

² Pour les variables de surface et du nombre de vaches laitières, qui sont définies par tranches dans la base de données RICA, nous avons attribué la valeur du minimum de la tranche.

Annexe 2: Attribution des scénarii Eco-Méthane aux anciennes régions françaises à partir de l'enquête annuelle laitière 2018 (Agreste, 2019)

Ancienne région	Départements	Scénarii des départements	Poids dans la région (% volume production laitière en 2018)	Scénario de la région
Ile de France	1	1, 3 ou 5		1, 3 ou 5
	77	1, 3 ou 5		
	78	1, 3 ou 5		
	91	1, 3 ou 5		
	95	1, 3 ou 5		
Champagne Ardennes	8	1, 3 ou 5		1, 3 ou 5
	10	1, 3 ou 5		
	51	1, 3 ou 5		
	52	1, 3 ou 5		
Picardie	2	1, 3 ou 5		1, 3 ou 5
	60	1, 3 ou 5		
	80	1, 3 ou 5		
Haute Normandie	14	1, 3 ou 5		1, 3 ou 5
	50	1, 3 ou 5		
	61	1, 3 ou 5		
Centre	18	1, 3 ou 5		1, 3 ou 5
	28	1, 3 ou 5		
	36	1, 3 ou 5		
	37	1, 3 ou 5		
	41	1, 3 ou 5		
	45	1, 3 ou 5		
Basse Normandie	27	2,4,6		2, 4 ou 6
	76	2,4,6		
Bourgogne	21	1, 3 ou 5		1, 3 ou 5
	58	1, 3 ou 5		
	71	1, 3 ou 5		
	89	1, 3 ou 5		
Nord pas de calais	59	1, 3 ou 5		1, 3 ou 5
	62	1, 3 ou 5		
Lorraine	54	1,3 ou 5	59%	1,3 ou 5
	55	1,3 ou 5		
	57	1,3 ou 5		
	88	7 ou 11	41%	
Alsace				1, 3 ou 5
Franche Comté	25	7 ou 10	76%	7 ou 10
	39	7 ou 10		
	70	1, 3 ou 5	24%	
Pays de la Loire	44	2, 4 ou 6		2, 4 ou 6
	39	2, 4 ou 6		
	F	2, 4 ou 6		
	JG	2, 4 ou 6		
Bretagne	22	1, 3 ou 5		1, 3 ou 5
	29	1, 3 ou 5		
	35	1, 3 ou 5		
	56	1, 3 ou 5		
Poitou Charentes		1, 3 ou 5		1 3 ou 5
Aquitaine		1, 3 ou 5		1 3 ou 5
Hautes Pyrénées	46	7 ou 8	60%	7 ou 8
	12	7 ou 8		
	9	1, 3 ou 5	40%	

	31	1, 3 ou 5		
	32	1, 3 ou 5		
	65	1, 3 ou 5		
	81	1, 3 ou 5		
	82	1, 3 ou 5		
Limousin				1, 3 ou 5
Rhône alpes	1	1, 3 ou 5	75%	1, 3 ou 5
	7	1, 3 ou 5		
	26	1, 3 ou 5		
	38	1, 3 ou 5		
	42	1, 3 ou 5		
	69	1, 3 ou 5		
	73	7 ou 8	25%	
	74			
Auvergne				7 ou 8
Languedoc	11	1, 3 ou 5	10%	7 ou 8
	30	1, 3 ou 5		
	34	1, 3 ou 5		
	66	1, 3 ou 5		
	48	7 ou 8		
Provence Alpes Côte d'Azur	5	7 ou 11	87%	7 ou 11
	4	1, 3 ou 5	13%	
	6	1, 3 ou 5		
	13	1, 3 ou 5		
	83	1, 3 ou 5		
	84	1, 3 ou 5		

Annexe 3: Statistiques descriptives des variables utilisées dans l'estimation du coût variable

Variable	France		Plaine du grand ouest		Plaine hors grand ouest	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
<i>Consommations intermédiaires (€/an)</i>	128 073,5	105 612,7	139 405,3	107 167,1	136 399,4	112 800,6
<i>Production laitière (l/an)</i>	398 594,1	297 513,2	446 128,0	328 781,5	402 355,2	296 923,0
<i>Autres productions (€/base100/an)</i>	498,6	671,5	581,3	642,3	554,6	770,2
<i>Prix carburant (€/l)</i>	0,60	0,10	0,59	0,10	0,59	0,11
<i>Prix aliment (base 100)</i>	96,6	2,4	96,5	2,4	96,6	2,4
<i>Herbe (ha)</i>	51,1	41,0	42,1	31,5	52,7	38,6
<i>Matériel (1000€)</i>	84,2	90,5	81,3	109,8	89,0	82,2
<i>UTA</i>	1,8	1,0	1,9	1,0	1,9	1,0
<i>Prix du lait (€/1000l)</i>	362,3	74,1	343,5	41,1	367,0	61,2
<i>SAU (ha)</i>	87,4	58,1	84,3	55,3	92,6	60,0
<i>Prairies permanentes (ha)</i>	30,7	41,9	14,6	31,9	40,0	36,9
<i>Nombre de vaches laitières</i>	58,0	36,7	63,2	42,5	57,9	34,0
	Montagne		Plaine avec plus de 30% de maïs dans la surface fourragère		Plaine avec moins de 30% de maïs dans la surface fourragère	
Variable	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
<i>Consommations intermédiaires (€/an)</i>	96 533,0	80 772,0	170 654,1	124 937,8	112 079,6	58 355,4
<i>Production laitière (l/an)</i>	306 703,0	226 416,1	526 707,0	333 580,8	348 741,1	254 671,3
<i>Autres productions (€/base100/an)</i>	274,4	413,0	750,2	871,1	425,9	512,3
<i>Prix carburant (€/l)</i>	0,61	0,10	0,59	0,10	0,60	0,10
<i>Prix aliment (base 100)</i>	96,8	2,3	96,6	2,4	96,6	2,4
<i>Herbe (ha)</i>	65,5	47,8	34,2	25,8	56,3	39,2
<i>Matériel (1000€)</i>	83,2	79,3	99,4	101,5	72,5	85,9
<i>UTA</i>	1,7	1,0	2,0	1,1	1,7	1,0
<i>Prix du lait (€/1000l)</i>	390,5	101,3	333,1	27,3	369,4	66,7
<i>SAU (ha)</i>	86,3	57,8	93,3	60,6	83,2	55,8
<i>Prairies permanentes (ha)</i>	48,0	49,4	13,9	23,0	34,2	41,3
<i>Nombre de vaches laitières</i>	48,4	30,9	70,5	40,7	53,5	32,7

Annexe 4: Résultats des estimations de la fonction de coût variable par bassin de production

France entière (2205 observations)		
Variable	Paramètre	Erreur standard
<i>Production laitière (1000l)</i>	189,25***	8,08
<i>Autres productions (€/base 100)</i>	78,42***	1354,00
<i>Prix carburant (€/l)</i>	47467,72***	6894,99
<i>Prix aliment (base 100)</i>	534,51*	303,09
<i>Herbe (ha)</i>	206,53***	49,30
<i>Matériel (1000€)</i>	-48,87***	9,35
<i>UTA</i>	-3820,96***	933,42
<i>Production laitière² (1000l²)</i>	-0,06***	0,02
<i>Herbe² (ha²)</i>	-4,12***	0,84
<i>Production laitière*Herbe (1000l.ha)</i>	0,82***	0,14
<i>Constante</i>	-70574,32**	32255,87
R²	0,914	

* seuil de significativité à 10% ; ** seuil de significativité à 5% ; *** seuil de significativité à 1%

Plaines hors grand ouest (975 observations)		
Variable	Paramètre	Erreur standard
<i>Production laitière (1000l)</i>	197,05***	12,60
<i>Autres productions (€/base 100)</i>	76,74***	1864,18
<i>Prix carburant (€/l)</i>	52133,49***	11045,94
<i>Prix aliment (base 100)</i>	1683,78***	489,76
<i>Herbe (ha)</i>	84,64	86,82
<i>Matériel (1000€)</i>	-16,24	15,66
<i>UTA</i>	-6368,65***	1492,15
<i>Production laitière² (1000l²)</i>	-0,05*	0,03
<i>Herbe² (ha²)</i>	-3,97***	1,09
<i>Production laitière*Herbe (1000l.ha)</i>	0,88***	0,19
<i>Constante</i>	-176956,86***	51971,59
R²	0,9145	

* seuil de significativité à 10% ; ** seuil de significativité à 5% ; *** seuil de significativité à 1%

Montagnes et piémonts (585 observations)		
Variable	Paramètre	Erreur standard
<i>Production laitière (1000l)</i>	264,75***	21,51
<i>Autres productions (€/base 100)</i>	78,99***	3688,11
<i>Prix carburant (€/l)</i>	52285,54***	12318,84
<i>Prix aliment (base 100)</i>	524,97	543,39
<i>Herbe (ha)</i>	138,16*	79,12
<i>Matériel (1000€)</i>	-25,35	17,19
<i>UTA</i>	-3530,53**	1711,26
<i>Production laitière² (1000l²)</i>	-0,35***	0,06
<i>Herbe² (ha²)</i>	-4,85***	1,36
<i>Production laitière*Herbe (1000l.ha)</i>	1,30***	0,25
<i>Constante</i>	-84400,93	58299,56
R²	0,8939	

* seuil de significativité à 10% ; ** seuil de significativité à 5% ; *** seuil de significativité à 1%

Plaines du grand ouest (645 observations)		
Variable	Paramètre	Erreur standard
<i>Production laitière (1000l)</i>	179,36***	17,70
<i>Autres productions (€/base 100)</i>	81,42***	2609,95
<i>Prix carburant (€/l)</i>	50344,49***	12612,24
<i>Prix aliment (base 100)</i>	11,71	537,30
<i>Herbe (ha)</i>	361,50**	179,11
<i>Matériel (1000€)</i>	-90,83***	17,18
<i>UTA</i>	-3675,24**	1750,68
<i>Production laitière² (1000l²)</i>	-0,02	0,04
<i>Herbe² (ha²)</i>	-6,93**	3,44
<i>Production laitière*Herbe (1000l.ha)</i>	0,73*	0,42
<i>Constante</i>	-24284,44	57295,54
R²	0,919	

* seuil de significativité à 10% ; ** seuil de significativité à 5% ; *** seuil de significativité à 1%

Annexe 5: Résultats des estimations de la fonction de coût variable par système fourrager en plaine

Plus de 30% de maïs dans la surface fourragère principale (767 observations)		
Variable	Paramètre	Erreur standard
<i>Production laitière (1000l)</i>	161,69***	25,26
<i>Autres productions (€/base 100)</i>	81,89***	2199,86
<i>Prix carburant (€/l)</i>	55773,53***	13959,58
<i>Prix aliment (base 100)</i>	1160,17*	621,60
<i>Herbe (ha)</i>	507,44	336,18
<i>Matériel (1000€)</i>	-58,55***	18,20
<i>UTA</i>	-4190,69**	1897,86
<i>Production laitière² (1000l²)</i>	0,23**	0,10
<i>Herbe² (ha²)</i>	45,68**	19,21
<i>Production laitière*Herbe (1000l.ha)</i>	-3,13**	1,53
<i>Constante</i>	-132271,12**	65891,84
R²	0,9126	

* seuil de significativité à 10% ; ** seuil de significativité à 5% ; *** seuil de significativité à 1%

Moins de 30% de maïs dans la surface fourragère principale (853 observations)		
Variable	Paramètre	Erreur standard
<i>Production laitière (1000l)</i>	209,42***	15,74
<i>Autres productions (€/base 100)</i>	70,22***	2739,27
<i>Prix carburant (€/l)</i>	49650,91***	10421,26
<i>Prix aliment (base 100)</i>	309,55	448,24
<i>Herbe (ha)</i>	243,44***	91,85
<i>Matériel (1000€)</i>	-42,93***	15,87
<i>UTA</i>	-2377,28*	1427,42
<i>Production laitière² (1000l²)</i>	-0,21***	0,06
<i>Herbe² (ha²)</i>	-6,03***	1,70
<i>Production laitière*Herbe (1000l.ha)</i>	1,22***	0,32
<i>Constante</i>	-54631,63	47687,77
R²	0,8767	

* seuil de significativité à 10% ; ** seuil de significativité à 5% ; *** seuil de significativité à 1%