

Influence de la race, de la stratégie d'alimentation et de l'âge au 1^{er} vêlage sur les émissions de méthane entérique intégrées à l'échelle du système laitier

DALL-ORSOLETTA A.C. (1), LEURENT-COLETTE S. (2), FORAY S. (3), LAUNAY F. (4), DELABY L. (5)

(1) UDESC, Lagès, SC 88520-000, Brazil

(2) AGRIAL, 4 rue des Roquemonts, 14000 Caen

(3) Institut de l'Élevage, Monvoisin, 35650 Le Rheu

(4) INRA, Domaine du Pin, Borculo, Exmes 61310 Gouffern en Auge

(5) INRA, UMR Pegase, 16 Le Clos, 35590 Saint Gilles

RESUME – Avec le méthane entérique, l'élevage des ruminants contribue aux émissions de gaz à effet de serre (GES). En France, il représente 7 à 8 % des émissions totales de GES. L'intégration des émissions de CH₄ à l'échelle du système d'élevage est peu décrite et l'analyse des possibles facteurs d'influence ouvre d'autres perspectives d'atténuation que celles connues à l'échelle individuelle. Les résultats issus de l'expérience à long terme « Quelle vache pour quel système ? » ont été valorisés afin de quantifier par modélisation les émissions de CH₄ du troupeau laitier. L'influence de la race, de l'âge au 1^{er} vêlage et de la stratégie d'alimentation a été étudiée. Pour un même volume de lait livré (400 t), les émissions totales annuelles de CH₄ entérique varient de 10,7 à 19,2 t selon la race et la démographie des différents troupeaux. Ces quantités émises sont sensibles aux performances individuelles, au potentiel des vaches et aux stratégies d'alimentation favorables à son expression. L'aptitude à revêler et l'âge au 1^{er} vêlage ont une influence importante sur les effectifs des différents troupeaux, donc sur les émissions. Intra système, différents leviers d'amélioration technique existent et sont souvent favorables à l'efficacité globale du système. L'impact de ces leviers doit être évalué globalement afin d'éviter de possibles effets défavorables associés sur l'environnement.

Effect of the breed, the feeding strategy and the first calving age on the methane emission integrated at dairy system level

DALL-ORSOLETTA A.C. (1), LEURENT-COLETTE S. (2), FORAY S. (3), LAUNAY F. (4), DELABY L. (5)

(1) UDESC, Lagès, SC 88520-000, Brazil

SUMMARY – With enteric methane, the ruminants contributes to greenhouse gases (GHG) emissions. In France, this represents 7 to 8% of the total GHG emissions. The integration of CH₄ emissions at the livestock farming system level is poorly described and the influential factors analysis offers other possibilities for mitigation than at the animal level. The results of the long term experiment “The cow for the system?” have been combined to quantify by modeling the dairy herd CH₄ emissions. The effect of the breed, the first calving age and the feeding strategy has been described. At the same level of milk sales (400 t), the enteric CH₄ annual emissions vary from 10.7 to 19.2 t according to the breed and herds demography observed. The total CH₄ released is sensitive to the individual performance and reduced with high genetic merit cows and high feeding strategies. The ability to be in-calf and the first calving age have an influence on the herd size, and consequently, on the CH₄ emissions. Within every system, different levers of technical improvement exist and are often associated with increased system efficiency. The impact of these levers has to be evaluated globally to avoid possible adverse associated effects on environment.

INTRODUCTION

Les émissions de méthane (CH₄) entérique associées à l'élevage des ruminants et à leur capacité à digérer les fourrages participent aux émissions totales de gaz à effet de serre (GES) dans le monde. En France, selon le CITEPA (2017), sur un total GES de 458 Mt eqCO₂ émis en 2016, le CH₄ total représente 12,3 % des émissions et l'agriculture en assume 70 %. Enfin, environ 88 % de ce méthane d'origine agricole est constitué de CH₄ entérique. Soit, en eqCO₂, 35 Mt de CH₄ entérique émis (7,6 % des émissions totales nationales). Si l'agriculture n'émet en France qu'environ 17 % des GES totaux, le CH₄ entérique représente néanmoins 51 % de cette contribution agricole (CITEPA, 2017). Mais cette contribution aux émissions de GES ne fait qu'augmenter compte tenu de la forte hausse de la demande alimentaire mondiale, notamment en produits animaux. L'élevage de ruminants, en Europe et dans le monde, est ainsi concerné par les engagements de réduction des émissions de GES affichés lors de la COP 21.

A l'échelle de l'animal, les quantités émises, leurs principaux facteurs de variation et les possibles actions de mitigation, notamment alimentaires, sont de mieux en mieux connus

(Martin *et al.*, 2010 ; Hristov *et al.*, 2013 ; Knapp *et al.*, 2014). Ainsi, les émissions de CH₄ dépendent d'abord et surtout des quantités de matières organiques digestibles (MOD) ingérées par l'animal, et donc des quantités totales ingérées par jour (Sauvant et Nozière, 2013).

A l'inverse, les évaluations à l'échelle du système d'élevage sont beaucoup moins fréquentes et méritent que l'on s'y attarde afin d'envisager d'autres actions possibles de mitigation. Ces évaluations globales d'émissions de CH₄ entérique et l'étude de leurs principaux facteurs de variation nécessitent d'intégrer à l'échelle du troupeau les effets de la stratégie d'alimentation, sur l'ingestion et les performances de production des animaux, mais aussi sur les performances de reproduction et les stratégies de renouvellement associées. Elles reposent sur des données issues d'expérimentations de longue durée et sont souvent le fruit de travaux de modélisation (Rotz *et al.*, 2018).

L'objectif de cet article est de valoriser les résultats zootechniques de l'expérience « Quelle vache pour quel système ? » (QVQS) conduite durant 10 ans (2006-2015) sur le domaine INRA du Pin-au-Haras (Orne), afin d'estimer à l'échelle du troupeau laitier (vaches et génisses) l'influence de la race, de la stratégie d'alimentation et de l'âge au 1^{er} vêlage sur les émissions totales de CH₄ entérique.

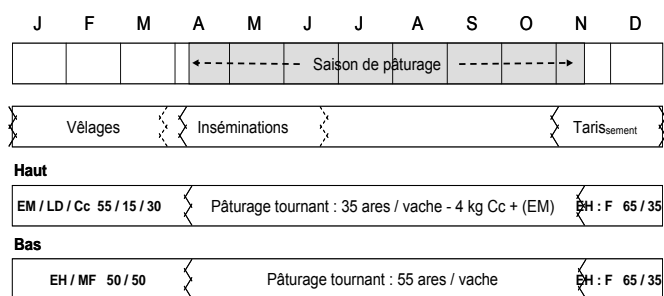
1. MATERIEL ET METHODES

1.1 Quelle vache pour quel système ? (Figure 1)

L'expérimentation QVQS a pour objectif d'évaluer au cours de leurs lactations successives la capacité d'adaptation de vaches laitières de race Holstein (Ho) ou Normande (No) conduites en vèlages groupés sur 3 mois en hiver (Jan à Mars), avec un âge au 1^{er} vêlage à 2 ou 3 ans (V2ans / V3ans) et affectées à deux stratégies d'alimentation opposées. Dans la 1^{ère} stratégie, caractérisée par de hauts apports nutritifs (Haut), l'objectif est de faciliter l'expression du potentiel laitier grâce à une ressource alimentaire et une ration adaptée à la demande animale. Dans la 2^{ème} stratégie, caractérisée par de moindres apports nutritifs (Bas), l'animal s'adapte à la ressource alimentaire locale basée sur les principes d'un système herbager à bas intrants (Delaby et Fiorelli, 2014). Chaque année, pour toutes les vaches et génisses, la saison de reproduction se déroule du 21 Mars au 21 Juin (13 semaines). Les vaches sont inséminées sur chaleurs naturelles (5 observations par jour, sans assistance technologique) au-delà de 42 jours après vêlage. Les causes de réforme sont pour l'essentiel associées à l'absence de nouvelle gestation, puis aux problèmes graves de santé (mammites, boiteries) ainsi qu'aux quelques mortalités accidentelles. Chaque vache est affectée à une stratégie d'alimentation pour toute sa carrière. La combinaison des 3 facteurs étudiés aboutit ainsi à 8 systèmes laitiers différents, sur lesquels est évaluée depuis 10 ans l'aptitude des différents types de vaches à produire et se reproduire.

Les vaches du lot Haut reçoivent en début de lactation durant l'hiver (90 jours) en stabulation une ration complète *ad libitum* à base d'ensilage de maïs (55 %), de luzerne déshydratée (15 %) et de concentré et minéraux (30 %). A la même période, leurs homologues du lot Bas sont alimentées *ad libitum* avec une ration composée d'ensilage d'herbe récolté en coupe fine et préfané (50 %) et de mi-fané enrubanné (48 %) sans aucun apport de concentré, si ce n'est 2 % d'aliment minéral vitaminé (AMV). A partir de début Avril, les vaches du lot Haut ont accès à une surface de pâturage limitée de 35 ares/vache qui permet environ 90 jours de pâturage seul. Elles reçoivent en quantité constante jusqu'au tarissement 4 kg de concentré et AMV mélangés, et dès que nécessaire 5 à 8 kg d'ensilage de maïs et d'herbe. Les vaches du lot Bas disposent d'une surface de 55 ares/vache, qui permet 180 jours de pâturage seul et ne reçoivent aucun apport de concentré. Elles consomment environ 200 g/jour d'AMV et peuvent être complémentées si nécessaire avec de l'ensilage d'herbe. En fin de lactation, à la rentrée à l'étable après 220 j de pâturage, l'herbe pâturée est remplacée par de l'ensilage d'herbe. Durant le tarissement, toutes les vaches sont alimentées avec de l'ensilage d'herbe (65 %) et du foin (35 %), avant de retrouver 15 jours avant vêlage leur ration hivernale de début de lactation. L'alimentation des génisses est raisonnée selon leur âge au 1^{er} vêlage, décidé à l'âge de 6 mois, avec un gain de poids objectif plus élevé dans le cas d'un vêlage à 2 ans.

Figure 1 : Calendriers d'alimentation et de reproduction de l'expérimentation « Quelle vaches pour quel système »



EM : Ensilage de maïs / LD : Luz. Déshydratée / Cc : Concentré / EH : Ensilage d'herbe / MF : Mi-fané enrubanné / F : Foin

En stabulation, les quantités ingérées totales (Ql_{groupe} en kg MS) à l'auge sont mesurées chaque jour selon les groupes de même stratégie d'alimentation par pesée des quantités distribuées et refusées. Au pâturage, l'herbe ingérée est estimée en moyenne par parcelle à partir des mesures de biomasse offerte, de la croissance de l'herbe et de la hauteur d'herbe disparue. Les quantités individuelles de concentré consommées sont issues des données du distributeur automatique de concentré (DAC). Chaque aliment, distribué à l'auge, au DAC ainsi que l'herbe offerte au pâturage, est échantillonné et sa composition chimique analysée afin d'en calculer la digestibilité de la matière organique (MO) et la valeur nutritive. La production laitière (PL) de chaque vache est mesurée lors des 2 traites quotidiennes et les taux butyreux (TB) et protéique (TP) individuels du lait sont évalués lors de 6 traites par semaine. Les vaches sont pesées chaque semaine tandis que leur état corporel est noté chaque mois par 3 opérateurs qualifiés. La ration détaillée, distribuée par classe d'âge aux différents lots de génisses, est enregistrée chaque semaine et ces animaux sont pesés tous les 15 jours, de la naissance au 1^{er} vêlage.

1.2 Modèle de prédiction des émissions individuelles annuelles de CH₄.

L'ensemble des données d'ingestion et de production recueillies pendant 10 ans (soit 589 lactations, dont 41 % de primipares issues de 146 Ho et 151 No) a été validé et structuré par vache et par période de 14 jours (en moyenne 22 en lactation et 4 de tarissement). Compte tenu des vèlages groupés sur 3 mois, 6 périodes de vêlage possibles, de 2 semaines chacune, ont également été définies.

En hiver comme au pâturage, les quantités ingérées totales individuelles puis de chaque aliment de la ration ont été calculées à partir de l'ingestion totale du groupe Haut ou Bas et de la capacité d'ingestion (CI) estimée (Faverdin *et al.*, 2010) de chaque vache selon l'équation :

$$Ql_{vache} \text{ (kg MS/j)} = Ql_{groupe} \times C_{l_{vache}} / C_{l_{groupe}} \text{ avec } C_{l_{groupe}} = \sum C_{l_{vache}}$$

Les données individuelles ont ensuite été décrites par quinzaine de lactation-tarissement selon un modèle linéaire intégrant les facteurs contrôlés suivants : année (2006 à 2015), quinzaine de vêlage (de 1 à 6), race (Ho ou No), âge au 1^{er} vêlage (2 ou 3 ans), rang de lactation (1, 2 ou 3 et plus), stratégie d'alimentation (Haut ou Bas) et les interactions significatives, combinant deux à deux les 4 derniers facteurs décrits ci-dessus. Finalement, les données d'ingestion et de production de 144 profils de vaches différents sont ainsi disponibles par quinzaine pour recomposer ensuite les différents troupeaux étudiés.

Les quantités ingérées journalières des rations successives des génisses de renouvellement ont été estimées par période de 3 mois selon l'évolution de leur poids vif et de leur CI (Agabriel et Meschy, 2010). Le gain de poids vif journalier a été modélisé à partir des pesées régulières selon la race et l'âge au 1^{er} vêlage.

Pour les vaches comme pour les génisses, les quantités de CH₄ entérique émises par kg de MOD ingérée ont été estimées selon l'équation proposée par Sauvant et Nozière (2013) qui intègre le niveau d'ingestion (NI) et la part de concentré dans la ration (PCO). Puis, pour aboutir aux émissions de CH₄ entérique journalières, les quantités de MOD ingérées ont été estimées à partir des quantités de MO ingérées modélisées et de la digestibilité de la MO de la ration corrigée des interactions digestives (INRA, 2018). Les données obtenues pour chaque quinzaine sur les 144 profils de vaches et les profils de génisses ont finalement été sommées sur l'ensemble de l'année.

1.3 Intégration des émissions de CH₄ à l'échelle du système d'élevage.

A l'échelle du système d'élevage, l'évaluation des performances de production et la quantification des émissions de CH₄ entérique résulte de la combinaison des différents profils de vaches et génisses selon la démographie observée de chaque troupeau des 8 systèmes étudiés. Cette démographie dépend à la fois de la répartition des 3 rangs de lactation (primipare, 2^{ème} puis 3^{ème} lactation et plus) et des dates de vêlage réparties en 6 quinzaines. Le nombre de vaches en 1^{ère} lactation définit alors le nombre de génisses de renouvellement à élever. Les résultats obtenus lors de l'expérimentation QVQS nous procurent la répartition des effectifs nécessaires à la reconstitution des troupeaux, en cohérence avec leurs propres performances de reproduction et les causes de réforme associées.

La démarche de comparaison des systèmes peut ensuite être appliquée soit à effectif constant pour un volume de lait livré variable, soit à volume de lait livré identique en adaptant alors les effectifs de vaches et de génisses. Dans un souci de simplification et de cohérence des ratios d'analyse, seule la seconde situation est présentée ci-après. Ainsi, une même exploitation livrant 400 tonnes de lait par an, soit une production de 434,8 tonnes (8 % de lait non commercialisé), avec des vêlages groupés de fin d'hiver a été simulée en y intégrant les performances des vaches et génisses au sein des 8 systèmes selon la race, l'âge au 1^{er} vêlage et la stratégie d'alimentation.

2. RESULTATS - DISCUSSION

2.1 Performances individuelles et démographie des troupeaux (Tableau 1).

Durant la phase d'élevage, les génisses destinées à un vêlage à 2 et 3 ans ont consommé respectivement 4820 et 8250 kg MS, dont 30 et 50 % d'herbe pâturée, pour un gain de poids moyen de 780 et 620 g par jour. Les vaches des stratégies Haut et Bas ont consommé par année respectivement 6860 et 6060 kg MS, dont respectivement 38 et 57 % d'herbe pâturée. En moyenne, dans toutes les situations, les vaches de race Ho ont consommé environ 580 kg MS de plus que les vaches No.

Quel que soit le rang de lactation ou l'âge au 1^{er} vêlage, les vaches du système Haut ont produit significativement plus de lait en 44 semaines que celles du lot Bas (+2110 kg). Mais la réponse aux apports nutritifs a été significativement plus marquée chez les vaches Ho (+2620 kg vs 1600 kg chez les No). L'effet de l'âge au 1^{er} vêlage est marqué en 1^{ère} lactation (+750 kg entre V2ans et V3ans - données non détaillées) puis la différence s'estompe de moitié environ à chaque nouvelle lactation, tout en restant significative en 2^{ème} (+435 kg). Les taux butyreux et protéiques sont sensibles à la race et au niveau d'alimentation. Dans tous les cas, les vaches No produisent un lait plus riche (+3,7 et +2,9 g de MG et MP par kg de lait). Les vaches du lot Haut, Ho comme No, ont produit un lait plus riche en protéines (+1,3 g/kg) mais moins riche en matières grasses (-1,5 g/kg). Les vaches No d'une part et les vaches du lot Haut d'autre part sont systématiquement plus lourdes avec des écarts respectifs de +40 kg et +57 kg de poids vif. La courte saison de reproduction met en difficulté toutes les vaches de race Ho qui ne revèlent qu'à 52 % tandis que 70 % des vaches No entament une nouvelle lactation.

Ces résultats, déjà observés par ailleurs (Dillon *et al.*, 2006 ; Beerda *et al.*, 2007), témoignent d'une réactivité différente de la production de lait, de matières et du poids vif aux variations d'apports nutritifs selon le potentiel laitier des vaches (Friggens *et al.*, 2007). Cette réactivité, plus marquée chez les vaches à fort potentiel laitier, est associée à une partition différente des nutriments, modifiant l'amplitude et la durée des variations négatives puis positives des réserves corporelles. A l'inverse, l'aptitude à revèler ne diffère pas selon les niveaux d'apports nutritifs Haut et Bas. Mais, chez

les vaches Ho, les voies physiologiques par lesquelles passent ces résultats diffèrent selon les stratégies d'alimentation (Bédère *et al.*, 2017).

Le taux de renouvellement, globalement très élevé et qui oblige dans certains systèmes à acheter des génisses, est d'abord la conséquence de ces piètres performances de reproduction et ensuite de la politique de réforme, plus marquée chez les vaches No. Ainsi pour un même volume de lait livré, les effectifs de vaches laitières des troupeaux varient de 50 (Ho/Haut/V3) à 102 (No/Bas/V2), avec un effet associé à la race d'environ +30 % d'effectif chez les No. Compte tenu de la réactivité laitière plus forte des vaches Ho, l'effet de la stratégie d'alimentation est de respectivement +47 % et +37 % de vaches chez les Ho et No des systèmes Bas. Un âge au 1^{er} vêlage à 2 ans nécessite un effectif de vaches supérieur de 10 % en moyenne, avec un effet plus conséquent dans la stratégie d'alimentation Bas (+15 % vs +5 %). Après intégration des génisses de renouvellement, et compte tenu des productions laitières individuelles différentes qui modulent la valeur UGB d'une vache, les effets sur les effectifs totaux (en UGB) par système évoluent dans la même logique mais sont moins marqués.

2.2 Emissions de méthane entérique à l'échelle du troupeau laitier selon les systèmes (Tableau 1).

En moyenne, les émissions journalières de CH₄ entérique calculées par vache évoluent de 336 g/j (No/Bas/V2ans) à 434 g/j (Ho/Haut/V3ans), soit des valeurs annuelles de respectivement 119 à 155 kg. Les émissions de CH₄ associées aux génisses varient de 160 g (V2ans) à 185 g (V3ans) par jour d'élevage, soit sur la période complète d'élevage de 115 et 200 kg respectivement. Ces valeurs se situent dans la gamme des données publiées, que ce soient les valeurs journalières issues de mesures expérimentales (Vermorel, 1995 ; Doreau *et al.*, 2014 ; O'Neill *et al.*, 2012) ou à l'échelle de l'année et calculées par diverses équations (Ellis *et al.*, 2010 ; Appuhamy *et al.*, 2016). Elles sont, pour les vaches laitières, plus élevées que celles calculées sur la base de la production laitière par le CITEPA (2017), notamment chez les vaches de race No.

De 24 à 36 mois d'âge, les génisses destinées à un 1^{er} vêlage à 3 ans émettent 100 kg de CH₄, soit 50 % du CH₄ entérique émis entre la naissance et leur 1^{er} vêlage. C'est également durant cette période que les émissions de CH₄ ramenées au gain de poids sont les plus élevées de la phase d'élevage. Intégrées à l'échelle du troupeau, compte tenu des besoins en renouvellement, ces émissions de la 3^{ème} année d'élevage en regard d'une conduite en V2ans accroissent de 10 et 25 % des émissions totales de CH₄. C'est dire l'importance de l'âge au 1^{er} vêlage, encore tardif en France, dans la mise en œuvre de possibles mitigations à l'échelle de l'élevage laitier (Knapp *et al.*, 2014 ; Dollé *et al.*, 2013).

Les émissions de CH₄ par vache et par an sont plus élevées dans le système Haut (+22 kg) et ce pour les 2 races, surtout du fait d'un niveau d'ingestion plus important (+800 kg MS/an) et assez peu du fait de la nature différente des rations. Rapportées au kg de MS ingéré, et à l'échelle du troupeau, les émissions de CH₄ sont assez peu variables et se situent dans nos travaux à une valeur moyenne de 22,3 g/kg MS ingéré. Cette valeur est en accord avec les données de la littérature (Niu *et al.*, 2018) qui souligne néanmoins une forte variabilité entre les expériences recensées.

A l'échelle du troupeau, les émissions entre systèmes varient presque du simple au double, avec une valeur minimale à 10,7 t (Ho/Haut/V2ans) et maximale à 19,2 t (No/Bas/V3ans). Pour une même quantité de lait livrée, ces écarts sont surtout sensibles à la démographie des troupeaux influencée d'abord par la production par vache, et donc la race et la stratégie d'alimentation, puis par les besoins en renouvellement très dépendants ici des performances de reproduction. En moyenne, les troupeaux No émettent 2,55 t de CH₄ en plus (+18 %) tandis que les troupeaux avec une stratégie

alimentaire Bas émettent +4,25 t de CH₄, soit 32,5 % en plus. De par la nécessité de plus de vaches et génisses pour un même volume de lait livré, les systèmes à bas intrants herbager vont de fait émettre plus de méthane entérique. Exprimé par kg de lait ou de matière utile (MU) produit, ces différences restent ainsi très marquées, avec entre extrêmes des valeurs qui varient de 24,6 à 44,2 g/kg de lait produit. Cette augmentation d'émissions par kg de lait entre les systèmes Haut et Bas est néanmoins moins importante chez les vaches No (+8,6 g/kg de lait) que chez les vaches Ho (+10,8 g/kg de lait). Les taux de renouvellement élevés associés aux contraintes de l'expérience « Quelle vache pour quel système » influencent les émissions totales des troupeaux. Ainsi, l'utilisation du modèle en simulant un taux de renouvellement de 30 % induit une baisse des émissions totales de 0,7 à 4,0 t de CH₄ selon les systèmes, avec un effet plus net dans les troupeaux Ho (-2,7 t) et Bas (-3,2 t).

CONCLUSION

Cette étude confirme l'intérêt d'une approche intégrative pour évaluer les facteurs d'influence et leur hiérarchie dans les émissions de CH₄ entérique associées à l'élevage des ruminants. Intra système, des voies d'amélioration possibles ont été soulignées, avec notamment le rôle important de la démographie du troupeau, sensible aux performances de production et de reproduction. Comme bien souvent en matière d'impact environnemental, toutes convergent vers une amélioration de l'efficacité des systèmes. Elles doivent néanmoins être évaluées globalement afin d'éviter de possibles effets défavorables associés.

Ce projet (n°16-60-C0004) est réalisé avec le soutien financier de l'ADEME dans le cadre du programme de recherche REACTIF. Les auteurs tiennent à remercier tout particulièrement Marion Lautrou, étudiante à AgroParisTech et Marie Gaborit, étudiante-apprentie à Lasalle Beauvais et Agrial, pour leur contribution pertinente à la réalisation de cette étude.

Agabriel, J., Meschy, F. 2010. Alimentation des bovins, ovins et caprins, INRA, Ed Quae, Versailles, 77-89.

Appuhamy, J., France J. Kebreab E. 2016. Glob. Change Biol., 22, 3039-3056.

Bédère N., Disenhaus C., Ducrocq V., Leurent-Colette S., Delaby L. 2017. J. Dairy Sci., 100, 2812-2827

Breda, B., Ouweltjes, W., Sebek L.B.L., Windig, J.J., Verkamp R. 2007. J. Dairy Sci., 90, 219-228.

CITEPA, 2017. Rapport National d'Inventaire pour la France, CCNUCC, 700 pages.

Delaby, L., Fiorelli, J.L. 2014. INRA, Prod. Anim., 27, 123-134.

Dillon, P., Berry, D., Evans, R.D., Buckley, F., Horan, B. 2006. Livestock Sci., 99, 141-158.

Dollé, J.B., Moreau, S., Foray, S. 2013. Combiner production et environnement. Coll. L'essentiel, Idèle, 16 pages

Doreau, M., Ferlay, A., Rochette, Y., Martin, C. 2014. Animal, 8 :3, 420-430.

Ellis, J.L., Bannink A., France, J., Kebreab, E., Dijkstra, J. 2010. Glob. Change Biol., 16, 3246-3256

Faverdin, P., Delagarde, R., Delaby, L., Meschy F.2010. Alimentation des bovins, ovins et caprins, INRA, Ed Quae, Versailles, 23-58

Friggens, N., Berg, P., Theilgaard, P., Korsgaard, I.R., Ingvarsten K.L., Lovendahl. P., Jensen J. 2007. J. Dairy Sci., 90, 5291-5305

Hristov, A.N., Oh, J., Firkins, L., Dijkstra, J., Kebreab, E., Waghorn, G., Makkar, H.P.S., Adesogan, T., Yang, W., Lee, C., Gerber, P.J., Henderson, B., Tricarico, J.M. 2013. J. Anim. Sci., 91, 5045-5069.

INRA, 2018. Alimentation des ruminants. Ed Quae, Versailles, 730 pages

Knapp, J.R., Laur, G.L., Vadas, P.A., Weiss, W.P., Tricarico, J.M. 2014. J. Dairy Sci., 97, 3231-3261.

Martin, C., Morgavi, D., Doreau, M. 2010. Animal, 4:3, 351-365.

Niu, M., Kebreab, E., Hristov, A.N., Oh J., Arndt, C. et al. 2018. Glob. Change Biol., 24, 3368-3389.

O'Neill, B., Deighton, M.H., O'Loughlin, B.M., Galvin N., O'Donovan, M., Lewis, E., 2012. J. Dairy Sci., 95, 6582-6590

Rotz, C.A. 2018. J. Dairy Sci., 101, 6675-6690.

Sauvant, D., Nozière, P. 2013. INRA, Prod. Anim., 26, 327-346.

Vermorel, M. 1995. INRA, Prod. Anim., 8, 265-272.

Tableau 1 : Performances de production et reproduction, démographie du troupeau et émissions de méthane entérique selon le système d'élevage caractérisé par la race (Ho / No), l'âge au 1^{er} vêlage (2 / 3 ans) et la stratégie d'alimentation (Haut / Bas) pour un même volume de lait produit.

Race Stratégie alimentaire Age au 1er vêlage	Holstein				Normande			
	Haut		Bas		Haut		Bas	
	2 ans	3 ans	2 ans	3 ans	2 ans	3 ans	2 ans	3 ans
Lait total (kg - 44 s)	8553	8861	5830	6340	6161	6524	4463	5027
TB (g/kg)	37,2	37,5	39,3	38,9	41,2	41,4	42,7	42,2
TP (g/ kg)	31,7	32,1	30,9	30,8	34,9	35,1	33,6	33,4
Poids vif moyen (kg – 44 s)	634	689	583	635	687	733	621	665
Revêlage (%)	54	54	51	52	67	75	69	68
Renouvellement (%)	51	46	60	55	37	45	47	46
Vaches laitières	53	50	80	71	71	68	102	88
UGB génisses (1)	24	42	43	71	24	55	43	73
UGB totaux (2)	88	104	119	143	96	126	129	153
CH ₄ vache (kg/an)	142	155	121	131	140	149	119	128
CH ₄ génisse (kg) (3)	117	200	117	200	112	198	117	200
CH ₄ total (tonnes /an)	10,7	12,4	15,3	17,2	12,9	16,2	17,5	19,2
CH ₄ total /kg MS ingéré (g)	21,8	22,2	21,8	22,2	22,7	22,9	22,2	22,5
CH ₄ total /kg lait produit (g)	24,6	28,6	35,2	39,6	29,8	37,3	40,2	44,2
CH ₄ total /kg de MU (g)	333	382	472	531	367	457	496	548

(1) Les UGB génisses correspondent à l'ensemble des génisses présentes avec une valeur de respectivement 0,3 ; 0,6 et 0,9 UGB pour les femelles de 0 à 1 ans, 1 à 2 ans et plus de 2 ans. Soit 0,9 et 1,8 UGB par génisse élevée pour un vêlage à 2 ou 3 ans.

(2) Une UGB vache correspond à une vache produisant 6000 kg de lait, avec 0,09 UGB en plus ou en moins par tranche de 1000 kg de lait.

(3) Sur toute la durée d'élevage (de la naissance au 1^{er} vêlage)