

**LE DIAGNOSTIC ET LA RÉDUCTION DES GAZ À EFFET DE SERRE DES
ENTREPRISES AGRICOLES DU BAS-SAINT-LAURENT**

6009256

DURÉE DU PROJET : 2019-05 / 2023-05

RAPPORT FINAL

Réalisé par :

Pierre-Luc Lizotte, Alysse Grenier-Denis, Charles-Antoine Besner
Développement Agricole des Basques

10 février 2023

Les résultats, opinions et recommandations exprimés dans ce rapport émanent de l'auteur ou des auteurs et n'engagent aucunement le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

LE DIAGNOSTIC ET LA RÉDUCTION DES GAZ À EFFET DE SERRE DES ENTREPRISES AGRICOLES DU BAS-SAINT-LAURENT

6009256

RÉSUMÉ DU PROJET ET DE SON AVANCEMENT

Ce projet a pour principaux objectifs de quantifier les émissions de gaz à effet de serre (GES) et d'identifier des pistes d'intervention régionales afin de réduire les émissions de 60 entreprises agricoles œuvrant en production laitière, bovine, ovine et acéricole, réparties sur le territoire du Bas-Saint-Laurent. Les résultats découlant de la réalisation de ce projet permettront d'avoir une meilleure connaissance des sources et des quantités d'émissions de GES au Bas-Saint-Laurent afin d'établir des stratégies de réduction réalistes et adaptées aux entreprises agricoles de la région. En considération des restrictions liées à la pandémie et de la nécessité de se déplacer chez les entreprises agricoles participantes, les collectes de données ont été brièvement interrompues en 2020. En revanche, nous avons adapté la collecte de données à cette situation.

En 2022, nous avons pu être en mesure de récolter des données et de diagnostiquer les sources d'émissions les plus importantes pour les différents types de productions agricoles auprès de 60 entreprises. Nous avons élaboré des questionnaires en ligne pour la cueillette des données brutes auprès des producteurs agricoles. La collaboration s'est poursuivie avec Élyme-Conseil et les nouveaux membres de la Cohorte de développement durable à la quantification des GES. Concernant l'identification de pistes d'intervention régionales pour réduire les émissions, nous avons répertorié l'ensemble des pistes d'interventions applicables au Bas-Saint-Laurent et nous avons discuté de leurs retombées et de leurs coûts d'implantation sur les entreprises agricoles sondées.

OBJECTIFS ET APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE

Afin de dresser un portrait détaillé des émissions de GES pour les entreprises agricoles bas-laurentiennes des secteurs ciblés, les protocoles internationaux de quantification des émissions du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et les coefficients d'émissions (CE) du Rapport d'inventaire national (NIR) de GES du Canada ont été utilisés. Le projet implique également de définir des pistes d'intervention et des stratégies de réduction des GES réalistes et adaptées aux entreprises de la région. Les résultats de quantification sont brièvement présentés dans ce rapport.

Les résultats d'émission de GES obtenus ont été calculés selon le potentiel de réchauffement planétaire (PRP) sur 100 ans, une mesure qui nous permet de comparer les capacités de réchauffement de certains gaz à effet de serre à celles du dioxyde de carbone (CO₂), qui agit ici comme donnée de référence. Pour faciliter les comparaisons, le potentiel de réchauffement de chaque GES est exprimé en équivalent CO₂ (éq. CO₂/an). Par exemple,

le méthane (CH₄) d'origine fossile et non-fossile possède un PRP 29,8 et 27,0 fois supérieur, respectivement, à celui du CO₂, tandis que l'oxyde nitreux (N₂O) en a 273 fois plus (Forster *et al.*, 2021).

Des indices d'émission de GES ont été calculés en fonction du lait, du bétail vivant produit et de la protéine produite. Ces indices permettent de comparer l'empreinte carbone d'une production à une autre et celle d'une même production mais provenant d'un autre endroit dans le monde. Or, la base de calcul des émissions doit être relativement la même pour permettre une comparaison pertinente. Aux fins de cette étude, ce sont au total 61 entreprises agricoles qui ont été diagnostiquées à travers les huit MRC de la région du Bas-Saint-Laurent, dont 55 en production animale. La majorité de ces entreprises se dénombrent dans trois des quatre productions ciblées par le MAPAQ, soit 30 en production laitière, 18 en production ovine et 6 en production de bovins de boucherie (Tableau 1). Bien que l'ensemble des MRC soit relativement représentées dans l'étude, les entreprises étaient principalement situées dans quatre de celles-ci, soit Rivière-du-Loup (16%), Kamouraska (16%), Les Basques (15%) et Rimouski-Neigette (15%).

Tableau 1. Répartition par production et par MRC des entreprises agricoles participant à la quantification des GES.

	Exploitation agricole	
	Nb	%
Production		
Laitière (bovins)	30	49
Ovine	18	30
Bovins de boucherie	6	10
Avicole (oeufs)	1	2
Acéricole	4	7
Grandes cultures	2	3
MRC		
Rivière-du-Loup	10	16
Rimouski-Neigette	9	15
La Mitis	7	11
La Matapédia	7	11
Kamouraska	10	16
Les Basques	9	15
Témiscouata	6	10
Matane	3	5
Total	61	

RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS

Suite aux diagnostics des GES réalisés auprès de 61 entreprises agricoles réparties sur le territoire de la région du Bas-Saint-Laurent, la valeur médiane du bilan de GES de la production ovine, bovin de boucherie et laitière était de 413, 397 et 850 t éq. CO₂/an, respectivement, en excluant la séquestration du carbone dans les sols (Tableau 2, 3 et 4). La principale source de GES de ces productions était la fermentation entérique, présentant de 52% à 71% des émissions (Tableau 5).

Bilan de la production laitière

Le bilan de GES élevé de la production laitière par rapport à ceux de la production ovine et de bovins de boucherie est principalement attribuable à la fermentation entérique. Cette fermentation est due à la dégradation de la biomasse végétale par les micro-organismes du rumen des animaux. Elle est fortement liée aux caractéristiques de leur régime alimentaire. Ce processus de fermentation produit une quantité importante CH₄ et s'avère donc la principale source d'émission sur les fermes laitières de l'étude, avec en moyenne 481 t éq. CO₂/an (Tableau 2). L'écart type élevé de 254 t éq. CO₂/an est principalement justifié par les différentes grosseurs de troupeau des fermes étudiées. Plus le nombre d'animaux est élevé, plus les émissions de la fermentation entérique seront élevées.

Tableau 2. Émission de GES des entreprises laitières sondées (n = 30) au Bas-Saint-Laurent.

Source et intensité de GES	Moy.	Méd.	Min	Max	ET
Émission de GES (t éq. CO ₂)					
Fermentation entérique (CH ₄)	481	417	266	1504	254
Gestion du fumier					
CH ₄	155	141	12	520	118
N ₂ O direct	35	30	13	112	19
N ₂ O indirect	9	8	5	28	5
Sols agricoles					
N ₂ O direct	93	88	39	224	42
N ₂ O indirect	34	31	14	98	18
CO ₂	9	7	0	36	8
Utilisation des énergies (CO ₂)	57	42	24	178	37
Achat d'intrants					
Aliments	88	90	0	306	67
Engrais minéraux	5	2	0	22	7
Carburants	10	8	4	34	6
Toutes les sources	976	850	459	2926	518
Intensité d'émissions					
Lait corrigé (kg éq.CO ₂ /kg lait)	1.22	1.19	0.77	1.93	0.23

La seconde source de GES sur les fermes laitières à l'étude est attribuable aux modes d'entreposage des fumiers et est responsable d'émissions de CH₄ et N₂O, soient 155 et 35 t éq. CO₂/an en moyenne, respectivement. Alors que la majorité des fermes laitières gère les fumiers sous forme liquide, la méthanisation ou la fermentation anaérobie de ces lisiers peut être de 1,9 à 20 fois supérieure aux entreprises entreposant des fumiers solides en amas en structure d'entreposage ou au champ. L'oxyde nitreux (N₂O) de la dénitrification de l'azote (N) des sols agricoles était de 93 t éq. CO₂/an. Suivie de près par l'achat d'intrants lié aux aliments, avec des émissions annuelles moyennes de 88 t éq. CO₂/an. En calculant toutes les sources de GES, les fermes laitières à l'étude présentaient une valeur médiane de 850 t éq. CO₂/an, avec un maximum de 2926 t éq. CO₂/an et un minimum de 459 t éq. CO₂/an.

Par la méthodologie de quantification utilisée, l'intensité d'émissions du lait produit par les entreprises laitières sondées était en moyenne de 1,26 kg éq. CO₂ par kg de lait corrigé pour sa teneur en protéine et en gras (FPCM) (Tableau 2). Ces données sont cohérentes avec celles recueillies par l'équipe de recherche en production laitière d'Édith Charbonneau de l'Université Laval, qui a modélisé à l'aide du logiciel N-CyCLE l'empreinte carbone d'un troupeau laitier de l'Est du Québec (Saint-Augustin-de-Desmaures) en fonction d'une alimentation composée de luzerne combinée à quatre graminées (fléole des prés, fétuque élevée, fétuque des prés, brome des prés) (Ouellet *et al.*, 2021). Cette alimentation similaire à celle des troupeaux laitiers du Bas-Saint-Laurent générerait des intensités d'émissions variant entre 1,24 et 1,28 kg éq. CO₂/kg FPCM. La production laitière au Bas-Saint-Laurent serait tout de même moins émettrice de GES comparée à celle des États-Unis. En effet, Uddin *et al.* (2021) la chiffrait entre 1,31 et 1,56 kg éq. CO₂/kg FPCM pour des troupeaux laitiers nourris à l'ensilage de luzerne et de maïs.

Bilan de la production ovine

Pour les 18 entreprises ovines sondées sur le territoire du Bas-Saint-Laurent, la fermentation entérique constituait la source la plus importante de GES avec un maximum de 533 t éq. CO₂/an, un minimum de 2 t éq. CO₂/an et une moyenne de 231 t éq. CO₂/an (Tableau 3). La gestion des sols agricoles est la seconde source notable de GES pour la production ovine, avec en moyenne des émissions de 60 t éq. CO₂/an. Sur les 18 entreprises à l'étude, l'utilisation des énergies ainsi que l'achat d'aliments représentent respectivement une moyenne d'émission de GES de 38 t éq. CO₂ et de 35 t éq. CO₂ annuellement (tableau 3). Les émissions de CO₂ liées à l'utilisation des énergies varient d'une entreprise à une autre et dépendent du diesel utilisés principalement pour les opérations culturales. On observe donc sur les 18 fermes sondées une émission maximale de 84 t éq. CO₂ et minimale de 2 t éq. CO₂, selon la gestion de l'énergie sur chaque ferme. L'achat d'intrants, des aliments spécifiquement, est aussi une source non négligeable de GES. La distance parcourue par les produits avant d'arriver à la ferme ainsi que leur moyen de production et de transformation sont les principaux facteurs de GES des intrants alimentaires. On observe donc une émission maximale de 100 t éq. CO₂ et minimale de 0 t éq. CO₂ dans les données recueillies sur les 18 fermes. En calculant toutes les sources de GES combinées pour la

production ovine au Bas Saint-Laurent, on obtient une moyenne de 426 t éq. CO₂/an, soit moins de la moitié des émissions produites sur les fermes laitières.

Tableau 3. Émission de GES des entreprises ovines sondées (n = 18) au Bas-Saint-Laurent.

Source et intensité de GES	Moy.	Méd.	Min	Max	ET
Émission de GES (t éq. CO₂)					
Fermentation entérique (CH ₄)	222	208	2	514	153
Gestion du fumier					
CH ₄	10	10	0	24	7
N ₂ O direct	24	25	0	54	16
N ₂ O indirect	4	5	0	10	3
Sols agricoles					
N ₂ O direct	60	57	2	153	39
N ₂ O indirect	19	17	0	46	13
CO ₂	2	1	0	13	4
Utilisation des énergies (CO ₂)	38	38	2	84	26
Achat d'intrants					
Aliments	35	27	0	100	34
Engrais minéraux	5	1	0	28	8
Carburants	6	6	0	16	5
Toutes les sources	426	413	10	913	276
Intensité d'émissions					
Ovins vendus (kg éq.CO ₂ /kg) ^a	13.5	11.3	6.7	29.9	5.9

^a Émissions de GES sur une base de kg de bétail vivant vendu.

Basé sur les entreprises ovines sondées, près de 13,5 kg éq. CO₂ de GES sont en moyenne émis par kg d'agneaux vivants produits (PV) (Tableau 3). Cette valeur est très similaire à celles de 10,6 et 14,2 kg éq. CO₂/kg PV provenant d'autres études réalisées au Canada telles que Groupe AGÉCO (2017) et Dyer et al. (2014), respectivement. Une analyse de cycle de vie (ACV) de la production ovine réalisée en Ontario (Canada) révélait une intensité d'émissions de l'ordre de 8,4 à 18,6 kg éq. CO₂/kg PV (Bhatt et Abbassi, 2022). En Nouvelle-Zélande, l'intensité d'émissions associée à l'agneau vendu à la ferme est très faible à 6,01 kg éq. CO₂/kg PV (Mazzetto, Falconer et Ledgard, 2023). Or, l'élevage en pâturage des ovins effectué en Nouvelle-Zélande réduit considérablement les émissions de GES puisqu'il n'y a pas bio-méthanisation (CH₄), ni de dénitrification de l'azote (N₂O) du fumier entreposé.

Bilan de la production bovine

Pour les 6 entreprises œuvrant en production bovine sondées, la fermentation entérique constitue la principale source de GES pour cette production, avec une moyenne de 272 t éq. CO₂ annuellement (Tableau 4). Un résultat doublement inférieur à celui des vaches laitières (501 t éq. CO₂), mais tout de même important. Les GES liés à la gestion des fumiers représentent en moyenne 46 t éq. CO₂/an (Tableau 4). Le pâturage et une gestion solide en amas sont ici les raisons pour lesquelles on observe des émissions moindres liées à l'entreposage des fumiers. En effet, sur les fermes bovines, l'accumulation du fumier se fait principalement à l'hiver lorsque les bovins sont davantage en confinement ou en enclos d'hivernage, ce qui entraîne une moins grande quantité de fumier entreposée.

Tableau 4. Émission de GES des entreprises de bovins de boucherie sondées (n = 6) au Bas-Saint-Laurent.

Source et intensité de GES	Moy.	Méd.	Min	Max	ET
Émission de GES (t éq. CO₂)					
Fermentation entérique (CH ₄)	272	266	157	392	85
Gestion du fumier					
CH ₄	8	7	5	13	3
N ₂ O direct	25	24	15	40	9
N ₂ O indirect	13	12	7	20	4
Sols agricoles					
N ₂ O direct	30	27	17	44	9
N ₂ O indirect	13	12	7	20	4
CO ₂	2	1	0	8	3
Utilisation des énergies (CO ₂)	29	28	5	61	18
Achat d'intrants					
Aliments	1	0	0	6	2
Engrais minéraux	7	6	0	12	4
Carburants	5	5	1	8	3
Toutes les sources	404	397	242	606	131
Intensité d'émissions					
Bovins vendus (kg éq. CO ₂ /kg) ^a	21.3	20.1	16.6	31.6	5.4

^a Émissions de GES sur une base de kg de bétail vivant vendu.

Les émissions de GES des sols agricoles en production bovine sont aussi élevées que celles de la gestion des fumiers avec 45 t éq. CO₂/an en moyenne, suivie de près par l'utilisation des énergies sur la ferme avec 29 t éq. CO₂/an en moyenne. Avec des émissions directes de N₂O maximale de 44 t éq. CO₂ et une émission minimale de 17 t éq. CO₂ annuellement, les

sols agricoles des entreprises bovines libèrent pratiquement trois fois moins de N₂O que les productions laitières (93 t éq. CO₂/an).

Pour les 6 entreprises de production de bovin de boucherie à l'étude, une moyenne d'intensité d'émission de 21,4 kg éq. CO₂ par kg de bétail vivant vendu a été observée. Ce résultat est similaire aux résultats de 16,3 à 37,8 kg éq. CO₂/kg PV obtenus par Alemu et al. (2017) suite au diagnostic de 295 fermes en production vache-veau au Canada. Or, les résultats obtenus sont variables d'une entreprise bovine sondée à une autre. Une meilleure représentation de ce type de production améliorerait la précision et la représentativité des résultats obtenus.

Répartition des émissions des productions animales

Pour l'ensemble des productions laitière, ovine et bovine, la fermentation entérique est la principale source de GES. En effet, cette dernière représente respectivement 48%, 53% et 69% des émissions totales sur chaque ferme (Tableau 5). C'est en production laitière que la gestion des fumiers impacte de façon plus importante les émissions de GES de par les émissions de CH₄ de la gestion principalement liquide des fumiers et se trouve à être la source de 21% d'émissions. Ce taux est très élevé comparativement à la production ovine (10%) et à la production bovine (11%) étant majoritairement en production solide. Sur les fermes ovines sondées, la gestion des sols agricoles représente la seconde source d'émissions la plus importante, avec 19% des émissions totales, tant dis que les sols agricoles des fermes laitières et bovines produisent respectivement 15% et 10% de leurs émissions totales. Ce sont l'achat d'intrants et l'utilisation des énergies qui génèrent le moins de GES parmi l'ensemble des productions. Or, pour la production laitière, on observe tout de même un taux assez élevé de 12% des émissions totales lié à l'achat d'intrants. Chez les productions ovines, on observe que 10% de leurs émissions de GES proviennent de l'utilisation des énergies sur la ferme. L'intensité des émissions de GES sur une base de protéine produite (PP) en lait et en viande est très élevée pour la production bovine avec plus de 242,2 kg éq. CO₂/kg PP, suivie par la production ovine produisant 176,6 kg éq. CO₂/kg PP (Tableau 5). L'intensité d'émissions du lait produit par les entreprises laitières est nettement inférieure et représente 36,1 kg éq. CO₂/kg PP. Ces valeurs d'intensité sont globalement inférieures à celles définies à l'échelle mondiale par la FAO, soient de 87 kg éq. CO₂/kg PP pour le lait, 201 et 295 kg éq. CO₂/kg PP pour la viande de petits ruminants et de bovins de boucherie, respectivement (Gerber *et al.*, 2013).

Tableau 5. Répartition des sources d'émission de GES des principales productions animales du Bas-Saint-Laurent.

Source et intensité de GES	Production		
	Laitière	Ovine	Bovine
Nombre d'entreprises sondées (n)	30	18	6
Répartition des émissions (%)			
Fermentation entérique	48	53	69
Gestion du fumier	21	10	11
Sols agricoles	15	19	10
Utilisation des énergies	5	10	7
Achat d'intrants	12	9	3
Intensité (kg éq. CO ₂ /kg PP) ^a	36.1	176.6	242.2

^a Émissions de GES sur une base de protéine produite en lait et viande.

Bilan de la production acéricole

Bien que l'échantillon soit petit (n=4), les entreprises acéricoles analysées émettaient en moyenne 74 t éq. CO₂/an (Tableau 6). Leurs émissions totales de GES variaient de 10 à 192 t éq. CO₂/an. Cet écart est attribuable à la différence importante des entreprises acéricoles analysées en termes de taille (de 4 200 à 23 000 entailles) et des sources d'énergie utilisées pour l'évaporateur (2 entreprises au bois, 1 au mazout, 1 à l'électricité). En comparant les différentes sources de GES de ces entreprises, il est constaté que les équipements fixes génèrent en moyenne la plus importante portion de ces émissions (52 t éq. CO₂/an) et plus spécifiquement par les évaporateurs (34 t éq. CO₂/an). Ces résultats confirment que la majeure partie des émissions de GES de la production acéricole provient de la transformation de l'eau d'érable par évaporation. Néanmoins, les émissions attribuables aux évaporateurs présentaient aussi la variabilité la plus importante des sources d'émissions (écart-type de 42 t éq. CO₂/an). Elles pouvaient être très faibles ou totaliser près de 93 t éq. CO₂/an. Ce résultat s'explique par l'absence d'émissions générées par un évaporateur électrique en comparaison des émissions issues d'un système de combustion classique opérant avec des combustibles tel que le bois et l'huile (mazout léger).

Les résultats permettent également de conclure que les autres équipements fixes (ex. : génératrice, pompe, chauffage, etc.) étaient la deuxième source d'émission en importance (18 t éq. CO₂/an) (Tableau 6). La variabilité de cette source d'émission (écart-type de 26 t éq. CO₂) s'avère également importante. Elle est notamment attribuable à l'électrification des équipements fixes autres que l'évaporateur. Il s'agit toutefois de possibilités qui ne s'offrent pas toujours aux producteurs puisque plusieurs érablières ou stations de pompage s'avèrent coûteuse ou difficiles à alimenter en électricité. Les équipements mobiles et l'achat de

carburants généraient des quantités moyennes de GES moins importantes que les deux sources mentionnées précédemment, soient 12 et 10 t éq. CO₂/an, respectivement.

Tableau 6. Émission de GES des entreprises acéricoles sondées (n = 4) au Bas-Saint-Laurent.

Source et intensité de GES	Moy.	Méd.	Min	Max	ET
Émission de GES (t éq. CO₂)					
Équipements fixes					
Évaporateur	34	20	0,03	93	42
Autre équipements fixes	18	8	0	57	26
Équipements mobiles					
Achat d'intrants	12	10	0	27	12
Carburants	10	7	3	24	10
Chaux	0	0	0	0	0
Toutes les sources	74	47	10	192	82
Intensité d'émissions (kg éq. CO₂/lbs)^a	1.48	1.21	0.17	3.31	1.37

^a Émissions de GES sur une base de livre (lbs) de sirop produit.

L'intensité d'émissions par livre (lbs) de sirop produit des entreprises sondées totalisait 1,48 kg éq. CO₂/lbs (Tableau 6). Cet indice d'émissions s'avère variable au même titre que les différentes sources d'émissions considérées en raison du petit échantillon (n=4) et de la source d'énergie utilisé pour l'évaporateur, de l'électrification de l'érablière et des stations de pompage. En 2019, les Producteurs et productrices acéricoles du Québec (PPAQ) estimaient que la fabrication de chaque livre de sirop d'érable émettait en moyenne au Québec l'équivalent de 0,478 kg de CO₂ (Laterre, 2019). L'intensité d'émissions résultants des érablières sondées était largement supérieure du fait que le nombre de producteurs acéricoles diagnostiqués est très faible, mais également par la différence des limites du système analysé. À titre d'exemple, les GES associés à la fabrication et au transport du mazout (24 g éq. CO₂/MJ) ont été considérés dans cette étude (EarthShift Global, WSP USA et Introspective Systems, 2020). Les PPAQ n'ont pas fourni d'informations sur la méthodologie employée pour déterminer l'intensité d'émissions du sirop produit au Québec.

APPLICATIONS POSSIBLES POUR L'INDUSTRIE

Les résultats des diagnostics réalisés ont permis d'isoler certaines mesures d'atténuation des émissions de GES. Bien que ces mesures ne soient pas applicables pour chacune des fermes diagnostiquées, elles permettent néanmoins d'avoir un impact considérable de réduction des GES étant appropriées pour un grand nombre d'entreprises bas-laurentiennes. Les cinq sources de GES en production animale ainsi que les sources de la production

acéricole sont abordées. Or, il est très important d'avoir une approche systémique dans l'élaboration d'une stratégie d'atténuation des GES, car une réduction obtenue pour une source spécifique peut être annulée par davantage d'émissions d'une autre source.

Fermentation entérique

La fermentation entérique est la principale source de GES des productions animales. Malgré l'abondance des mesures d'atténuation pour cette source, la littérature scientifique indique qu'elles peuvent être complexes et coûteuses à appliquer sur les fermes, peuvent avoir un effet limité de réduction du CH₄ entérique et peuvent avoir une incidence sur la consommation volontaire de matière sèche (CVMS) et la productivité du bétail. Or, pour les entreprises sondées, une mesure applicable serait d'accroître la teneur en gras de la ration en utilisant des aliments attentifs à ceux utilisés. L'ajout de lipides à la ration permet de réduire ces émissions de CH₄ en diminuant la fermentation des matières organiques dans le rumen. Dans une méta-analyse de 10 publications évaluant l'effet de la composition de la ration sur les émissions de CH₄ de la fermentation entérique des ovins, Patra (2014) a constaté que pour chaque pourcentage de gras ingéré, la réduction est de 1,03 g de CH₄ par jour sans pour autant affecter la CVMS. Pour une méta-analyse portant sur l'ensemble des ruminants du secteur agricole, Arnt et al. (2022) ont estimé que l'ajout de gras à la ration réduirait de 12 et 22% le CH₄ entérique sur une base de lait produit et de gain moyen quotidien, respectivement. Le tourteau de soya est largement utilisé par les entreprises laitières (19/30 fermes) et ovines (7/18 fermes). Cette source de protéine (47% PB) a généralement une teneur de 0,5% en matières grasses. En remplaçant cette source de protéine par un tourteau de soya trituré (44 à 47% PB) ou un tourteau de canola (36% PB) ayant des niveaux de gras de 6,0% et de 2,0%, respectivement, la teneur en gras de la ration sera augmentée permettant de réduire le CH₄ entérique. Bien que le coût du tourteau de soya trituré soit environ 14% (+110 \$/t) plus élevé que celui du tourteau de soya conventionnel, les travaux d'AgriNova (2021) indiquaient que les coûts d'alimentation pour la production laitière peuvent néanmoins être similaires avec l'un ou l'autre des tourteaux. Le tourteau de canola est environ 9% moins coûteux que le tourteau de soya conventionnel, mais sa teneur en protéine est plus fiable. En prenant en considération les rations des vaches en lactation de la ferme du Québec de Holtshausen et al. (2021), la source de suppléments protéiniques de la ration avec le tourteau de canola serait 22% moins coûteuse que celle avec le tourteau de soya. Les coûts d'inclusion de ce tourteau de canola dans la ration doit être davantage étudié. Une autre mesure d'atténuation applicable sur les fermes sondées serait d'accroître la digestibilité des rations offertes au bétail et augmentant la qualité fourrage ou en augmentant la proportion de céréales cultivées localement. Selon les coefficients d'émission du GIEC, le fait d'accroître la digestibilité de la ration dans une fourchette de 62 à 71% permet de réduire de 10% les émissions entériques (Gavrilova *et al.*, 2019). Or, avant d'implanter cette mesure, il est important d'évaluer les retombés sur les autres sources de GES à la ferme, car les émissions de la production à la ferme ou l'achat de fourrages plus digeste ou de céréales peuvent contre-balancer la réduction du CH₄ entérique.

Gestion des fumiers

Pour une gestion liquide des fumiers telle que majoritairement utilisée en production laitière (24/30 fermes), l'acidification du restant de lisier dans la fosse suivant la fin d'un chantier d'épandage réduirait de 77% les émissions de CH₄ et de 73% les émissions de N₂O (Sokolov *et al.*, 2020). À la fin d'un chantier d'épandage, il y a la présence de lisier résiduel dans la fosse soit parce qu'il est physiquement impossible de parfaitement vider la fosse ou parce que les quantités de lisier à épandre étaient inférieures au contenu total de la fosse. Ce lisier résiduel inocule l'apport de nouveau lisier dans la fosse réactivant rapidement la réaction de bio-méthanisation des matières organiques. En limitant l'activité biologique du lisier résiduel par une acidification, par exemple à l'acide sulfurique, la réactivation de la réaction de bio-méthanisation est retardée permettant de réduire les émissions. Selon les travaux de Sokolov *et al.* (2020), l'ajout de 1,1 L d'acide sulfurique (concentration de 70%) par m³ de lisier résiduel dans la fosse à la fin du chantier d'épandage permet d'obtenir les réductions mentionnées. Au Québec, l'acide sulfurique (93%) est utilisé pour acidifier l'eau d'irrigation et se détaille à environ 2,41 \$/L. Pour une telle concentration d'acide, la quantité à ajouter serait de l'ordre de 0,83 L/m³ de lisier résiduel. Une autre mesure d'atténuation des émissions de la gestion des fumiers est de réduire la durée d'entreposage. En raccourcissant la durée d'entreposage des fumiers solides de la déjection de l'animal à l'épandage au champ, moins d'émissions directes et indirectes de CH₄ et de N₂O seront générées. Pour les entreprises ovines sondées, la durée médiane d'entreposage incluant l'accumulation en bâtiment et le fumier en amas une fois les bâtiments écurés est de 12 mois. En raccourcissant cette durée à 9 mois, environ 25% des émissions de GES de la gestion des fumiers seraient théoriquement atténués. Cette mesure implique de faire davantage de chantiers d'écurage et d'épandage ainsi que de raccourcir la durée d'amas en structure ou en champ. Le même principe de réduction de la durée d'entreposage s'applique pour les lisiers. Basé sur le calculateur du GIEC pour des températures moyennes de la région (VanderZaag, 2018), effectué trois chantiers d'épandage de lisier permet de réduire de 32% les émissions de CH₄ comparativement à une gestion à deux chantiers.

Sols agricoles

Une gestion optimale des engrais azotés organiques et inorganiques est essentielle pour réduire les émissions de N₂O des sols agricoles. La mise en application les 4 B d'une fertilisation azotée optimale est nécessaire; les 4 B étant d'appliquer la bonne source de N, selon la bonne dose, au bon moment et au bon endroit. Cette mise en application devrait prioritairement s'orienter pour une meilleure gestion des épandages de fumiers et de lisiers, car l'utilisation d'engrais minéraux azotés des entreprises sondées en production animale était relativement faible. À titre d'exemple pour les entreprises ovines, ce sont en moyenne 13 kg N/ha qui étaient annuellement appliqués sur l'ensemble des superficies cultivées pour chacune des fermes. Une autre stratégie de réduction des émissions de N₂O des sols agricoles serait l'utilisation d'inhibiteur de nitrification (IN) pour le lisier et les engrais azotés à base d'urée. Dans une méta-analyse mondiale réalisée par Fan *et al.* (2022) et incluant la

collaboration de chercheurs d'Agriculture et Agroalimentaire Canada, l'utilisation d'IN permet à lui seule de réduire de 49% les émissions de N₂O des sols. Les IN réduisent temporairement les populations de bactéries Nitrosomonas et Nitrobacter dans le sol. Ces bactéries sont responsables de la transformation de l'ammonium en nitrite (Nitrosomonas) et du nitrite en nitrate (Nitrobacter). Les IN protègent à la fois contre la dénitrification et le lessivage en retenant l'azote des engrais sous forme d'ammonium. Il est préférable d'utiliser l'IN en combinaison d'un inhibiteur d'uréase (IU) pour à la fois réduire les pertes par dénitrification, mais également par volatilisation (Woodley *et al.*, 2020). Le coût d'utilisation d'un double inhibiteur avec l'urée est d'environ 23% plus élevé que le coût de l'urée sans inhibiteur. Des IN peuvent être mélangés au lisier au début des chantiers d'épandage pour réduire les émissions de N₂O des sols suite à l'épandage au champ. Les IN peuvent également être appliqués par pulvérisation au champ après l'épandage du lisier au champ. Le coût d'utilisation des IN pour les lisiers est d'environ de 21 \$/ha. Ce coût considérable n'est cependant pas compensé par une augmentation systématique des rendements de culture. Globalement pour l'Est du Canada, ce ne sont que 1 à 3% du N appliqué sur les sols qui sont responsables des émissions de N₂O. Alors, le gain en N pour les cultures (environ 0,5 à 1,5% du N appliqué) par l'utilisation des IN est trop faible en relation aux autres pertes par volatilisation et lessivage pouvant correspondre de 14 à 44% du N appliqué (Tran et Giroux, 1998).

Différentes mesures à la ferme peuvent être mises en place au Bas-Saint-Laurent pour diminuer la perte de carbone des sols ou augmenter sa teneur telles que 1) réduire le travail du sol, 2) accroître le retour de résidus au sol, 3) valoriser des apports au sol de biomasses racinaires et aériennes à l'aide d'engrais verts et de cultures de couverture, 4) accroître la biomasse racinaire par une sélection adapter des cultures, une meilleure santé des sols et par l'optimisation de la fertilisation, etc. Basé sur la méta-analyse de Bai *et al.* (2019), la réduction du travail de sol et l'usage de cultures de couverture auraient un potentiel d'augmentation du carbone du sol relativement similaire de l'ordre de 5-6% pour le climat froid et humide du Québec. Or, les travaux de Poirier *et al.* (2009) et de Liang *et al.* (2020) remettaient en perspective la conversion de travail de sol conventionnel à semis-direct alors que le carbone total des profils de sols de plus de 60 cm de profondeur n'est pas significativement différent d'un travail à l'autre. Alors que dans certaines situations, les cultures de couverture peuvent augmenter le carbone du sol de 10 à 12% et réduire les émissions de N₂O des sols (McClelland, Paustian et Schipanski, 2021 ; Bolinder *et al.*, 2020 ; Basche *et al.*, 2014), elles peuvent réduire les rendements des cultures et être coûteuses à valoriser (79 à 124 \$/ha) (Abdalla *et al.*, 2019 ; Lizotte, 2022). Afin d'optimiser les retombés des cultures couverture sur le bilan carbone, il est préférable 1) d'utiliser des cultures non-fixatrices d'azote afin de puiser le N résiduel du sol et réduire les pertes par lessivage et de 2) ne pas enfouir les cultures à l'automne afin de limiter les importantes émissions de N₂O survenant lors du dégel du sol et de la fonte de la neige au printemps (Muhammad *et al.*, 2019 ; Pelster *et al.*, 2022). Ainsi, si l'on prend pour exemple pour une rotation de maïs ensilage avec intercalaire non-enfoui à l'automne suivi d'une année d'orge grainée et de cinq années de prairie, l'intercalaire de ray-grass annuel aurait un meilleur bénéfice sur le bilan de GES (-97 kg éq. CO₂/ha) qu'un intercalaire de trèfle incarnat (-31 kg éq. CO₂/ha) (Lizotte, 2022).

Utilisation des énergies

La principale source de GES liée à l'utilisation des énergies des productions animales sondées est la combustion de carburant pour les opérations culturales. Alors, toutes mesures visant à réduire la consommation de diesel permettent d'atténuer les GES de ce poste d'émissions. Ces mesures peuvent 1) réduire la profondeur et le travail du sol, 2) réduire les passages au champ en utilisant des machines plus larges ou combinant des opérations (combo déchaumeuse-semoir), 3) utiliser des tracteurs récents ayant de meilleures performances en fonction du carburant utilisé et ayant des systèmes de combustion à faible émissions, 4) maximiser la performance des équipements agricoles par un meilleur ajustement et un entretien adéquat (ex. : changer les pièces d'usure dès que nécessaires), etc.

Intrants à la production

Les intrants, autant ceux pour l'alimentation que les engrais et les carburants, ont un impact considérable en termes d'émissions de GES de par leurs fabrications et leurs transports. Une stratégie de réduction de ces émissions est l'auto-suffisance à la ferme. En produisant à la ferme la protéine nécessaire pour engraisser le bétail ou produire du lait, l'achat (et les GES associés) des suppléments protéiniques et de certaines moulées en sera diminué. Pour les 30 fermes laitières diagnostiquées, l'achat de maïs grain pour la ration s'élevait à 76 t/an (environ 87% MS) par ferme en moyenne. Alors que chaque tonne (100% MS) achetée de maïs est responsable de l'émission de 0,325 t éq. CO₂, (Rotz *et al.*, 2019), l'ajustement de la ration par le remplacement de cet aliment avec une céréale produite sur les fermes du Bas-Saint-Laurent permettrait de réduire de 21 t éq. CO₂ le bilan de GES. Autre mesure d'atténuation réside dans le choix d'intrants agricoles à faible GES. Près de la moitié des entreprises ovines font l'achat de supplément protéinique 39%. Ces suppléments cubés ont une empreinte carbone plus élevée (environ 1,02 t éq. CO₂/t) que celles des sources primaires de protéine telles que le tourteau de soya, le tourteau de canola, le fin gluten de maïs, etc (environ 0,420 à 0,548 t éq. CO₂/t) (Rotz *et al.*, 2019 ; Hawkins *et al.*, 2015).

Réduction des GES de la production acéricole

Pour le secteur de l'acériculture, la principale mesure d'atténuation est liée au type d'énergie utilisé pour l'évaporateur. En prenant en considération les GES de la combustion, mais également les GES de la fabrication et du transport du carburant, la production d'un baril de 32 gal Imp. à partir d'un concentré de 15 degrés Brix à l'aide d'un évaporateur conventionnel au mazout est responsable de l'émission de 289 kg éq. CO₂ (Tableau 7). La même quantité de sirop produite à l'aide d'un évaporateur conventionnel au bois, un évaporateur hautes-performances au bois et un évaporateur aux granules résulte en l'émissions de 173, 69 et 76 kg éq. CO₂, respectivement. Ces émissions sont 39, 76 et 74% inférieures à celles de

l'évaporateur conventionnel au mazout. Cependant, la réduction des émissions est nettement supérieure (99,96%) pour l'évaporateur électrique, alors que seulement 0,11 kg éq. CO₂, est émis par la production et la distribution des 58 kWh nécessaire pour produire le 32 gal Imp. Un changement de type d'énergie peut s'avérer économiquement intéressant. Les travaux de Bernier (2020) fixaient de façon générale, des coûts fixes et variables similaires sinon inférieurs pour un évaporateur électrique en comparaison à un évaporateur conventionnel au mazout. Autant pour les érablières de 5000 que celles à 40 000 entailles, les évaporateurs à la biomasse de bois (bûche et granules) présentaient des coûts fixes et variables inférieurs à ceux d'un évaporateur conventionnel au mazout.

Activités de vulgarisation

Plusieurs activités de vulgarisation ont été accomplies lors de la réalisation de ce projet (Tableau 8). Ces activités ont eu un rayonnement régional, mais également provincial. Il est important de mentionner que le projet a également permis la formation de personnes hautement qualifiées en la quantification et la réduction des GES agricoles. D'autres activités de vulgarisation et de transfert technologique sur l'empreinte carbone et la réduction des GES des entreprises agricoles du Bas-Saint-Laurent seront offertes au courant de la prochaine année.

POINT DE CONTACT POUR INFORMATION

Pierre-Luc Lizotte, ing., agr., Ph.D.
Développement agricole des Basques
701, 3e rang Ouest,
Saint-Mathieu-de-Rioux (Québec, Canada), G0L 3T0
Tél.: (418) 476-1143
Courriel: dev-agr-basques@mail.com

ANNEXE(S)

Tableau 7. GES directs de combustion et GES indirects de la fabrication et du transport d'énergie utilisée pour la production d'un baril de 32 gal Imp de sirop d'érable en fonction du degré Brix du concentré.

Énergie et émissions	Concentré (degré Brix)					
	8	10	12	15	18	20
Énergie utilisée pour produire un baril de sirop (32 gal Imp)						
Bois (kg)	737	583	480	377	317	283
Bois (HP) (kg)	497	394	326	257	214	188
Granule de bois (kg)	270	220	180	140	120	100
Mazout (L)	136	108	89	70	58	52
Mazout (HP) (L)	113	89	74	58	48	43
Électricité (kWh)	112	89	74	58	48	43
Émissions de la combustion (kg éq. CO ₂)						
Bois	281	222	183	144	121	108
Bois (HP)	95	76	63	49	41	36
Granule de bois	34	28	23	18	15	13
Mazout	430	342	282	223	184	164
Mazout (HP)	358	284	235	185	153	136
Électricité	0	0	0	0	0	0
Émissions de la fabrication et du transport (kg éq. CO ₂)						
Bois	57	45	37	29	25	22
Bois (HP)	39	31	25	20	17	15
Granule de bois	112	89	74	58	48	43
Mazout	126	100	83	66	54	48
Mazout (HP)	105	83	69	54	45	40
Électricité	0,21	0,17	0,14	0,11	0,09	0,08
Émissions totales de GES (kg éq. CO ₂)						
Bois	338	267	220	173	146	130
Bois (HP)	134	107	88	69	58	51
Granule de bois	146	117	97	76	63	56
Mazout	556	442	365	289	238	212
Mazout (HP)	463	367	304	239	198	176
Électricité	0,21	0,17	0,14	0,11	0,09	0,08

Tableau 8. Activité de vulgarisation effectuée lors de la réalisation du projet.

Date	Activité de vulgarisation du projet PAAR
2019-04-30	Rencontre téléphonique avec Dr. Roland Kröbel, modélisateur des écosystèmes et responsable du logiciel Holos d'Agiculture et Agroalimentaire Canada pour la réalisation des diagnostics Holos
2019-07-18	Entrevue téléphonique lors de l'émission radio d'Est en Est de Radio-Canada Première concernant le projet du PAAR de diagnostic de GES.
2020-01-08	Rencontre avec Élyme-Conseil afin de discuter de la collaboration et du partage de données entre la Cohorte de Développement Durable (cohorte DD) et Développement agricole des Basques.
2020-02-05 et 2020-02-06	Rencontre avec les producteurs agricoles présents à la Journée laitière, bovine et ovine afin de pouvoir réaliser des diagnostics de GES à l'aide d'Holos.
2020-02-26 et 2020-02-27	Présentation d'une conférence sur le projet PAAR-GES et rencontre avec les producteurs agricoles présents aux Journées d'information du Groupe Pousse-Vert afin de pouvoir réaliser des diagnostics de GES à l'aide d'Holos.
2020-05-01 à 2021-01-14	Collaboration au développement du calculateur de GES d'Élyme-Conseil (projet PADAAR) pour la réalisation de diagnostics auprès des membres de la cohorte DD.
2021-02-16	Formation sur les émissions de GES agricoles offerte auprès des producteurs agricoles de la cohorte DD.
2021-02-23	Formation sur la quantification des GES offerte auprès des producteurs agricoles de la cohorte DD.
2021-07-01 et 2021-12-01	Collaboration au développement du calculateur de GES d'Agriclimat (phase 2) pour la réalisation de diagnostics auprès des fermes pilotes (dont 2 fermes situées au Bas-Saint-Laurent).
2022-02-01	Collaboration à la formation de l'utilisation du calculateur GES d'Agriclimat pour les agronomes responsables de la réalisation des bilan GES des fermes pilotes.
2022-04-04	Présentation lors d'un webinar sur la réduction des GES des fermes laitières de Régénération Canada; présentation disponible sur le web à : https://www.youtube.com/watch?v=JNMmu9W5KI0&t=3435s
2022-11-01	Collaboration à la réalisation de capsules de formation sur les émissions de GES agricoles pour Lactanet et le CDPQ; capsule disponible à : https://www.youtube.com/watch?v=fECDmd48DCE

Références

- Abdalla, Mohamed, Astley Hastings, Kun Cheng, Qian Yue, Dave Chadwick, Mikk Espenberg, Jaak Truu, Robert M. Rees et Pete Smith. 2019. « A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity ». *Global Change Biology*, vol. 25, n° 8, p. 2530-2543. <<https://doi.org/10.1111/gcb.14644>>.
- Agrinova. 2021. *Trituro laitier - En action sur les fermes de chez vous - Ferme Gilbert et fils*. Alma, Canada : Agrinova, 1 p.
- Alemu, Aklilu W., Brian D. Amiro, Shabtai Bittman, Douglas MacDonald et Kim H. Ominski. 2017. « Greenhouse gas emission of Canadian cow-calf operations: A whole-farm assessment of 295 farms ». *Agricultural Systems*, vol. 151, p. 73-83.
- Arndt, Claudia, Alexander N. Hristov, William J. Price, Shelby C. McClelland, Amalia M. Pelaez, Sergio F. Cueva, Joonpyo Oh, Jan Dijkstra, André Bannink, Ali R. Bayat, Les A. Crompton, Maguy A. Eugène, Dolapo Enahoro, Ermias Kebeab, Michael Kreuzer, Mark McGee, Cécile Martin, Charles J. Newbold, Christopher K. Reynolds, Angela Schwarm, Kevin J. Shingfield, Jolien B. Veneman, David R. Yáñez-Ruiz et Zhongtang Yu. 2022. « Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5 °C target by 2030 but not 2050 ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 119, n° 20, p. 1-10. <<https://doi.org/10.1073/pnas.2111294119>>.
- Bai, Xiongxiang, Yawen Huang, Wei Ren, Mark Coyne, Pierre-Andre Jacinthe, Bo Tao, Dafeng Hui, Jian Yang et Chris Matocha. 2019. « Responses of soil carbon sequestration to climate-smart agriculture practices: A meta-analysis ». *Global Change Biology*, vol. 25, n° 8, p. 2591-2606. <<https://doi.org/10.1111/gcb.14658>>.
- Basche, A. D., F. E. Miguez, T. C. Kaspar et M. J. Castellano. 2014. « Do cover crops increase or decrease nitrous oxide emissions? A meta-analysis ». *Journal of Soil and Water Conservation*, vol. 69, n° 6, p. 471-482. <<https://doi.org/10.2489/jswc.69.6.471>>.
- Bernier, Raymond. 2020. *Évaporateur d'eau d'érable - Caractéristiques, opération et choix selon les préférences, les coûts d'acquisition et d'opération*. Gatineau, Canada : Bélanger agro-consultant Inc., 51 p.
- Bhatt, Akul et Bassim Abbassi. 2022. « Life cycle impacts of sheep sector in Ontario, Canada ». *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 27, p. 1283-1298. <<https://doi.org/10.1007/s11367-022-02105-1>>.
- Bolinder, Martin A., Felicity Crotty, Annemie Elsen, Magdalena Frac, Tamás Kismányoky, Jerzy Lipiec, Mia Tits, Zoltán Tóth et Thomas Kätterer. 2020. « The effect of crop residues, cover crops, manures and nitrogen fertilization on soil organic carbon changes in agroecosystems: a synthesis of reviews ». *Mitigation and Adaptation*

Strategies for Global Change, vol. 25, n° 6, p. 929-952.
<<https://doi.org/10.1007/s11027-020-09916-3>>.

Dyer, James A., Xavier PC Vergé, Raymond L. Desjardins et Devon E. Worth. 2014. « A comparison of the greenhouse gas emissions from the sheep industry with beef production in Canada ». *Sustainable Agriculture Research*, vol. 3, n° 3, p. 153.

Fan, Daijia, Wentian He, Ward N. Smith, Craig F. Drury, Rong Jiang, Brian B. Grant, Yaoyao Shi, Daping Song, Yanhua Chen, Xuexia Wang, Ping He et Guoyuan Zou. 2022. « Global evaluation of inhibitor impacts on ammonia and nitrous oxide emissions from agricultural soils: A meta-analysis ». *Global Change Biology*, vol. 28, n° 17, p. 5121-5141. <<https://doi.org/10.1111/gcb.16294>>.

Forster, Piers, Trude Storelvmo, William Collins, Jean-Louis Dufresne, Dave Frame, Dan Lunt, Thorsten Mauritsen, Matthew Palmer, Masahiro Watanabe, Martin Wild, Hua Zhang, Kari Alterskjaer et Christopher Smith. 2021. « The Earths energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity ». In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, p. 923-1054. vol. 2021. United Kingdom and New York, NY, USA : Cambridge University Press. <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021AGUFM.U13B..07A>>. Consulté le 14 novembre 2022.

Gavrilova, Olga, Adrian Leip, Hongmin Dong, James Macdonald, Carlos Gomez, Barbara Amon, Rolando Barahona Rosales, Agustin, Agustin Del Prado, Magda Lima, Walter Oyhantcabal, Tony Weerden, Yeni Widiawati, Andre Bannink, Karen Beauchemin, Harry Clark, April Leytem, Ermias Kebreab, Ngwa Ngwabie et Theunis Vellinga. 2019. « Chapter 10: Emissions from livestock and manure management ». In *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, p. 209. vol. 4. Geneva, Switzerland : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Gerber, Pierre J., Henning Steinfeld, Benjamin Henderson, Anne Mottet, Carolyn Opio, Jeroen Dijkman, Alessandra Falcucci et Giuseppe Tempio. 2013. *Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Rome, Italy : Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 115 p.

Groupe AGÉCO. 2017. *Life cycle assessment of sheep production in Ontario*. Montréal, Canada : Groupe AGÉCO, 23 p.

Hawkins, James, Alfons Weersink, Claudia Wagner-Riddle et Glenn Fox. 2015. « Optimizing ration formulation as a strategy for greenhouse gas mitigation in intensive dairy production systems ». *Agricultural Systems*, vol. 137, p. 1-11. <<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.03.007>>.

Holtshausen, Lucia, Chaouki Benchaar, Roland Kröbel et Karen A. Beauchemin. 2021. « Canola meal versus soybean meal as protein supplements in the diets of lactating

- dairy cows affects the greenhouse gas intensity of milk ». *Animals*, vol. 11, n° 6, p. 1636. <<https://doi.org/10.3390/ani11061636>>.
- Laterre, Rédaction. 2019. « C'est le temps de rendre le sirop d'érable plus vert ». In *La Terre de Chez Nous*. <<https://www.laterre.ca/actualites/foret/cest-le-temps-de-rendre-le-sirop-derable-plus-vert>>. Consulté le 4 février 2022.
- Liang, B. C., A. J. VandenBygaart, J. D. MacDonald, D. Cerkowniak, B. G. McConkey, R. L. Desjardins et D. A. Angers. 2020. « Revisiting no-till's impact on soil organic carbon storage in Canada ». *Soil and Tillage Research*, vol. 198, p. 104529. <<https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104529>>.
- Lizotte, P.-L. 2022. *Les retombées économiques et environnementales d'adoption de pratiques régénératrices pour la réduction des GES de fermes laitières*.
- Mazzetto, Andre M., Shelley Falconer et Stewart Ledgard. 2023. « Carbon footprint of New Zealand beef and sheep meat exported to different markets ». *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 98, p. 106946. <<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106946>>.
- McClelland, Shelby C., Keith Paustian et Meagan E. Schipanski. 2021. « Management of cover crops in temperate climates influences soil organic carbon stocks: a meta-analysis ». *Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America*, vol. 31, n° 3, p. e02278. <<https://doi.org/10.1002/eap.2278>>.
- Muhammad, Ihsan, Upendra M. Sainju, Fazhu Zhao, Ahmad Khan, Rajan Ghimire, Xin Fu et Jun Wang. 2019. « Regulation of soil CO₂ and N₂O emissions by cover crops: A meta-analysis ». *Soil and Tillage Research*, vol. 192, p. 103-112. <<https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.020>>.
- Ouellet, Veronique, Gaëtan F. Tremblay, Jean-Philippe Laroche, Gilles Bélanger, Simon Binggeli, Guillaume Jégo et Edith Charbonneau. 2021. « Modeling whole farm profitability and environmental performance of four alfalfa-grass binary mixtures in eastern Canadian dairy farms ». *Agronomy Journal*, vol. 113, n° 5, p. 4047-4063. <<https://doi.org/10.1002/agj2.20793>>.
- Patra, Amlan Kumar. 2014. « A meta-analysis of the effect of dietary fat on enteric methane production, digestibility and rumen fermentation in sheep, and a comparison of these responses between cattle and sheep ». *Livestock Science*, vol. 162, p. 97-103. <<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2014.01.007>>.
- Pelster, David E., Arumugam Thiagarajan, B. Chang Liang, Martin H. Chantigny, C. Wagner-Riddle, Kate A. Congreves, R. L. Lemke, Aaron Glenn, Mario Tenuta, Guillermo Hernandez-Ramirez, Shabtai Bittman, D. E. Hunt, Jennifer Owens et J. Douglas MacDonald. 2022. « Ratio of non-growing season to growing season N₂O emissions in Canadian croplands: an update to national inventory methodology ». *Canadian Journal of Soil Science*. <<https://doi.org/10.1139/CJSS-2022-0101>>. Consulté le 8 février 2023.

- Rotz, C. Alan, Senorpe Asem-Hiablie, Sara Place et Greg Thoma. 2019. « Environmental footprints of beef cattle production in the United States ». *Agricultural Systems*, vol. 169, p. 1-13. <<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.11.005>>.
- Sokolov, Vera, Andrew VanderZaag, Jemaneh Habtewold, Kari Dunfield, James T. Tambong, Claudia Wagner-Riddle, Jason J. Venkiteswaran et Robert Gordon. 2020. « Acidification of residual manure in liquid dairy manure storages and its effect on greenhouse gas emissions ». *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 4, n° 568648, p. 1-11. <<https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.568648>>.
- Tran, Thi Sen et Marcel Giroux. 1998. « Fate of 15N-labelled fertilizer applied to corn grown on different soil types ». *Canadian Journal of Soil Science*, vol. 78, n° 4, p. 597-605. <<https://doi.org/10.4141/S97-086>>.
- Uddin, M. E., H. A. Aguirre-Villegas, R. A. Larson et M. A. Wattiaux. 2021. « Carbon footprint of milk from Holstein and Jersey cows fed low or high forage diet with alfalfa silage or corn silage as the main forage source ». *Journal of Cleaner Production*, vol. 298, p. 126720. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126720>>.
- VanderZaag, Andrew. 2018. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - MCF Calculations Example Spreadsheet*.
- Vincent Poirier, Denis A. Angers, Philippe Rochette, Martin H. Chantigny, Noura Ziadi, Gilles Tremblay, et Josée Fortin. 2009. « Interactive Effects of Tillage and Mineral Fertilization on Soil Carbon Profiles ». *Soil Science Society of America journal*, vol. 73, n° 1, p. 255-261. <<https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0006>>.
- Woodley, Alex L., Craig F. Drury, Xueming Y. Yang, Lori A. Phillips, Daniel W. Reynolds, Wayne Calder et Tom Okello Oloya. 2020. « Ammonia volatilization, nitrous oxide emissions, and corn yields as influenced by nitrogen placement and enhanced efficiency fertilizers ». *Soil Science Society of America Journal*, vol. 84, n° 4, p. 1327-1341. <<https://doi.org/10.1002/saj2.20079>>.