

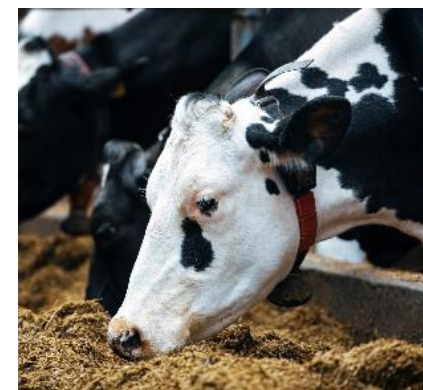
01 octobre 2026 – Webinaire #3

Adaptez vos pratiques face aux changements climatiques –
Coordination Services-Conseils

Portrait du bilan carbone en production laitière

Présenté par Sylvestre Delmotte, PhD, agr. Consultant CDAQ

et Frédérika Nadon, agr., M.Sc. Candidate au doctorat en sciences animales, Université Laval



Plan de présentation

- Survol du bilan carbone
- Les émissions
- Le stockage du carbone

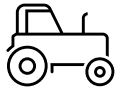


Bilan carbone

- Les **postes d'émissions** de GES et le **stockage** de carbone

Postes d'émissions

N
K
P



Fabrication et utilisation des intrants
(Engrais, énergie, aliments et litières)

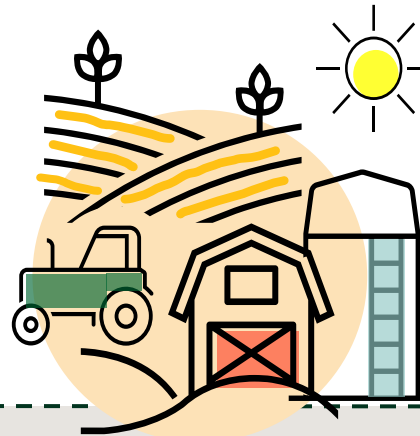
**Gestion
des fumiers**



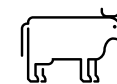
**Arbres et
arbustes**



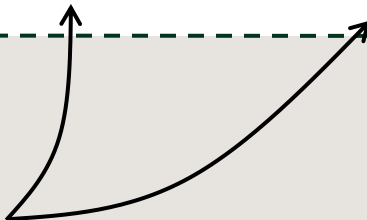
**Sols
agricoles**



**Fermentation
entérique**



Stockage



Les 3 principaux gaz



Dioxyde de carbone
issu de la **combustion**
(tracteur, chauffage)



Méthane provenant
de la **digestion** des
aliments et des fumiers



Protoxyde d'azote issu de la
dégradation de l'azote dans
les sols et les fumiers



Le potentiel de réchauffement de chaque gaz
dépend de sa **durée de vie dans l'atmosphère**
et de son **potentiel de rétention de la chaleur**

Gaz

Équivalent CO₂

1 kg CO₂

1 kg éq. CO₂

1 kg CH₄, biogénique

27 kg éq. CO₂

1 kg CH₄, fossile

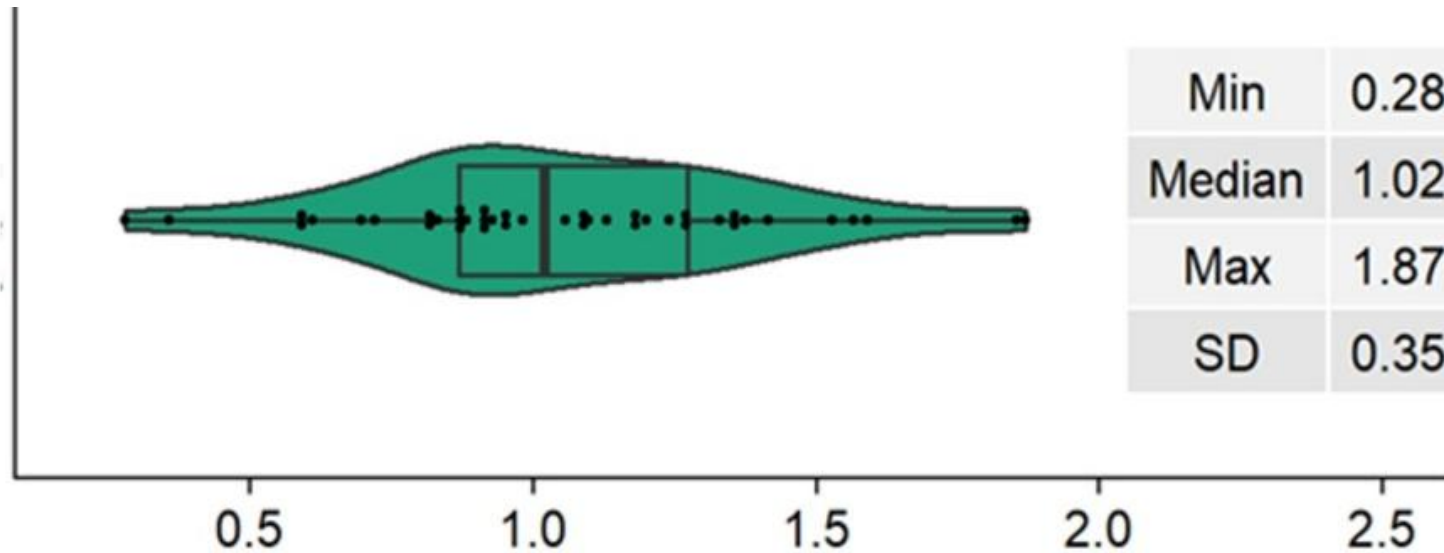
29,8 kg éq. CO₂

1 kg N₂O

273 kg éq. CO₂

Le bilan est très variable d'une ferme à l'autre!

Émissions
nettes de GES
(42 fermes)



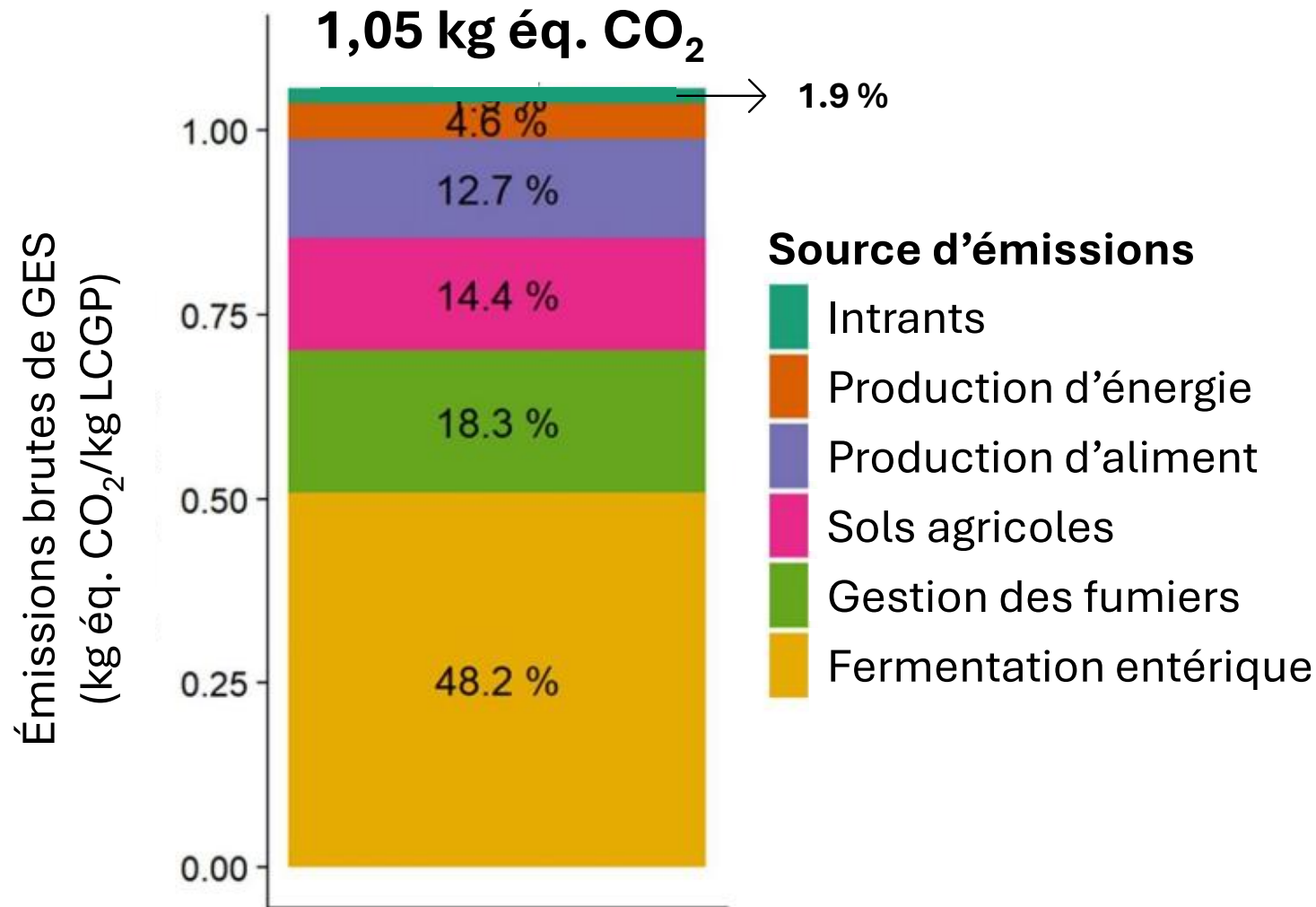
Émissions de GES
(kg éq. CO₂/kg LCGP)

Portrait des émissions

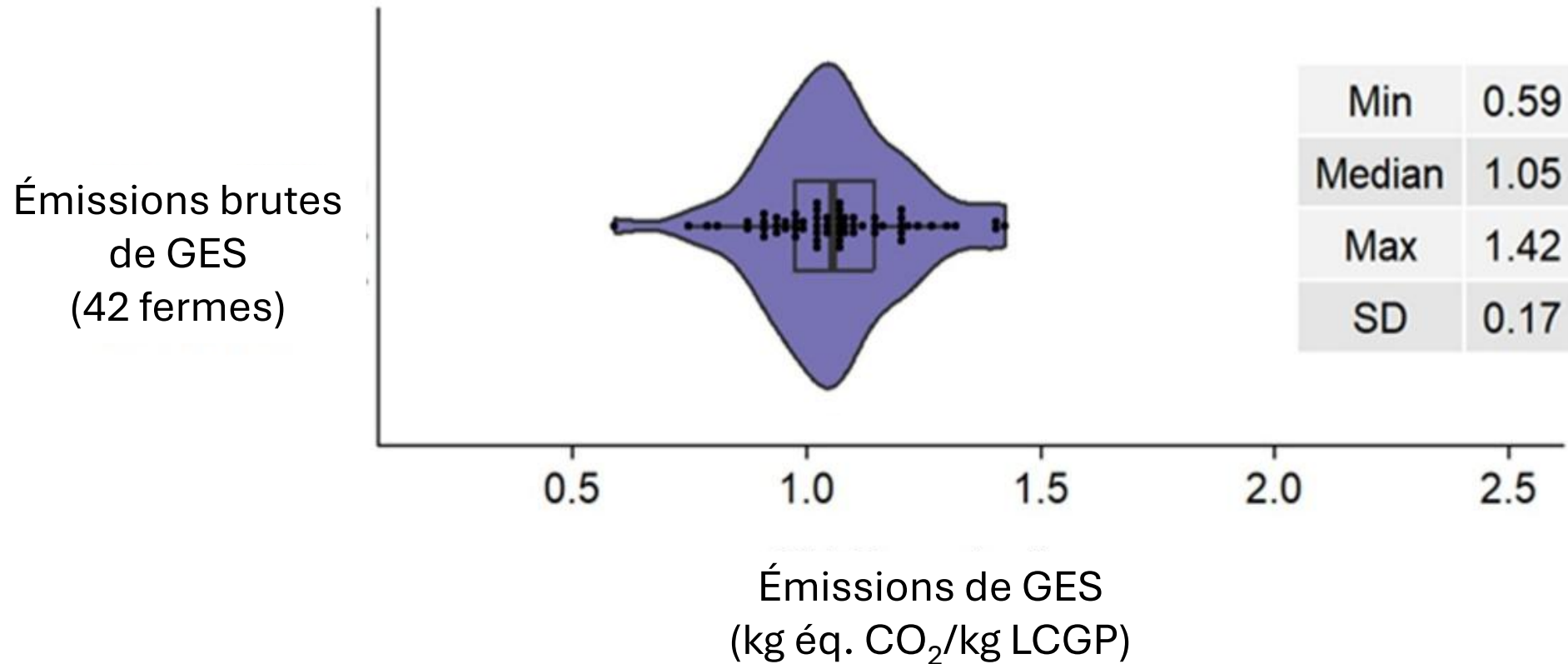
Plusieurs études récentes nous fournissent des chiffres :

Contexte	Nombre d'entreprises étudiées	Empreinte carbone moyenne du lait (kg éq. CO ₂ / kg LCGP)
Laboratoire vivant – Lait Carboneutre – année 2022 – Nadon et al., 2026	20	Holos : 1,02 (0,86-1,56) Agriclimat : 1,05 (0,84-1,42)
Agriclimat – années 2021 à 2023 – Ruiz-Gonzalez et al., 2026	62	1,05 (0,59-1,42)
Méthane Québec – année 2024 – Non publié	33	1,07 (0,78-1,47)
Plateforme Agriclimat – Années 2024 et 2025 – Non publié	46	1,20 (0,69 – 1,77)

Portrait des émissions



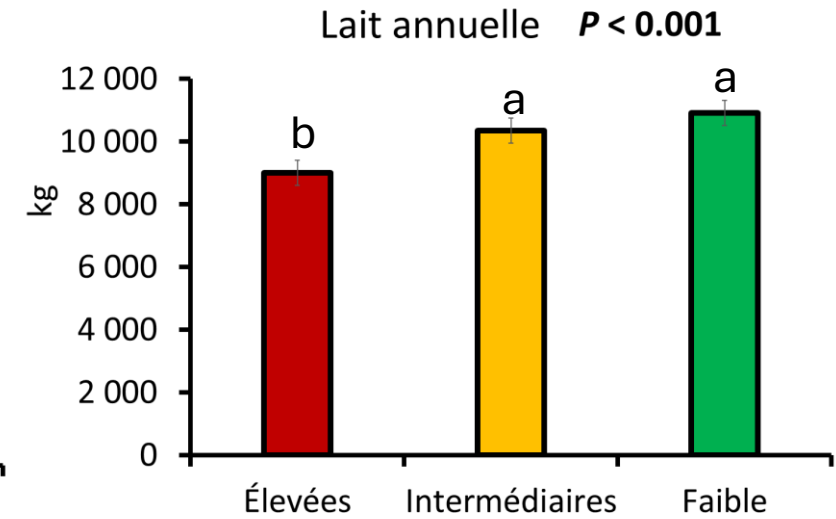
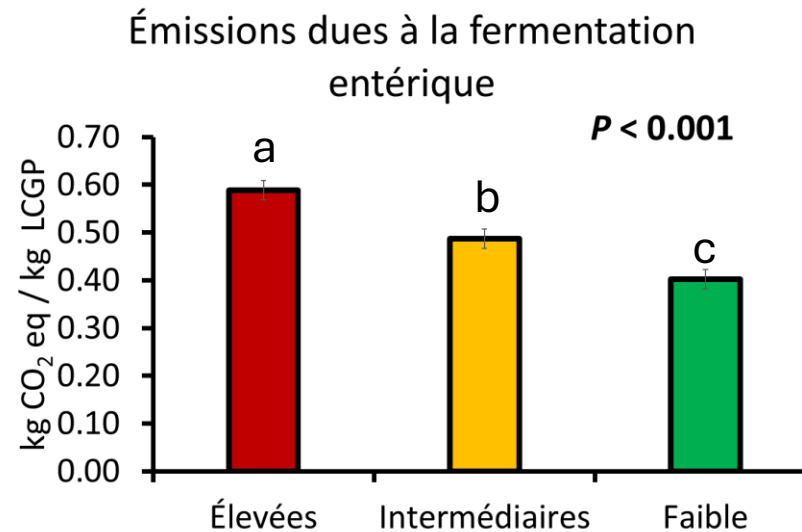
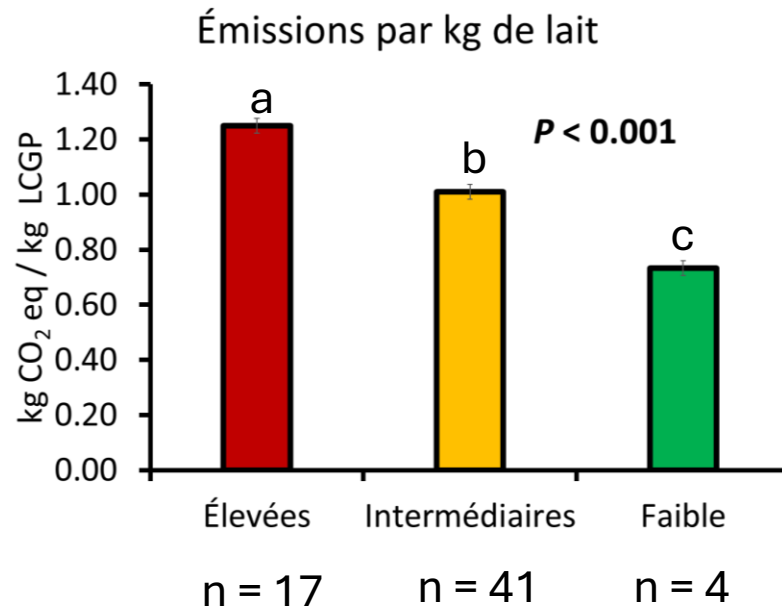
Variabilité des émissions



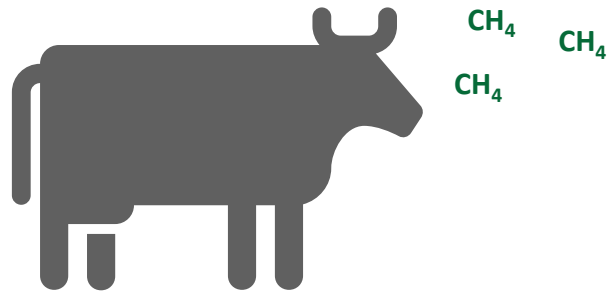
Analyse transversale



Analyse des émissions de 62 entreprises laitières par classification hiérarchique



La fermentation entérique



Le **rumen** est composé d'une communauté riche en bactéries, protozoaires et champignons

Cette communauté microbienne dégrade les fibres végétales en acides gras volatils (AGV) par **fermentation**



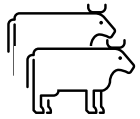
Les **AGV** sont la principale source d'énergie de la vache



Les AGV (acétate, propionate, butyrate) sont absorbés par les papilles du rumen

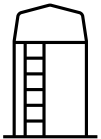
Production de méthane CH₄

Les facteurs influençant les émissions



La gestion du troupeau

Nombre d'animaux de remplacement, sélection génétique, caractéristiques de l'animal (poids, productivité, etc.), santé des animaux et reproduction



La composition de l'alimentation

Qualité des fourrages, quantités de concentrés, additifs, paramètres de la ration



L'environnement

Conditions ambiantes (stress thermique, froid), qualité de l'eau, stress

Fermentation entérique



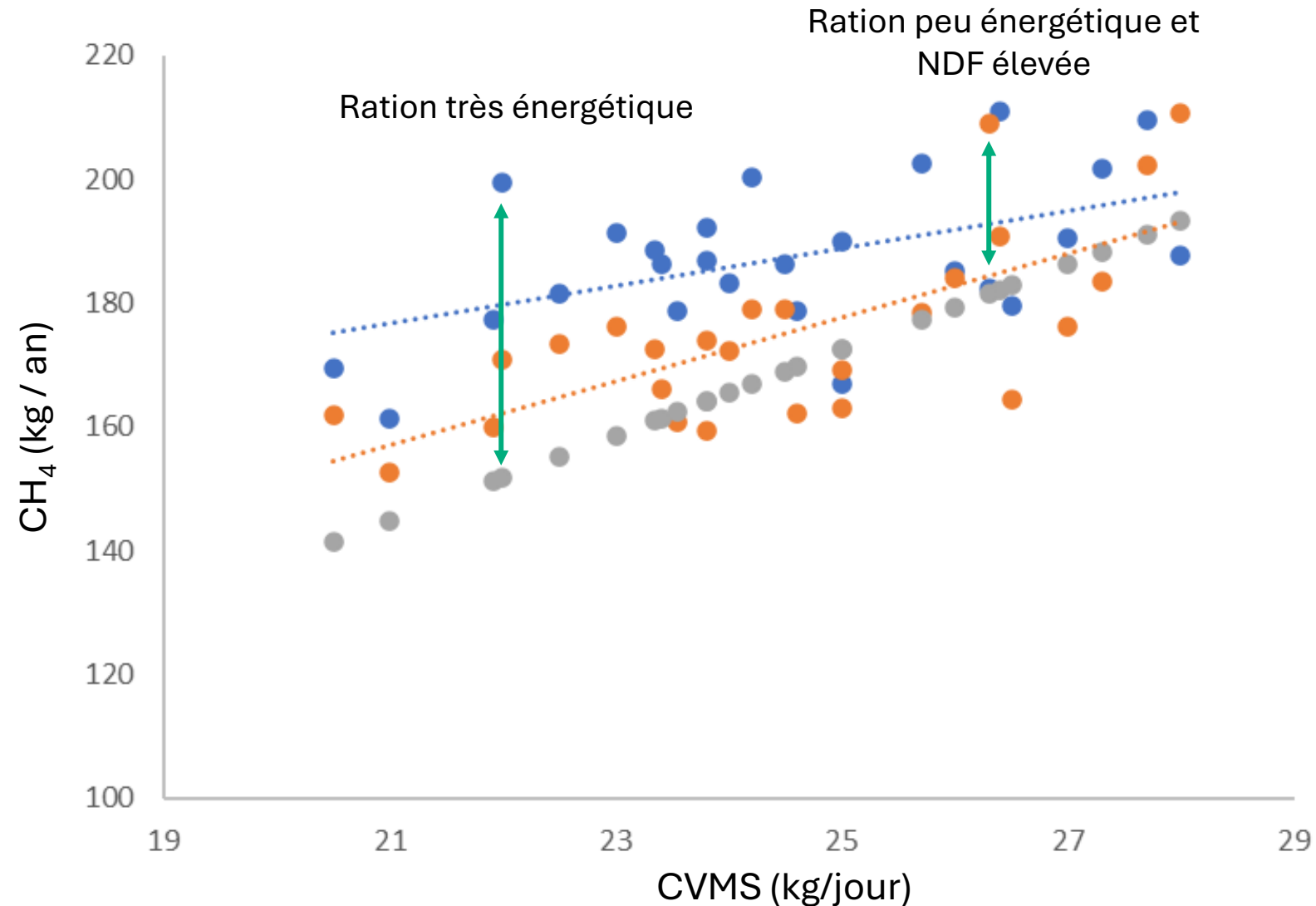
Exemple du modèle de Vellarde-Guillen et al., 2019 pour les vaches en lactation

$$\begin{aligned} CE_{(FE)T} = & -1260.37 + 1.87 MY (kg d^{-1}) + 62.79 MF (\%) - 18.37 MP (\%) \\ & + 11.00 DMI (kg d^{-1}) + 0.26 BW (kg) + 58.25 NDF (\% DM) - 0.82 NDF^2 (\% DM) \\ & + 1.93 starch (\% DM) - 2.45 (EE - rumen - inert fat) (\% DM) \end{aligned}$$

Données requises : production de lait, gras et protéines, CVMS, poids des vaches, paramètres techniques de la ration.

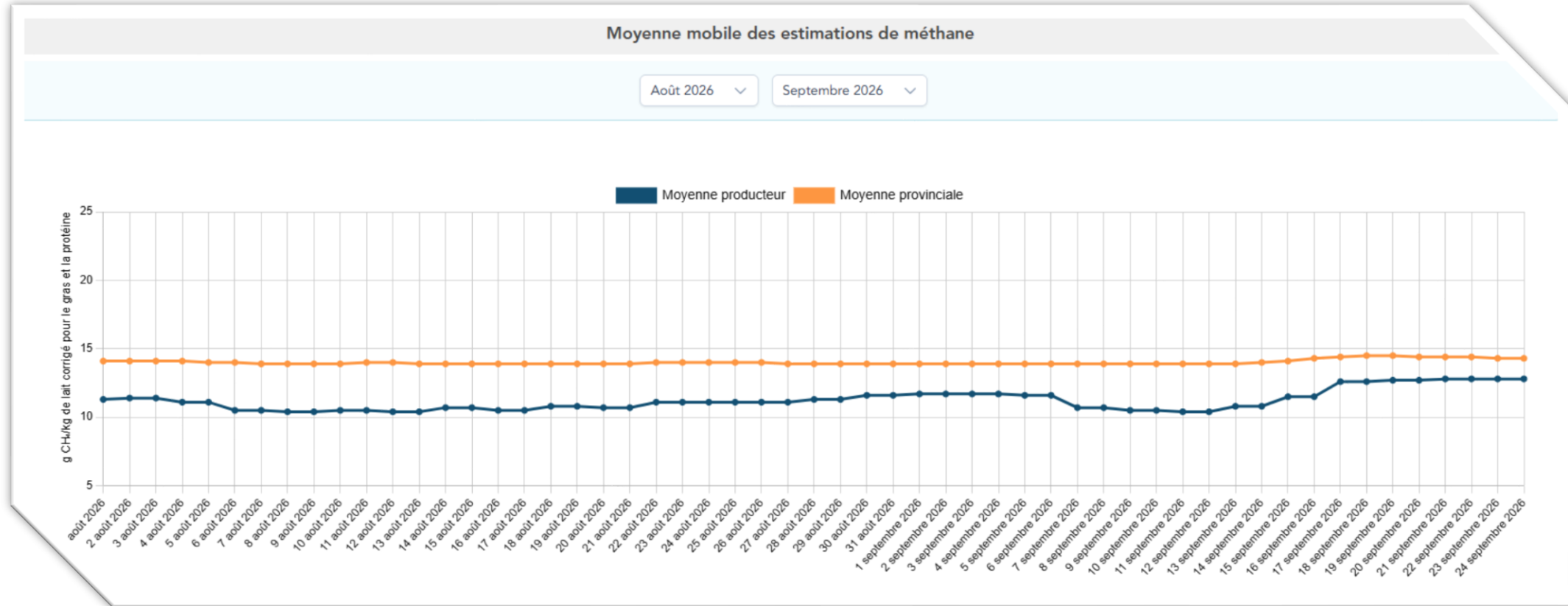
- Choix d'une ration qui représente bien les pratiques de la ferme (avril).
- Permet d'analyser la qualité et d'envisager des pistes d'améliorations.

Comparaison de modèles



- Modèle de Vellarde-Guillen et al., 2019 (Agriclimat)
- Modèle de Jayasundara et al., 2019
- Modèle du GIEC et du NIR

Maintenant sur l'extranet des producteurs

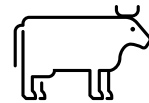


Comment ça fonctionne?



Analyse multispectrale des échantillons
de lait de réservoir

+



Mesure des renifleurs de méthane sur
14 fermes commerciales



Modèle d'IA pour prédire les
émissions de méthane entérique
à la ferme

Gestion des fumiers

Émissions liées à l'entreposage

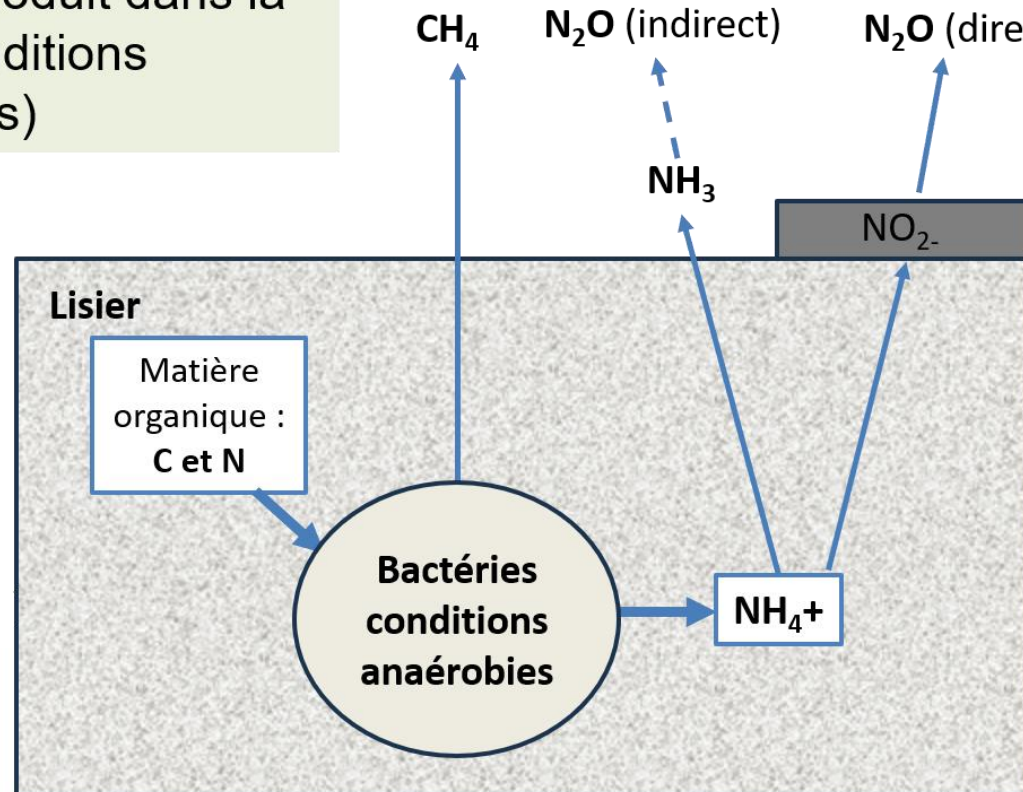


CH₄ est produit dans la fosse (conditions anaérobies)



N₂O est produit au niveau de la croûte qui se forme sur la fosse (conditions aérobies)

- Gestion liquide : **surtout du CH₄**
- Gestion solide : **surtout du N₂O**
- Pâturage : **émissions très faibles!**



Facteurs influençant les émissions de CH₄



La température du fumier

Des températures élevées favorisent une activité microbienne élevée, donc plus d'émissions de méthane



La durée d'entreposage

Plus la durée est longue, plus la communauté bactérienne colonise le fumier

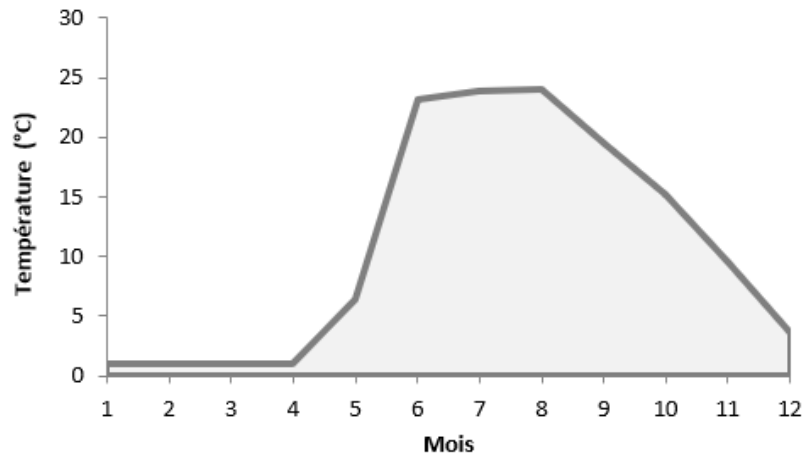


La composition du fumier

La composition de la ration, le type de litière, l'espèce animale, etc.

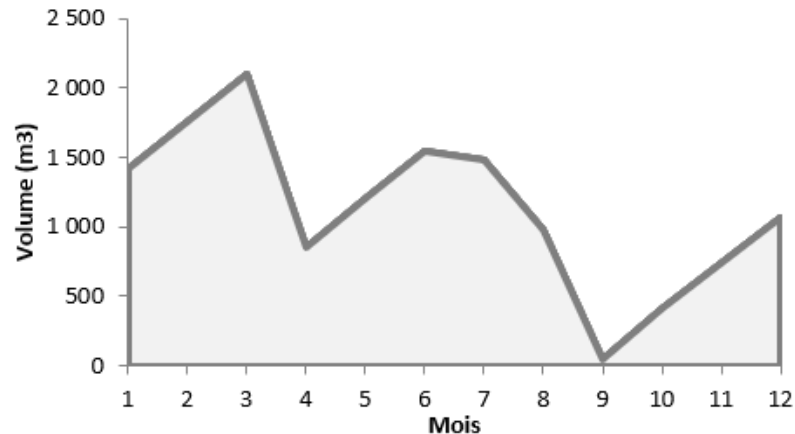
Température, lisier et méthane

Température des lisiers (°C)

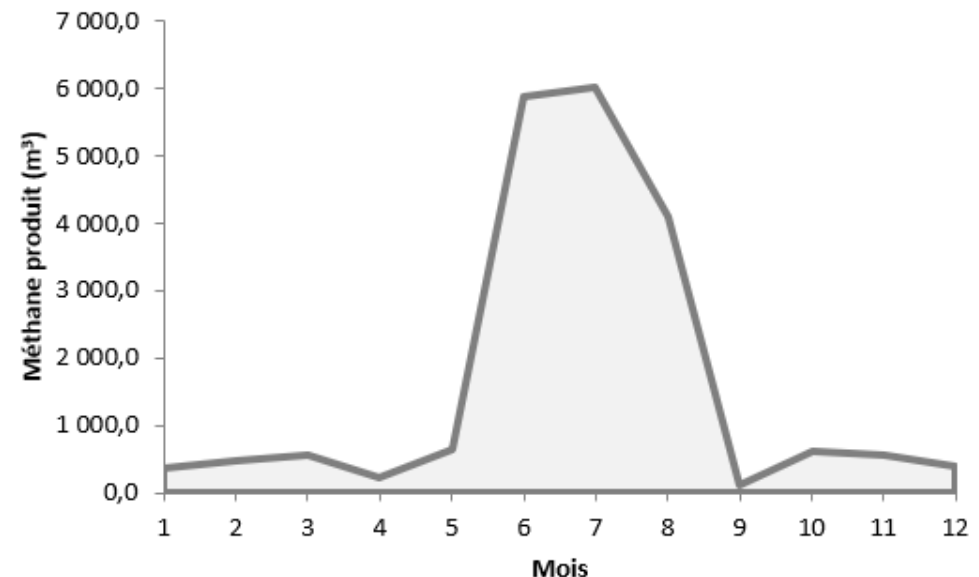


Modélisation des émissions d'une fosse à lisier
(production laitière) – 3 chantiers d'épandage
Modèle du GIEC (2019) modifié

Contenu de la fosse en lisier (m³)



Émissions de méthane (m³)



Lien entre l'alimentation et le protoxyde d'azote



- Approche par bilan alimentaire et bilan des pertes pour évaluer les émissions du fumier et des sols
- Exemple pour une vache en lactation :
DMI = 25 kg, CP = 16 % qui produisent 32 kg de lait par jour à 3,3 % de protéine

$$\text{N ingéré} = 25 * 0,16 / 6,25 = 0,64 \text{ kg N/jour}$$

N retenu pour la (faible)
croissance de la vache

$$\text{N retenu} = 32 * 0,033 / 6,38 + 0,005 = 0,17 \text{ kg N/jour}$$

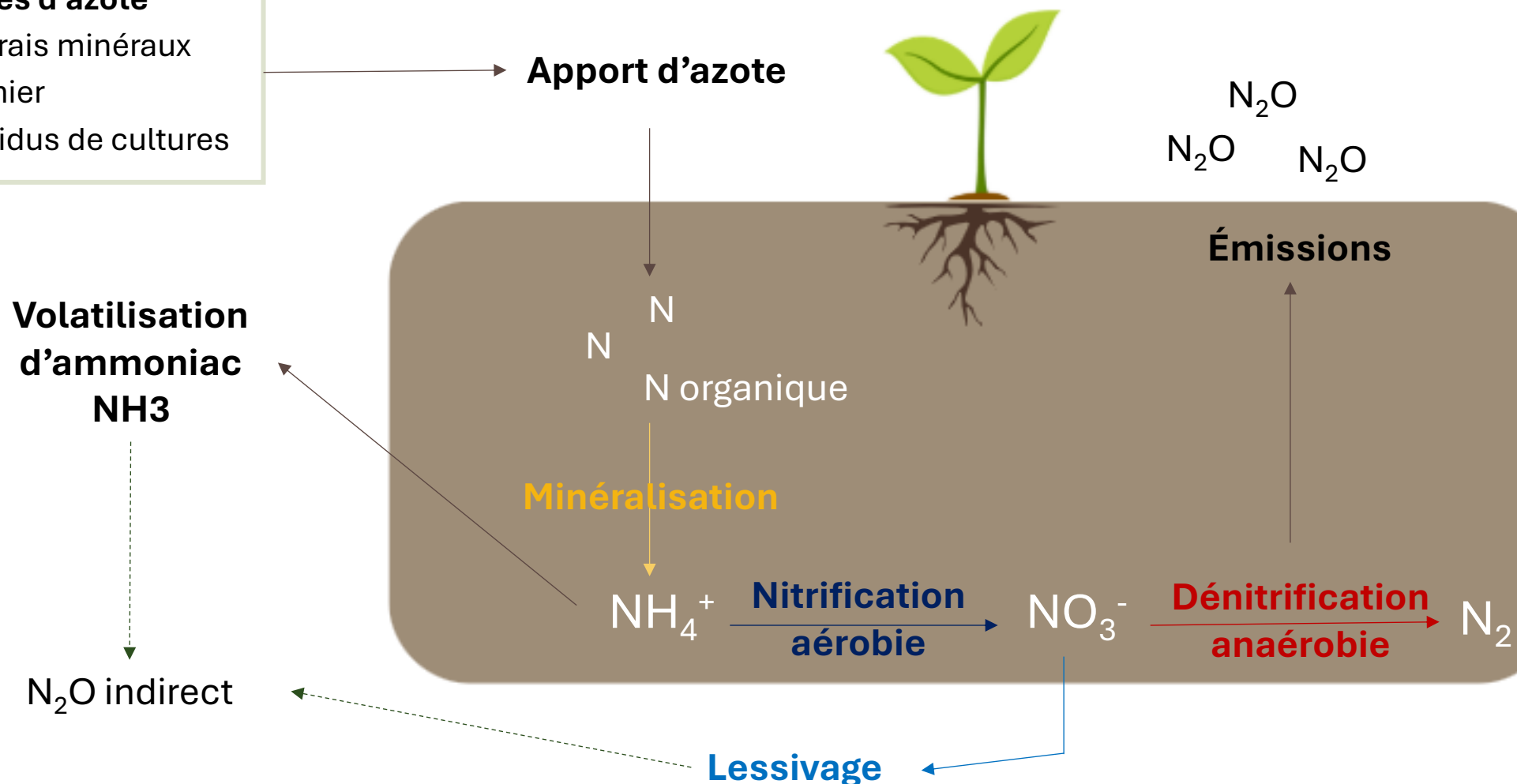
$$\text{N excrété} = 0.64 - 0.17 = 0.47 \text{ kg N/jour/vache}$$

Cycle de l'azote dans le sol

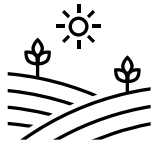


Sources d'azote

- Engrais minéraux
- Fumier
- Résidus de cultures

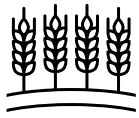


Facteurs influençant les émissions



Les conditions de sols

Les sols argileux en climat humide émettent plus de N_2O que les sols sableux en climat sec



Le type de culture

L'apport d'azote sur les cultures annuelles génère plus d'émissions de N_2O que l'apport sur les cultures pérennes



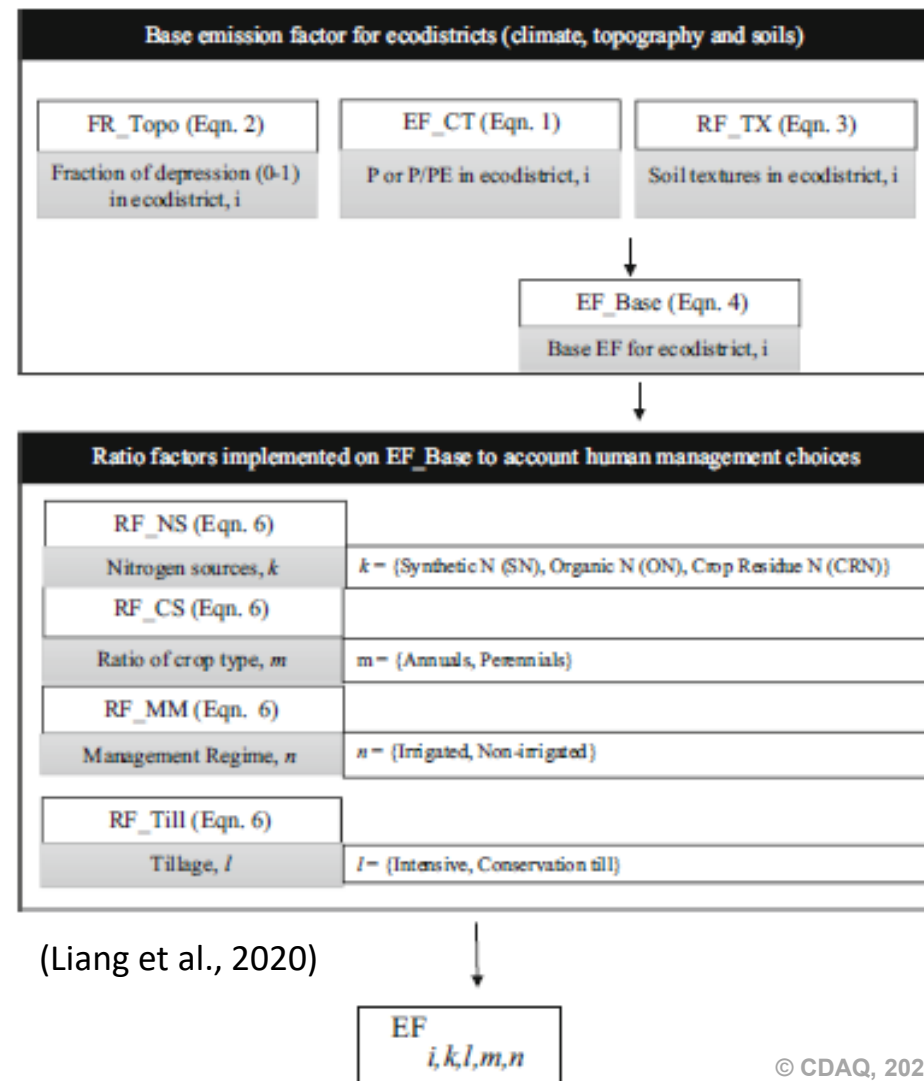
Les amendements

Le type, la quantité, le moment d'application, la méthode d'application, etc.

Sols agricoles – émissions directes de N_2O



- Modèle de Tiers 2 issu des travaux de Rochette et al., 2018 et Liang et al., (2020)
- Les précipitations, la topographie et la texture des sols sont la base du coefficient d'émission (CE)
- Le CE de base est ensuite modifié en fonction des :
 - Type d'apports de N (minéraux, organiques, résidus)
 - Types de culture



Fabrication et utilisation des intrants



Ce poste considère leur **production**, leur **fabrication**, leur **transport** et leur **utilisation***

Gaz émis par ce poste d'émission :

- **CO₂**, **CH₄** et **N₂O**

Facteurs influençant les émissions :

- Le type d'intrants
- La quantité

Quelques exemples :

Aliments achetés

Maïs-grain sec: **0,33** t éq. CO₂/t

Céréales: **0,53** t éq. CO₂/t

Énergie

Diesel: **3,2** kg éq. CO₂ /L

Essence: **2,99** kg éq. CO₂/L

Propane: **2,21** kg éq. CO₂/L

Engrais

Azote: **3,11** kg éq. CO₂/kg d'azote

Phosphore: **1,84** kg éq. CO₂/kg de phosphore

Chaux: **0,87 – 1,01** kg éq. CO₂/kg de chaux

(Alemu et al., 2017, Rotz et al., 2019, Arulnathan, 2023, ECCC, 2024)

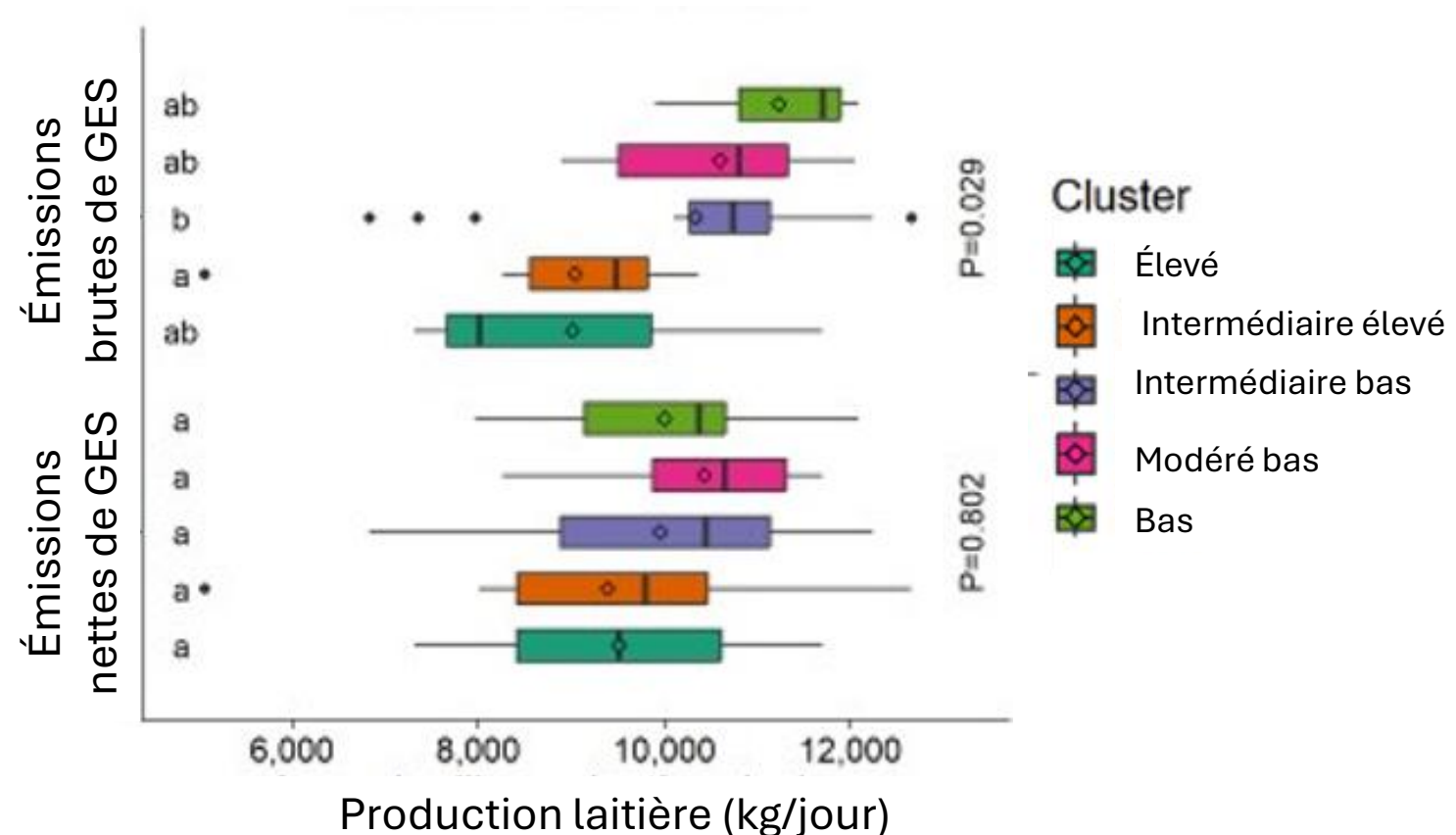
*Pour l'énergie seulement

Facteurs explicatifs des différences

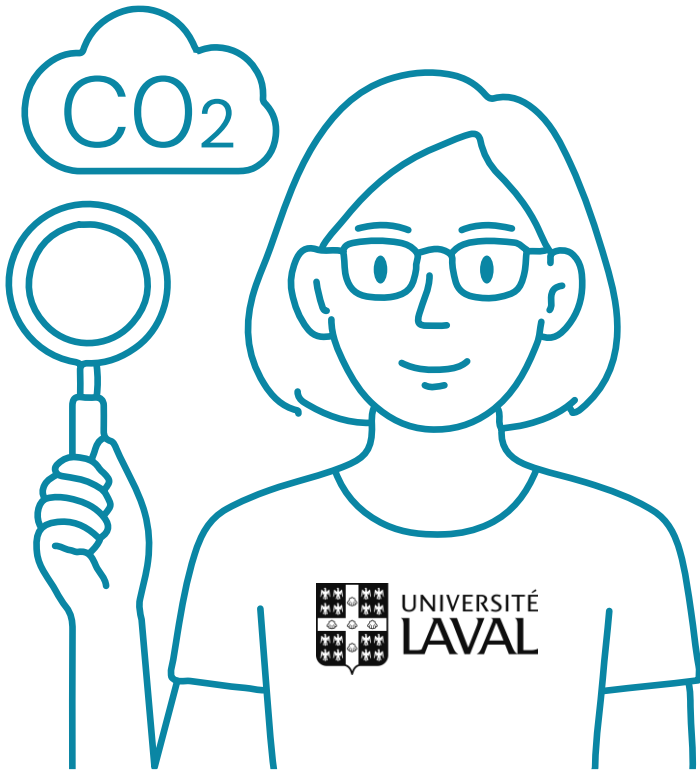


Pas une recette unique pour obtenir un bilan carbone faible :

- Très peu de variables explicatives significatives
- Production annuelle laitière (effet de dilution) – émissions brutes
- Contenu en amidon de la ration (effet sur le CH₄ entérique)
- Texture des sols : sols légers avantageés



Comparaison de calculateurs



Défi présentement → Plusieurs calculateurs de bilan carbone disponibles à l'échelle de la ferme

Tous les calculateurs produisent-ils des résultats similaires?

Les quatre calculateurs comparés



- Adapté au contexte canadien
- Version 4 modifiée par équipe ULaval (Holos-ULaval)
- Modifications : allocation lait-viande, coût environnemental des aliments achetés...



- Basé sur des documents de référence (ECCC, GEIC...) et des recherches réalisées en contexte canadien
- Toujours mis à jour au fil du temps

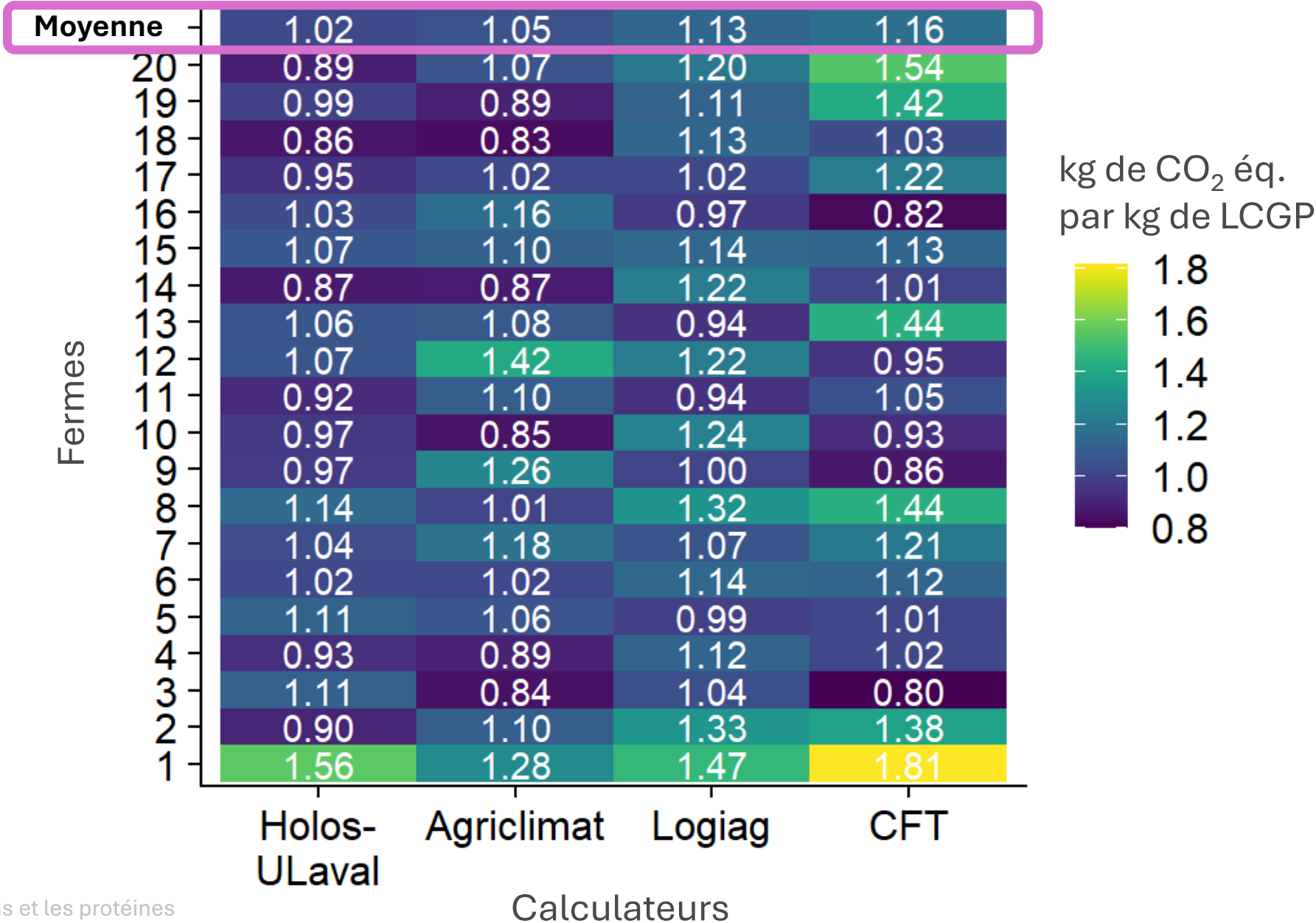


- Dérivé de la version 3 de Holos avec quelques adaptations
- Stabilité au fil du temps



- Basé sur le GIEC (équations plus générales, moins adaptées spécifiquement au contexte canadien)
- Largement utilisé dans le monde entier

Résultats – Empreintes carbone brutes du lait



Résultats - Résumé des six comparaisons par paires

	Holos-ULaval	Agriclimat	Logiag
Agriclimat	MD = -0.03 CCC = 0.42 $\rho = 0.34$		
Logiag	MD = -0.11 CCC = 0.30 $\rho = 0.00$	MD = -0.08 CCC = 0.06 $\rho = -0.06$	
Cool Farm Tool	MD = -0.14 CCC = 0.31 $\rho = 0.08$	MD = -0.11 CCC = 0.13 $\rho = 0.15$	MD = -0.03 CCC = 0.44 $\rho = 0.31$

MD : Différence moyenne (kg éq. CO₂ par kg de LCGP)

CCC : Coefficient de concordance de Lin

ρ : Correlation de Spearman

Résultats - Résumé des six comparaisons par paires

	Holos-ULaval	Agriclimat	Logiag
Agriclimat	MD = -0.03 CCC = 0.42 $\rho = 0.34$		
Logiag	MD = -0.11 CCC = 0.30 $\rho = 0.00$	MD = -0.08 CCC = 0.06 $\rho = -0.06$	
Cool Farm Tool	MD = -0.14 CCC = 0.31 $\rho = 0.08$	MD = -0.11 CCC = 0.13 $\rho = 0.15$	MD = -0.03 CCC = 0.44 $\rho = 0.31$

MD : Différence moyenne (kg éq. CO₂ par kg de LCGP)

CCC : Coefficient de concordance de Lin

ρ : Correlation de Spearman

Paires les plus proches:
Holos-ULaval + Agriclimat
Logiag + Cool Farm Tool

Résultats - Classement des calculateurs



Le classement des fermes (de l'empreinte carbone du lait la plus faible à la plus élevée) est-il le même d'un calculateur à l'autre ?



	MARD	Nombre de fermes			
		Nombre de changement de position			
		0 to 5	6 to 10	11 to 15	16 to 20
Holos-ULaval vs Agriclimat	5.2	13	5	2	0
Holos-ULaval vs Logiag	6.4	11	4	5	0
Holos-ULaval vs CFT	6.2	10	6	2	2
Agriclimat vs Logiag	7.3	10	4	6	0
Agriclimat vs CFT	5.8	13	2	5	0
Logiag vs CFT	5.2	12	6	2	0

Résultats - Classement des calculateurs



Le classement des fermes (de l'empreinte carbone du lait la plus faible à la plus élevée) est-il le même d'un calculateur à l'autre ?



		Nombre de fermes			
		Nombre de changement de position			
	MARD	0 to 5	6 to 10	11 to 15	16 to 20
Holos-ULaval vs Agriclimat	5.2	13	5	2	0
Holos-ULaval vs Logiag	6.4	11	4	5	0
Holos-ULaval vs CFT	6.2	10	6	2	2
Agriclimat vs Logiag	7.3	10	4	6	0
Agriclimat vs CFT	5.8	13	2	5	0
Logiag vs CFT	5.2	12	6	2	0

Classements les plus similaires:
Holos-ULaval + Agriclimat
Logiag + Cool Farm Tool

Discussion – Sources des différences

Raisons spécifiques aux outils

Logiag → Priorise la **stabilité dans le temps**, ses résultats diffèrent de ceux d'Holos-ULaval et d'Agriclimat. Une **nouvelle version** printemps/été est en cours d'élaboration.

Agriclimat → **Mise à jour régulière**, différences mineures avec Holos-ULaval.

Cool Farm Tool → Basé sur les équations Tiers 1 et 2. Mieux adapté aux **comparaisons internationales** qu'à un bilan spécifique dans le contexte canadien.

Raisons méthodologiques

- **Objectifs différents** (soutien aux producteurs, applications scientifiques, certification, utilisation internationale vs adaptation régionale)
- Variations dans **l'inclusion/l'exclusion des intrants**
- **Choix méthodologiques et d'équations différents**

Stockage du carbone



Le stockage du carbone sur une entreprise agricole peut se faire par :

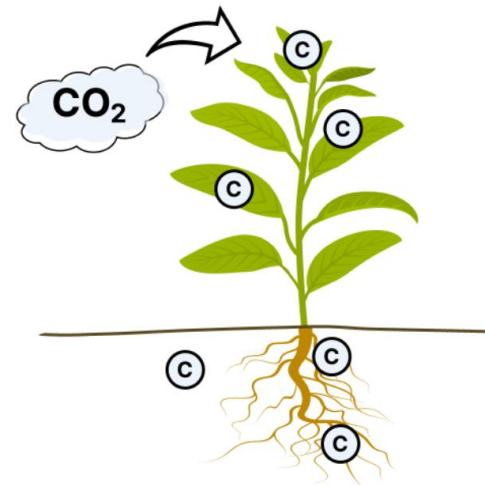
Les arbres

- Dépend des espèces plantées ainsi que de leur destination
- Calculée grâce à des références forestières



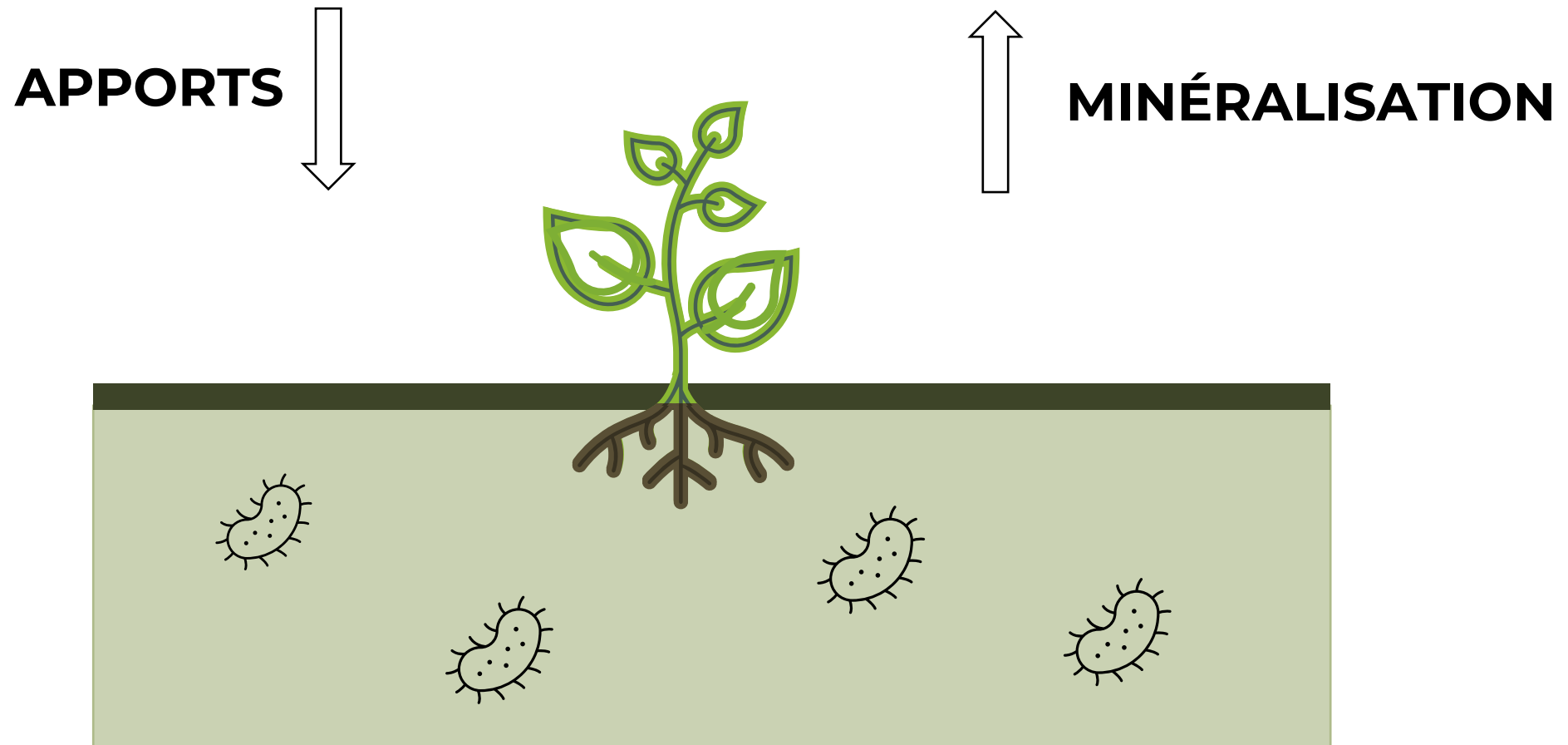
Le sol

- Dépend des pratiques agricoles et des conditions environnantes
- Calculée par la matière organique présente dans les sols

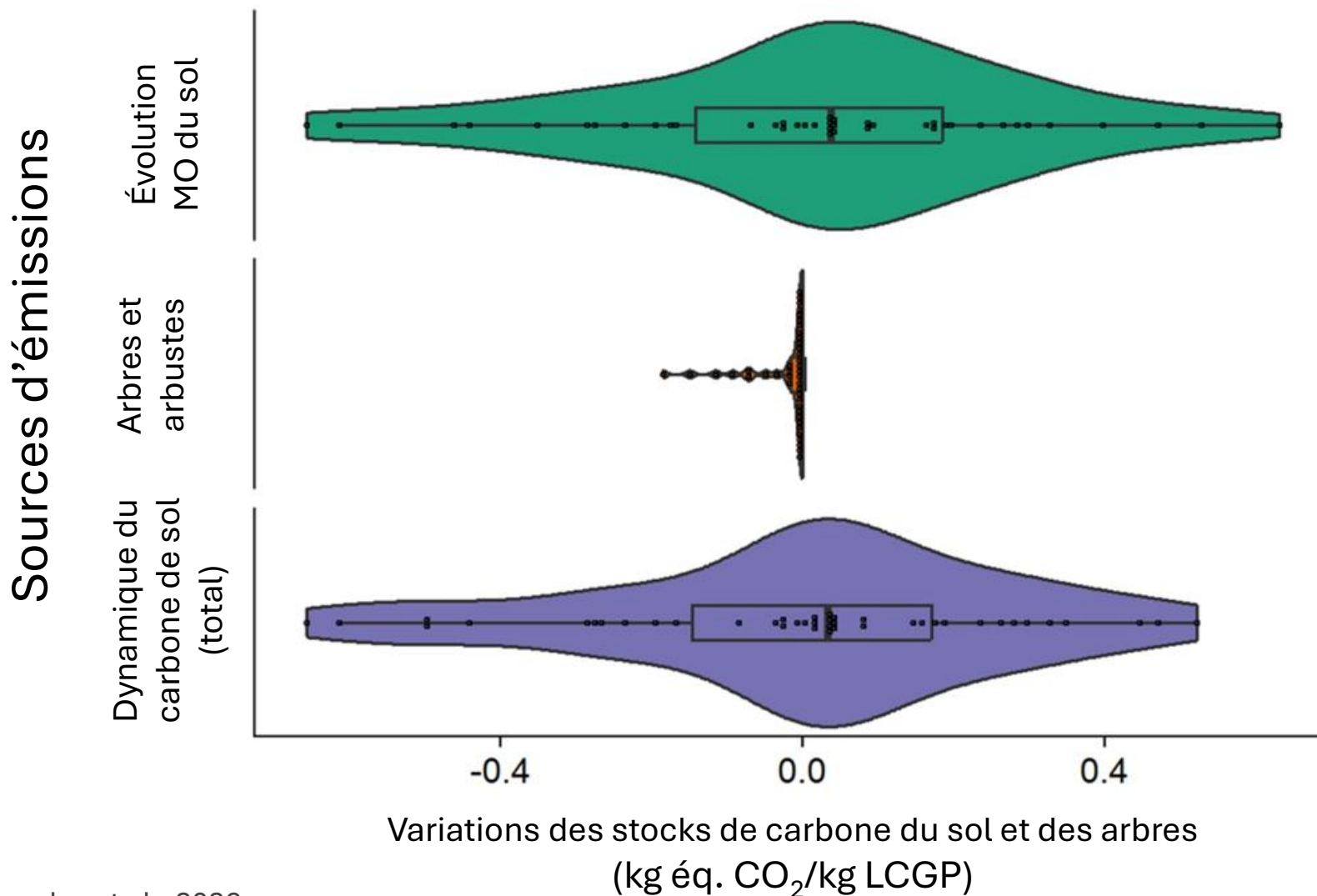


Dynamique du carbone du sol

Une question d'équilibre entre :



Variabilité du stockage



Dynamique de perte généralisée au Québec

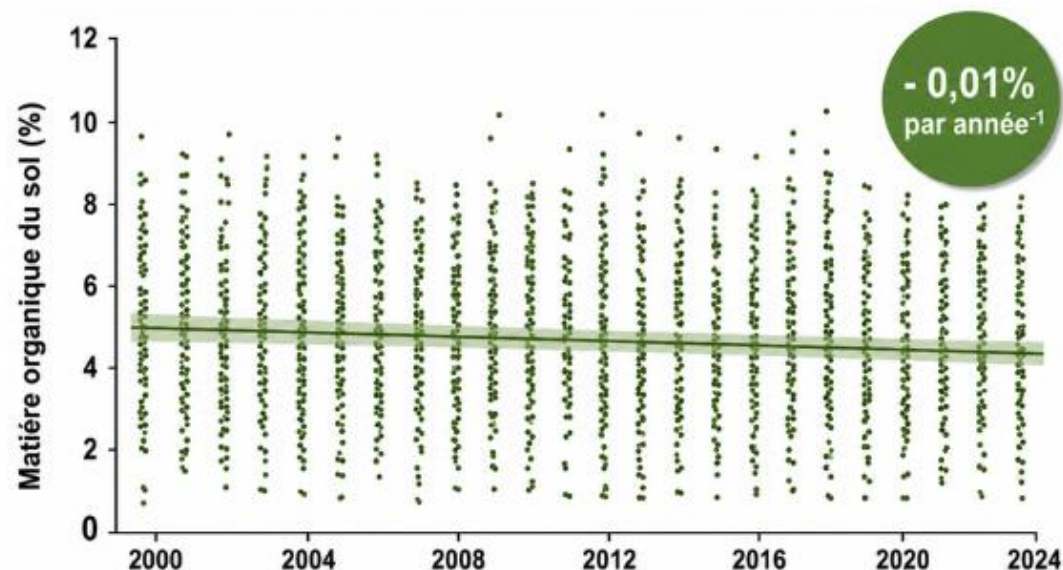


Analyse des données de PAEF (%MOS en surface) chez un groupe de fermes engagées dans la démarche agriclimat.

Derrien et al. en rédaction

Dynamique de perte au Québec...

Pour une ferme moyenne de 100 ha, c'est comme si le sol perdait 28 tonnes de matière organique chaque année, année après année.



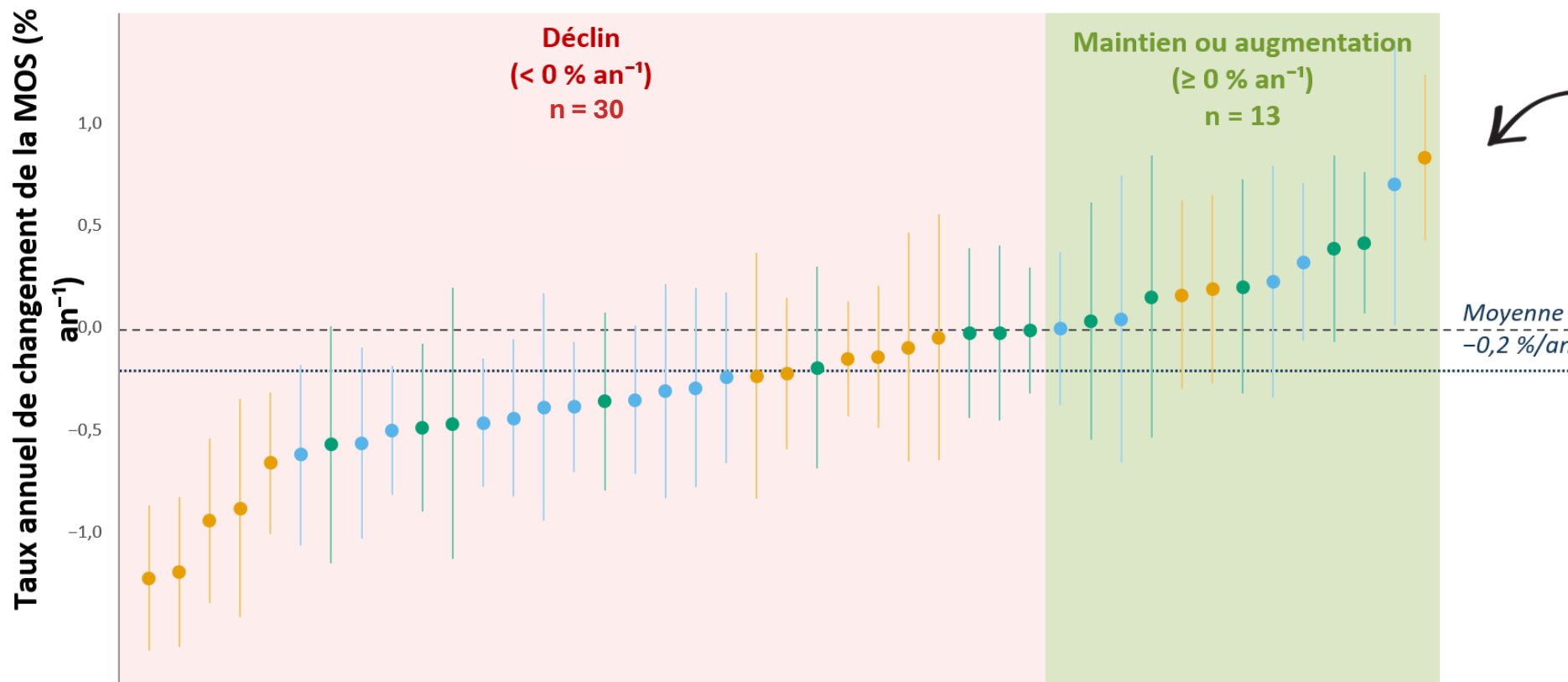
Perte qui correspond à 3 vans de paille par an!



C'est quand même possible d'y arriver!

Distribution des trajectoires à l'échelle ferme selon les textures dominantes pour chaque ferme

BLUPs M4 $\pm$ IC 95 % ; couleurs = groupe textural dominant



Fermes (classées par taux annuel de changement)

Groupe textural dominant : ● Fines ● Moyennes ● Grossières

33% des fermes de ce jeu de données arrivent à **maintenir ou augmenter** leur pourcentage de matière organique en surface (0-15 cm).

Comparaison de la dynamique de carbone du sol (%)



Holos-ULaval

- Calculée pour les 20 fermes
- Modèle ICBM (rendement, conditions du sol, température, précipitations, entrées de carbone)



Agriclimat

- Calculée pour 8 fermes
- Basée sur les analyses de sol des 20 dernières années



Cool Farm Tool

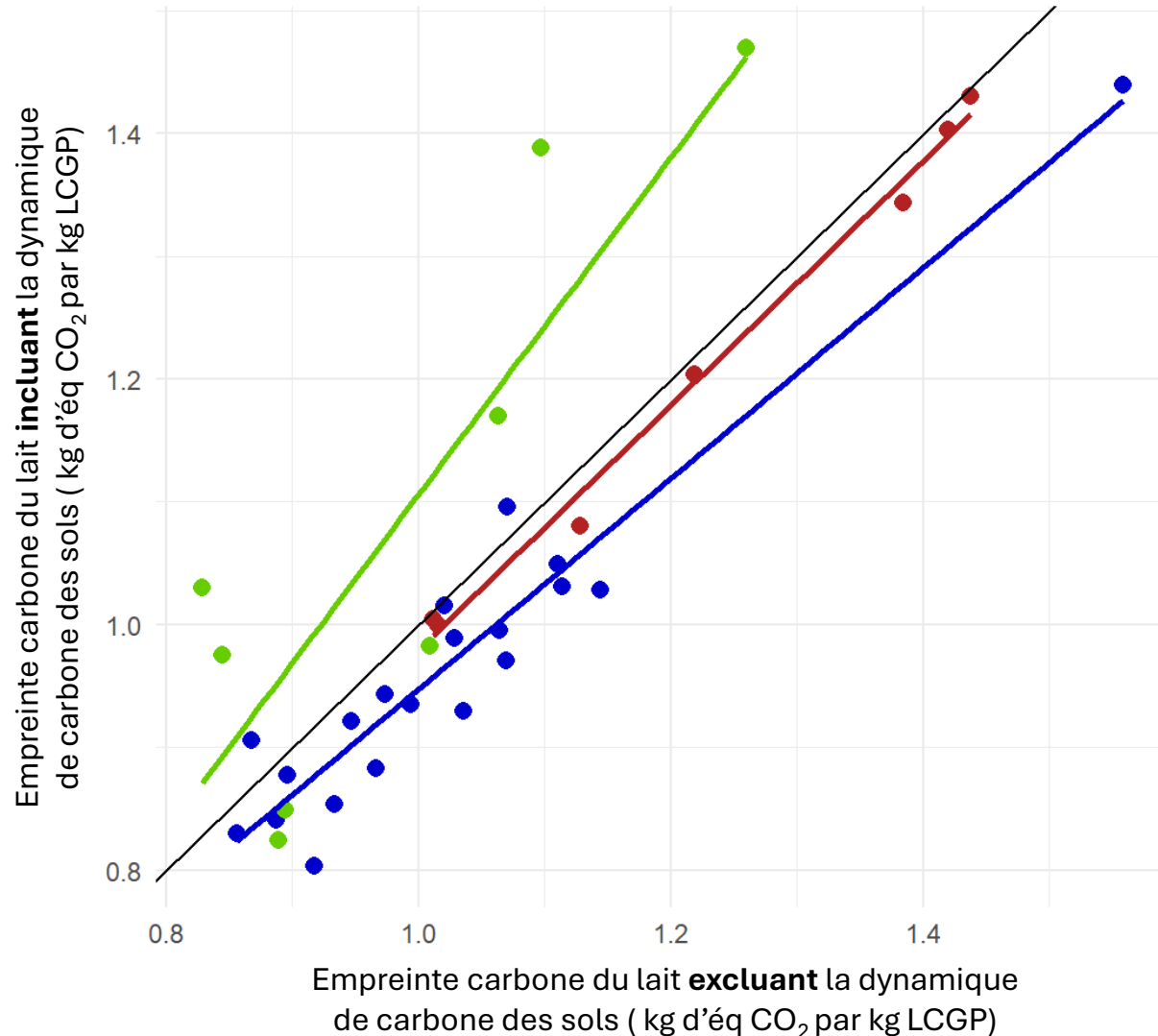
- Calculée pour 7 fermes
- Basée sur le Tier 1 du GIEC
- Évolution des pratiques de gestion des sols au cours des 20 dernières années



Logiag

- Ne permet pas d'évaluer la dynamique du carbone du sol

Résultats – Dynamique de carbone du sol (%)



Holos-ULaval

20 fermes : 1,02 → 0,97 **(-5,5%)**



Agriclimat

8 fermes : 0,99 → 1,09 **(+10,2%)**



Cool Farm Tool

7 fermes : 1,23 → 1,21 **(-1,8%)**

Conclusions différentes

Holos-ULaval + CFT : séquestration de C

Agriclimat : perte/émission de C

Discussion – Dynamique de carbone du sol



Raisons spécifiques aux outils

Holos-ULaval

- Modèle robuste, initialement développé en Suède puis adapté au contexte canadien
- Des **ajustements supplémentaires demeurent nécessaires** pour mieux représenter les conditions canadiennes

Agriclimat

- Approche basée sur l'évolution de la matière organique du sol sur 20 ans (**mesure réelle**)
- **Reflète plus fidèlement la réalité**

Cool Farm Tool

- **Équations générales** basées sur les changements sur 20 ans
- Approche **moins spécifique au contexte canadien**

Conclusions

Le bilan carbone moyen d'un échantillon d'entreprises laitières du Québec se situe autour de **1,02 kg éq. CO₂/kg LCGP**

- Très grande variabilité des émissions, en particulier au niveau de la gestion des fumiers et des sols
- Très grande variabilité du stockage de carbone au niveau des sols

Des bilans réalisés dans différents outils sont difficilement comparables

- Choisir l'outil adapté à votre besoin
- Comprendre les limites de chaque outil



Webinaire #4 :
15 octobre 2026

Selon le contexte, **beaucoup de possibilités de réduire les émissions**



Merci de votre attention!

Partenaires du projet « Développement de l'approche interprofessionnelle des services-conseils pour l'adaptation aux changements climatiques des entreprises laitières via un programme de formation et de coaching »

