

# Améliorer le bilan carbone en grandes cultures : par où commencer?

Sylvestre Delmotte, Ph.D., agr.

Avec le soutien de Thomas Dupuis, Alexis Ruiz Gonzalez, Ph.D. et Maëlle  
Derrien, Ph.D., Université Laval

Webinaire MAPAQ - 28 février 2025





# 01

Comment  
estimer les  
GES ?

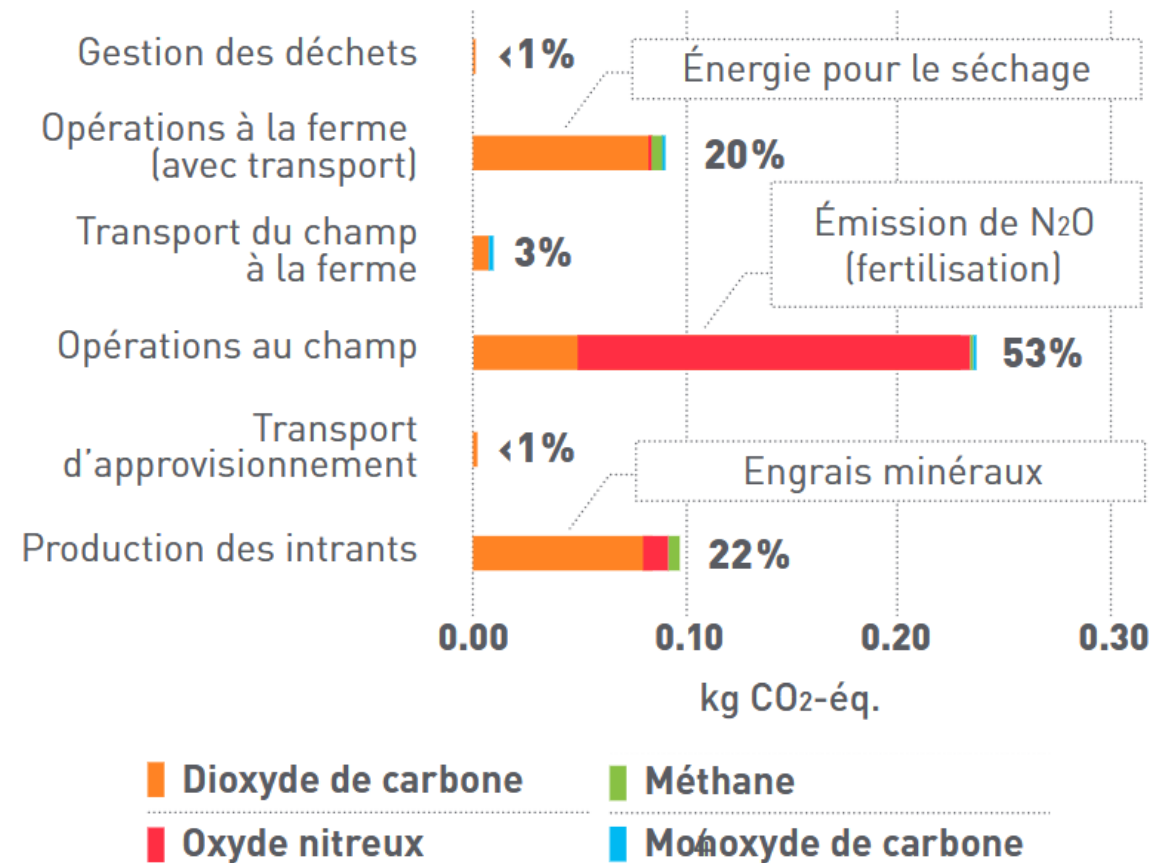
# D'où part-on?

## Études antérieures

- ACV des producteurs de grains du Québec :
  - 2015 : 0,44 kg éq. CO<sub>2</sub> / kg de maïs
  - Analyse filière, issue de la description d'un scénario de production moyen pour le Québec
- À notre connaissance, pas de portrait réalisé des émissions de GES de la production de grandes cultures au Québec basé sur des fermes réelles

## Empreinte carbone d'un kilo de maïs

### Principaux contributeurs aux changements climatiques



# Calculateur GES Agriclimat



- Basé sur les méthodologies standards (GHG protocol, IPCC 2006 et 2019, NIR 2024)
- Modèles de Tiers 2 :
  - Gestion des fumiers
  - N<sub>2</sub>O des sols (Liang et al., 2020) : précision du calcul et potentiel de réduction
- Adéquation entre précision du calcul et temps requis pour collecter, compiler et analyser les données;
- Transparence pour l'utilisateur, flexibilité dans le choix des formalismes suivant les données disponibles, adaptation aux contextes locaux et aux nouvelles connaissances;
- Conforme aux exigences des différents standards de l'industrie.

→ Audit externe et publications scientifiques en cours

# Processus de développement



- Collaboration des experts pour opérer des choix :
  - Près de 30 experts consultés entre septembre 2021 et février 2022 : présentation d'une revue de la littérature, des méthodes possibles, et suggestions de choix
- Tests et améliorations successives en fonction des retours des utilisateurs et des experts depuis 2022
- Participation à plusieurs projets de R&D pour approfondir les connaissances
- Comité scientifique réuni en novembre 2024 pour prioriser les développements futurs



# Déploiement du diagnostic

Chercheurs et professionnels  
(porteurs de connaissances agronomiques)

Partage de connaissances,  
soutien pour le  
développement de l'outil  
diagnostic

Équipe  
AGRICLIMAT

Formation et  
outil diagnostic

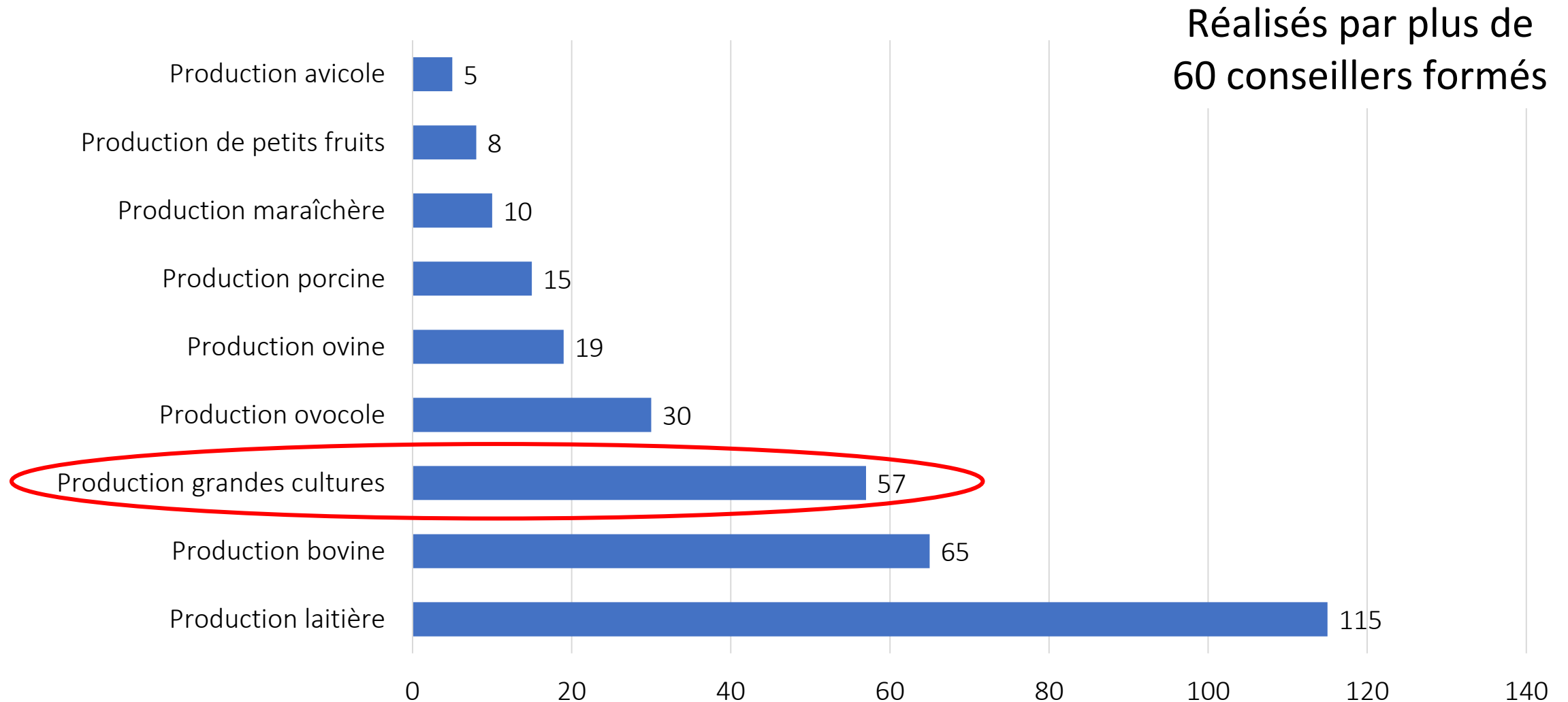
Conseillers

Producteurs agricoles

Diagnostic et  
accompagnement

Réseau Agriclimat

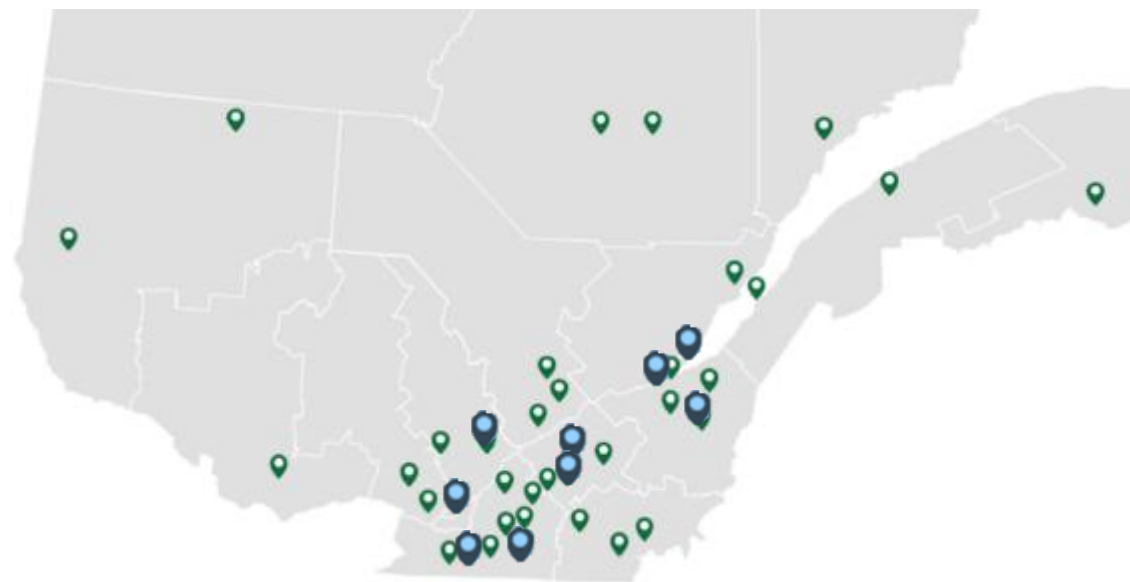
# Répartition - 324 diagnostics dont plus de la moitié réalisés en 2024





# Bilans carbone en production de grandes cultures

- Un échantillon initial de 103 entreprises
  - Fermes pilotes Agriclimat
  - Diagnostics financés par le MAPAQ en région (PAAR)
  - Diagnostics financés par Agrisolutions climat (AAC)
- Des entreprises spécialisées en grandes cultures et des entreprises qui ont également une production animale

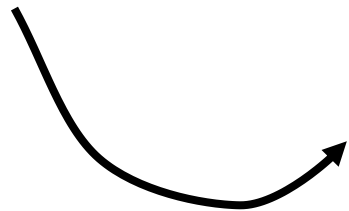




# Tri des données

## – Fermes de différentes vocations

- Parmi les 103 fermes, 2 à 100 % des superficies produisent des grains destinés à la vente
- Critère de sélection :
  - Superficie cultivée destinée à la vente doit être  $> 25$  ha
- Échantillon final : 84 entreprises
  - 32 font seulement des productions végétales, 39 vendent 100 % de leurs productions végétales



Séparation des émissions totales entre les grandes cultures vendues et les autres productions sur une base physique (superficie et consommation)

# Description de l'échantillon des 84 fermes

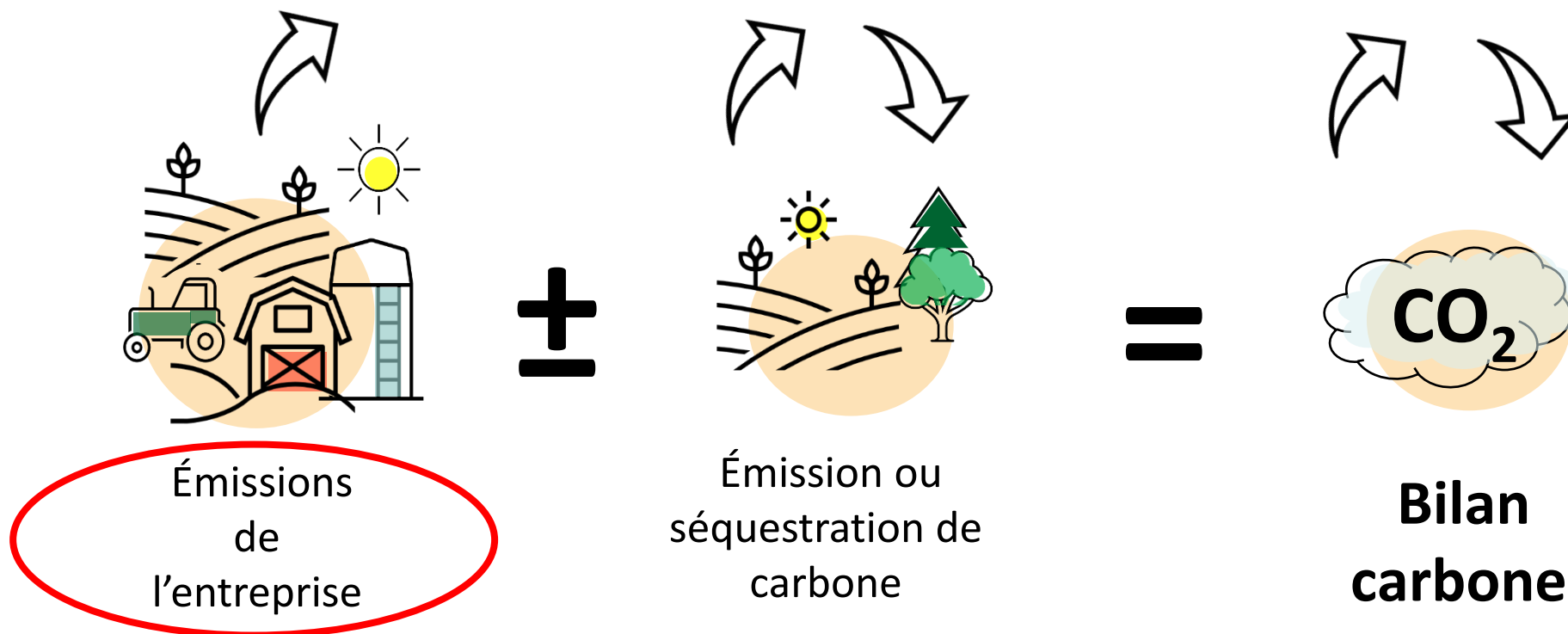
	Moyenne	Minimum	Maximum
Superficie cultivée totale (ha)	<b>310</b>	36	1529
Part de la superficie destinée à la vente	<b>76 %</b>	13 %	100 %
Part de la superficie cultivée en maïs	<b>27 %</b>	0 %	78 %
Part de la superficie cultivée en soya	<b>28 %</b>	0%	83 %
Part de la superficie cultivée en cultures fourragères pérennes	<b>18 %</b>	0 %	67 %

# 02

Résultats des  
bilans carbone  
réalisés  
jusqu'ici



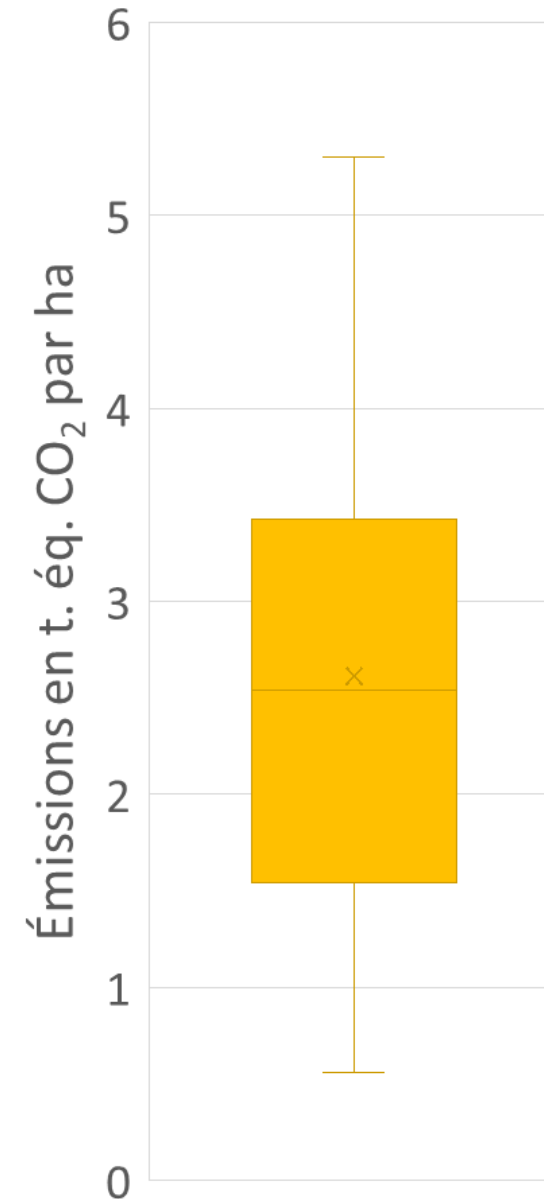
# Qu'est-ce qu'un bilan carbone ?





# Émissions de GES

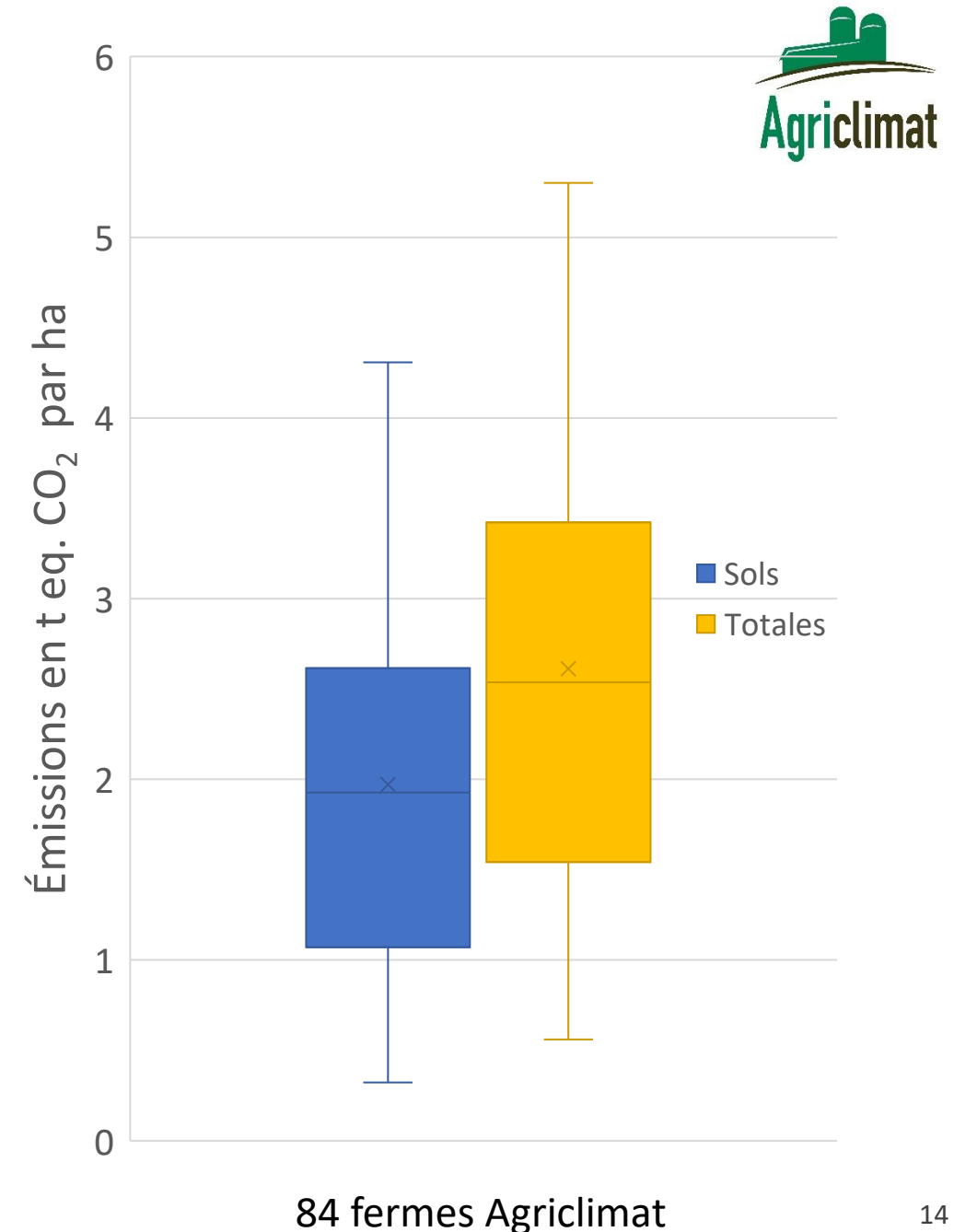
- Moyenne des 84 fermes
  - Émissions de 2,6 t éq. CO<sub>2</sub> par ha
  - Très grande variabilité des émissions : de 0,6 à 5,3 t éq. CO<sub>2</sub> par ha
- Si on tient compte des superficies cultivées destinées à la vente de chaque ferme : 3,0 t éq. CO<sub>2</sub> par ha



84 fermes Agriclimat

# 1<sup>er</sup> poste GES = les sols

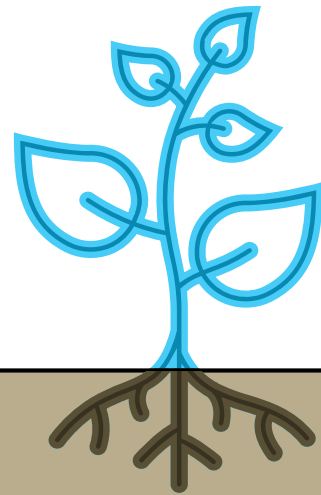
- Les émissions provenant des sols cultivés représentent 76 % du total
  - Émissions directes et indirectes de N<sub>2</sub>O
  - Émissions de CO<sub>2</sub> associées au chaulage



# Émissions de $\text{N}_2\text{O}$ des sols

## Apport d'azote (N) :

- Engrais
- Fumier
- Résidus de cultures



Phase aérobie  
Nitrification



Phase anaérobie  
Dénitrification



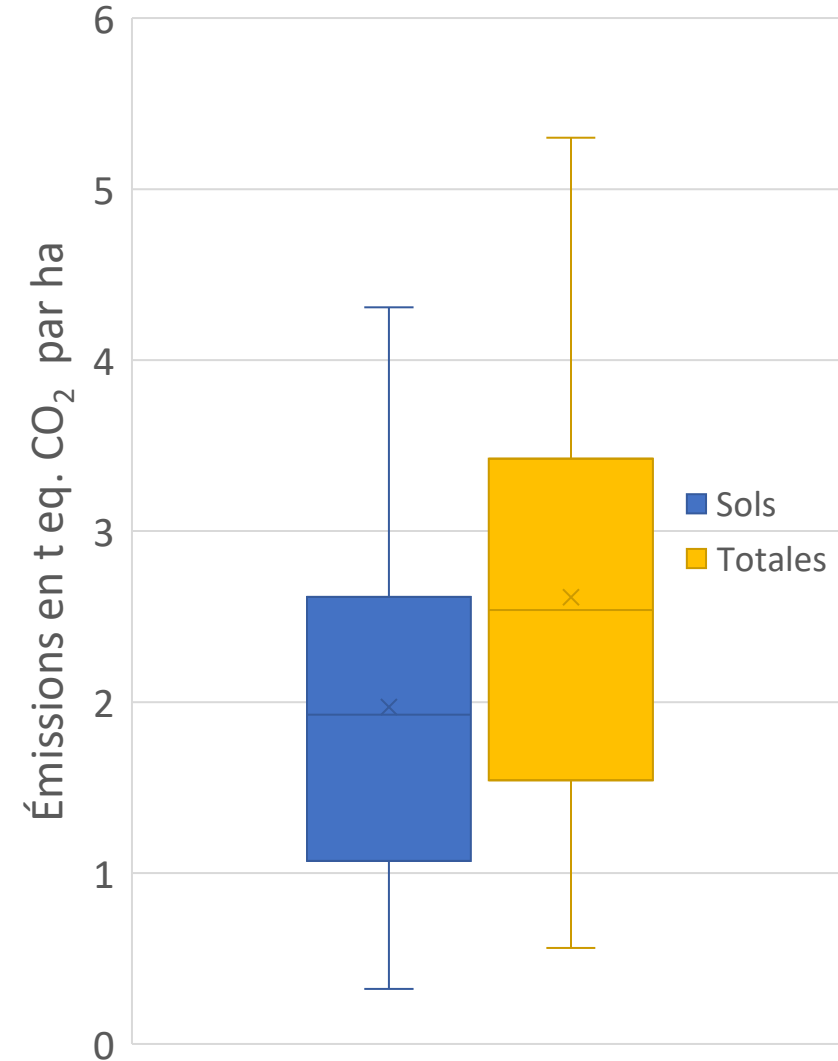
## Conditions propices aux émissions de $\text{N}_2\text{O}$ :

- La fonte de la neige
- Après une forte pluie

# 1<sup>er</sup> poste GES = les sols

–Qu'est-ce qui explique une telle variabilité ?

- La texture des sols
  - Sols légers = 10 fois moins de risque d'émissions qu'un sol lourd



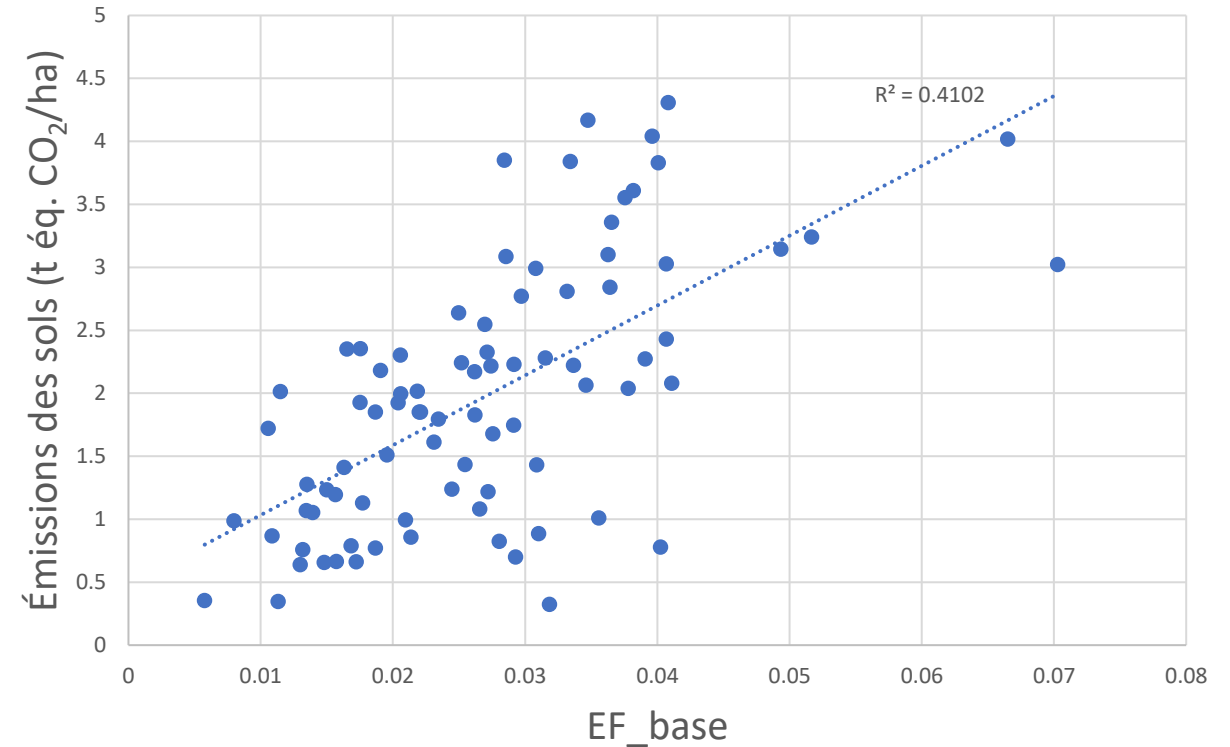
Extrait partiel, CDAQ 2025



# 1<sup>er</sup> poste GES = les sols

–Qu’est-ce qui explique une telle variabilité ?

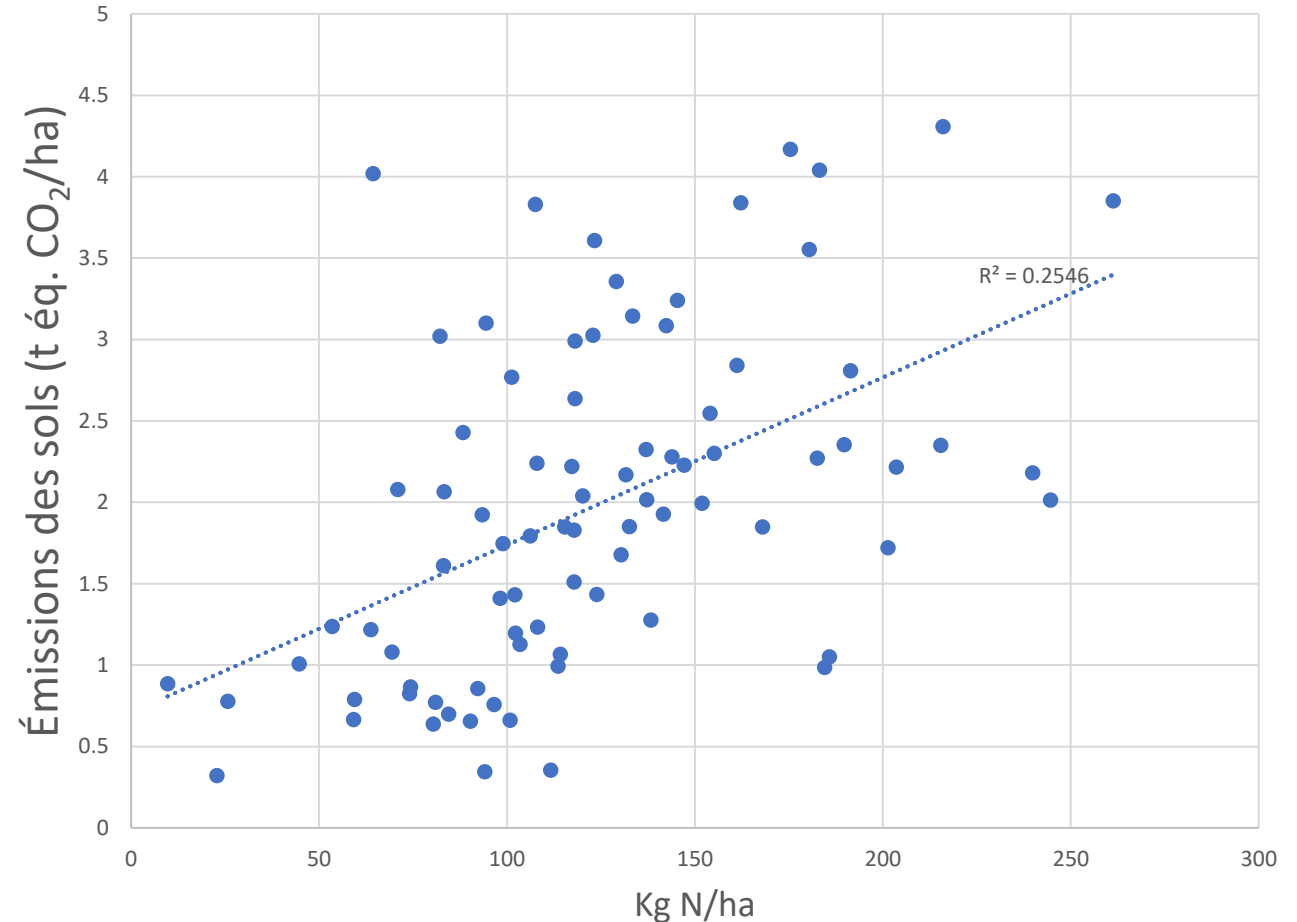
- La texture des sols
  - Sols légers = 10 fois moins de risque d’émissions qu’un sol lourd
- Le climat
  - Outaouais : plus sec et chaud, moins de risque d’émission qu’en Estrie par exemple (plus frais et pluvieux)



# 1<sup>er</sup> poste GES = les sols

–Qu’est-ce qui explique une telle variabilité ?

- Les pratiques de fertilisation : dose totale apportée, proportion d’N organique vs minérale
  - En moyenne, 15 % moins d’émissions avec de l’N organique

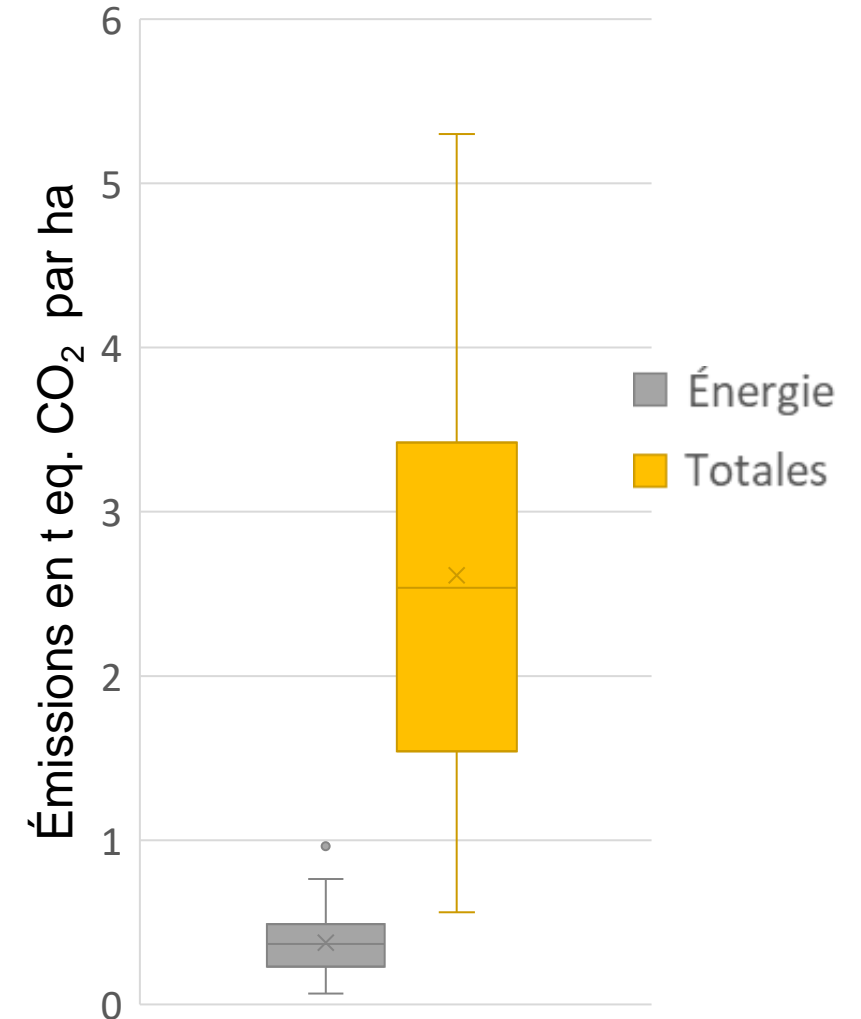


# 1<sup>er</sup> poste GES = les sols

- Modèle pour les cultures de couvertures ?
  - Si 0 % de légumineuses : - 10% d'émissions directes de  $N_2O$
  - Si 50 % de légumineuses : effet neutre
  - Si 100 % de légumineuses : + 10% d'émissions directes de  $N_2O$   
(Drever et al., 2022)
- Effet du travail de sol?
  - Est-du-Canada : pas d'effet de la réduction des travaux de sols  
(Liang et al., 2020)
  - Sols lourds : émissions supérieures en travail réduit, au moins à court terme (Pelster et al., 2024)

# 2<sup>e</sup> poste GES = fabrication et utilisation de l'énergie

- 14 % des émissions d'un ha de grandes cultures
- Diesel pour la machinerie
  - 1 L = ~ 3,2 kg éq. CO<sub>2</sub>
- Propane pour le séchage (maïs)
  - 1 L = ~ 2,2 kg éq. CO<sub>2</sub>

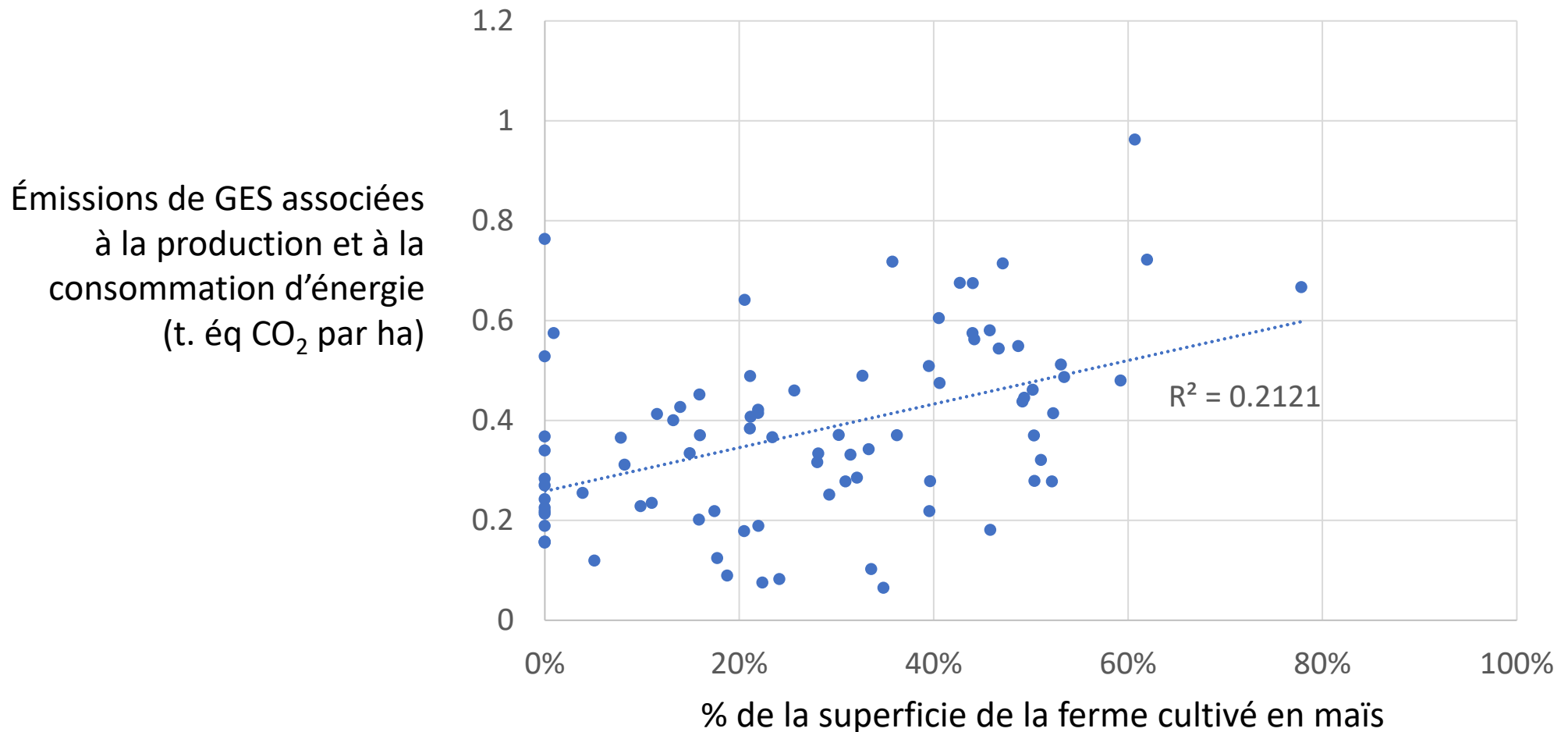


84 fermes Agriclimat



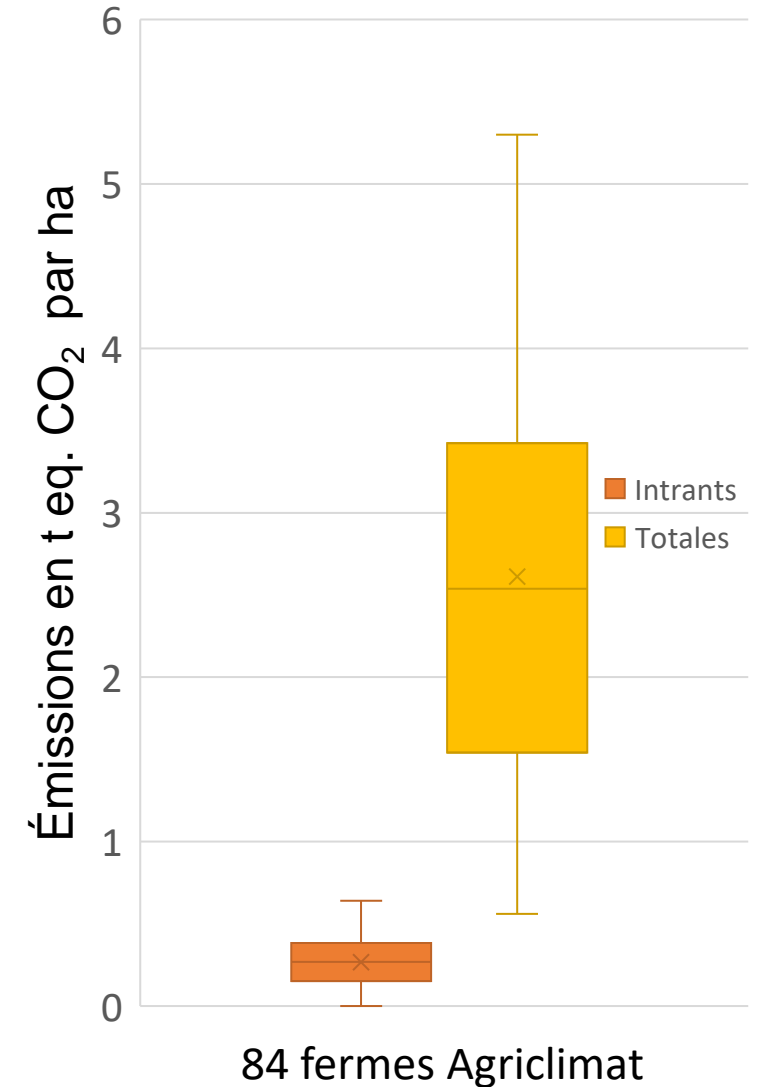
# 2<sup>e</sup> poste GES = énergie

—Le maïs-grain = diesel + propane



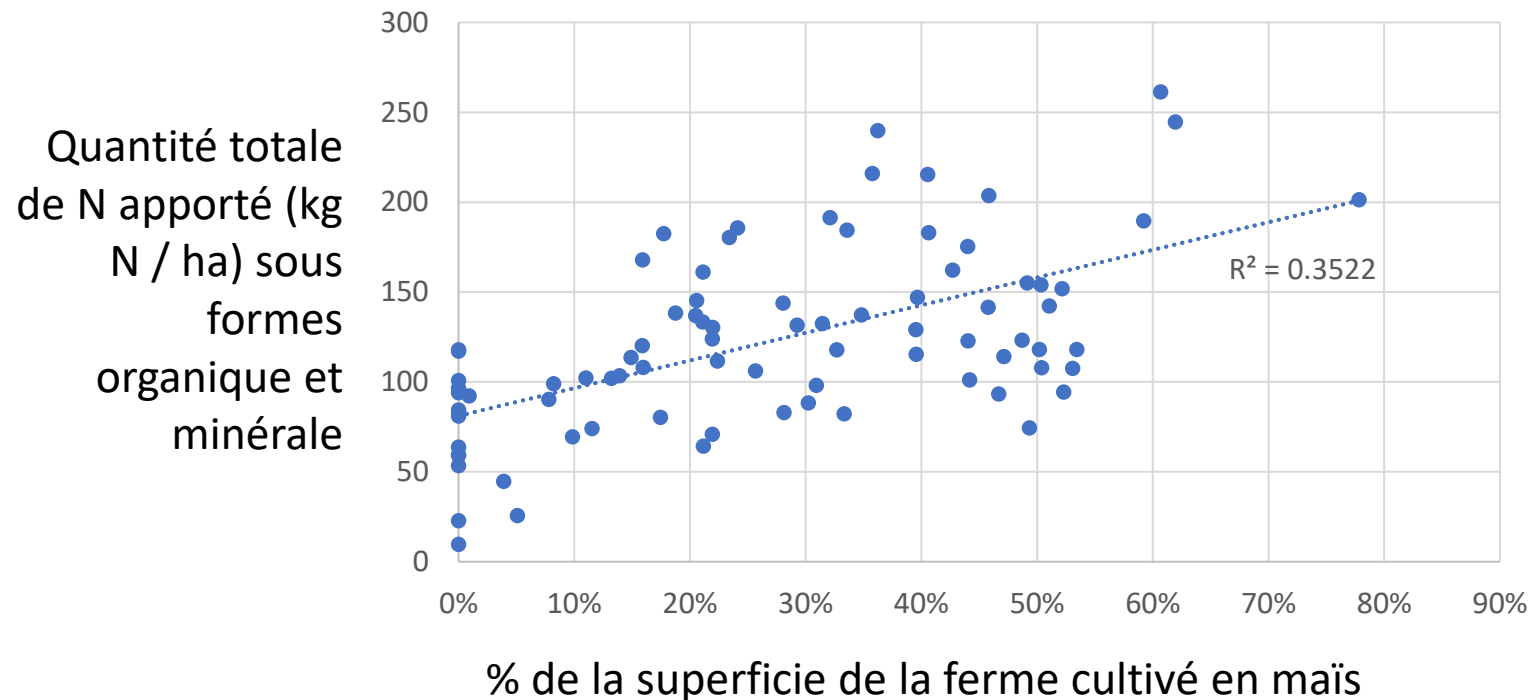
# 3<sup>e</sup> poste GES = productions des intrants

- 10 % des émissions d'un ha de grandes cultures
- Production et transport des engrais
  - 1 kg de N = 3,1 kg éq. CO<sub>2</sub><sup>1</sup>
  - 1 kg de P = 1,8 kg éq. CO<sub>2</sub><sup>1</sup>
  - 1 kg de K = 1,3 kg éq. CO<sub>2</sub><sup>1</sup>
- Semences et pesticides représentent une faible part des intrants



# 3<sup>e</sup> poste GES = productions des intrants

- Plus la superficie cultivée en maïs grain est importante, plus les quantités d'azote apportées sont élevées



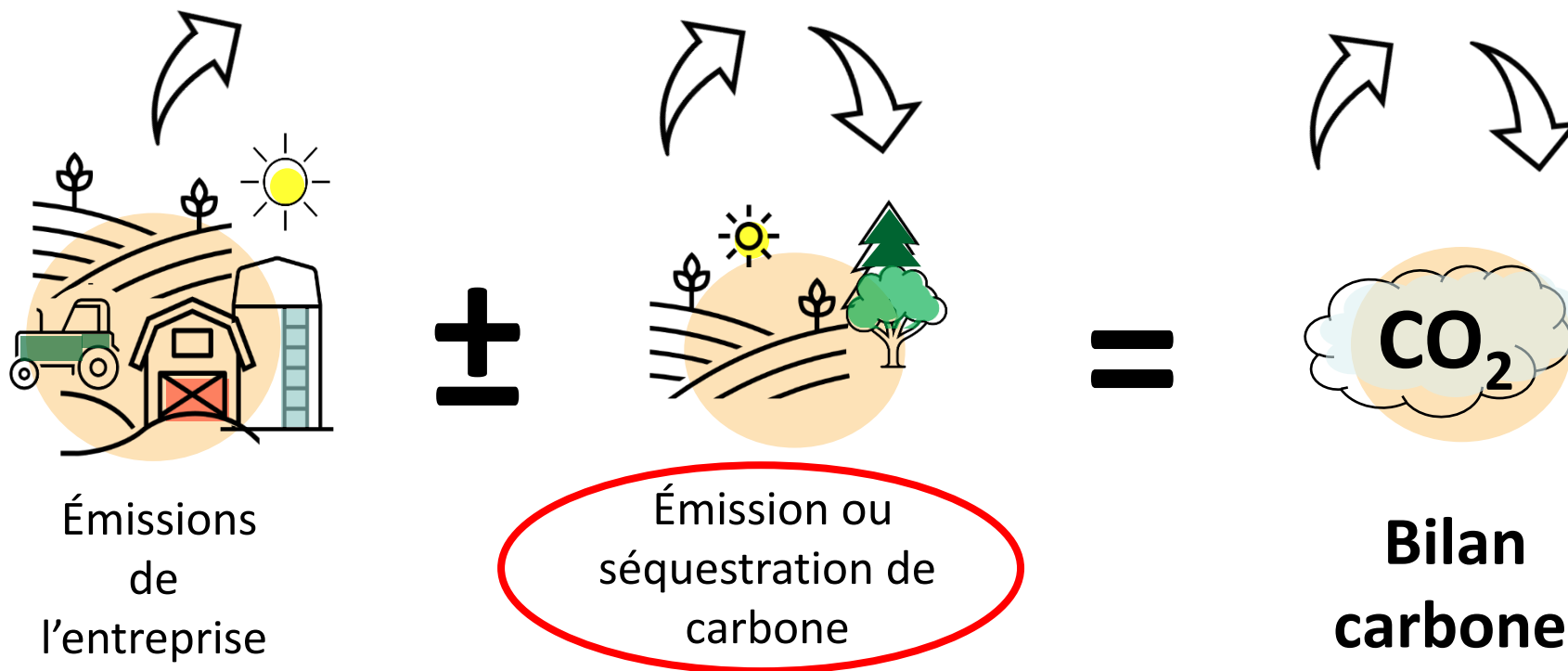
# Produire avec ou sans animaux?

- 51 % de l'azote provient d'engrais minéraux dans les fermes sans élevage
  - Seules 5 fermes sur 84 n'ont pas recours au fumier!
- 33 % de l'azote provient des engrais minéraux dans les fermes avec élevage



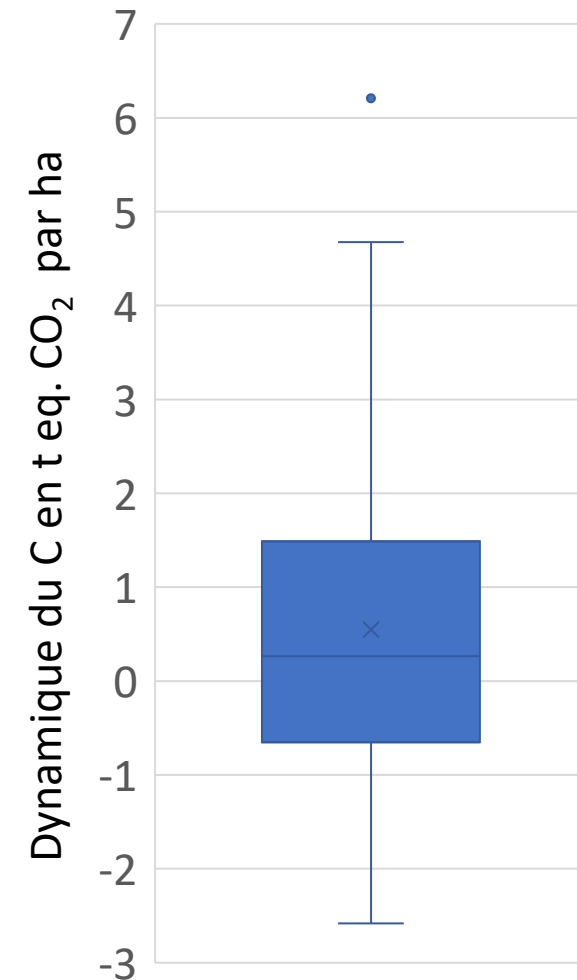


# Qu'est-ce qu'un bilan carbone ?



# Dynamique du carbone des sols

- Données disponibles pour 48 des 84 fermes
  - Émission additionnelle moyenne de 0,6 t éq. CO<sub>2</sub> par ha
  - Très grande variabilité : de -2,5 à 6,2 t éq. CO<sub>2</sub> par ha
- Si on tient compte des superficies cultivées destinées à la vente de chaque ferme : 1,1 t éq. CO<sub>2</sub> par ha



48 fermes Agriclimat

# Dynamique du carbone du sol

Évolution observée de la matière organique dans 72 fermes Agriclimat

38 fermes



Leurs sols **perdent**  
du carbone

~ 450 kg de C/ha/an

21 fermes



Leurs sols  
sont **stables**

~ 0 kg de C/ha/an

13 fermes



Leurs sols **séquestrent**  
du carbone

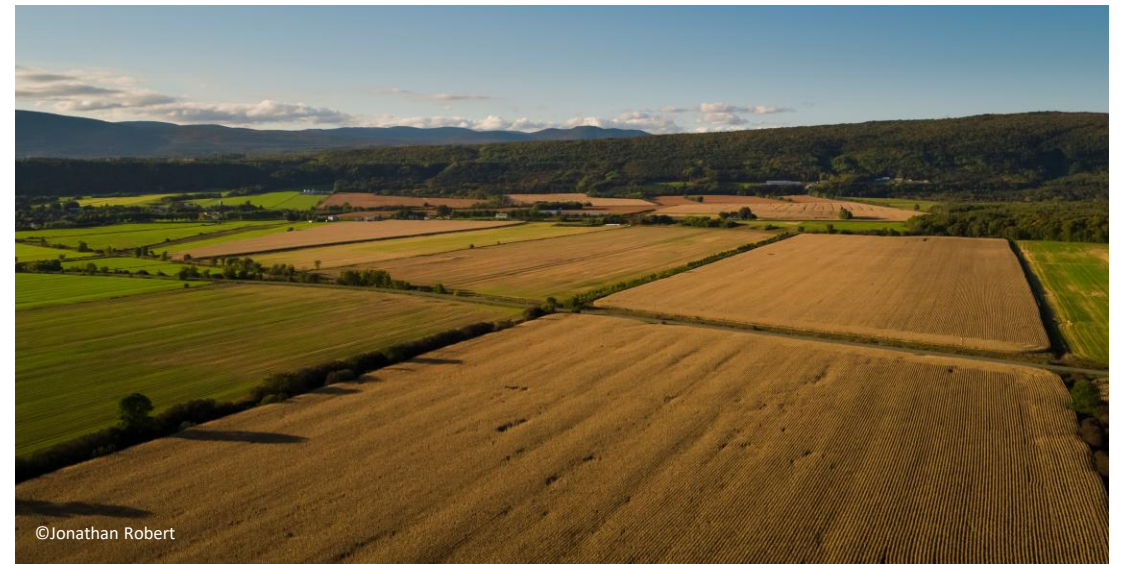
~ 250 kg de C/ha/an

Tendance des fermes Agriclimat :

Perte de 200 kg de C/ha/an en moyenne = 700 kg éq. CO<sub>2</sub>/ha

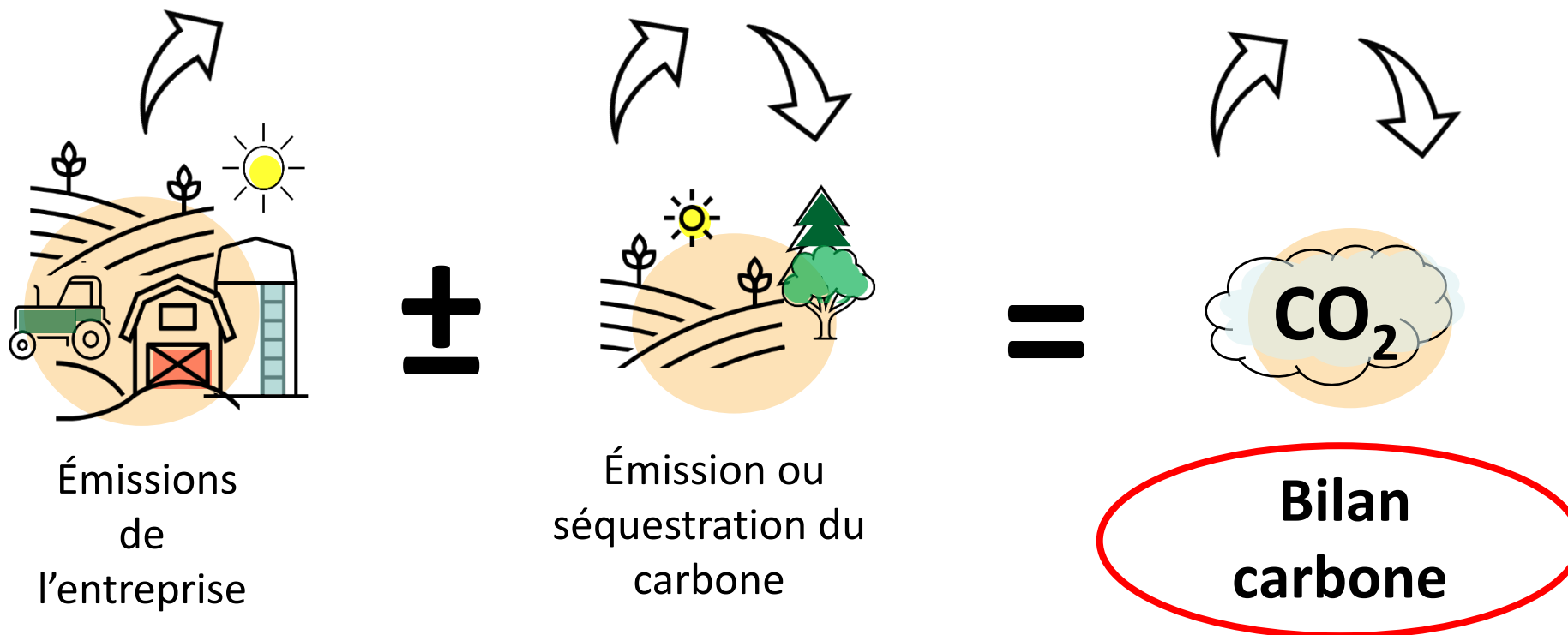
# C dans les arbres et arbustes

- 44 fermes sur 84 ont réalisé des plantations
  - Séquestration moyenne : de 0,1 t éq. CO<sub>2</sub> par ha, variant de 0 à 1,5 t éq. CO<sub>2</sub> par ha
- Si on tient compte des superficies cultivées destinées à la vente de chaque ferme : 0,08 t éq. CO<sub>2</sub> par ha

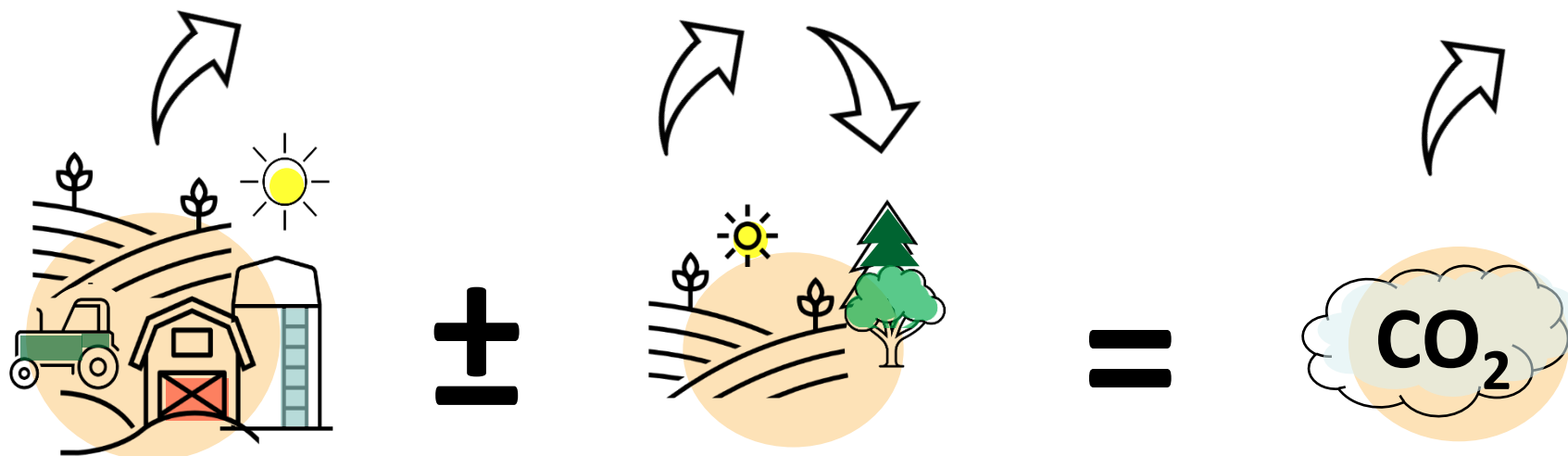


©Jonathan Robert

# Qu'est-ce qu'un bilan carbone ?



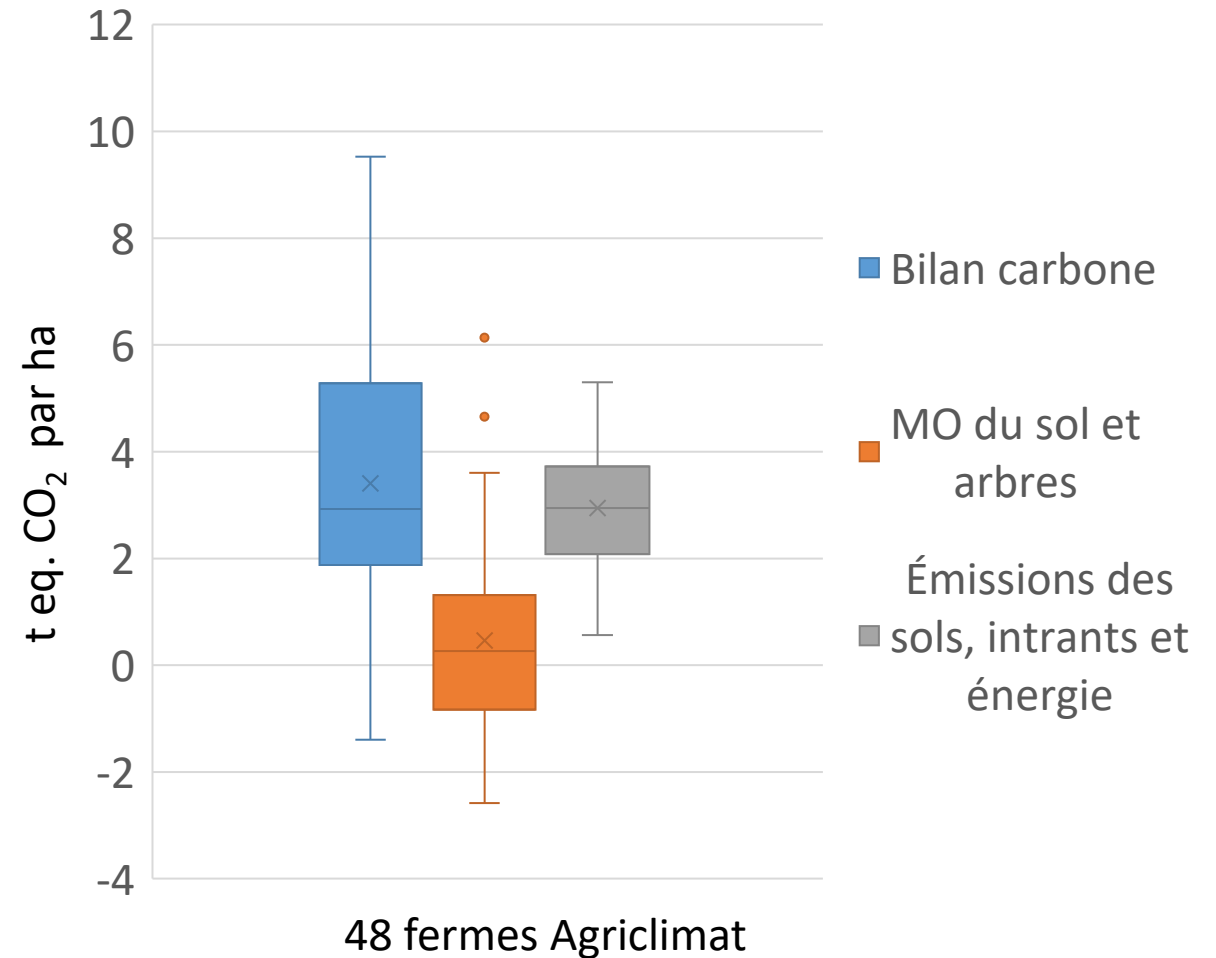
# Bilan carbone moyen des 84 fermes



$$3 + 1,1 - 0,1 = 4,1 \text{ t. éq. CO}_2 / \text{ha}$$

# Bilan carbone

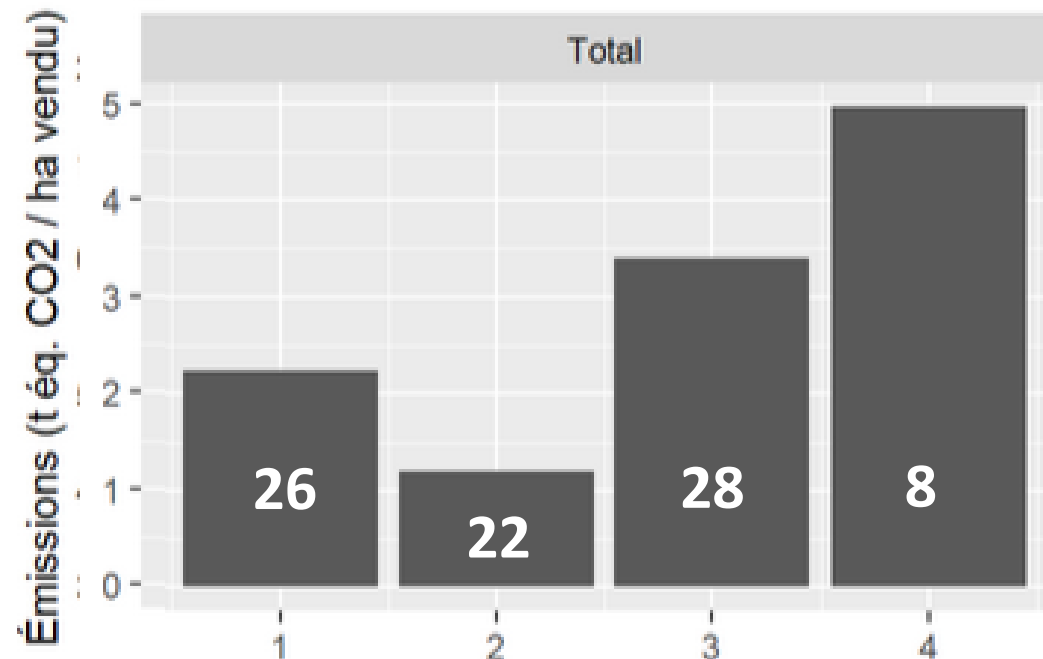
- Bilan carbone moyen du sous-échantillon : 3,4 t. éq. CO<sub>2</sub> /ha
  - Très variable d'une ferme à l'autre!!!
  - Quelques fermes ont un bilan négatif? Seulement pour les productions végétales... artifice lié à l'allocation des émissions?
  - Plusieurs fermes ont un bilan supérieur à 5 t éq. CO<sub>2</sub> par ha
- Qu'est-ce qui explique de telles disparités?





# Analyses statistiques

- Classification ascendante hiérarchique
  - Regrouper les entreprises qui ont un profil d'émissions similaire
  - Sur les 84 entreprises, postes d'émissions seulement



4 groupes de fermes issus  
des 84 fermes Agriclimat

# Analyses des 84 fermes Agriclimat

Groupe	1		2		3		4	
Nombre de fermes	26		22		28		8	
Émissions totales (t éq. CO2 / ha)	2.2	a	1.2	b	3.4	c	5.0	d
Émissions des sols	1.7	a	0.8	b	2.6	c	4.0	d

# Analyses des 84 fermes Agriclimat

Groupe	1		2		3		4	
Nombre de fermes	26		22		28		8	
Émissions totales (t éq. CO <sub>2</sub> / ha)	2.2	a	1.2	b	3.4	c	5.0	d
Émissions des sols	1.7	a	0.8	b	2.6	c	4.0	d
Coefficient d'émissions de N <sub>2</sub> O-N (%)	2.4	a,b	2.1	a	3.0	b	4.0	c
Proportion de sols fins	32%	a	36%	a	48%	a	82%	b



# Analyses des 84 fermes Agriclimat

Groupe	1		2		3		4	
Nombre de fermes	26		22		28		8	
Émissions totales (t éq. CO <sub>2</sub> / ha)	2.2	a	1.2	b	3.4	c	5.0	d
Émissions des sols	1.7	a	0.8	b	2.6	c	4.0	d
Coefficient d'émissions de N <sub>2</sub> O-N (%)	2.4	a,b	2.1	a	3.0	b	4.0	c
Proportion de sols fins	32%	a	36%	a	48%	a	82%	b



Régions plus sèches en été : Bas-Saint-Laurent, Saguenay-Lac-Saint-Jean, Outaouais, Abitibi-Temiscamingue?

# Analyses des 84 fermes Agriclimat

Groupe	1		2		3		4	
Nombre de fermes	26		22		28		8	
Émissions totales (t éq. CO <sub>2</sub> / ha)	2.2	a	1.2	b	3.4	c	5.0	d
Émissions des sols	1.7	a	0.8	b	2.6	c	4.0	d
Coefficient d'émissions de N <sub>2</sub> O-N (%)	2.4	a,b	2.1	a	3.0	b	4.0	c
Proportion de sols fins	32%	a	36%	a	48%	a	82%	b
kg N total (kg/ha)	118	a	85	b	145	c	162	a,c
kg N minéral (kg /ha)	47	a	15	b	78	c	89	c



# Analyses des 84 fermes Agriclimat

Groupe	1		2		3		4	
Nombre de fermes	26		22		28		8	
Émissions totales (t éq. CO <sub>2</sub> / ha)	2.2	a	1.2	b	3.4	c	5.0	d
Émissions des sols	1.7	a	0.8	b	2.6	c	4.0	d
Coefficient d'émissions de N <sub>2</sub> O-N (%)	2.4	a,b	2.1	a	3.0	b	4.0	c
Proportion de sols fins	32%	a	36%	a	48%	a	82%	b
kg N total (kg/ha)	118	a	85	b	145	c	162	a,c
kg N minéral (kg /ha)	47	a	15	b	78	c	89	c
Proportion de maïs	24%	a	8%	b	40%	c	43%	c
Proportion de plantes fourragères	15%	a	39%	b	9%	c	7%	a,c

# Analyses des 84 fermes Agriclimat

–Peut-on analyser les émissions des sols, énergies et intrants uniquement pour avoir un bon portrait de l'entreprise?

- Comparaison des groupes selon si on analyse les émissions uniquement ou le bilan carbone complet

- 35 % des fermes se retrouve dans le même groupe (1 à 4)
- 50 % des fermes sont dans un groupe supérieur ou inférieur
- 15 % des fermes sont dans un groupe vraiment différent!

→ Dès lors que les données de matière organique des sols sont disponibles, il est pertinent de les utiliser!!

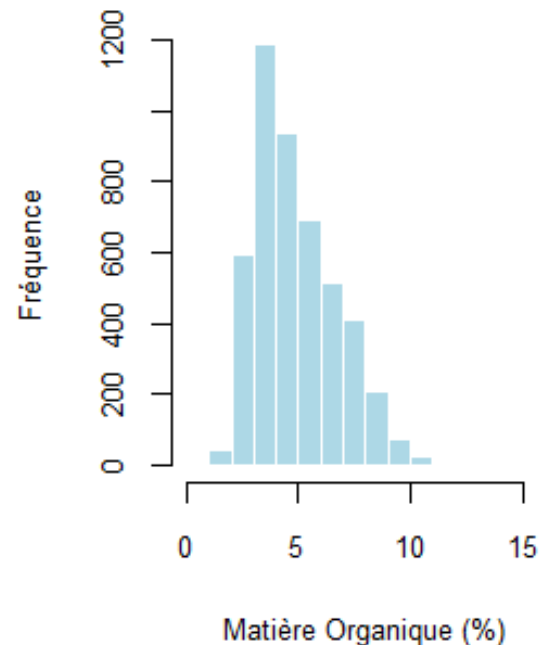




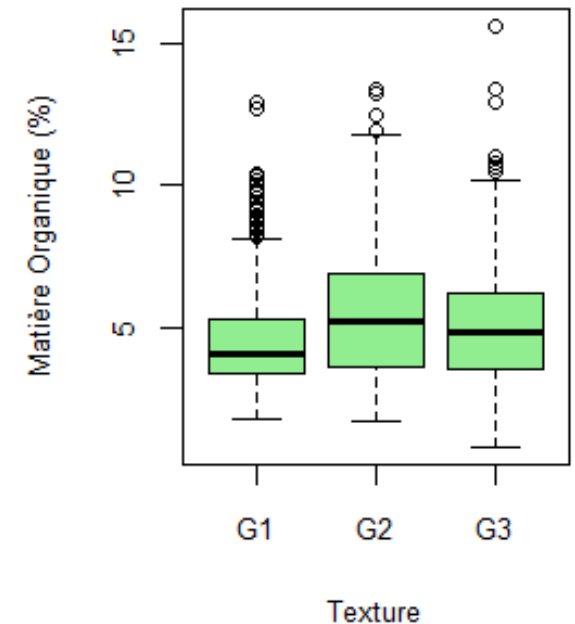
# Analyses des fermes Agriclimat

- Peut-on expliquer les différentes dynamiques de matières organiques observées?
  - Thèse de Maëlle Derrien
  - Plus de 4 500 analyses de sols rassemblées pour 50 fermes Agriclimat

Distribution de la Matière Organique



MO par Type de Texture

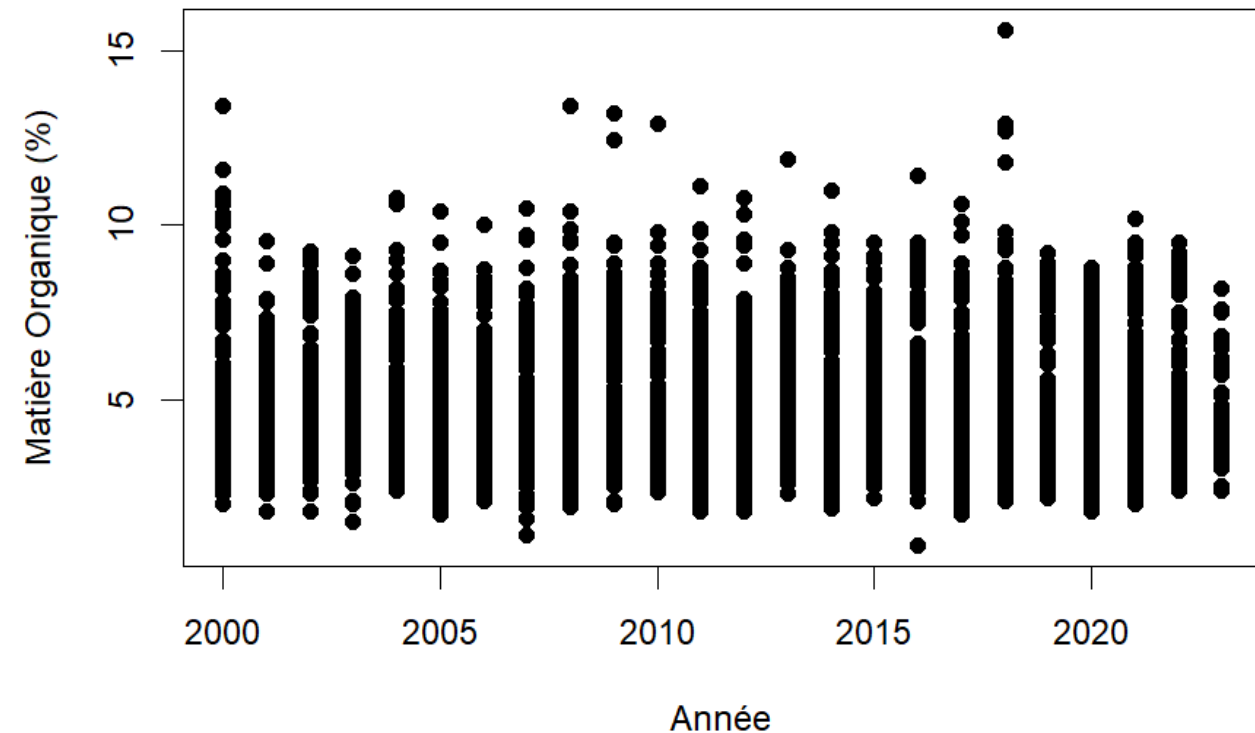


# Analyses des fermes Agriclimat

—Construction d'un modèle prédictif de la dynamique en cours

- Résultats préliminaires
  - Tendance générale à la baisse
  - Baisse plus faible chez les producteurs qui ont plus de plantes fourragères dans les rotations

Évolution de la Matière Organique dans le temps



(Derrien et al., en prép)

# 03

## Conclusions



# Pistes d'amélioration possibles

## Régie des cultures :

- Réduction du travail du sol
- Diversification des rotations
- Utilisation de cultures de couvertures

## Gestion de l'énergie :

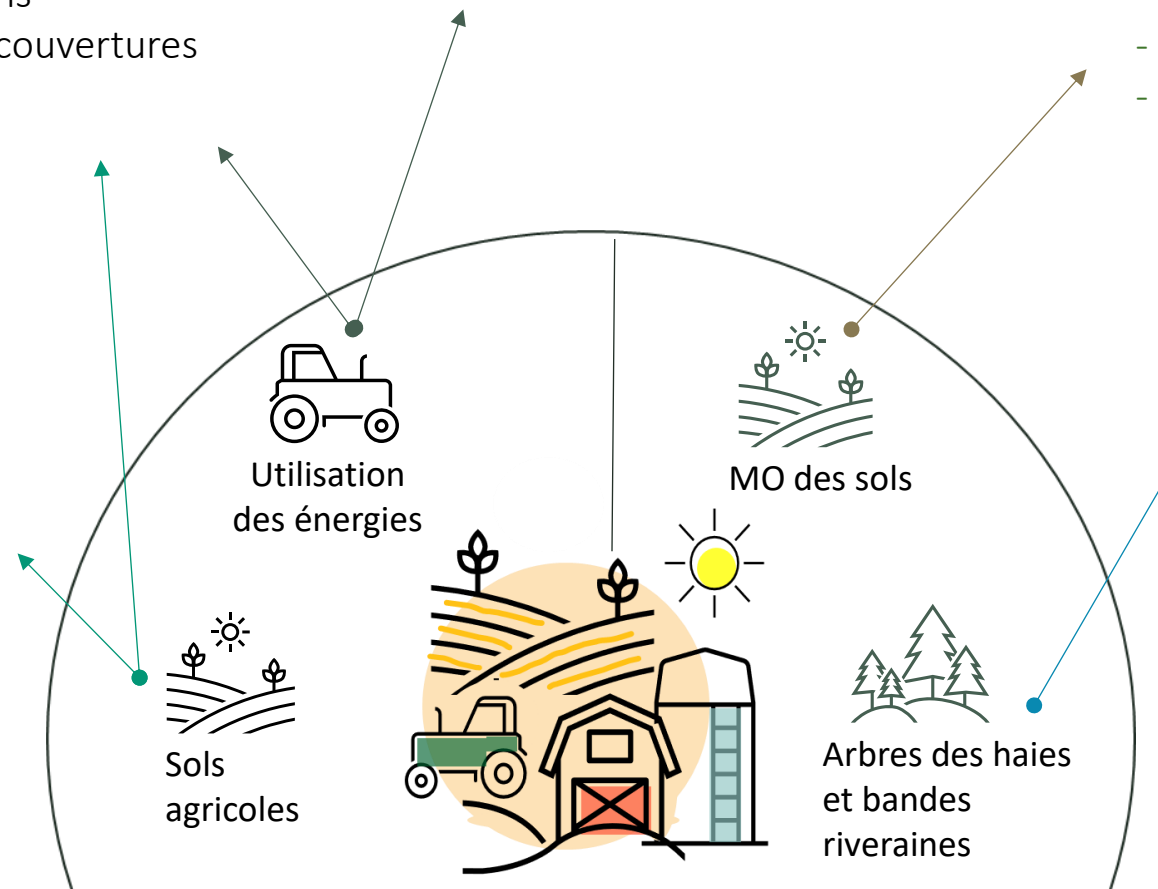
- Électrification des opérations
- Réduction du travail du sol

## Carbone des sols :

- Gestion des sols et des résidus
- Apports de matière organique
- Cultures de couvertures
- Cultures pérennes
- Systèmes agroforestiers

## Gestion de la fertilisation (4B)

- Application de l'azote en bande
- Injection et incorporation du fumier
- Utilisation d'inhibiteurs d'uréase et de nitrification
- Utilisation d'engrais à libération contrôlée

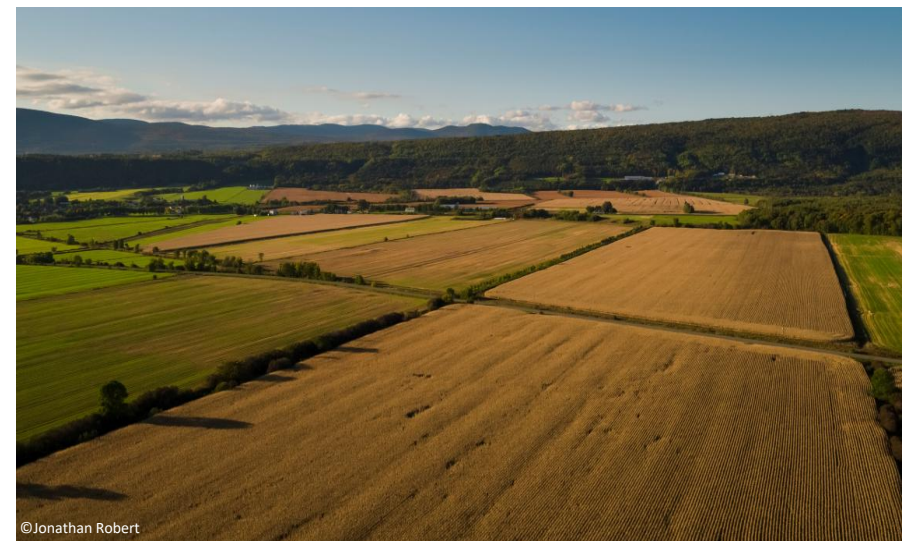


## Carbone des arbres :

- Plantation d'arbres dans des zones inutilisées
- Plantation de haies brise-vent
- Aménagement de bandes riveraines arborées

# Conclusions

- À chaque bilan son plan d'actions!
- De nombreuses connaissances disponibles pour réduire les GES
- Le climat change... réduire les GES est une nécessité, s'adapter une obligation!
  - Avez-vous votre plan de lutte contre les changements climatiques?



# Merci!

Pour en savoir plus...

YouTube Agriclimat et Facebook

- Café carbone
- L'évolution du climat de votre région
- Capsule grandes cultures à venir sous peu!...

Agriclimat bénéficie d'une aide financière du gouvernement du Québec provenant du programme Action-Climat Québec et rejoint les objectifs du Plan pour une économie verte 2030



© CDAQ 2025

La reproduction d'extraits est autorisée à des fins non commerciales avec la mention de la source.  
Toute reproduction partielle doit être fidèle au texte utilisé.