



Dynamique du carbone dans les sols agricoles et potentiel d'accumulation de différentes pratiques

Émilie Maillard

Colloque Bio pour tous – 29 février 2024



Agriculture et
Agroalimentaire Canada

Agriculture and
Agri-Food Canada

Canada

Le carbone dans le sol...



- Carbone : lié à l'oxygène, l'hydrogène, l'azote dans des composés appelés **matière organique (MO)** du sol
- MO du sol : matériel complexe issu de la décomposition et de la transformation des plantes, animaux et micro-organismes



MO ↔ Carbone (C)

En quoi le C du sol est important ?

Cycle global du C

Atmosphère : 750 Gt C

Végétation : 500 Gt C

Sols : 1 800 – 2 400 Gt C

- Augmentation du CO₂ atmosphérique
- Petits changements du stock de C des sols → Grands impacts sur le C de l'atmosphère

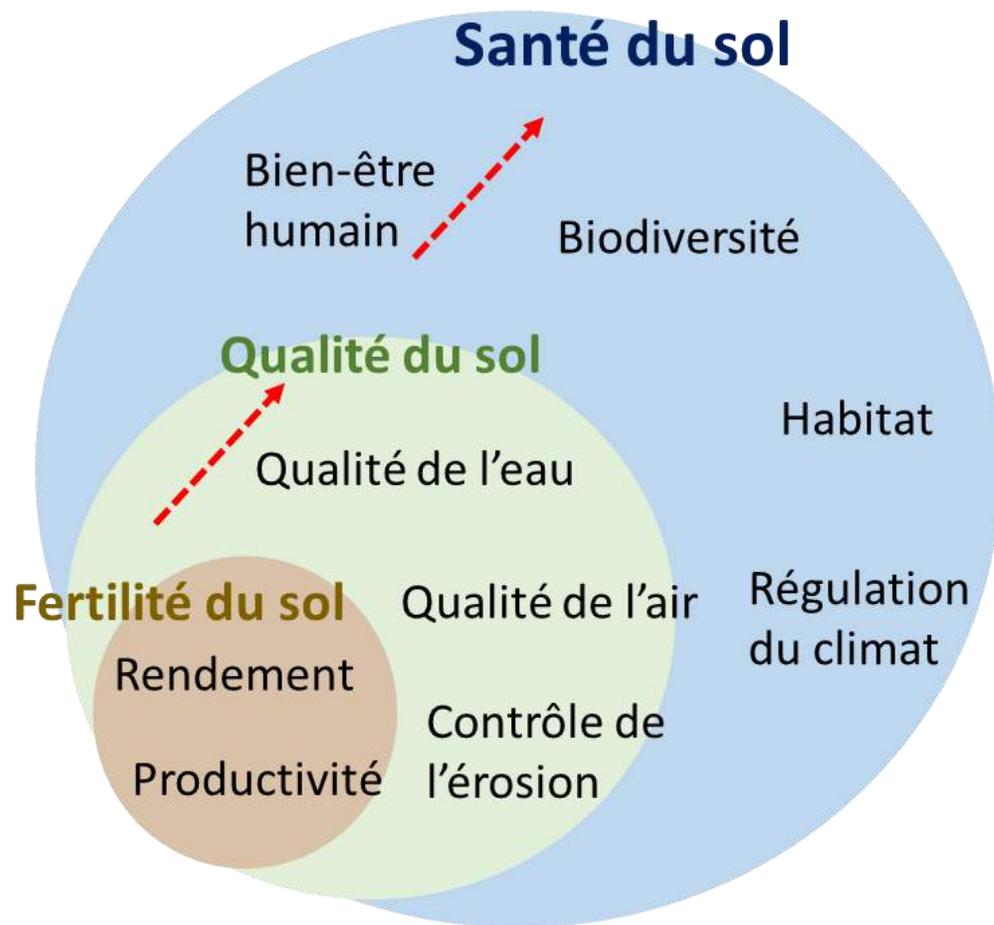
Maintien + Augmentation du C du sol



Atténuation changements climatiques

Smith et al., 2012
Paustian et al., 2016
Schmidt et al., 2019
Initiative 4 pour 1000

En quoi le C du sol est important ?



Adapté de Janzen et al. (2021)

- Maintien de la productivité agricole, réduction de l'érosion du sol, préservation de la qualité de l'eau, etc.

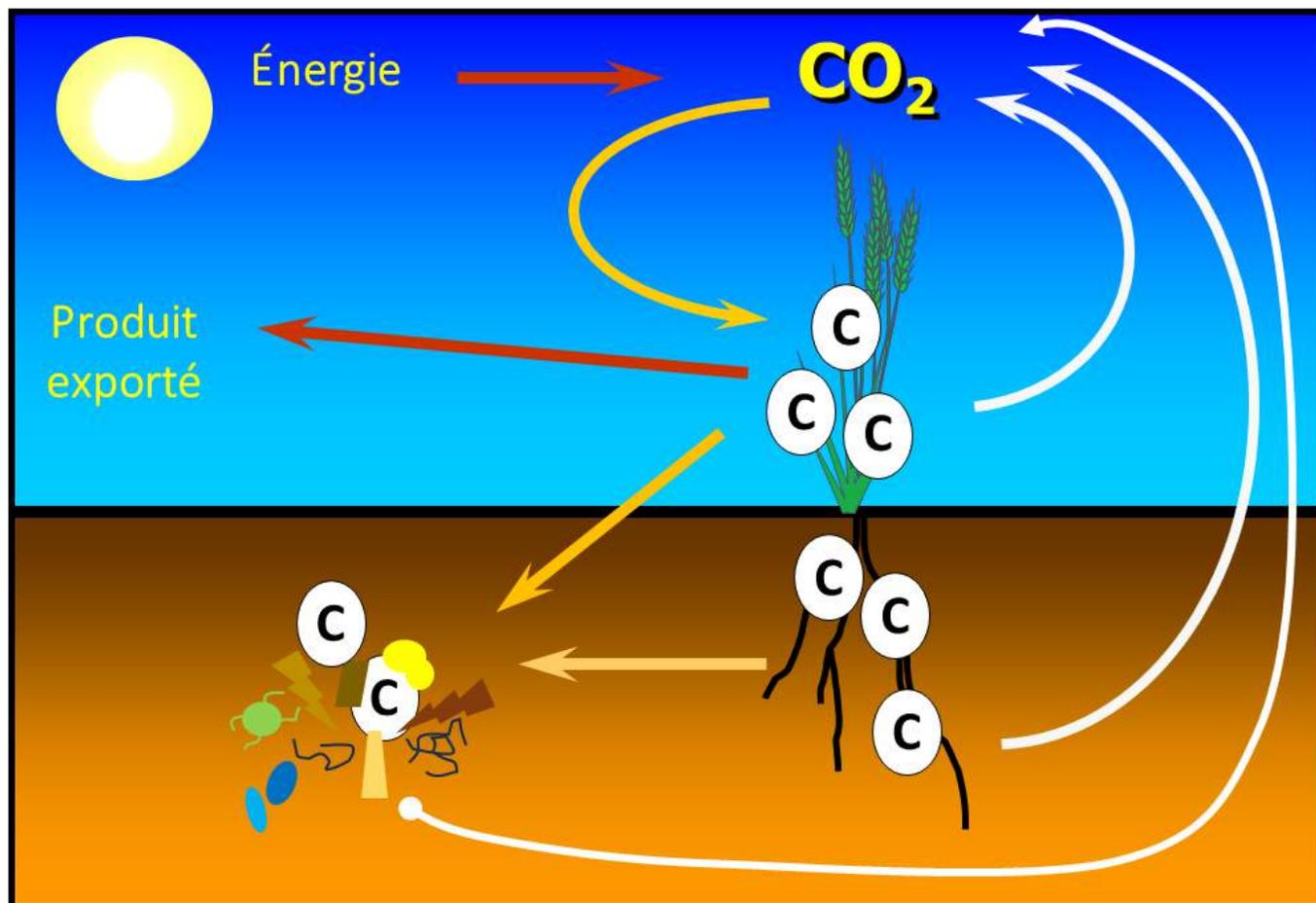
- Indicateur de santé du sol

Systemes agricoles + résilients



Adaptation aux changements climatiques

Cycle du C dans un écosystème agricole



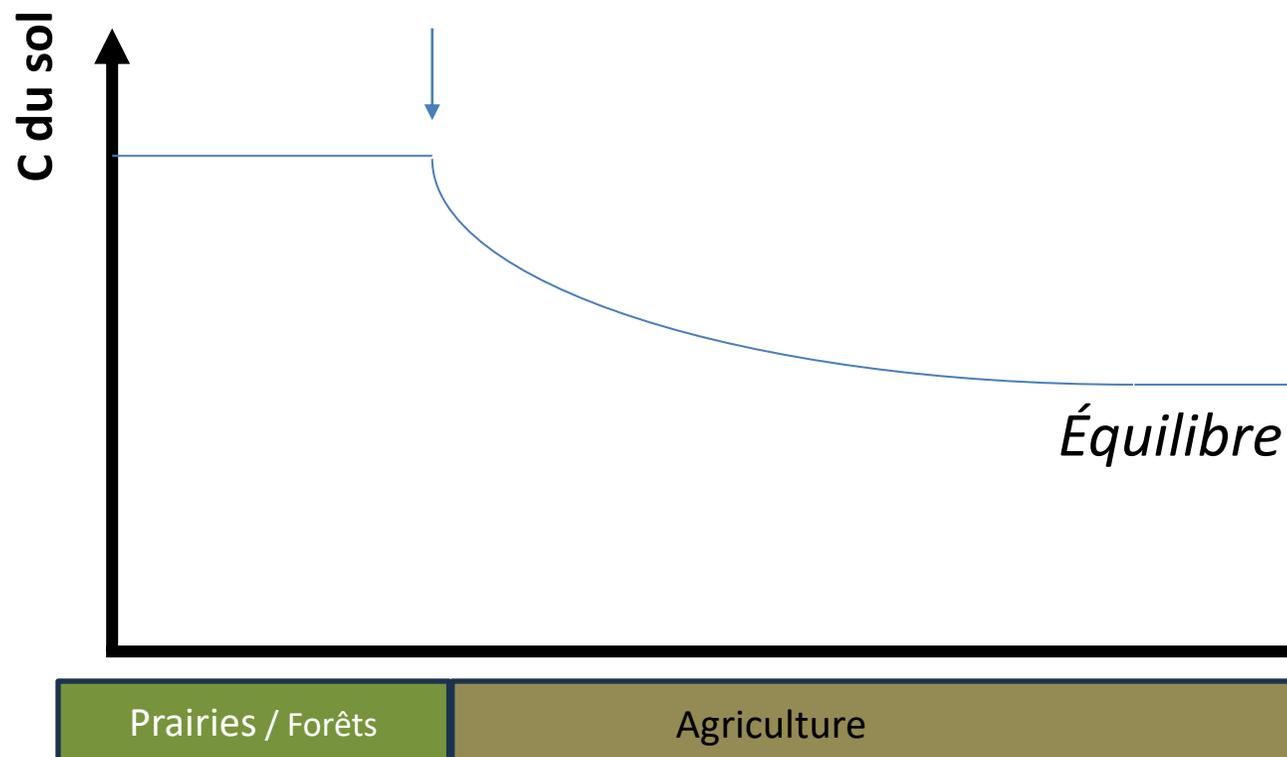
- Leviers d'augmentation du C du sol
(Pratique bénéfique)
 - ✓ Augmenter taux photosynthèse
 - ✓ Retourner + de C au sol
(résidus, racines)
 - ✓ Favoriser conditions pour - de minéralisation

Adapté de Lavallée et Cotrufo 2020, Janzen et al 2021, Sansom et al. 2023

Dynamique du C du sol et potentiel d'accumulation

Scénario 1

Mise en cultures



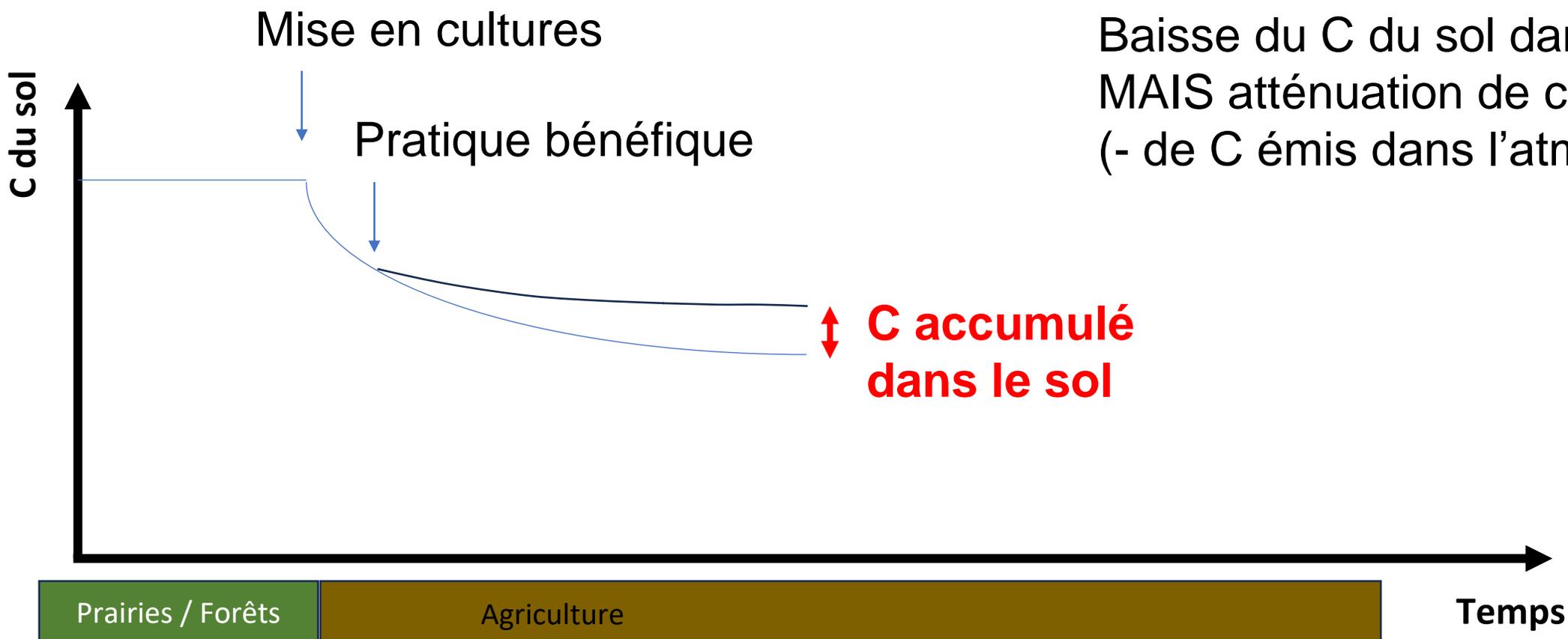
Effet sur le CO₂
atmosphère



~

Dynamique du C du sol et potentiel d'accumulation

Scénario 2



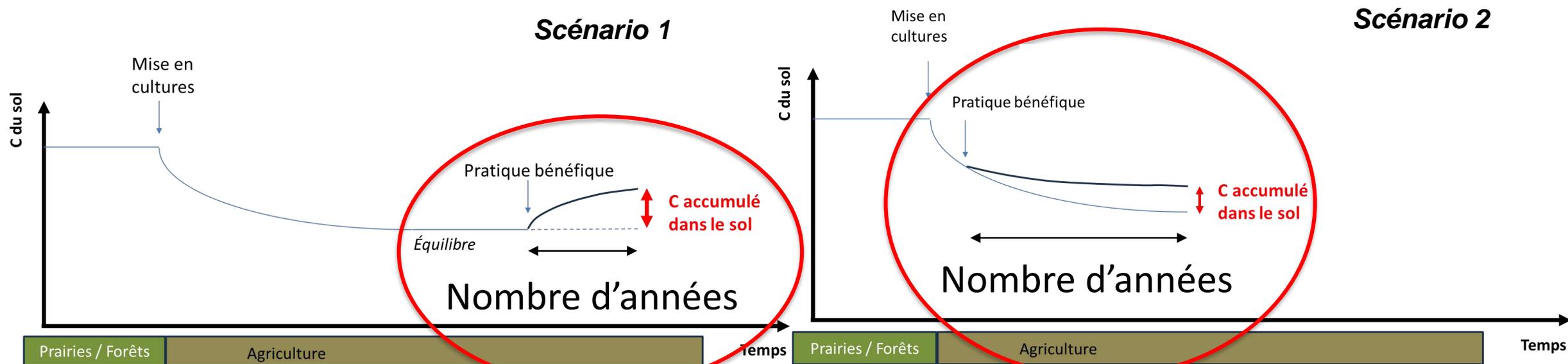
Baisse du C du sol dans le temps
MAIS atténuation de cette baisse
(- de C émis dans l'atmosphère)

Effet sur le CO₂
atmosphère



Samson et al. 2023
Don et al. 2023

Dynamique du C du sol et potentiel d'accumulation



**Potentiel d'accumulation de la pratique
(t C/ha/an)**

Pratiques et potentiel d'accumulation du C du sol

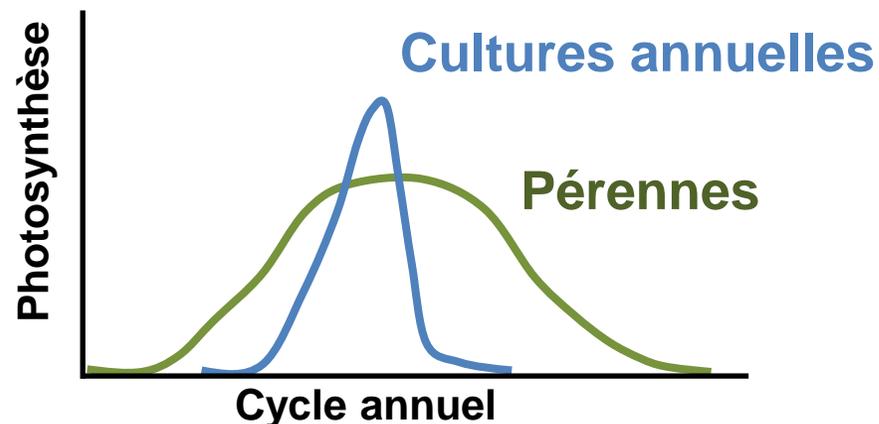
- Variabilité : propriété du sol, climat, temps depuis implantation, niveau de C initial, pratiques agricoles
- Survol de différentes pratiques et de leur potentiel d'accumulation du C du sol



Pérennes Cultures de couverture Agroforesterie Non-labour Engrais de ferme

Efficacité des pérennes herbacées pour transférer du C vers le sol

- + d'énergie solaire captée sur une base annuelle



- + de C retourné dans le sol via leur système racinaire
 - ✓ Céréales: **20-30%** du C retourné au sol
 - ✓ Pérennes: **30-50%** du C retourné au sol

Pérennes
Cultures de couverture
Agroforesterie
Non-labour
Engrais de ferme

Adapté de Janzen H., BCRC
Webinaire, 20 Fev. 2018

Implantation pérennes herbacées

Expérience long terme : Woodslee, Ontario

Monoculture maïs



116 t C / ha

35 années

0-70 cm

Loam argileux

Pérennes vs. Annuelles

1,06 t C / ha / an

Pâturin des prés



153 t C / ha

Pérennes

Cultures de couverture

Agroforesterie

Non-labour

Engrais de ferme

Gregorich et al., 2001

Implantation pérennes herbacées

Expérience moyen terme : Saint-Nicolas, Québec

11 années
0-30 cm

Monoculture maïs



57.4 t C / ha



Pérennes vs. Annuelles

0,86 t C / ha / an

Alpiste roseau



66.9 t C / ha



- Maintenir pérennes herbacées ou en planter

Pérennes
Cultures de couverture
Agroforesterie
Non-labour
Engrais de ferme

Maillard et al., en préparation

Pérennes herbacées dans les rotations d'annuelles

Expérience long terme : Woodslee, Ontario

35 années

0-70 cm

Loam argileux

Monoculture maïs



116 t C / ha

Rotation avec pérennes vs.
Annuelles

0,40 t C / ha / an

Rotation maïs-
avoine-luzerne-
luzerne



130 t C / ha



Pérennes

Cultures de couverture

Agroforesterie

Non-labour

Engrais de ferme

Gregorich et al., 2001

Pérennes herbacées dans les rotations d'annuelles

Expérience long terme : Normandin, Québec

21 années
0-50 cm
Argile limoneuse

Monoculture orge



80,2 t C / ha

Rotation: orge grainé + 2 années de trèfle rouge et dactyle



95,8 t C / ha

Rotation avec pérennes vs. Annuelles

0,74 t C / ha / an

Pérennes
Cultures de couverture
Agroforesterie
Non-labour
Engrais de ferme

Cultures de couverture

- Intercalaires
- En dérobée (après la culture principale)
- Bénéfices des cultures de couverture :
 - de lessivage N, - d'érosion, - de mauvaises herbes, **accumulation de C**

Biomasse additionnelle
(parties aériennes + **racines**)



Pérennes
Cultures de couverture
Agroforesterie
Non-labour
Engrais de ferme

Cultures de couverture

Méta-analyses globales

Nombre d'années, profondeur, sols variables

TABLE 2 Comparison of ecosys simulated SOC sequestered by cover crops with meta-studies.

	SOC benefits from cover crops (MgC ha ⁻¹ year ⁻¹)		Number of studies	Number of sites	Region	Depth	Source
	Mean	Uncertainty					
Meta-studies	0.32	0.08	37	139	Worldwide	A mean soil depth of 0.22 m	Poeplau and Don (2015)
	0.54	0.57	106	372	Worldwide	Normalized to 0–0.3 m	Abdalla et al. (2019)
	0.56	—	131	1195	Worldwide	Different depth	Jian, Du, Reiter, and Stewart (2020), Jian, Du, and Stewart (2020)
	0.21	—	40	181	Temperate latitude zone	Different depth	Mcclelland et al. (2021)

Avec cultures de couverture (CC) vs. Sans CC

0.21- 0.56 t C / ha / an

- CC en dérobée en majorité

Pérennes
Cultures de couverture
 Agroforesterie
 Non-labour
 Engrais de ferme

Cultures de couverture

- + de résultats pour le Québec dans les prochaines années
- Projet mené par Dre. Caroline Halde (Université Laval)

COMPRENDRE LA DYNAMIQUE DE L'AZOTE ET DU CARBONE DANS LE MAÏS-GRAIN ET SOYA AVEC CULTURES DE COUVERTURE INTERCALAIRES EN FONCTION DE L'ESPACEMENT D'ENTRE-RANGS

02/2021 – 02/2024

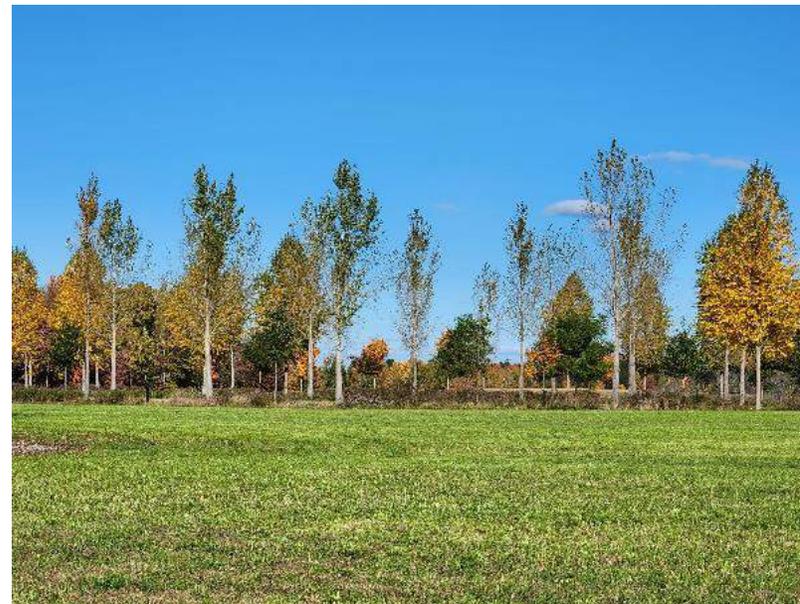


Pérennes
Cultures de couverture
 Agroforesterie
 Non-labour
 Engrais de ferme

Qin et al. 2023

Systemes agroforestiers

- Santé du sol
- Biodiversité
- Amélioration de la qualité de l'eau
- Microclimat
- **Séquestration de carbone (arbres + sol)**

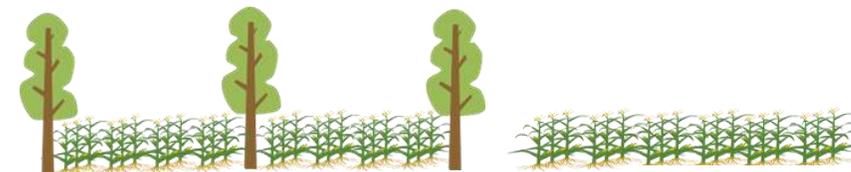


Pérennes
Cultures de couverture
Agroforesterie
Non-labour
Engrais de ferme

Systèmes agroforestiers intra-parcellaires (SAI)

- 6 sites à travers la France

6 à 41 années
0-30 cm



SAI

Témoin



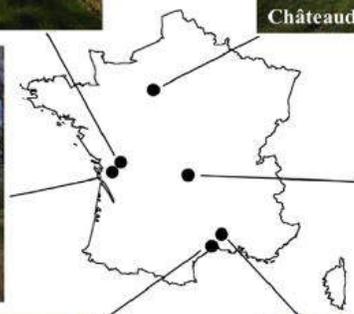
Melle (ME)



Châteaudun (CH)



Saint-Jean-d'Angély (SJ)



Theix (TH)



Restinclières (RE)



Vézénobres (VE)

SAI vs. Témoin agricole sans arbres

0.24 t C / ha / an

Pérennes
Cultures de couverture
Agroforesterie
Non-labour
Engrais de ferme

Systemes agroforestiers intra-parcellaires (SAI)

Expérience long terme : Guelph, Ontario

21 années

0-20 cm

Loam sableux



Treatment	SOC (Mg C ha ⁻¹)
Cultures entre peupliers	57.0a
Cultures entre épinettes	50.9b
Cultures sans arbres	50.8b

SAI vs. Témoin agricole sans arbres

0.30 t C / ha / an

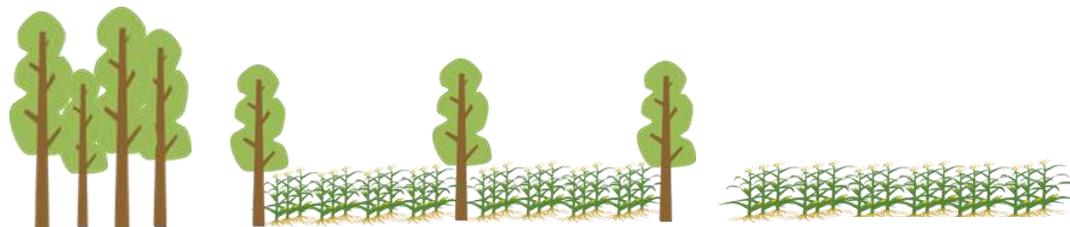
Pérennes
Cultures de couverture
Agroforesterie
Non-labour
Engrais de ferme

Bambrick et al. 2010

Systemes agroforestiers intra-parcellaires (SAI)

Expérience moyen terme : Baie-du-Febvre, Québec

10 années
0-20 cm



Boisé

SAI

Témoin

74.9 t C / ha

50.0 t C / ha

37.3 t C / ha

SAI vs. Témoin agricole sans arbres

1.3 t C / ha / an

- Encore des recherches nécessaires au Québec



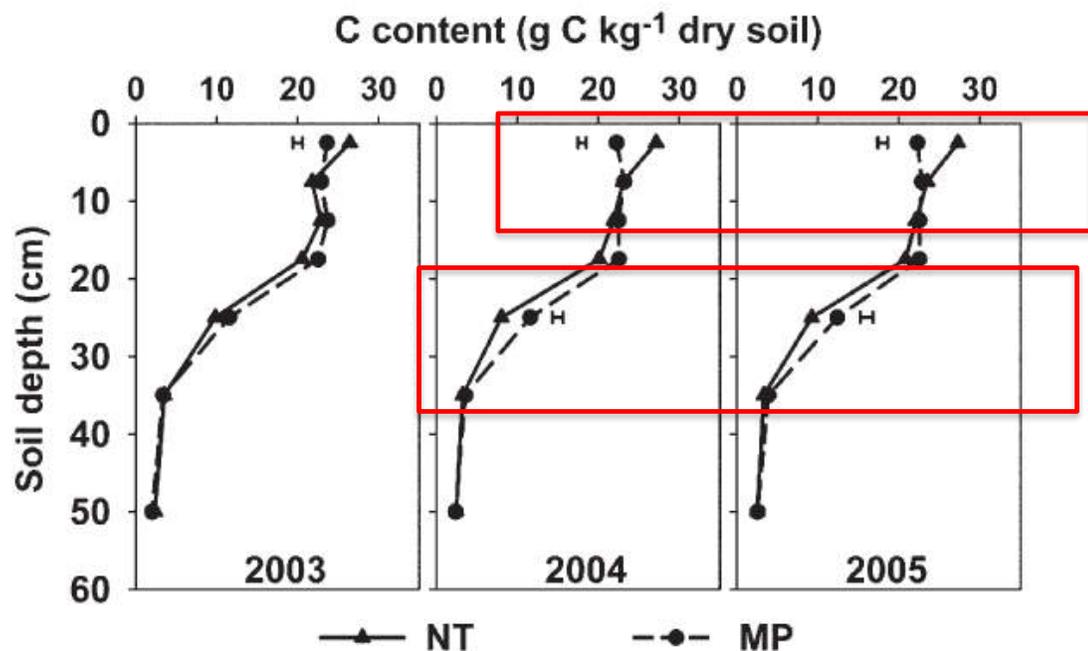
Pérennes Cultures de couverture **Agroforesterie** Non-labour Engrais de ferme

Illustrations de M.N Thivierge
Maillard et al. en préparation

Non-labour

Est du Canada

- Stock + élevé en surface (semis direct / travail réduit)
- Stock de C + faible en profondeur comparativement au labour



Semis direct/Travail réduit vs. Labour

Pas d'accumulation de C (profil entier)

- Bénéfices semis direct/travail réduit : structure, vie du sol, etc.

Pérennes

Cultures de couverture

Agroforesterie

Non labour

Engrais de ferme

Angers et al. 1997
Carter 2005
Poirier et al. 2009
Maillard et al. 2016

Engrais de ferme

- Apport de MO – Augmentation du C du sol

- **Méta-analyse globale**

18 années
0-26 cm

Engrais de ferme – Témoin sans fertilisation

1.02 t C / ha / an

Engrais de ferme – Fertilisation minérale

0.52 t C / ha / an



Transfert du C
Pas de CO₂ piégé

Pérennes
Cultures de couverture
Agroforesterie
Non-labour
Engrais de ferme

Maillard et Angers 2014

Grandes cultures biologiques

- Combinaison de plusieurs pratiques

- ✓ Rotations d'au moins 3 ans

- ✓ Cultures de couverture / Engrais verts

- ✓ Engrais de ferme

- ✓ Pérennes herbacées

- ✓ Travail du sol (contrôle des mauvaises herbes, destruction cultures couverture + prairies)



Apports de C au sol



Minéralisation du C

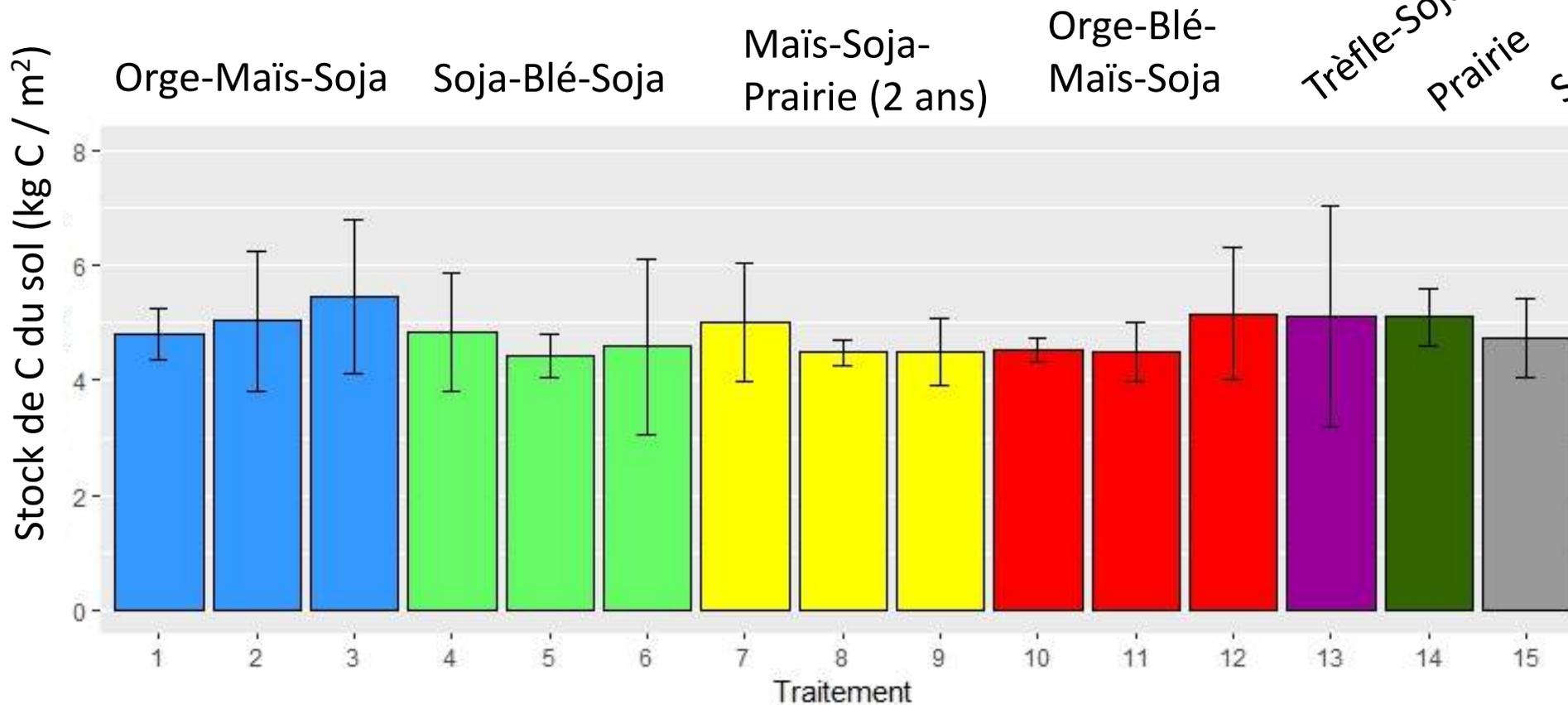
CRAAQ 2019

Grandes cultures biologiques

Dispositif long terme du Cetab+ : Victoriaville, Qc

- 7 rotations – 15 traitements

3 années
0-20 cm
Loam sableux



2021 :
Pas de différences significatives

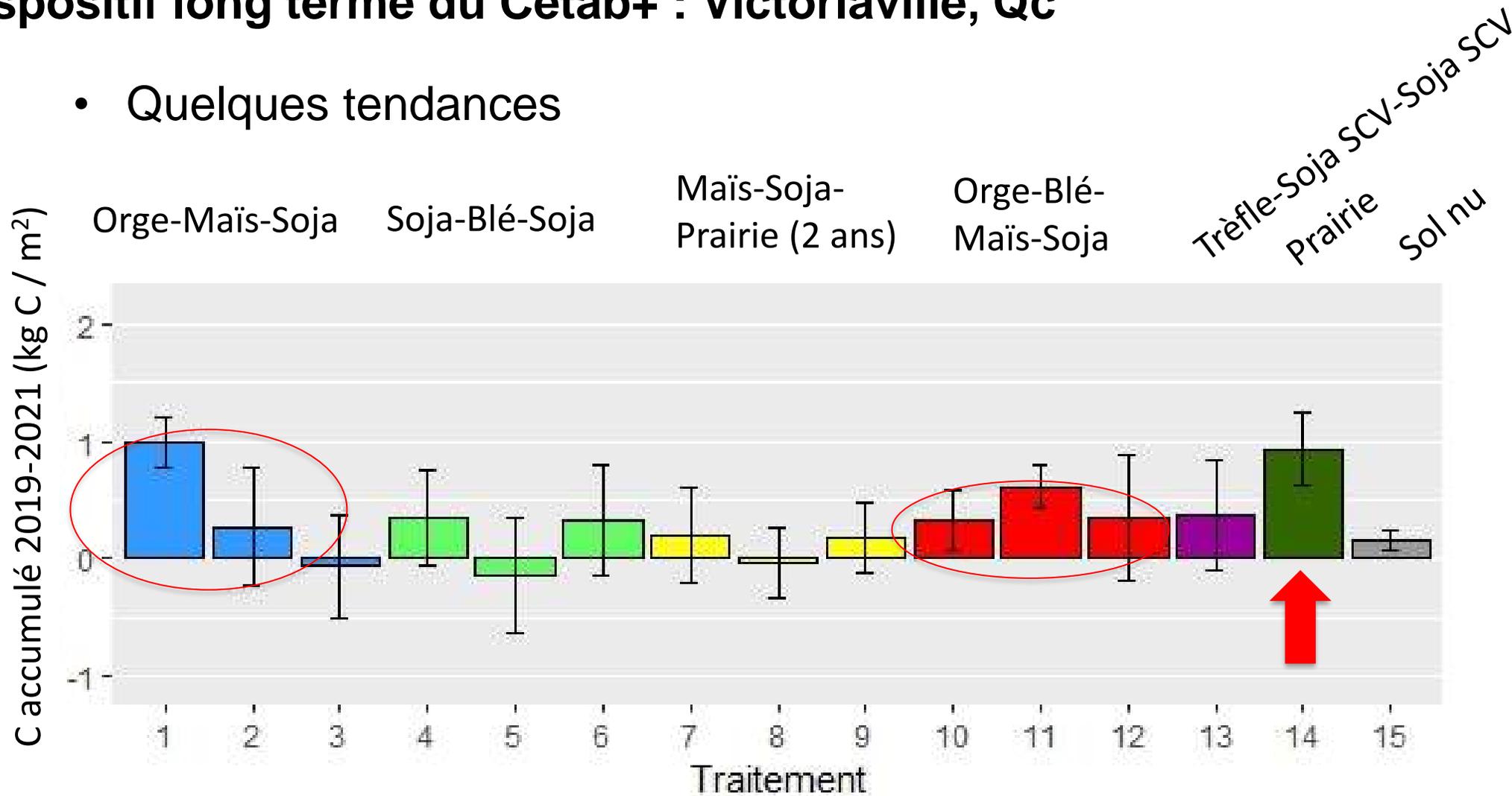
+ de temps...

Maillard et al. , en préparation

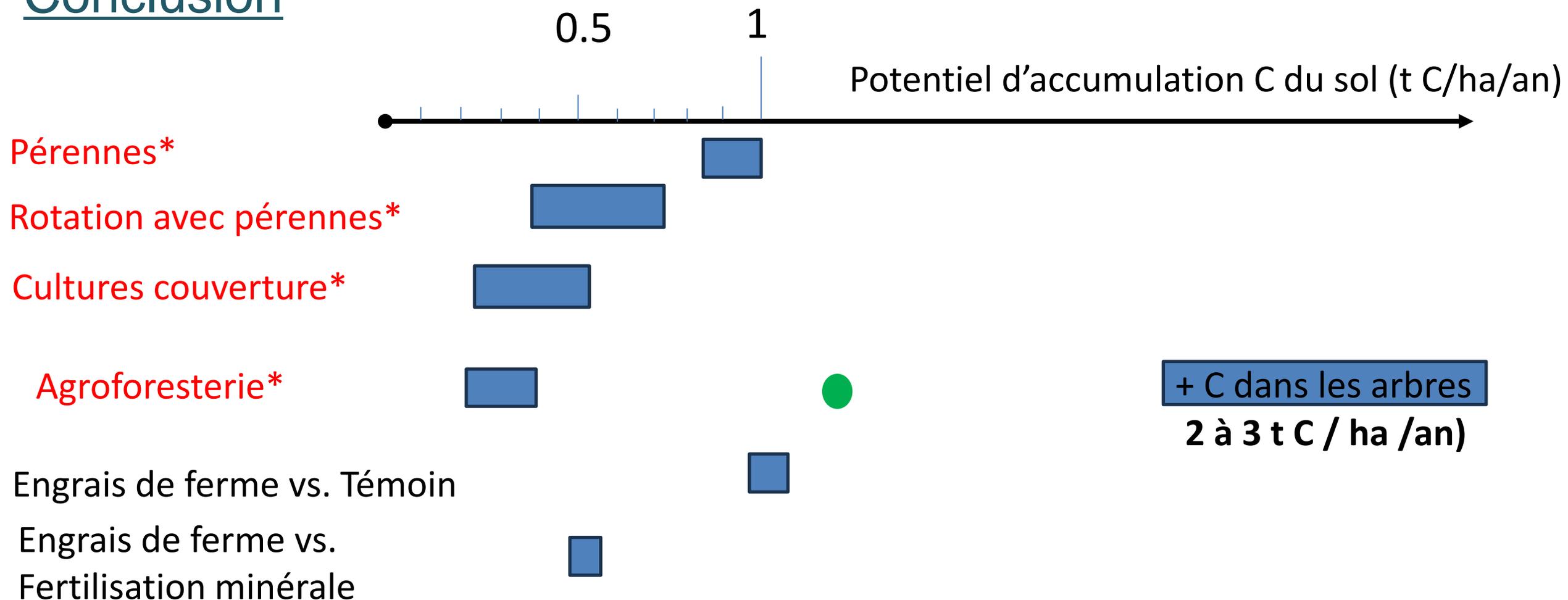
Grandes cultures biologiques

Dispositif long terme du Cetab+ : Victoriaville, Qc

- Quelques tendances



Conclusion



*** Potentiel d'atténuation des changements climatiques en séquestrant du C**

Conclusion

- Accumulation de C dans les sols : bénéfices agronomiques et environnementaux
- Nécessité d'évaluer toutes les émissions de GES quand on analyse si une activité peut conduire à atténuer les changements climatiques : émissions de CH₄, N₂O (ex: activité d'élevage, fertilisation...)
- Recherches nécessaires :
 - ✓ Valider les taux d'accumulation de certaines pratiques
 - ✓ Déterminer la sensibilité du C du sol aux événements climatiques

Pérennes

Cultures de couverture

Fertilisation

Semis direct/Travail simplifié

Agroforesterie

MERCI !

- Collègues, équipe de recherche
- Organisateurs



Emilie.maillard@canada.ca

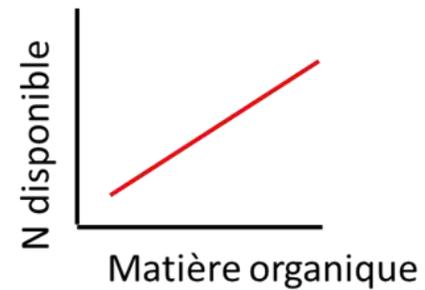


En quoi le C du sol est important ?

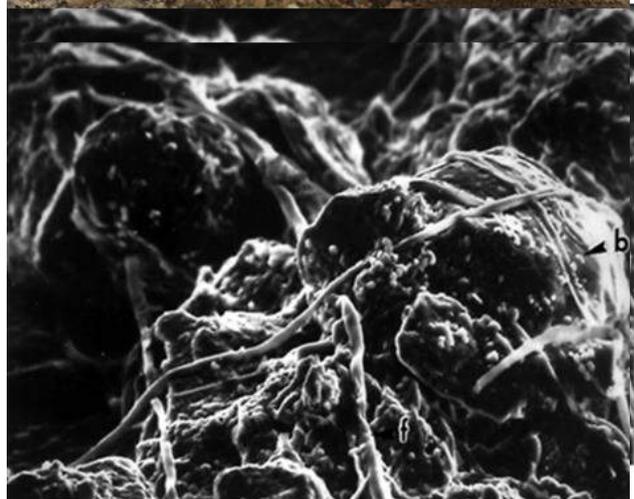
Biologie



Éléments nutritifs

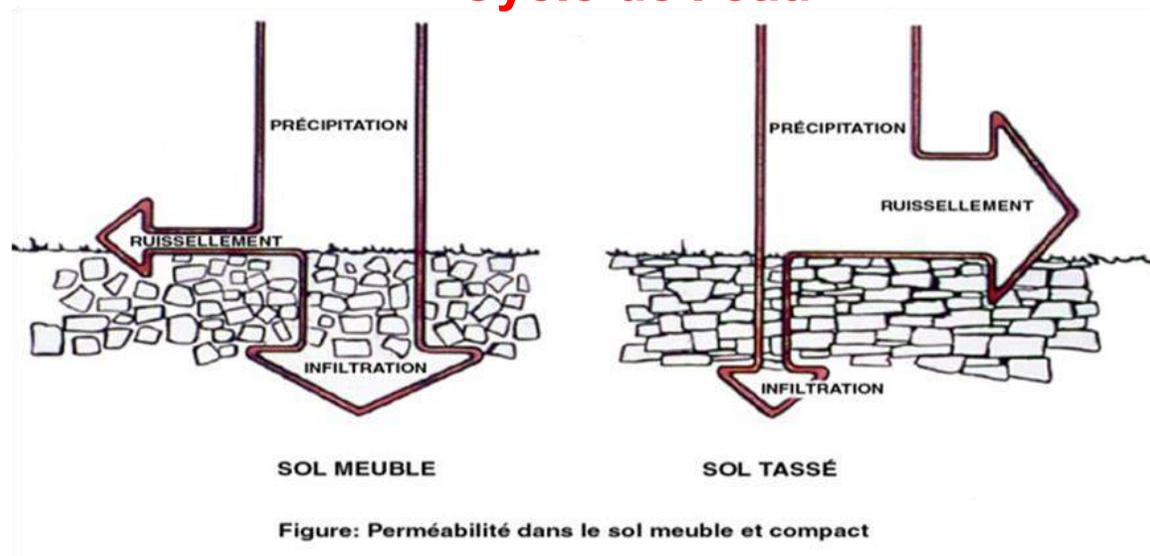


Structure

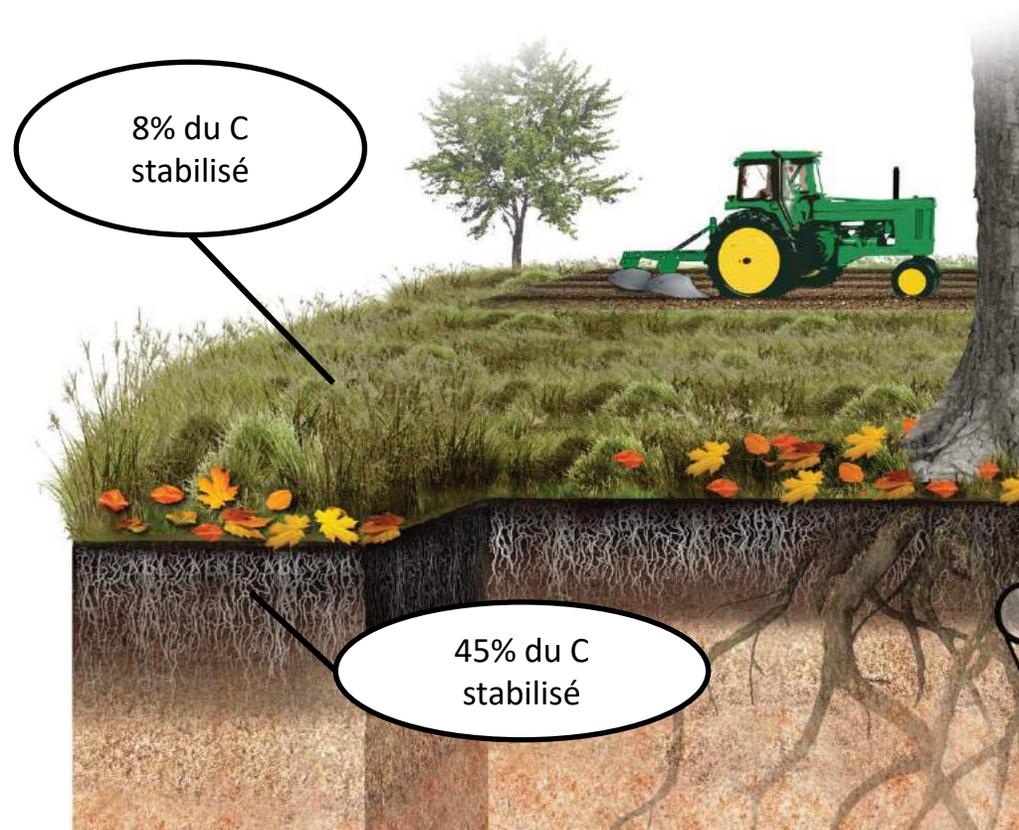


b © Angers-Chenu 1997 0.01 mm

Cycle de l'eau



Importance des racines pour l'accumulation de C dans le sol



© Jackson et al., 2017

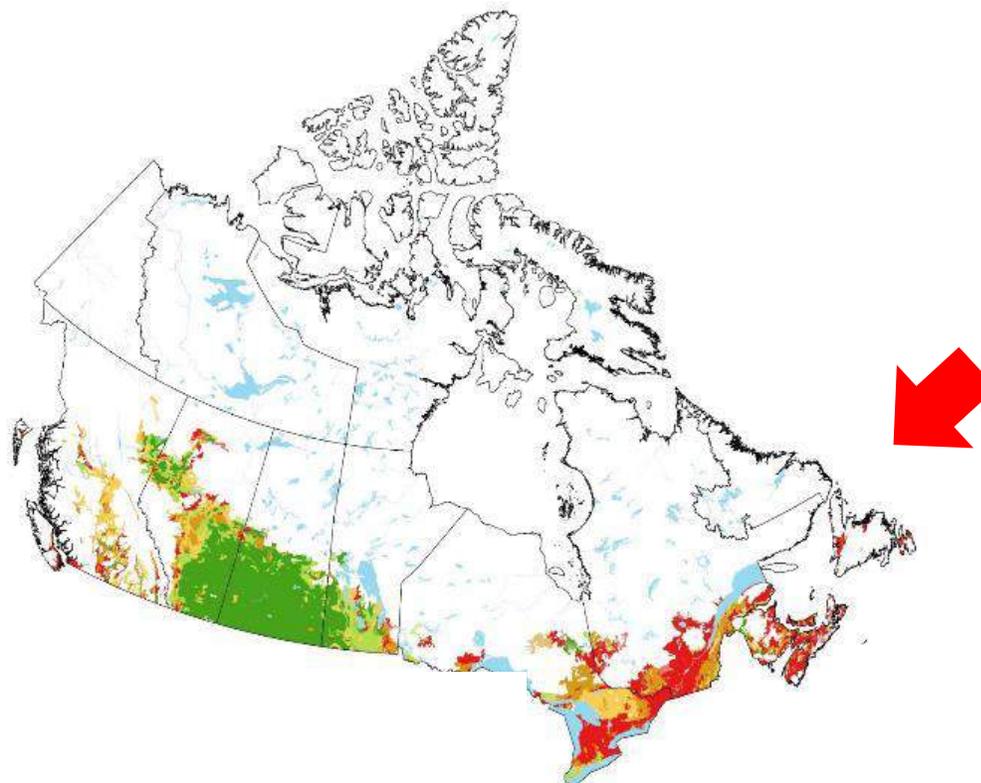


© D. Angers

- C des racines 5 fois plus susceptible de devenir du C stable du sol que le C des parties aériennes de la plante

Poirier et al. 2018
 Bardgett et al. 2016
 Herman et al. 2012
 Silver et Miya 2011
 De Deyn et al. 2008
 Jackson et al. 2017

Pratiques et potentiel d'accumulation du C du sol



Perte de C due à la mise en cultures d'anciennes prairies

Changement de stocks de carbone organique du sol (kg/ha/an)



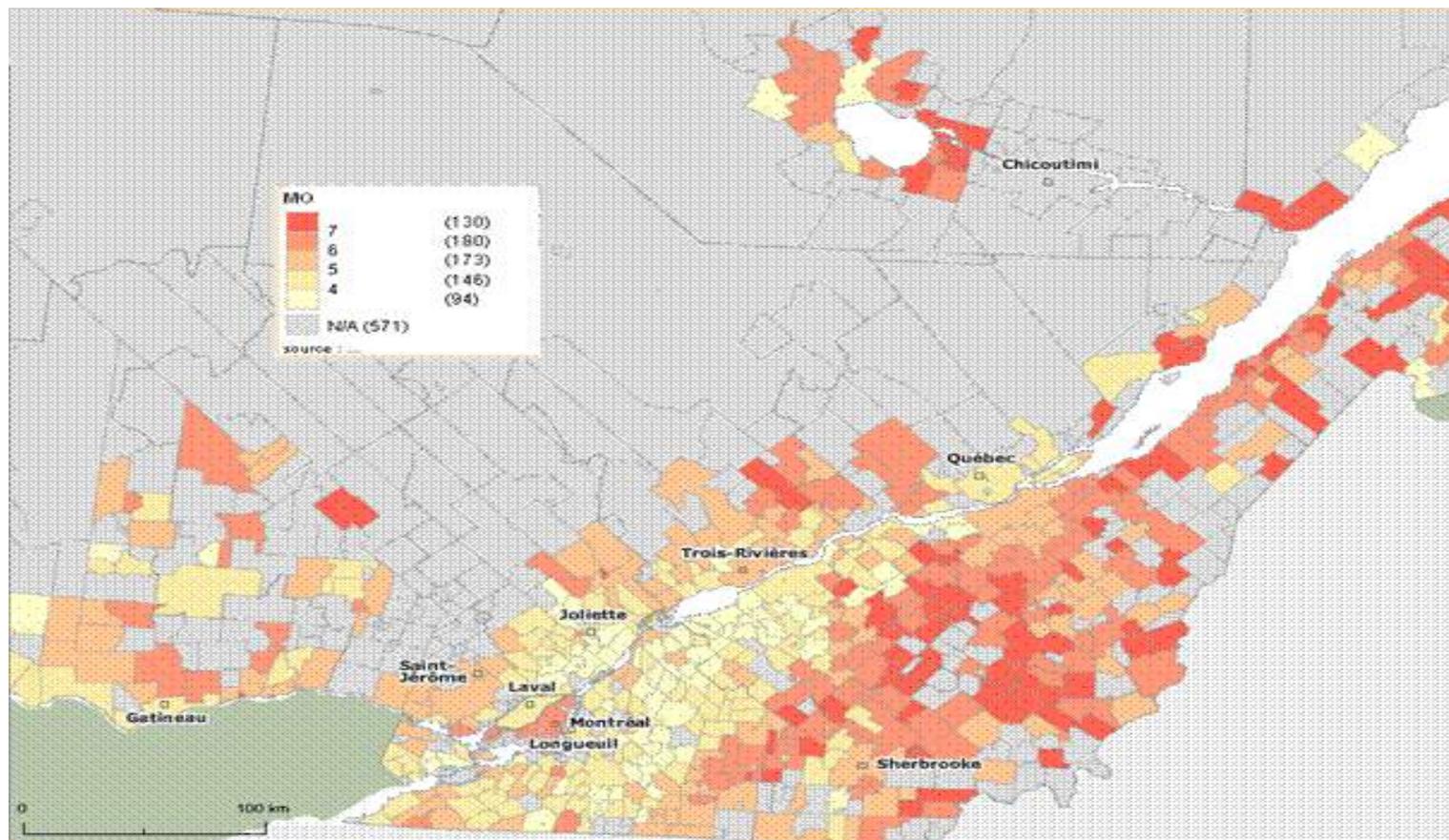
Agriculture et Agroalimentaire Canada

Agriculture and Agri-Food Canada

Pérennes Cultures de couverture Fertilisation Semis direct Agroforesterie

Effet des changements de pratiques sur le carbone du sol

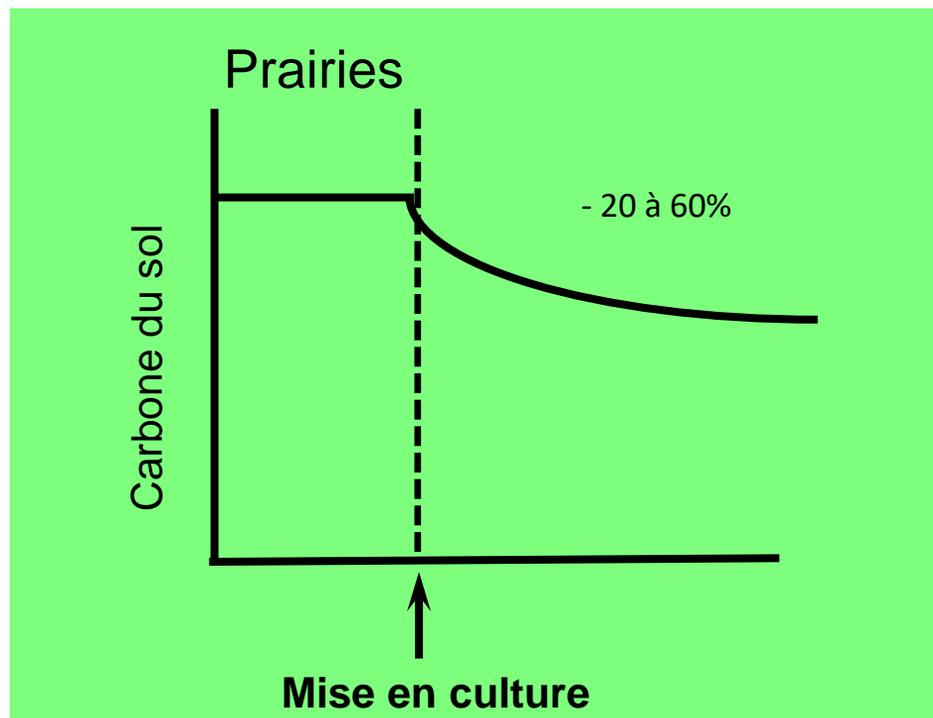
Teneur en matière organique des sols du Québec



M.-O. Gasser (IRDA, 2002)

Pérennes
Plantes de couverture
Fertilisation
Semis direct
Agroforesterie

Maintenir pérennes herbacées pour éviter des pertes de C du sol



-20 à 30% au Canada

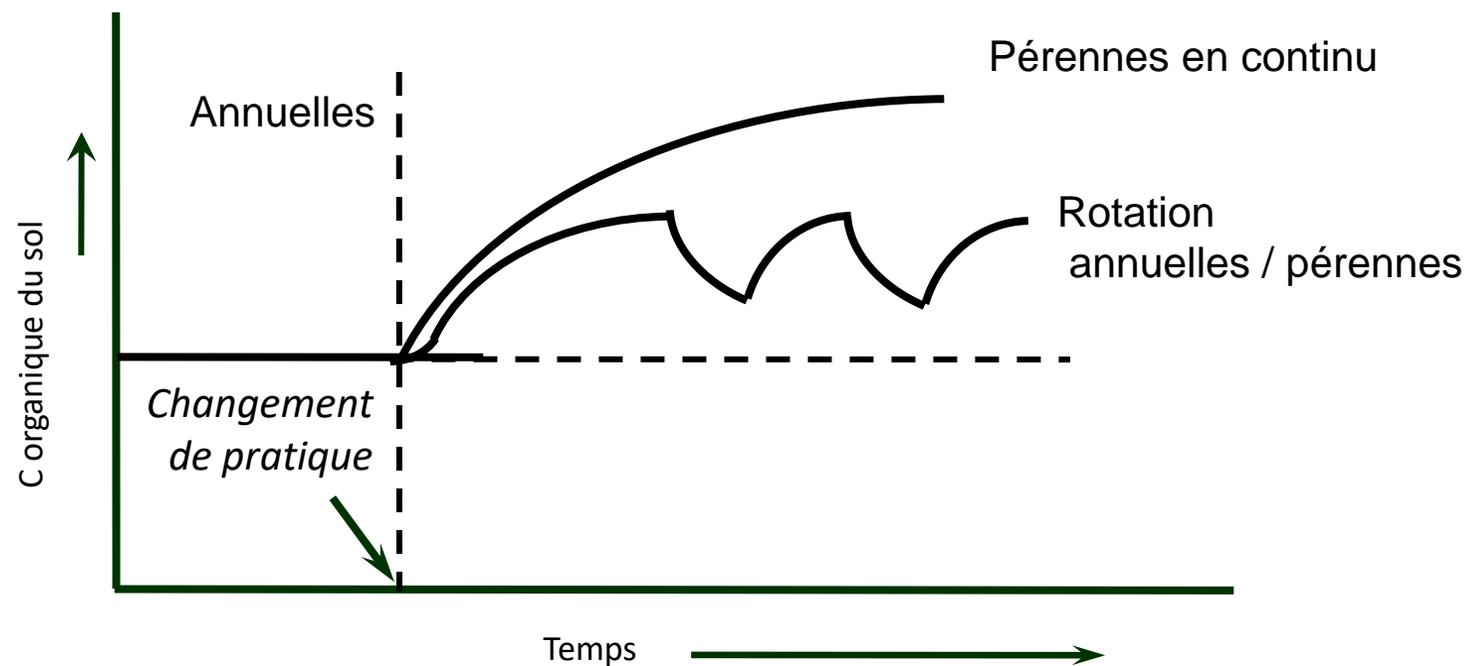
- 7 séries de sol du Québec :

C organique du sol **25 % plus élevé** dans des prairies que dans des cultures annuelles

Pérennes
Cultures de couverture
Fertilisation
Semis direct
Agroforesterie

Rotation pérennes - annuelles

Pérennes en rotation



Pérennes
 Plantes de couverture
 Fertilisation
 Semis direct
 Agroforesterie

Gestion des plantes pérennes pour augmenter le C du sol

Diversité des systèmes racinaires

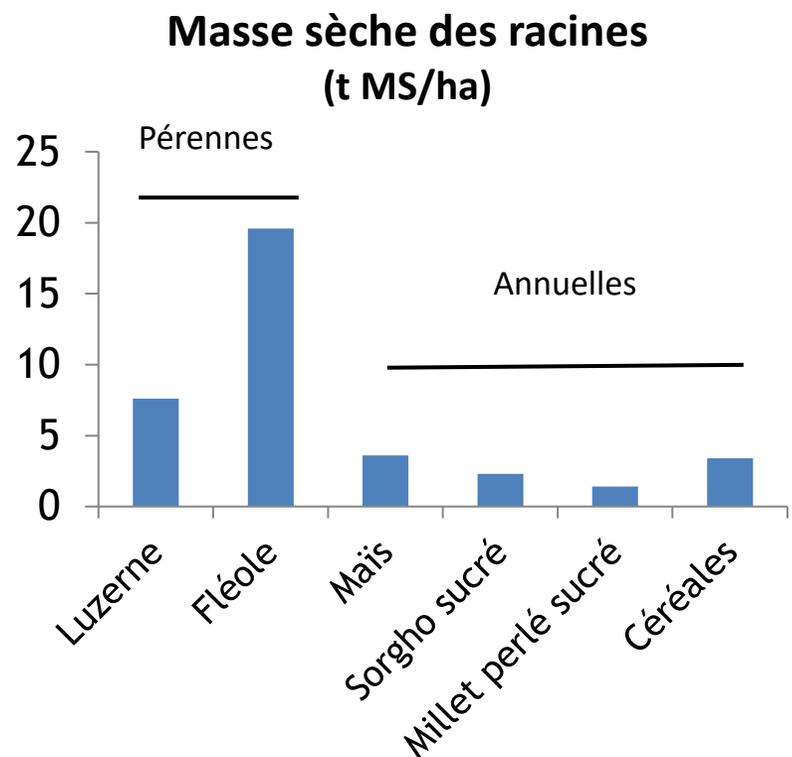


Photo: Marie-Noëlle Thivierge



Photo: Taylor et Shober, Delaware Univ.

(Thivierge et al., 2016; Bolinder et al., 2002)

Pérennes
 Plantes de couverture
 Fertilisation
 Semis direct
 Agroforesterie

Systemes agroforestiers

Étude globale : Amérique du Nord – tempérée
(Udawatta et Jose 2012)

Taux d'accumulation du C (sols + végétation)

Bandes riveraines : 2,6 t C ha⁻¹ an⁻¹



Systemes intra-parcellaires : 3,4 t C ha⁻¹ an⁻¹



C stocké additionnel dans la végétation

- Potentiel intéressant
- Encore des recherches nécessaires au Québec

Pérennes
Cultures de couverture
Fertilisation
Semis direct/Travail simplifié
Agroforesterie

Udawatta et Jose 2012

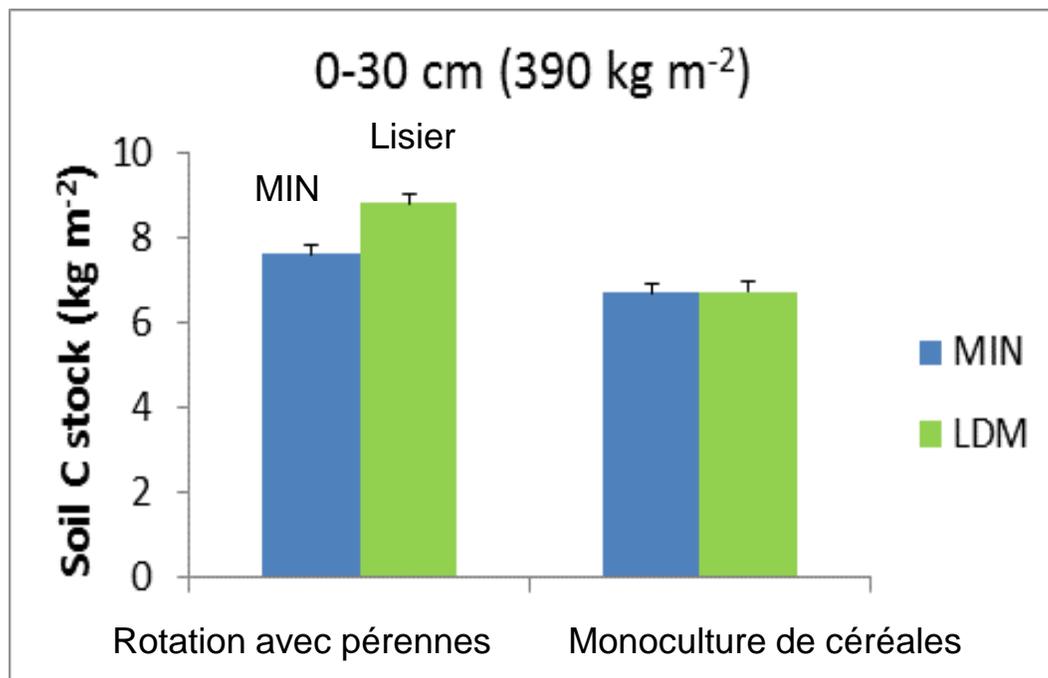
Engrais de ferme

Expérience à long terme : Normandin, Québec

21 années

0-30 cm

Argile limoneuse



Engrais de ferme – Fertilisation minérale
Rotation orge grainé – 2 ans trèfle
rouge/dactyle

0.52 t C ha⁻¹ an⁻¹

- Potentiel de séquestration du C si application engrais de ferme sur une rotation de pérennes plutôt que sur monoculture

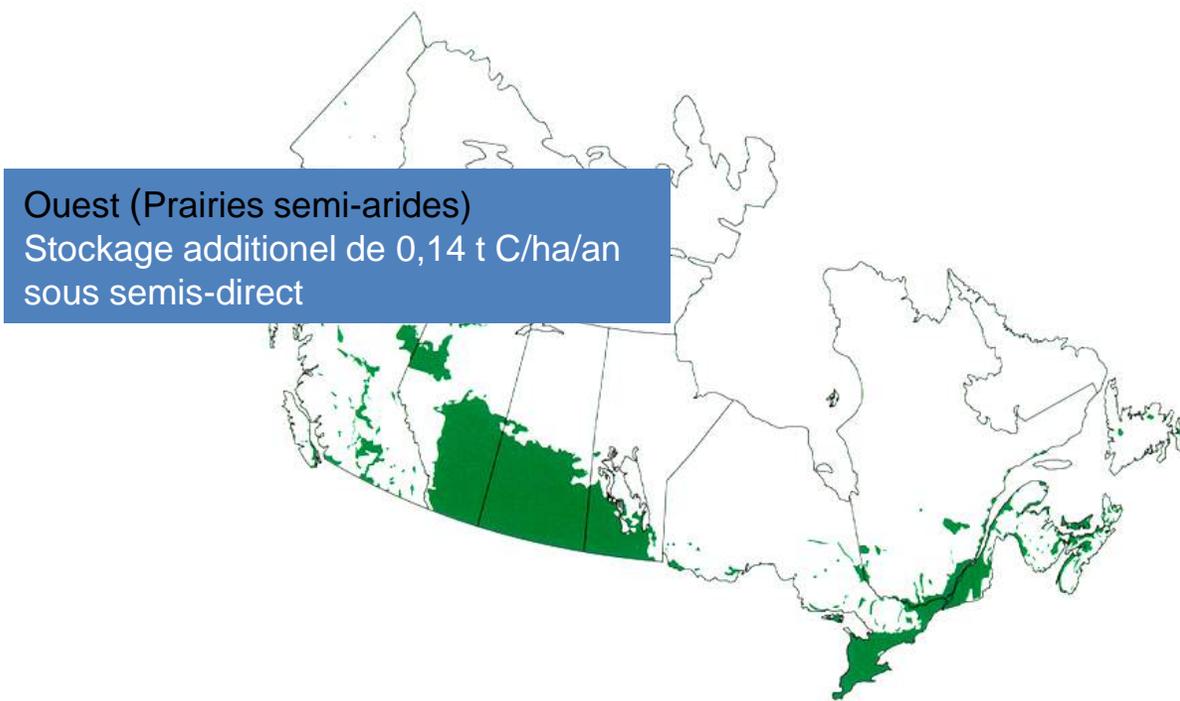
Pérennes Cultures de couverture **Fertilisation** Semis direct Agroforesterie

Maillard et al. 2016

Non-labour

Effets variables sur le taux de stockage de C du sol entre l'O et l'E du Canada

6 essais agronomiques de longue durée, 0-15 cm



Pérennes
Cultures de couverture
Fertilisation
Semis direct/Travail simplifié
Agroforesterie

VandenBygaart et al. 2010