



JEUDI 7 DÉCEMBRE 2023

**AGRICULTURE BIO
ET CARBONE**

LE COMPTE EST BON ?

**9h00 à
16h30**



**CINÉ 32
AUCH**



Avec le soutien financier de :



Projet cofinancé par le Fonds Européen Agricole pour le Développement Rural
L'Europe investit dans les zones rurales



**LES BIOS
DU GERS**
Les agriculteurs
biologiques du Gers

7

décembre
2023

Colloque de l'Agriculture Biologique de Conservation

FairCarbon
Le carbone dans les écosystèmes continentaux :
leviers et trajectoires pour la neutralité carbone



PROGRAMME
DE RECHERCHE
CARBONE ET
ÉCOSYSTÈMES
CONTINENTAUX

➤ Stockage de carbone dans les sols agricoles : *potentiel, pratiques favorables et incertitudes*

Lionel Alletto

UMR Agroécologie, Innovations, Territoires

lionel.alletto@inrae.fr


RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

INRAE



➤ Éléments généraux / contexte



➤ Éléments généraux / contexte

► Le sol : un compartiment à la croisée des enjeux et aux multiples fonctions



➤ Éléments généraux / contexte

▶ Le sol : un compartiment à la croisée des enjeux et aux multiples fonctions



ÉCHELLE LOCALE ←

→ ÉCHELLE GLOBALE

INRAE

Colloque ABC – C du sol
7-12-2023 / Lionel Alletto



➤ Éléments généraux

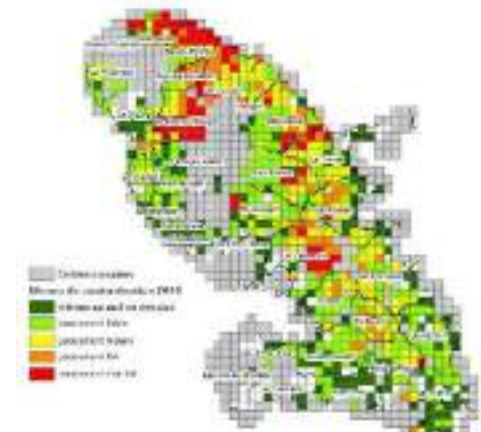


33 %
modérément à
sévèrement dégradés

Le Sol : ressource non renouvelable à l'échelle d'une génération...

=> De nombreuses causes de dégradation :

- Salinisation
- Erosion
- Contamination
- Perte en matière organique
- Perte de biodiversité
- Compaction
- Imperméabilisation
- Inondations



Rôle majeur du C du sol pour répondre à ces problèmes

➤ Éléments généraux / contexte

Fertilité physique

- ▶ Stabilité structurale
- ▶ Porosité / densité
- ▶ Capacités d'infiltration
- ▶ Rétention d'eau
- ▶ Rugosité
- ▶ Résistance à la battance

Fertilité biologique

- ▶ Abondance & Diversité
-> diversité fonctionnelle

Matières organiques du sol (MOS)

Quantité & Qualité des eaux

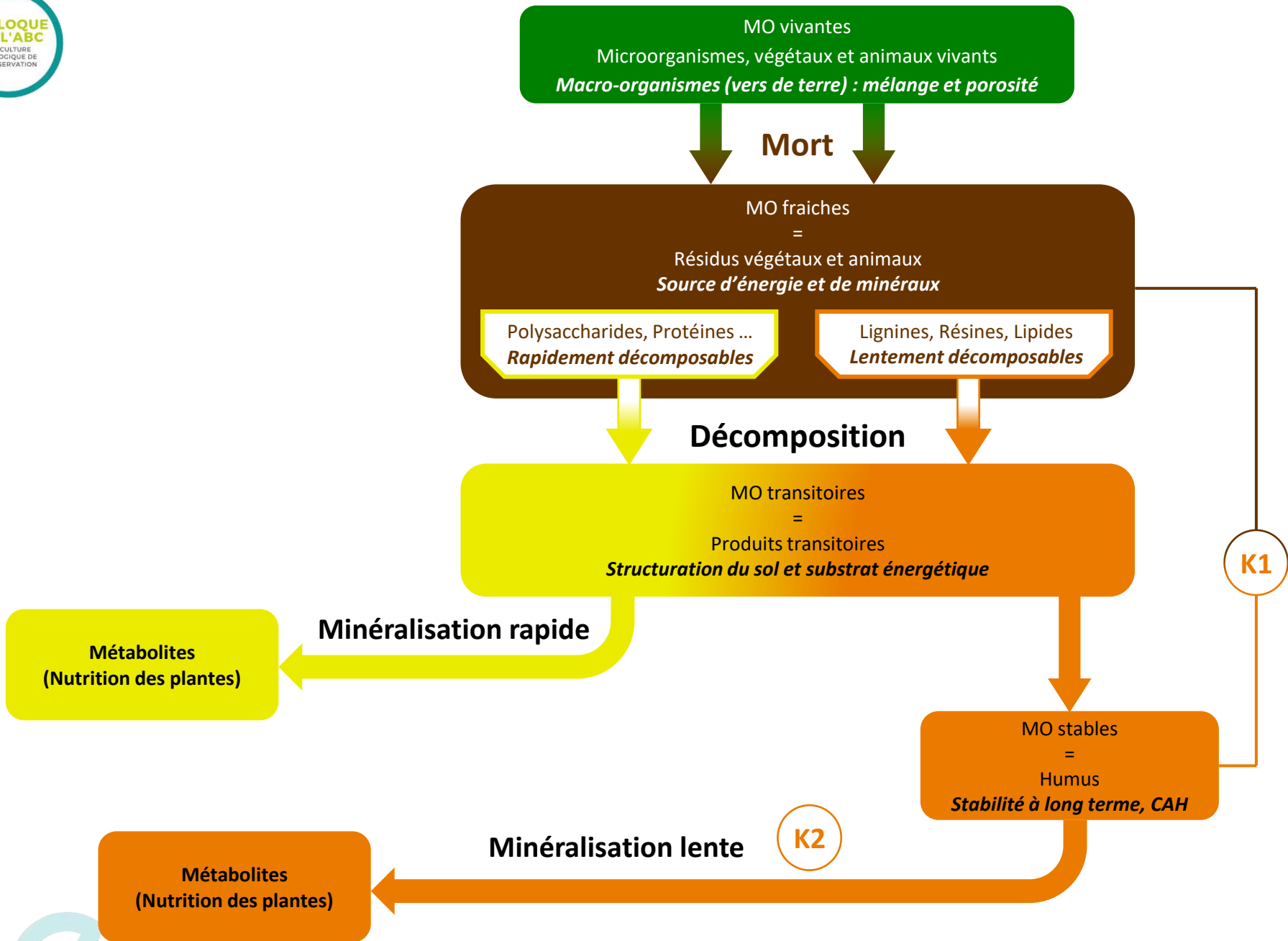
- ▶ Stockage de polluants
(NO₃⁻, pesticides, métaux ...)
- ▶ Régulation des cycles

Fertilité chimique

- ▶ Abondance & Diversité
des éléments nutritifs
- ▶ CEC

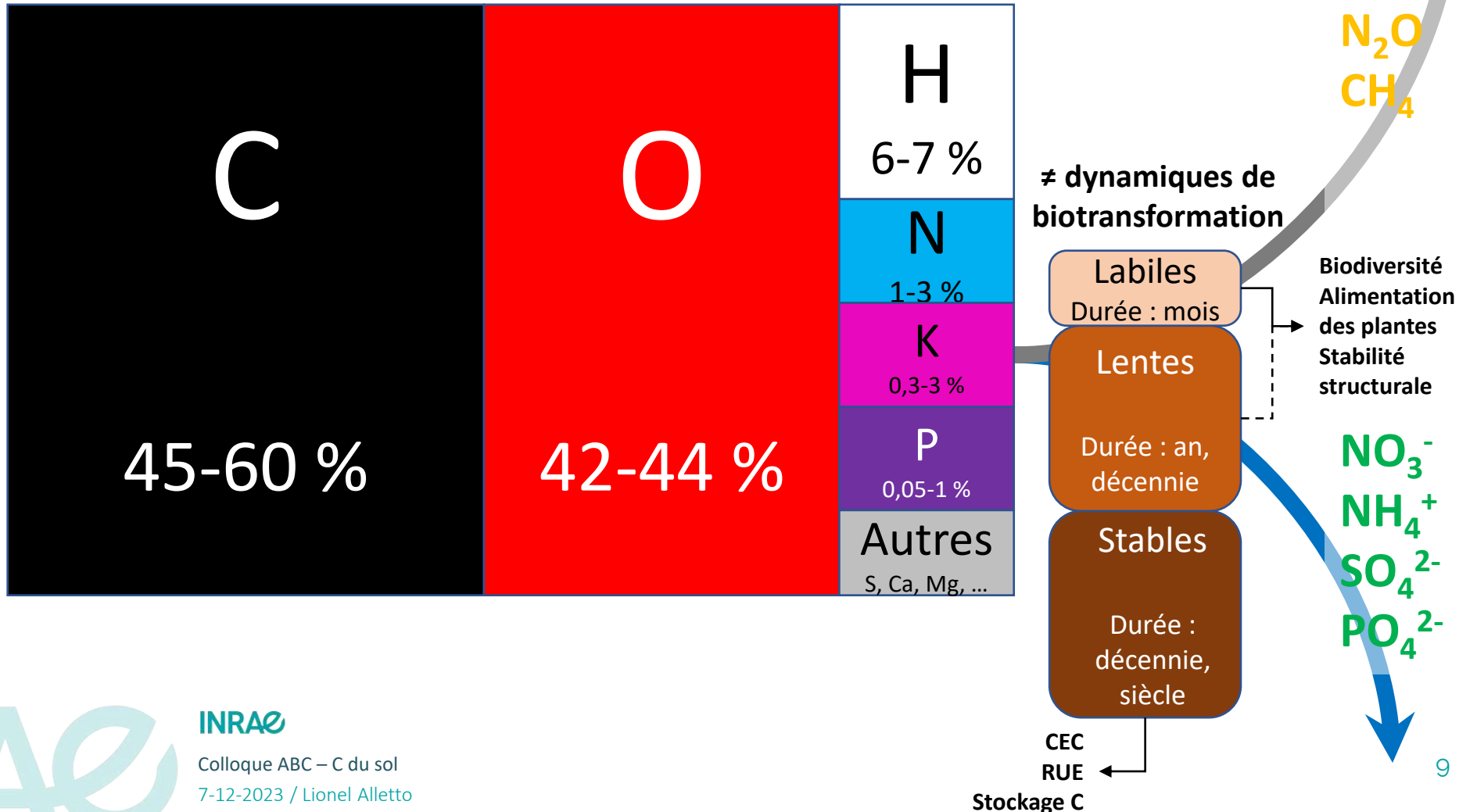
Qualité de l'air

- ▶ Stockage de C (CO₂)
- ▶ Emissions de GES (N₂O, CO₂)



➤ Éléments généraux / contexte

MOS : composition globale



➤ Éléments généraux / contexte

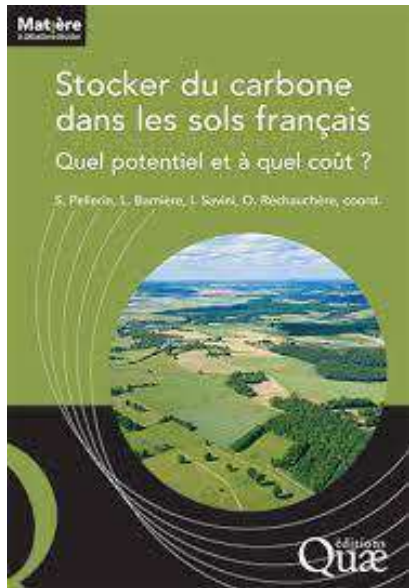
Un **compromis** à établir entre :



Biotransformation des MOS pour les fonctions et services de soutien
&
Stockage durable de C dans les sols

▶ **Les deux sont possibles simultanément en agriculture !**

➤ Éléments généraux / contexte



➤ Potentiel de stockage des sols



➤ Potentiel de stockage des sols

Teneur en C : quantité de C par masse de sol : $g C_{org} / kg$ (donc en ‰)

Quelques éléments de conversion :

▶ C_{org} vs. MO

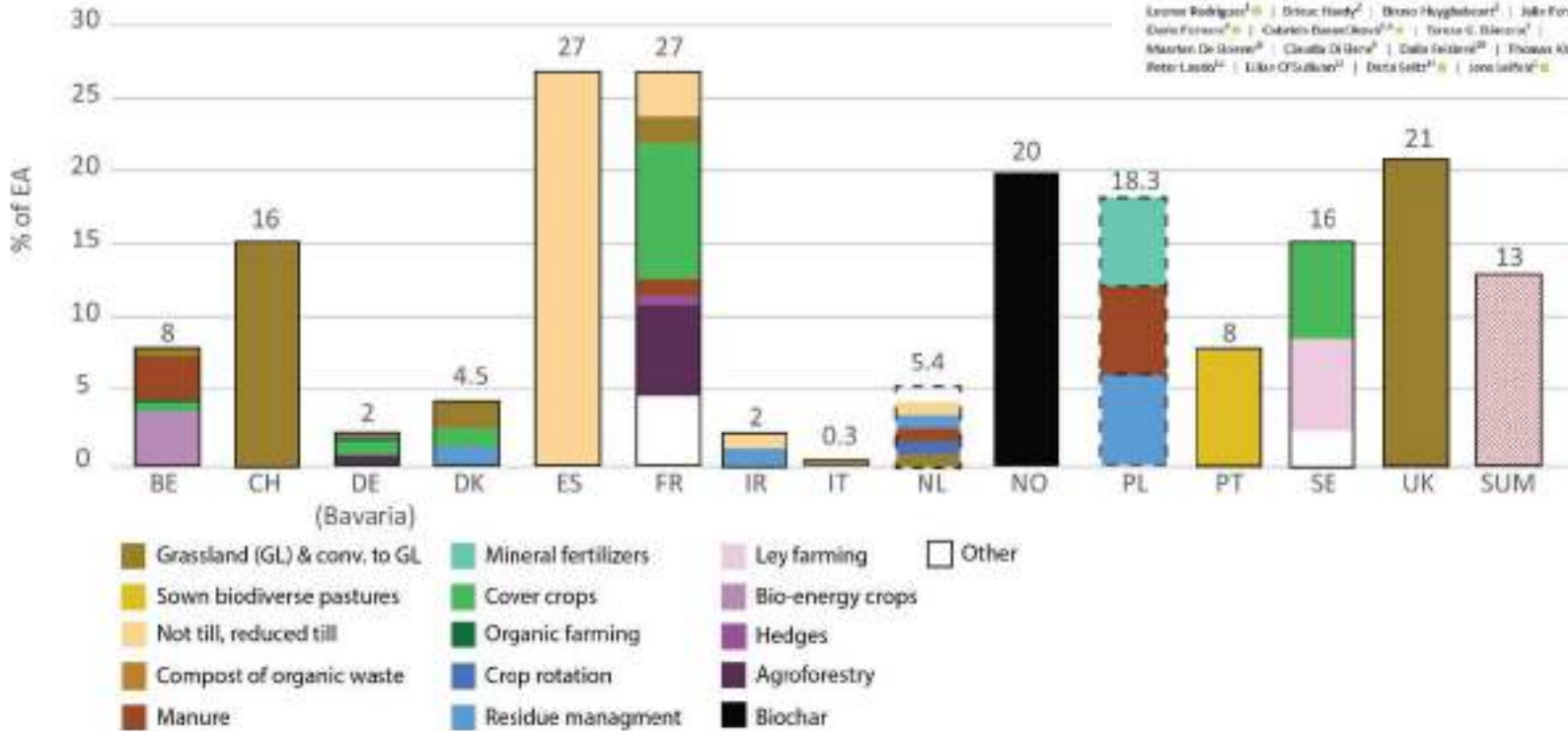
les MO du sol contiennent environ de 45 à 60 % de C : $MO \approx C_{org} \times 1,72$

▶ C vs. CO_2

1 kg CO_2 contient 0,273 kg de C, donc 1 eq $CO_2 \approx 0,273$ eq C

1 eq C $\approx 3,67$ eq CO_2

➤ Potentiel de stockage des sols



Estimations des potentiels de stockage de C_{org} pour compenser les émissions agricoles (EA) et pratiques à mobiliser pour atteindre ces estimations

- Méthodologie et pratiques variables selon les pays mais ordre de grandeur de 10 à 30 % des émissions agricoles
 - La **réduction des émissions est donc indispensable !!**

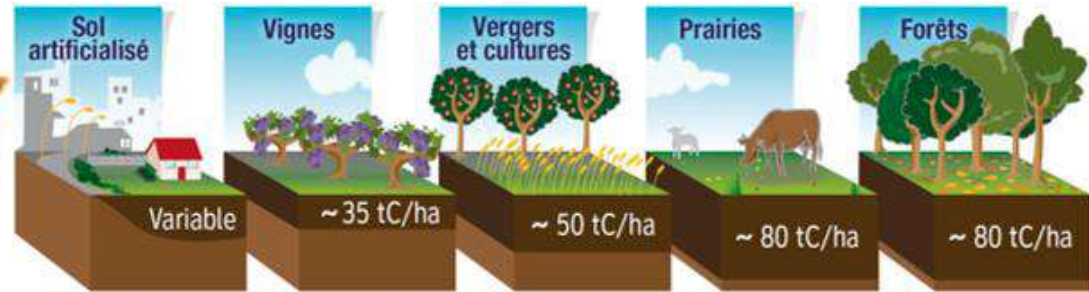
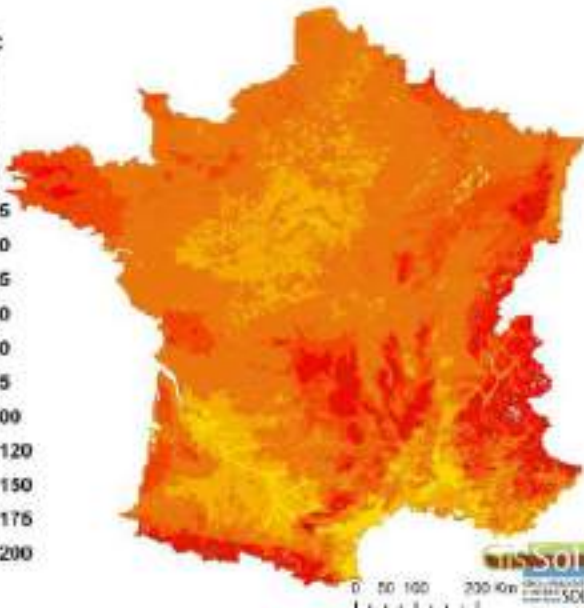
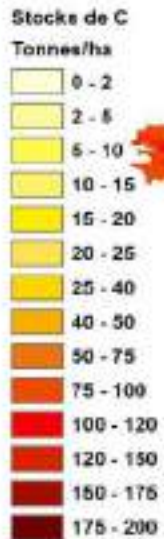


➤ Potentiel de stockage des sols

Variabilité des stocks de C :

sur 30 cm d'épaisseur

Estimation des stocks de carbone organique de C à 20 cm de profondeur en France métropolitaine hors Corse



GIS Sol

➤ Potentiel de stockage des sols

Variabilité des stocks de C en fonction du type de sol :

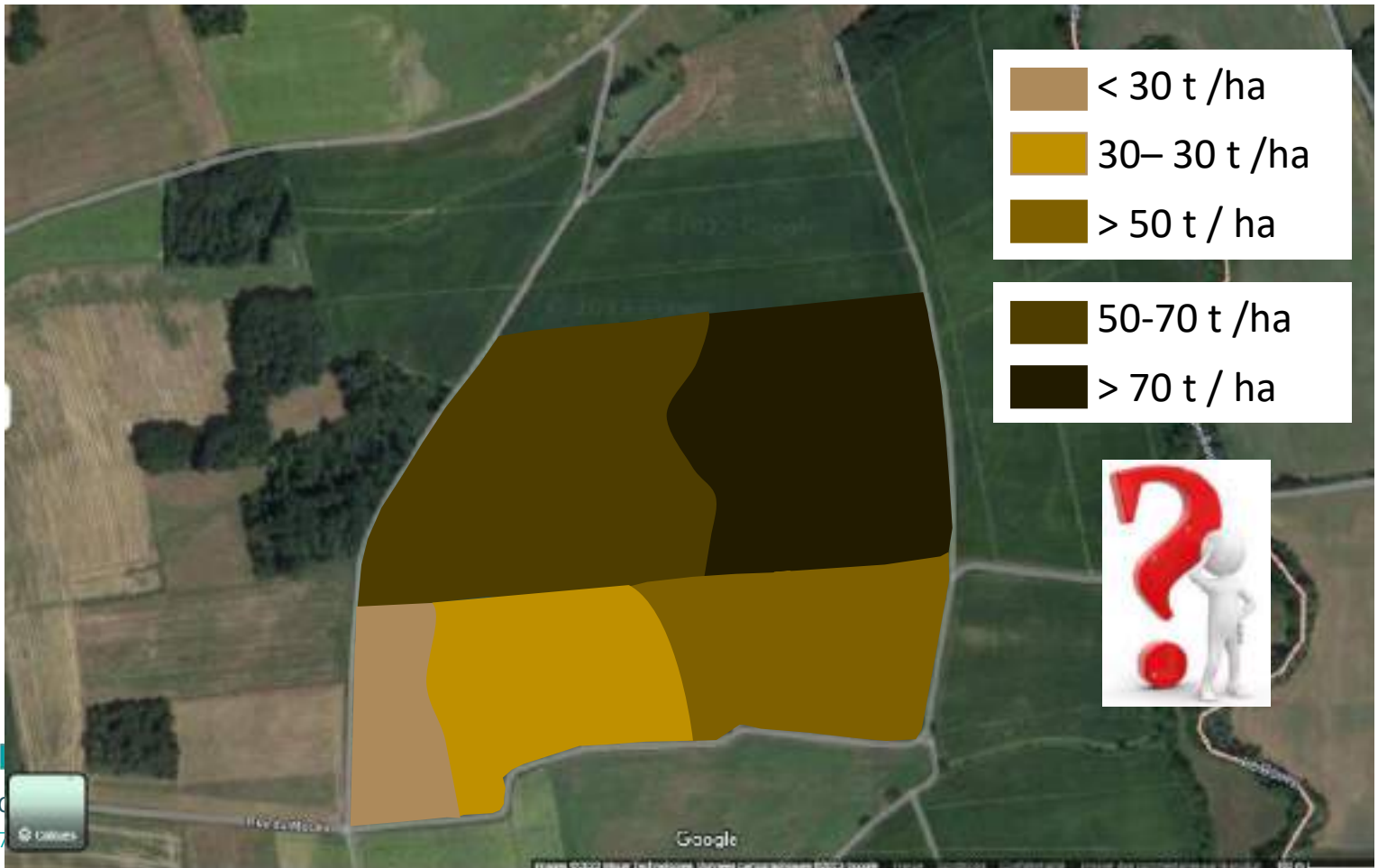
sur 60 cm d'épaisseur, sur sols travaillés (labour > 1 année / 2)



Type de sol	Nom vernaculaire / texture	Stock de C (t / ha) (sur 60 cm)
Gleyic Luvisol	Boulbènes / Limons	45 ± 8
Luvisol	Sol alluvial / Limons	63 ± 5
Vermic Umbrisol	Terres noires (sol de touyas) / Limons	110 ± 12
Cambic Calcisol	Terrefort / argilocalcaire	65 ± 7
Vertic Calcisol	Terrefort / argilocalcaire (avec fort gonflement / retrait)	60 ± 12
Podzol	Sols sableux landais	58 ± 9

➤ Potentiel de stockage des sols

Variabilité des stocks de C intraparcellaire : Gleyic Luvisol (Boulbènes) du Gers
sur 60 cm d'épaisseur, sur sol travaillé (labour > 1 année / 2)
sur 60 cm d'épaisseur, sur sol en agriculture de conservation depuis 20 ans



➤ Potentiel de stockage des sols

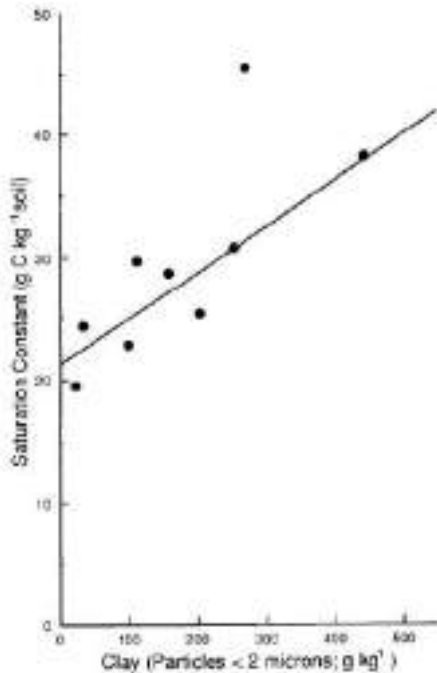
Published January, 1997

Concept de **saturation en C des sols** : *A Model of the Physical Protection of Organic Matter in Soils*

Jan Hassink and Andrew P. Whitmore*

➤ Etablissement d'une « ligne de saturation » en C_{org} qui dépend de la teneur en argiles + limons fins ($\varnothing < 20 \mu m$)

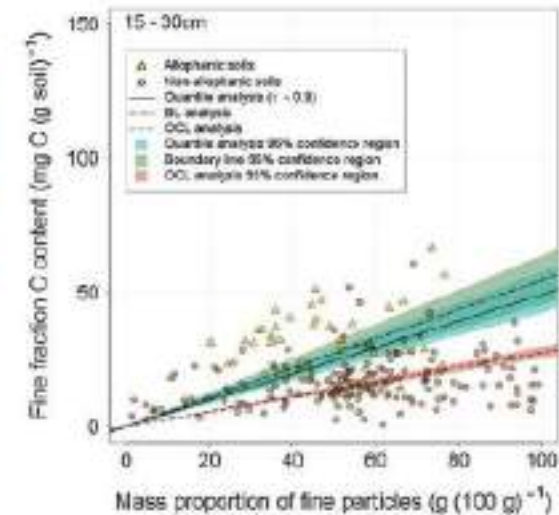
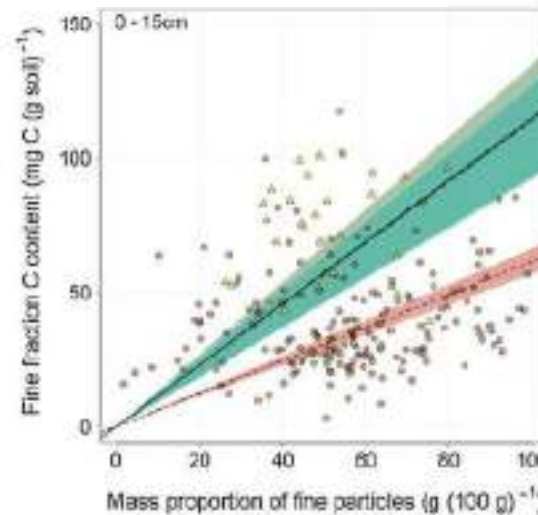
➤ Aujourd'hui largement mobilisé dans différents contextes agro-pédo-climatiques



Registration no. 2010-12871-07
DOI 10.6060/071114-092-1

Estimating the organic carbon stabilisation capacity and saturation deficit of soils: a New Zealand case study

H. H. Bean · S. J. McNeil · D. Currie ·
G. L. Parfitt · R. S. Jones · M. E. Dunin ·
J. Skyring



Hassink & Whitmore, 1997

INRAE







Colloque ABC – C du sol

7-12-2023 / Lionel Alletto

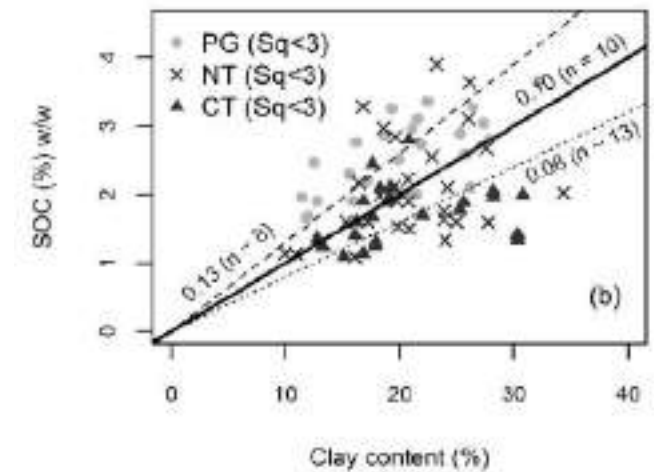
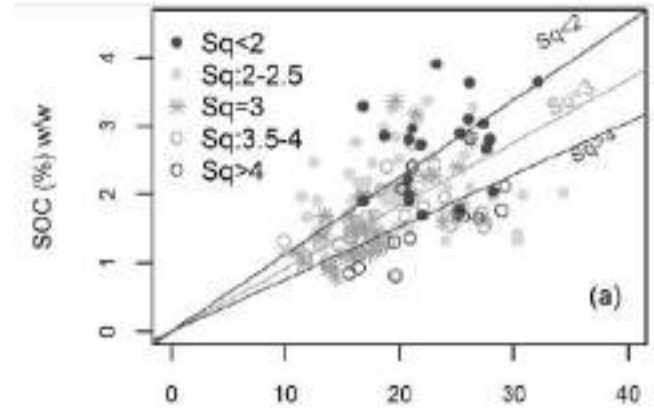
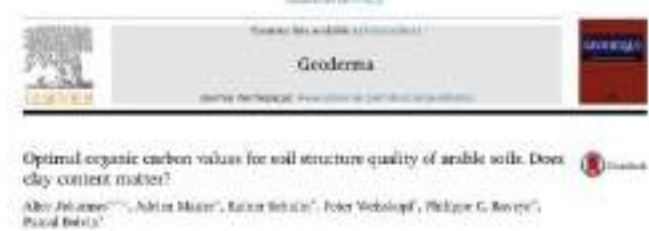
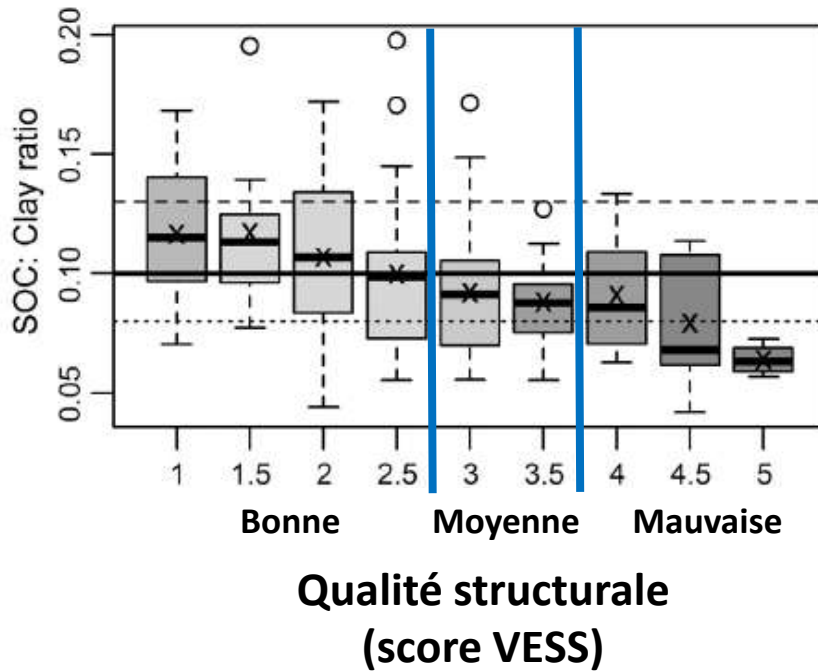


➤ Potentiel de stockage des sols

▶ Liens établis entre 'teneur en Corg' – 'texture' (teneur en argile) – 'état structural' en mobilisant la méthode VESS

Qualité de la structure	Taille et apparence des agrégats	Porosité visible (œil nu) et racines	Apparence après rupture du bloc	Caractéristique distinctive	Apparence et description d'un agrégat entier ou réduit d'environ 1,5 cm de diamètre	
Score 1 Friable Agrégats qui s'effritent facilement avec les doigts	Principalement < 6 mm après effritement	Très poreux Racines très présentes au travers des agrégats			 1 cm	L'action de rupture du bloc est suffisante pour mettre en évidence les agrégats. Les gros agrégats sont formés de plus petits tenus par les racines.
Score 2 Intacte Agrégats facilement à briser à une main	Un mélange d'agrégats poreux et arrondis de 2 mm à 7 cm Pas de mottes	La plupart des agrégats sont poreux Racines très présentes au travers des agrégats			 1 cm	Les agrégats obtenus sont arrondis, très fragiles, s'émiettent très facilement et sont très poreux.
Score 3 Ferme La plupart des agrégats se brisent à une main	Un mélange d'agrégats poreux de 2mm à 10 cm ; moins de 30% sont < 1 cm. Certains agrégats angulaires non poreux (mottes) peuvent être présents.	Présence de macropores et de fissures. Porosité et racines visibles dans les agrégats.			 1 cm	Les fragments d'agrégats sont assez faciles à obtenir. Ils ont peu de pores visibles et sont arrondis. Les racines poussent généralement à travers les agrégats.
Score 4 Compacte Nécessite un effort important pour briser les agrégats à une main	Généralement grands > 10 cm et sub-angulaire, non poreux ; moins de 30% sont < 7 cm	Peu de macropores et de fissures Toutes les racines sont regroupées dans des macropores et autour des agrégats.			 1 cm	Les fragments d'agrégats sont faciles à obtenir lorsque le sol est mouillé, sous forme de cube aux arêtes très vives et présentant des fissures à l'intérieur.
Score 5 Très compacte Difficile à briser	Principalement larges > 10 cm, très peu < 7 cm, angulaire et non poreux	Très faible porosité. Des macropores peuvent être présents. Peut contenir des zones anaérobies. Peu de racines, et s'il y en a, limitées aux fissures			 1 cm	Les fragments d'agrégats sont faciles à obtenir lorsque le sol est humide, bien qu'une force importante puisse être nécessaire. Aucun pores ou fissures ne sont généralement visibles.

Potentiel de stockage des sols



► Définition de propriétés physiques optimales en fonction du ratio Corg / Argile avec :

- **Score 2 : MO/argile = 24%**
- **Score 3 : MO/argile = 17% (soit Corg/argile = 10%)**
- **Score >4 : MO/argile = 12%**

► Semble « robuste » pour des sols à teneur en argile > 50 % → des teneurs en Corg > 5 % sont à viser...



➤ Pratiques favorables et incertitudes



COMMENT STOCKER PLUS DE CARBONE DANS LES SOLS ?

Plus on couvre les sols, plus les sols sont riches en matière organique, et donc en carbone.

Jusqu'à présent, la lutte contre le réchauffement climatique s'est beaucoup focalisée sur protection et la restauration des forêts. En dehors des forêts, il faut favoriser le couvert végétal sous toutes ses formes.



Ne pas laisser un sol nu et moins travailler le sol ;
ex. : les techniques sans labour



Introduire davantage de cultures intermédiaires, intercalaires et de bandes enherbées



Développer les haies en bordure des parcelles agricoles et l'agroforesterie



Optimiser la gestion des prairies, par exemple allonger la durée de pâturage



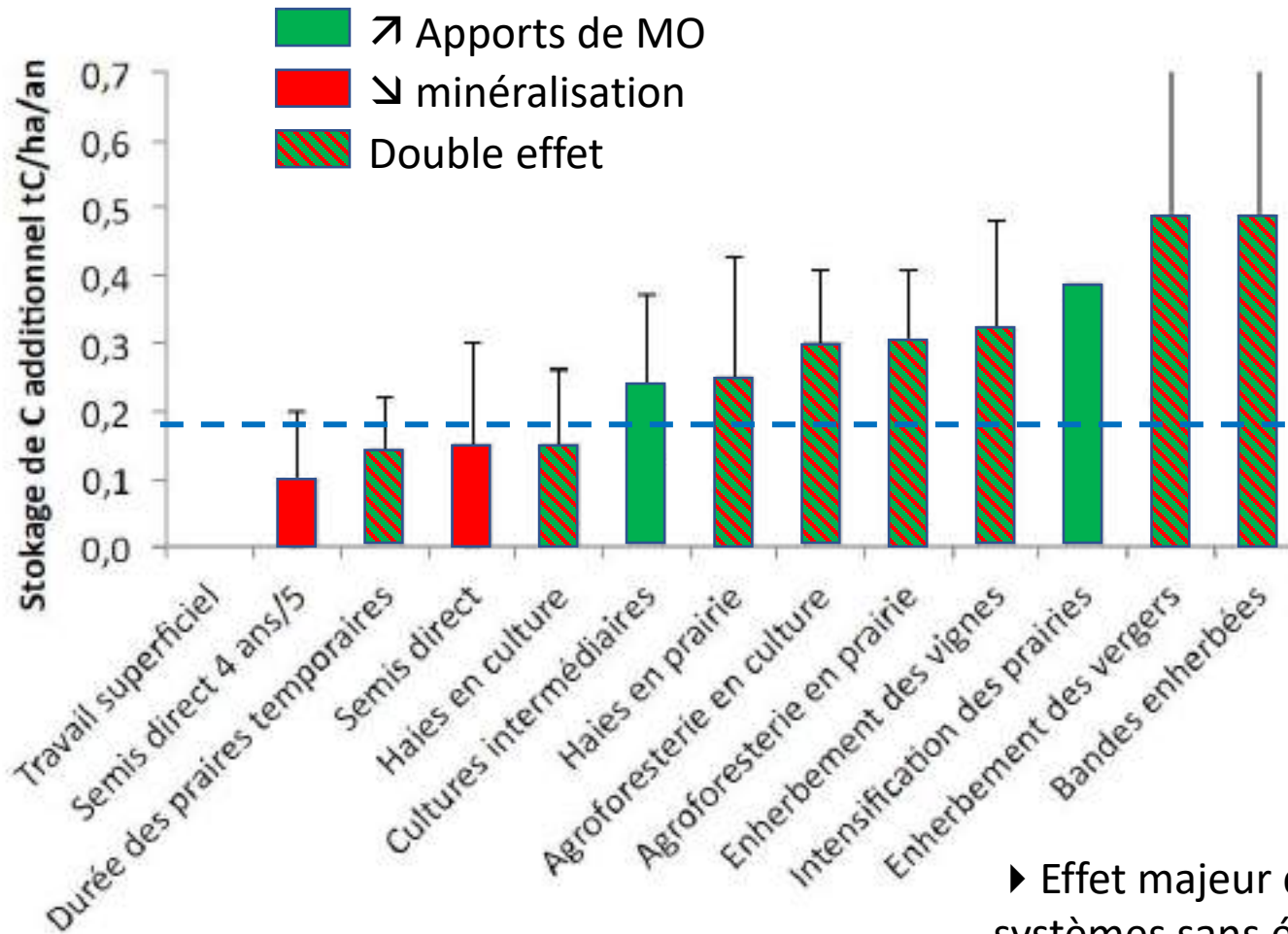
Restaurer les terres dégradées, par ex. les zones arides et semi arides du globe

➤ Pratiques favorables et incertitudes

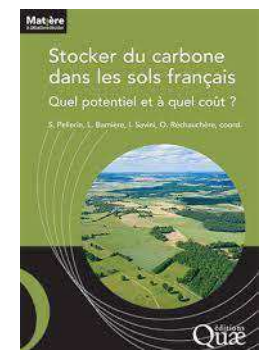
Innovations Agronomiques 37 (2014), 23-37

Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France

Chenu C.¹, Klumpp K.², Bispo A.³, Angers D.⁴, Colenne C.⁴, Metz A.⁵



► Il est plus efficace d'augmenter les entrées de C pour augmenter les teneurs en Corg des sols



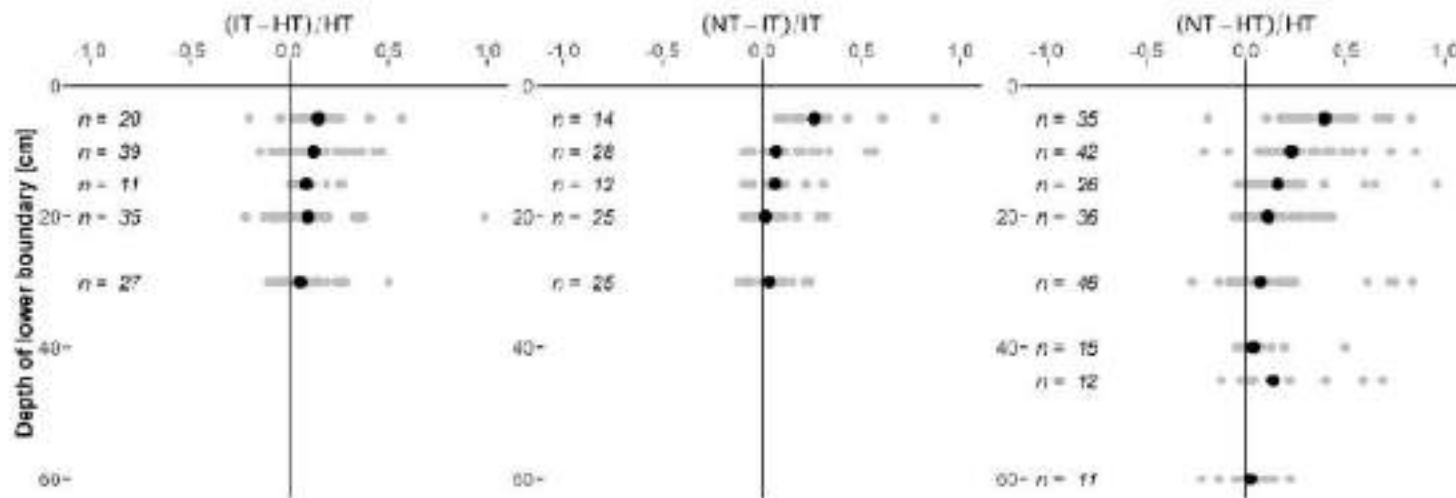
► Effet majeur des couverts végétaux en systèmes sans élevage

➤ Pratiques favorables et incertitudes

HT : travail du sol intensif avec retournement

IT : travail du sol sans retournement et < 40 cm

NT : aucun travail du sol

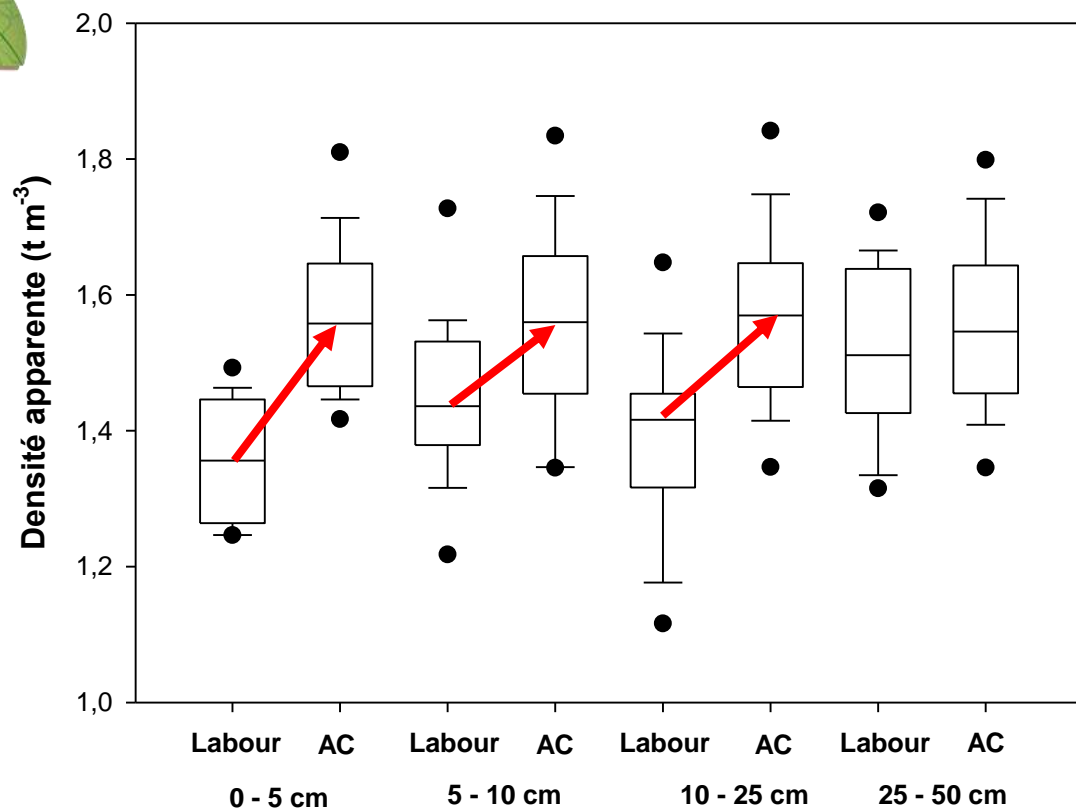


- ▶ La réduction / suppression du travail du sol prise isolément n'a que peu d'effet sur le stockage de Corg mais :
 - ▶ Réduit la minéralisation
 - ▶ Permet de localiser le C à la surface du sol : effets + sur la stabilité, le RU, l'infiltration, l'activité biologique
- levier favorisant la fertilité globale et la productivité du système

Pratiques favorables et incertitudes

Variabilité de la densité apparente sur Gleyic Luvisol (Boulbènes) du Gers

Effet du système de culture



► Densité apparente plus élevée en AC qu'en labour (= moins de porosité totale !)

- Influence sur les stocks :
- sur 5 cm d'épaisseur
 - Pour teneur $C_{org} = 2,5 \%$
 - Densité Labour : $1,36 \text{ t m}^{-3}$
 - Densité AC : $1,56 \text{ t m}^{-3}$

≠ 2,5 t de Corg / ha

➤ Pratiques favorables et incertitudes

Variabilité de la densité apparente sur Gleyic Luvisol (Boulbènes) du Gers

▶ Effet du système de culture



Dpt	Sol	Site	t C / ha
32	Luvisol	ACS	70 ± 4
		Labour	50 ± 3
64	Luvisol	ACS	116 ± 7
		Labour	113 ± 8
81	Luvisol	ACS	65 ± 4
		Labour	65 ± 6
81	Calcisol	ACS	70 ± 7
		Labour	55 ± 8
32	Calcisol	ACS	68 ± 8
32	Calcisol	ABC	59 ± 9

▶ sur des sols initialement pauvres :

- Augmentation des teneurs en C de 60 à 75 % en surface
- Stock global de C accru sur 0-60 cm (maximum +30 %)

▶ sur des sols riches :

- Pas de modification

▶ sur des sols peu contrastés au niveau des pratiques

- Pas de modification

Levier n°1 :
les couverts
végétaux !

Pratiques favorables et incertitudes

Effet des couverts végétaux

Projet SCARF :

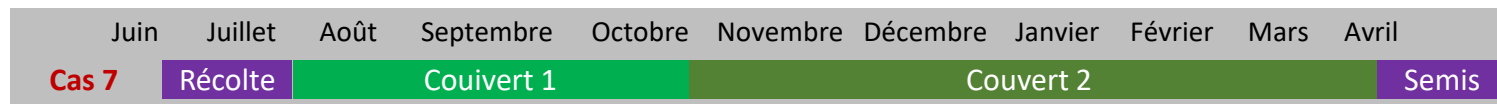


Climate-KIC is supported by the EIT, a body of the European Union 

► **Base de données** compilant les résultats d'essais conduits depuis 2004 au sein d'INRAE UMR AGIR ≈ **2 700 observations de couverts végétaux**



Exemple 1 : teneur en C dans les parties aériennes dans un couvert en relai de sorgho → féverole (n = 12)



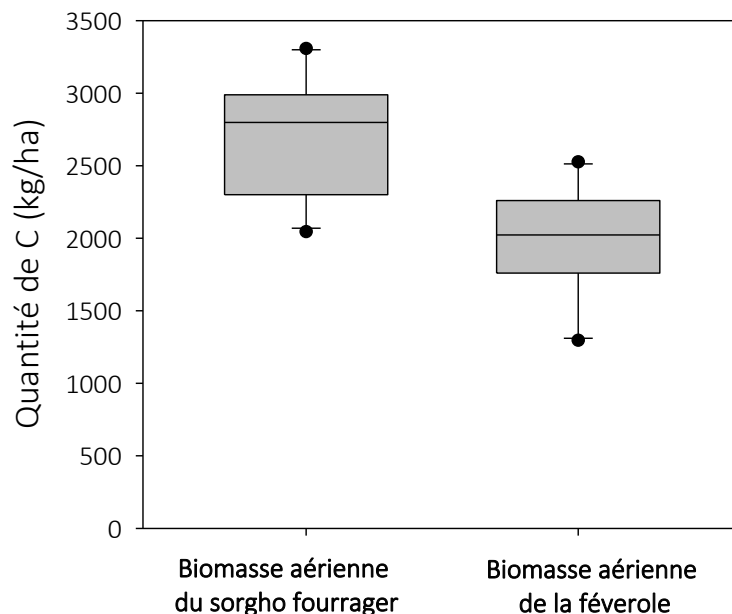
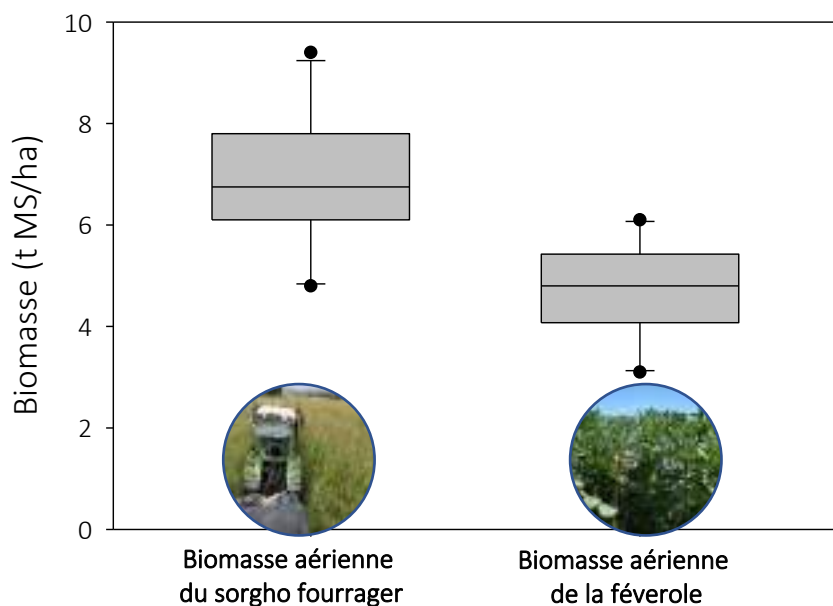
Exemple 2 : teneur en C dans les parties aériennes et racinaires de différentes espèces de crucifères et légumineuses (n = 1050)



Pratiques favorables et incertitudes

► Effet des couverts végétaux

Exemple 1 : quantité de C dans un couvert en relai (9 mois de cycle)



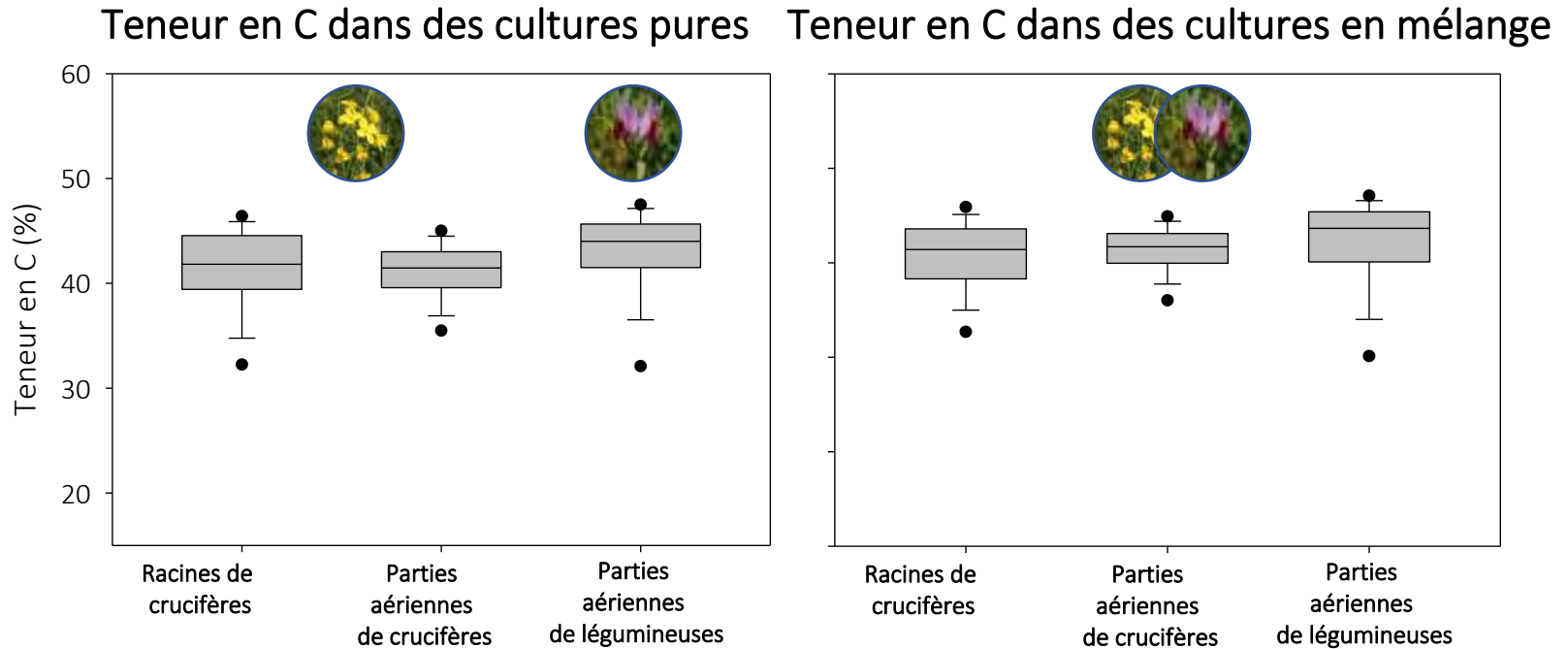
► Sur une longue période d'interculture (9 mois), **les couverts en relai** permettent de restituer d'importantes quantités de C / ha (> 4000 kg C/ha) → ≈ 500 – 600 kg de C_{org} du sol

► Pour optimiser la production de sorgho fourrager et les différents services associés, une irrigation (25-30 mm) peut parfois être nécessaire → règles de raisonnement à établir

Pratiques favorables et incertitudes

Effet des couverts végétaux

Exemple 2 : variabilité des teneurs en C dans des couverts végétaux (3 mois de cycle)



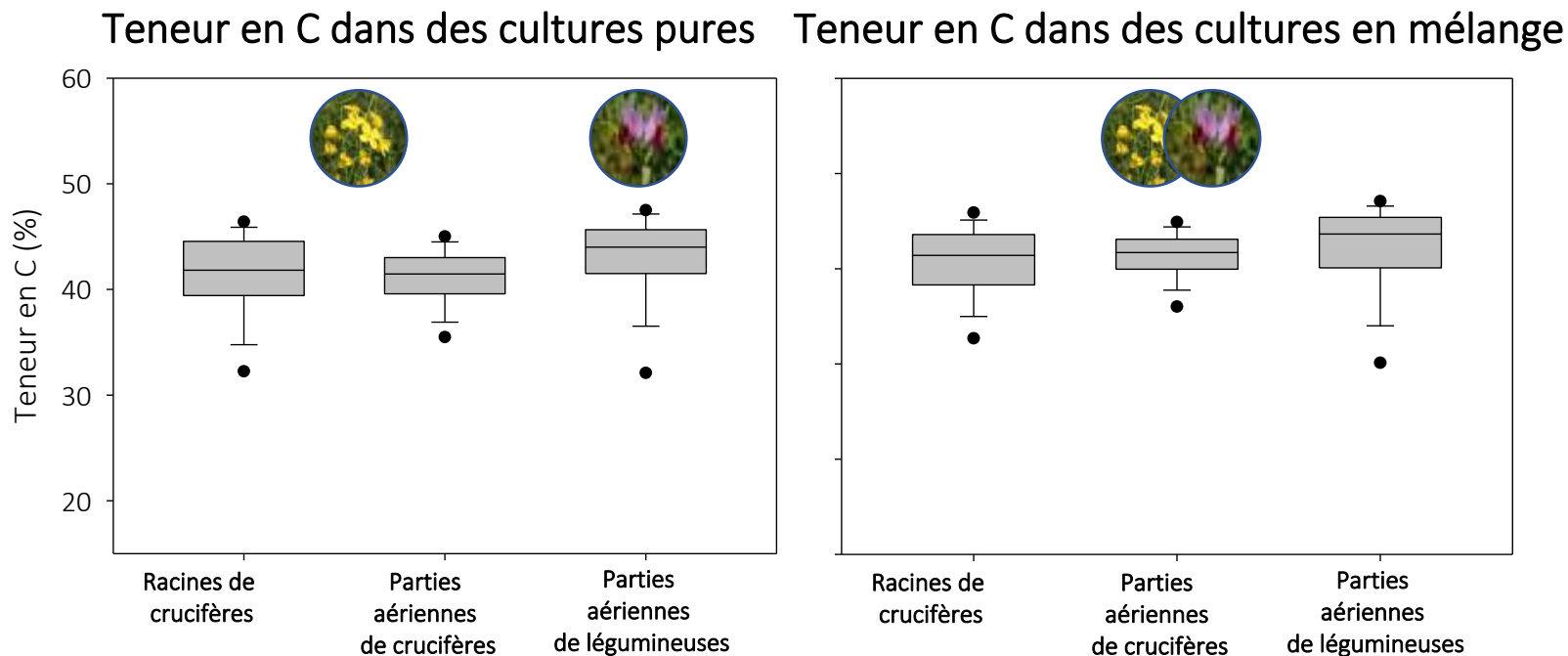
Moy. (±ET)	41.2 ± 4.5	41.0 ± 3.4	41.8 ± 4.7
Médiane	41.8	41.5	44.0

40.6 ± 4.3	41.2 ± 3.0	42.0 ± 5.1
41.4	41.7	43.6

➤ Pratiques favorables et incertitudes

▶ Effet des couverts végétaux

Exemple 2 : variabilité des teneurs en C dans des couverts végétaux (3 mois de cycle)



Moy. (±ET)	41.2 ± 4.5	41.0 ± 3.4	41.8 ± 4.7
Médiane	41.8	41.5	44.0

40.6 ± 4.3	41.2 ± 3.0	42.0 ± 5.1
41.4	41.7	43.6



Pratiques favorables et incertitudes

Effet des couverts végétaux

Exemple 2 : variabilité des teneurs en



Plant and Soil (2020) 210: 341–350
DOI 10.1007/s11104-019-4907-y

© Springer 2020

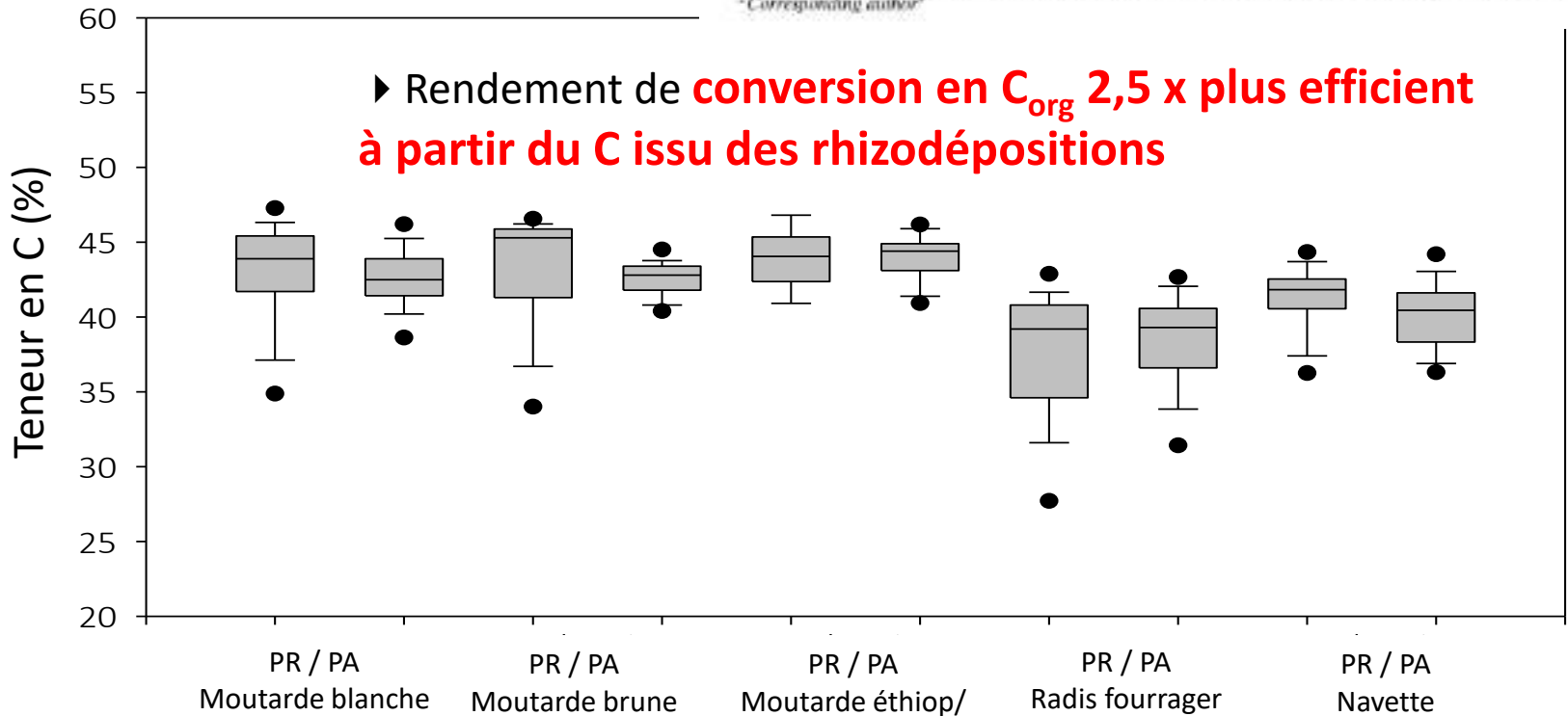
Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation

Daniel P. Rasse^{1,2}, Cornelia Rumpel¹ & Marie-France Dignac¹

¹UMR Biogéochimie des Milieux Continentaux, INRA-INAPG, Bâtiment EGÉ, 78850 Thiverval-Grignon, France.

²Corresponding author*

- Stratégie émergente « **si on veut stocker par la racine** » (Chenu Claire,

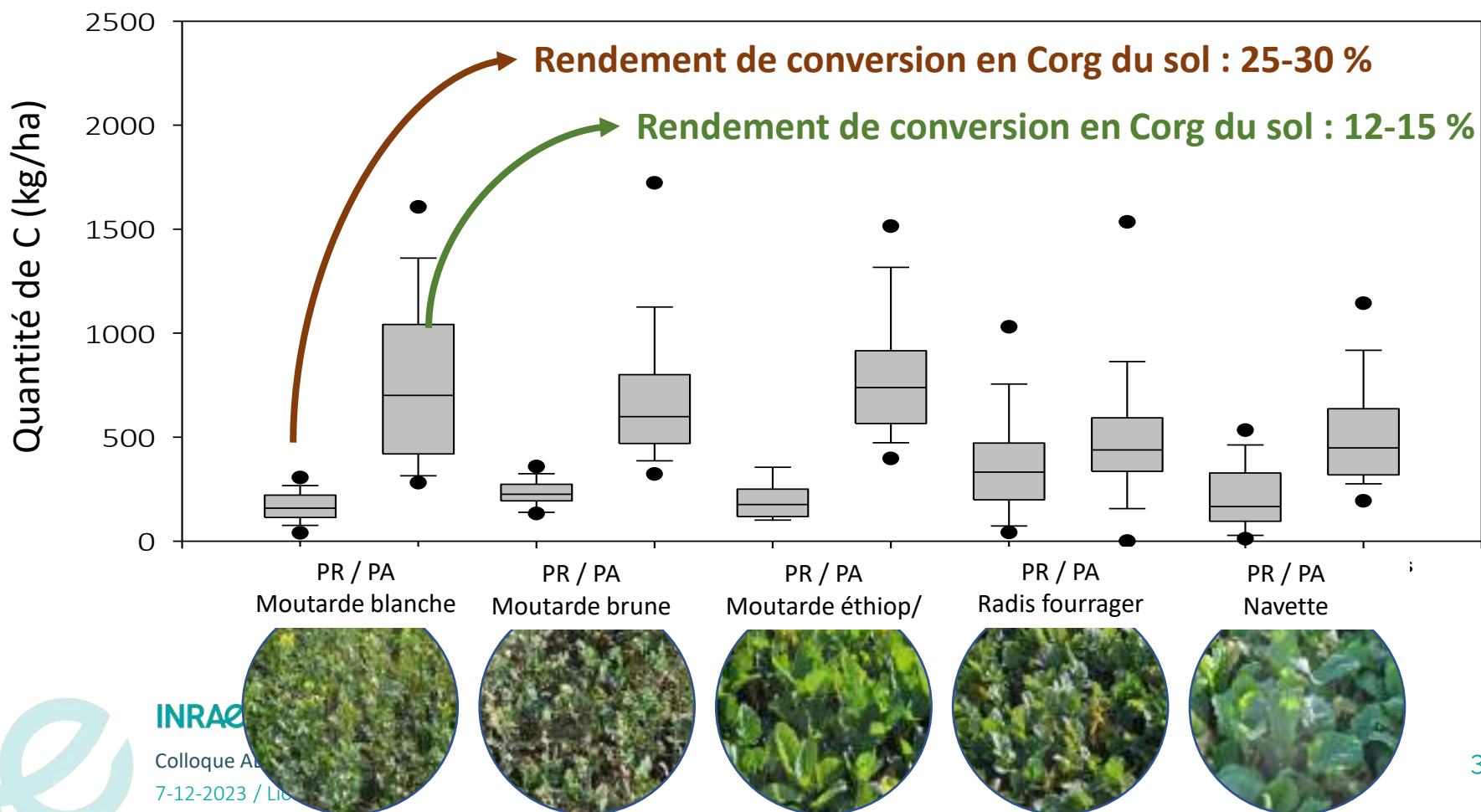


➤ Pratiques favorables et incertitudes

▶ Effet des couverts végétaux

Exemple 2 : variabilité des teneurs en C dans des couverts végétaux (3 mois de cycle)

- ▶ En cycle court, **forte variabilité des quantités de C** en culture pure de crucifères (de 150 à 3 100 kg C/ha)



Pratiques favorables et incertitu

Effet des couverts végétaux

Enjeux forts de sélection sur la base de traits racinaires !

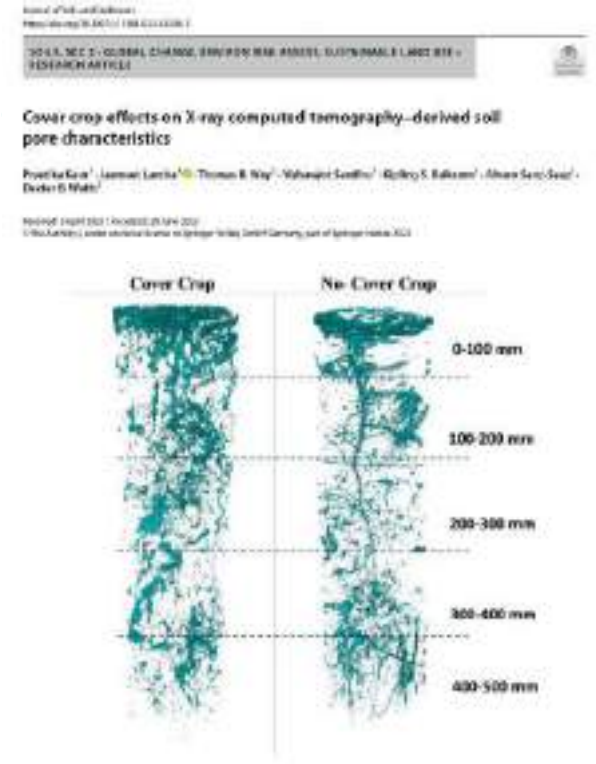
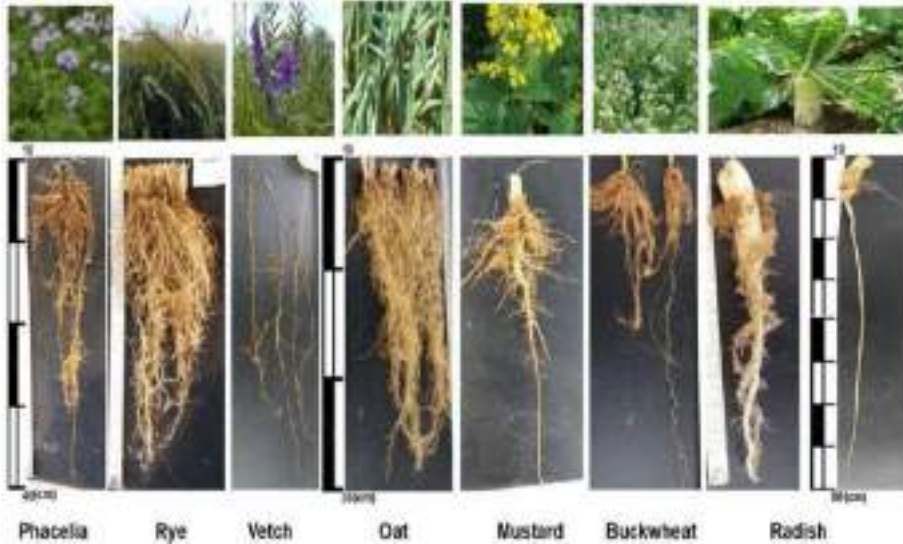


Fig. 1 3D Visualizations of macropore networks for soil columns under CC and NC treatments. The cyan color represents the soil pores

En plus des effets sur C : effet sur la porosité des sols (et propriétés associées)
 → Variable selon les espèces (Chen et Weil, 2010) et les systèmes racinaires avec porosité totale accrue pour les systèmes fasciculés fins (Hudek et al., 2021)

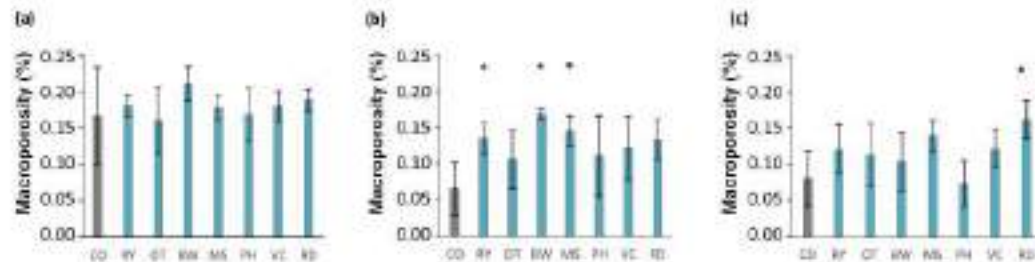
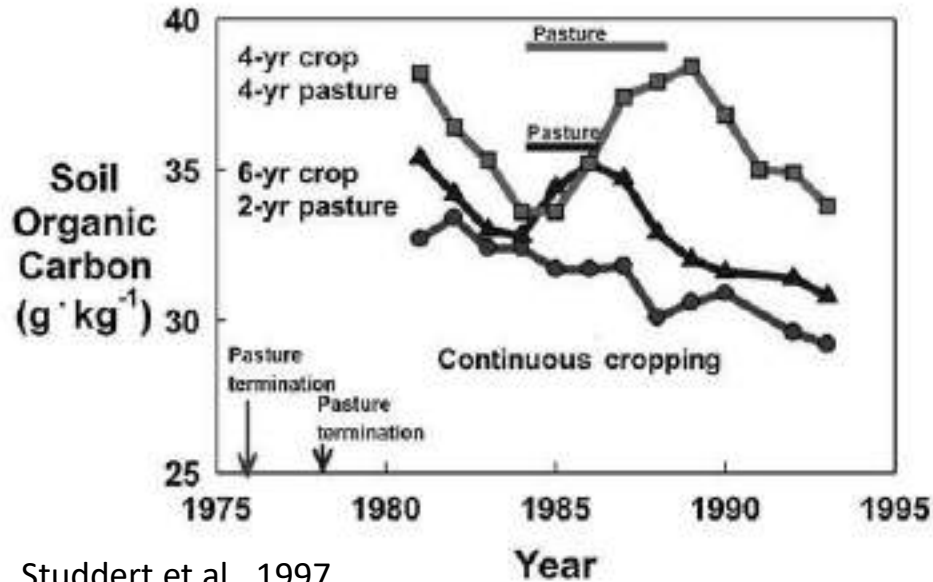


FIGURE 5 Detectable soil macroporosity (resolution >25 µm) of the soil with cover crop species (vetch (VC), radish (RI), oat (OT), buckwheat (BW), phacelia (PH), rye (RY), mustard (MS)), and the control bare soil (CO) as measured by X-ray computer tomography (CT) on samples collected at (a) 15, (b) 30 and (c) 50 cm soil depth. * Indicates significant differences computed to bare soil.

Pratiques favorables et incertitudes

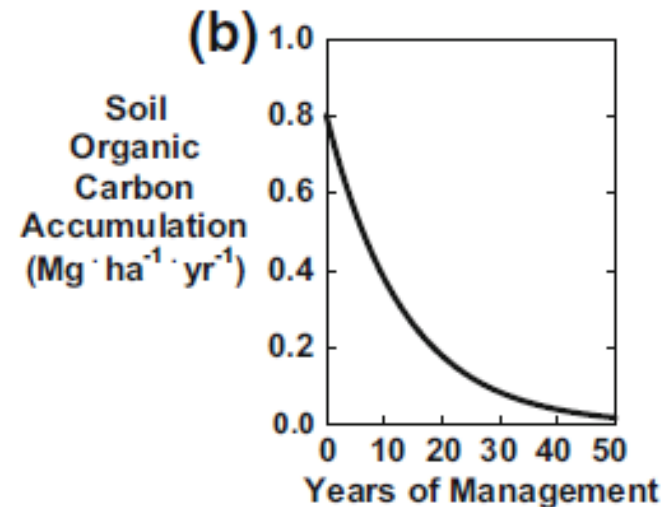
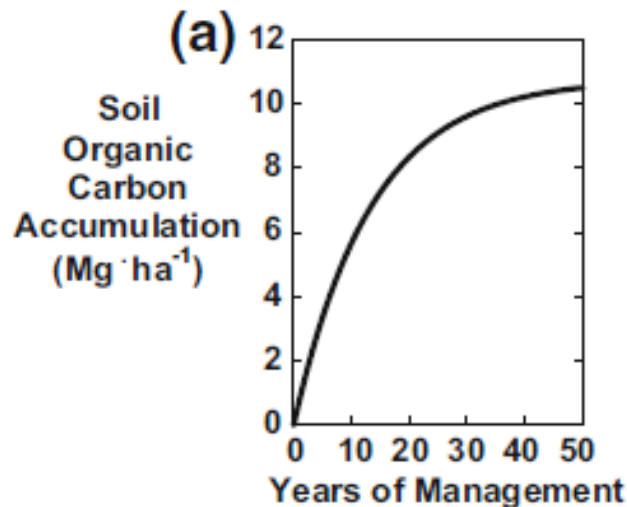
Effet des prairies



Studdert et al., 1997

► **Prairies temporaires** : levier performant de maintien / stockage du C sous conditions d'une « bonne » gestion

Franzluebbers et al., 2012

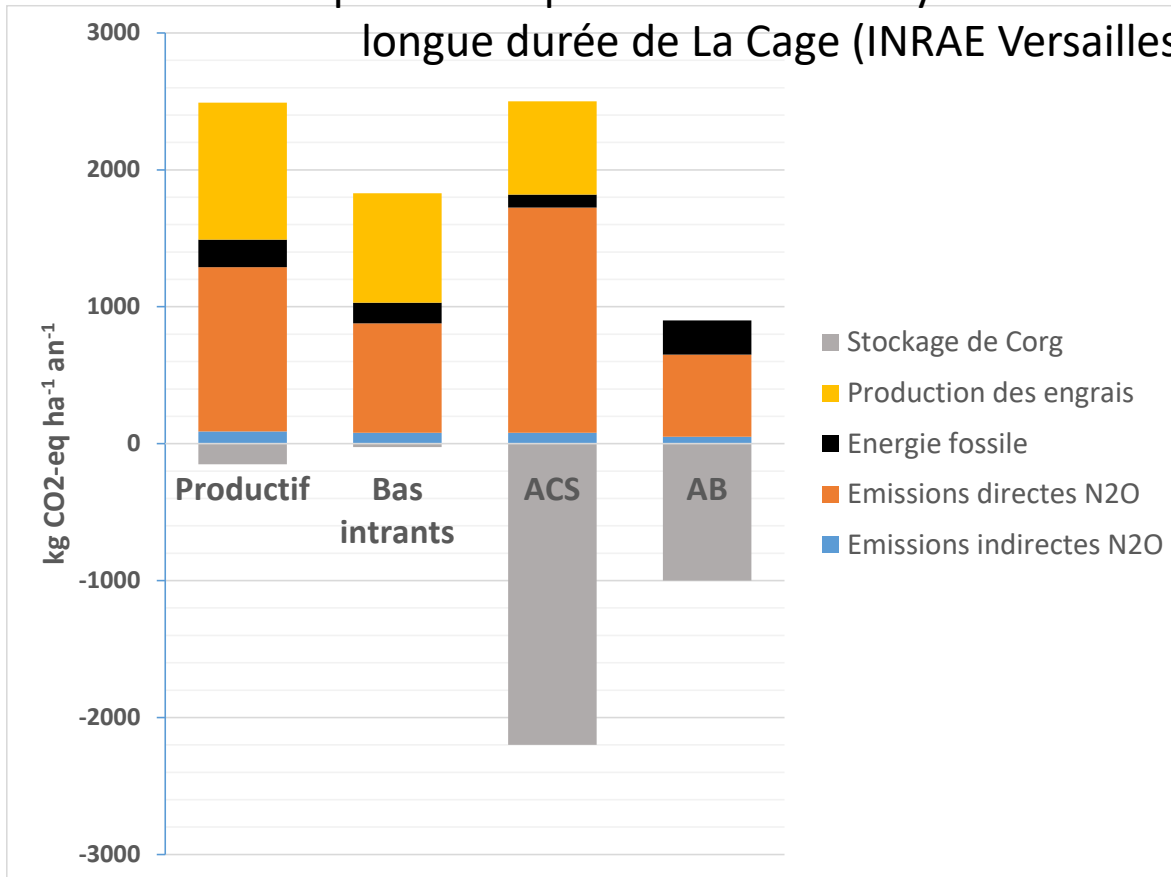


Pratiques favorables et incertitudes

et l'AB dans tout cela ??

- ▶ Encore peu de références sur du long terme de systèmes en AB et encore moins en ABC...

Dispositif d'expérimentation de systèmes de culture longue durée de La Cage (INRAE Versailles)



- ▶ Bilans GES : attention à faire une analyse complète des postes émetteurs !

- ▶ Stockage de C_{org} en AB : rôle probable des racines de luzerne (système basé sur 2 ans de luzerne puis 2 ans de blé tendre)

Autret, 2018

INRAE

Pratiques favorables et incertitudes

▶ et l'AB dans tout cela ??



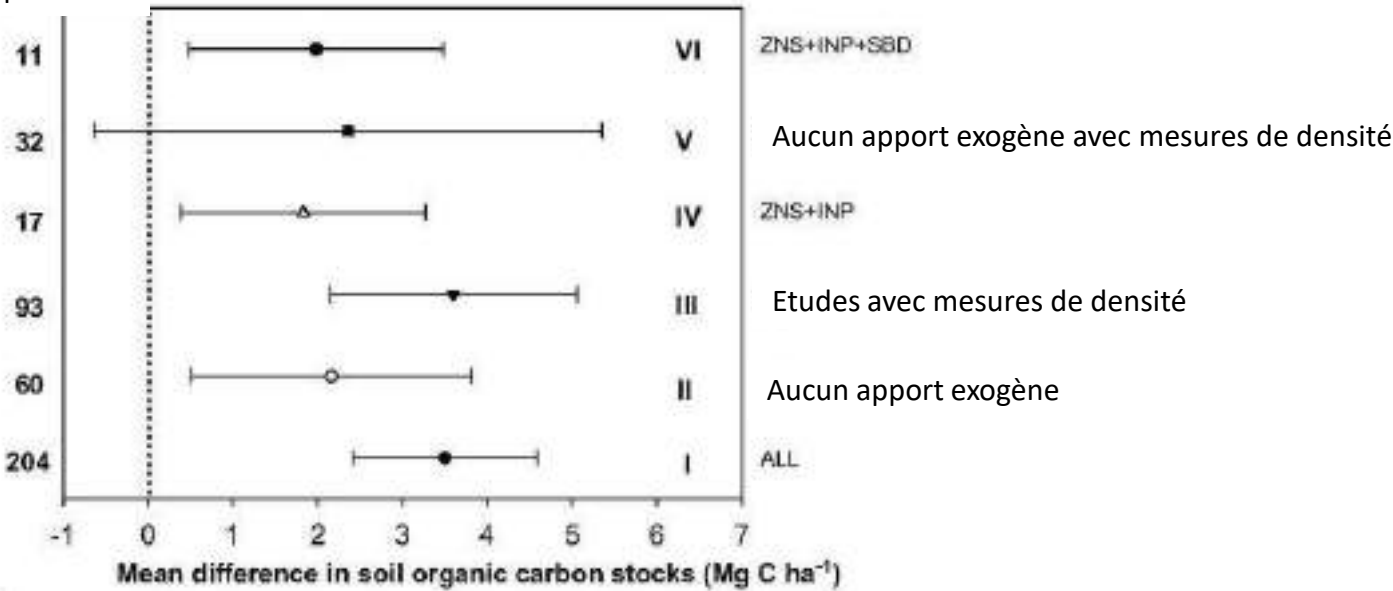
Enhanced top soil carbon stocks under organic farming

Andreas Göttinger^{1,2}, Adrian Müller³, Matthias Haeml^{4,5}, Colin Skinner⁶, Andreas Filasolach⁷, Mine Buchmann⁸, Paul Mäder⁹, Matthias Stolze⁹, Pete Smith⁹, Nodia El-Hage Scialabba⁹, and Urs Niggli⁹

¹Research Institute of Organic Agriculture, 8600 Frick, Switzerland; ²Institute of Agricultural Sciences, Eidgenössische Technische Hochschule Zurich, 8092 Zurich, Switzerland; ³Institute of Biological and Environmental Sciences, University of Aberdeen, Aberdeen AB24 3U, Scotland; and ⁴Natural Resource Management and ⁵Foreseesment Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 80700 Rome, Italy

Edited by William H. Schlesinger, Cary Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, NY, and approved August 15, 2012 (received for review June 3, 2012)

Nbre de comparaisons



▶ Les systèmes en **AB** sont souvent **bénéfiques pour les stocks de C** comparativement à des systèmes « conventionnels »

▶ Effets pas encore clairement attribués : rôle de légumineuses et des populations microbiennes (plus efficaces dans la conversion en C_{org}) ???



➤ Éléments de conclusion

Pour **éviter d'amplifier / réduire les effets du changement climatique** :

▶ Levier n°1 : **réduire les émissions de GES** dans les systèmes agricoles

→ Repenser la place et les types d'élevage : en systèmes bio, levier majeur de la fertilité des sols (et de gestion des adventices) !

▶ Levier n°2 : **préserver les stocks actuels** de C dans les sols

→ En France : lutter contre l'érosion des sols, cause principale des pertes en C à la parcelle ; lutte contre l'artificialisation (ZAN) ; préservation des milieux (zones humides, tourbières, ...)

➤ Éléments de conclusion

Pour **réduire les effets du changement climatique** :

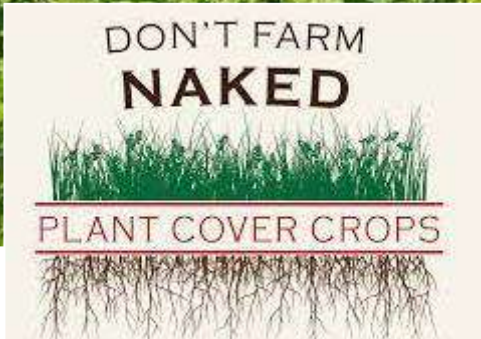
▶ Levier n°3 : **stocker du C dans les sols**

- Des leviers existent, avec des niveaux d'efficacité variables mais leur combinaison est toujours plus efficace que raisonnés séparément
- La productivité du système est importante : attention aux systèmes bio « déséquilibrés » (bio-miniers !)
- Raisonner l'allocation de l'eau d'irrigation : raisonnement systémique car ressource rare mais **cultiver du C dans les parcelles permet de relancer un cercle vertueux de fonctionnement des sols !**

Merci de votre attention

FairCarbon
Le carbone dans les écosystèmes continentaux :
leviers et trajectoires pour la neutralité carbone

**FRANCE
2030**
PROGRAMME
DE RECHERCHE
CARBONE ET
ÉCOSYSTÈMES
CONTINENTAUX



INRAE
Colloque ABC – C du sol
7-12-2023 / Lionel Alletto