

14

Décembre  
2023

*Colloque Agriculture de Conservation*

➤ Contribution de l'Agriculture de Conservation des Sols  
à la Transition Agroécologique :  
*Fertilité des sols et Gestion de l'eau*

**Lionel Alletto\***

\*UMR Agroécologie, Innovations, Territoires  
[lionel.alletto@inrae.fr](mailto:lionel.alletto@inrae.fr)



## ➤ Plan de l'exposé

- ▶ Éléments généraux / contexte
- ▶ L'agriculture de conservation : quels effets sur la fertilité des sols ?
- ▶ L'agriculture de conservation comme voie d'amélioration du fonctionnement hydrique des sols ?
- ▶ Perspectives



# ➤ Éléments généraux / contexte

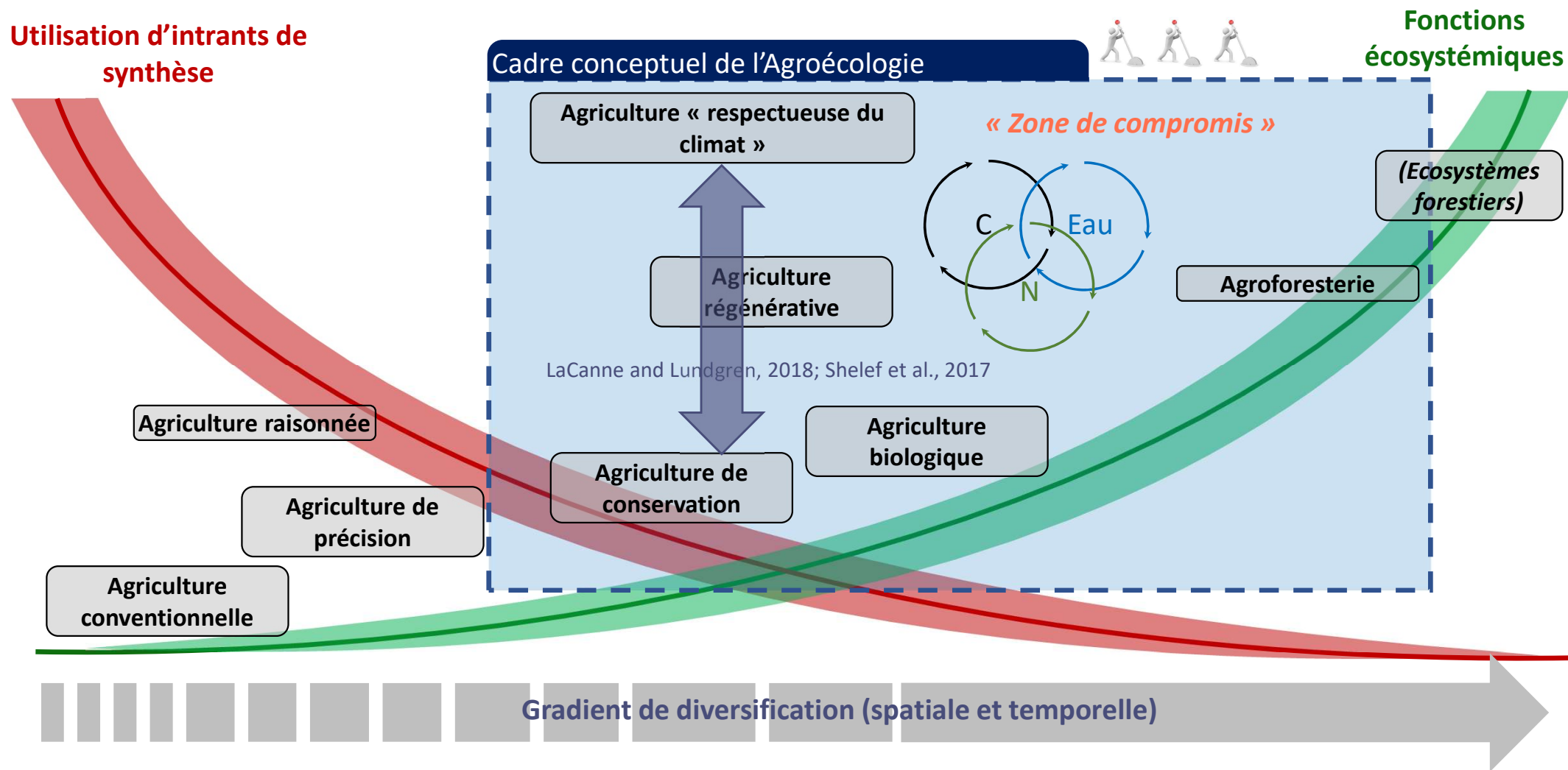


# ➤ Qu'est-ce que l'Agroécologie ?

- **Ensemble disciplinaire** alimenté par le croisement des sciences agronomiques, de l'écologie appliquée aux agroécosystèmes et des sciences humaines et sociales (Tomich et al., 2011)
- Alternative à une agriculture intensive basée sur l'artificialisation des cultures par l'usage d'intrants de synthèse (engrais, pesticides...) et d'énergies fossiles.  
Elle promeut des systèmes de production agricole valorisant la **diversité biologique** et les **processus naturels** (cycles de l'azote, du carbone, de l'eau, équilibres biologiques entre organismes ravageurs et auxiliaires des cultures...) (Hazard et al., 2016)
- Dans son acception la plus large, l'agroécologie vise à **promouvoir des systèmes alimentaires viables** respectueux des hommes et de leur environnement (Gliessmann, 1998)



# ➤ Qu'est-ce que l'Agroécologie ?





➤ En quoi l'agroécologie permet-elle de régénérer les sols ?



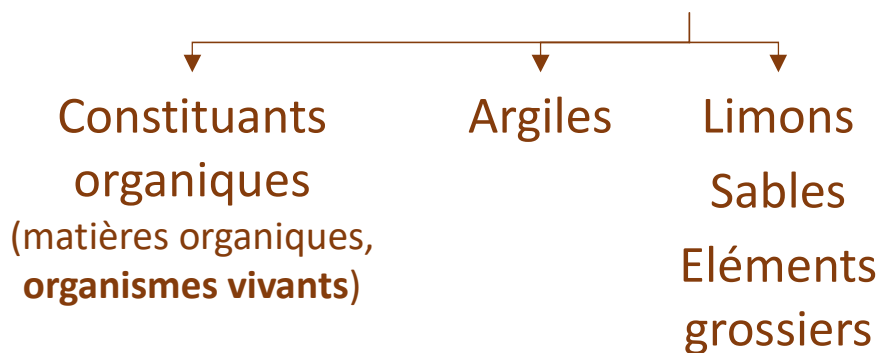
**INRAE**

Contribution de l'Agriculture de Conservation des Sols à la Transition Agroécologique

14-12-2023, Lionel Alletto

# ➤ Le Sol, en quelques mots...

▶ 3 fractions : **solide**  
(en volume) 45 ⇔ 60 %

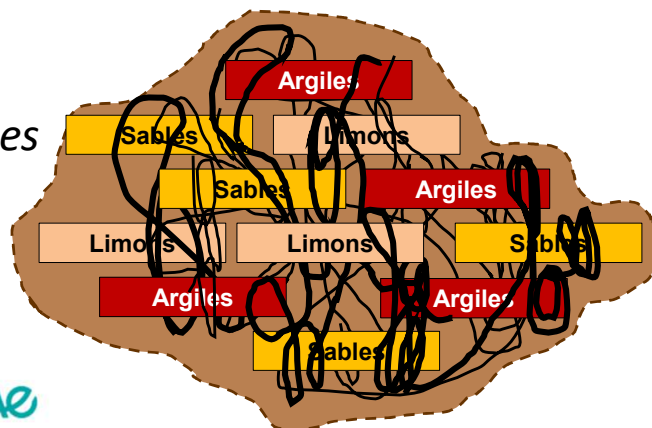


**liquide**  
5 ⇔ 55 %  
↓  
Solution du sol  
(éléments minéraux & organiques, organismes, polluants)

**gazeuse**  
0 ⇔ 50 %  
↓  
« Air du sol »  
(composition ≠ de l'air ambiant : + riche en CO<sub>2</sub>)

Structure du sol

Agencement tridimensionnel des particules

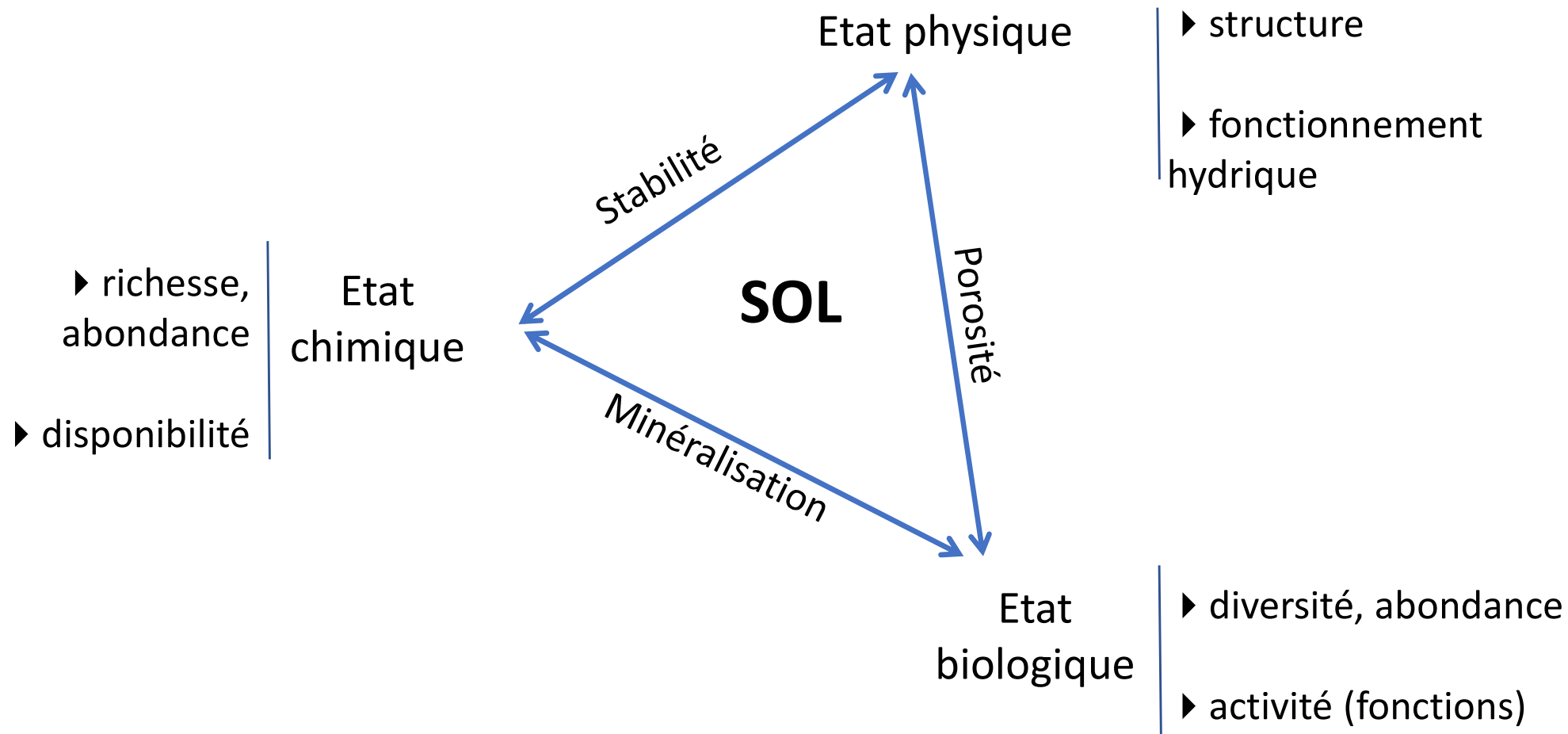


INRAE

Contribution de l'Agriculture de Conservation des Sols à la Transition Agroécologique

14-12-2023, Lionel Alletto

# ➤ Le Sol : un système interactif et dynamique





# ➤ Le Sol, ou plutôt LES Sols...

Sol brun lessivé



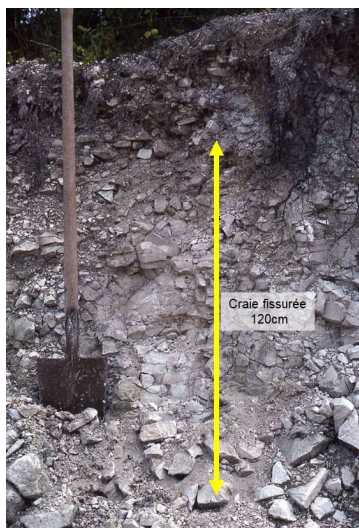
Sol brun sur substrat calcaire



Sol brun lessivé



Sol sur craie fissurée



Sol ferrallitique



Podzol



*une grande diversité mais des principes communs de fonctionnement*



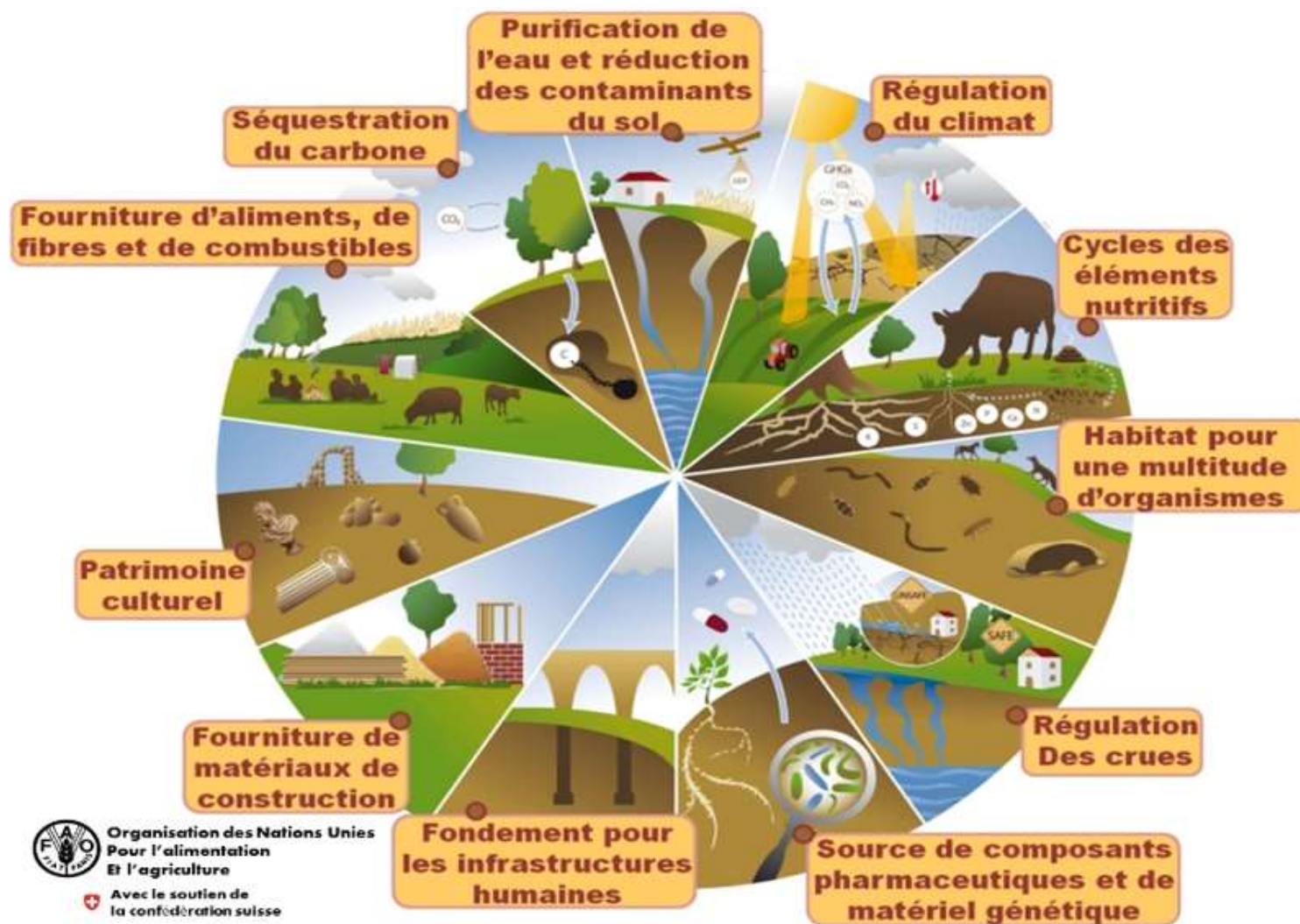
INRAE

Contribution de l'Agriculture de Conservation des Sols à la Transition Agroécologique

14-12-2023, Lionel Alletto

# ➤ Éléments généraux / contexte

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



INRAE

Contribution de l'Agriculture de Conservation des Sols à la Transition Agroécologique

14-12-2023, Lionel Alletto

## ➤ Éléments généraux / contexte

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



ECHELLE LOCALE ←

→ ECHELLE GLOBALE

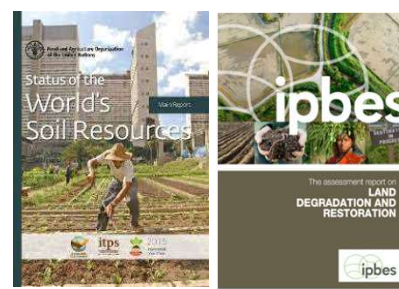


INRAE

Contribution de l'Agriculture de Conservation des Sols à la Transition Agroécologique

14-12-2023, Lionel Alletto

# ➤ Éléments généraux

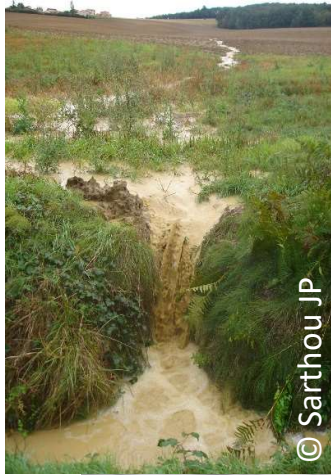


**33 %**  
modérément à  
sévérement dégradés

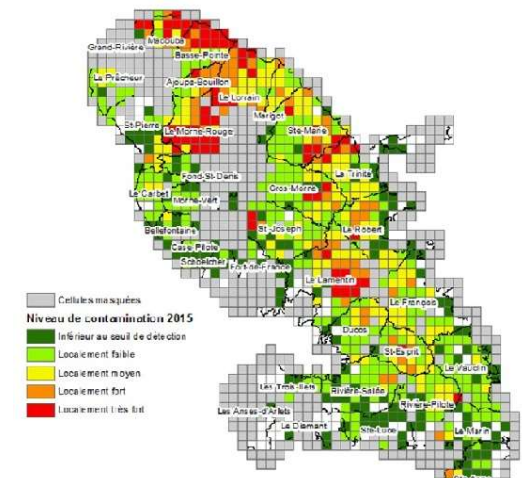
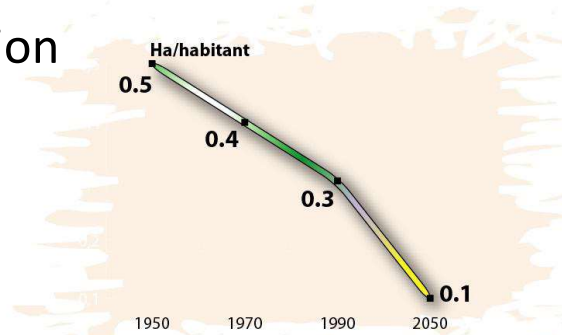
## Le Sol : ressource non renouvelable à l'échelle d'une génération...

=> De nombreuses causes de dégradation :

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



© Sarthou JP



## Rôle majeur du C du sol pour répondre à ces problèmes

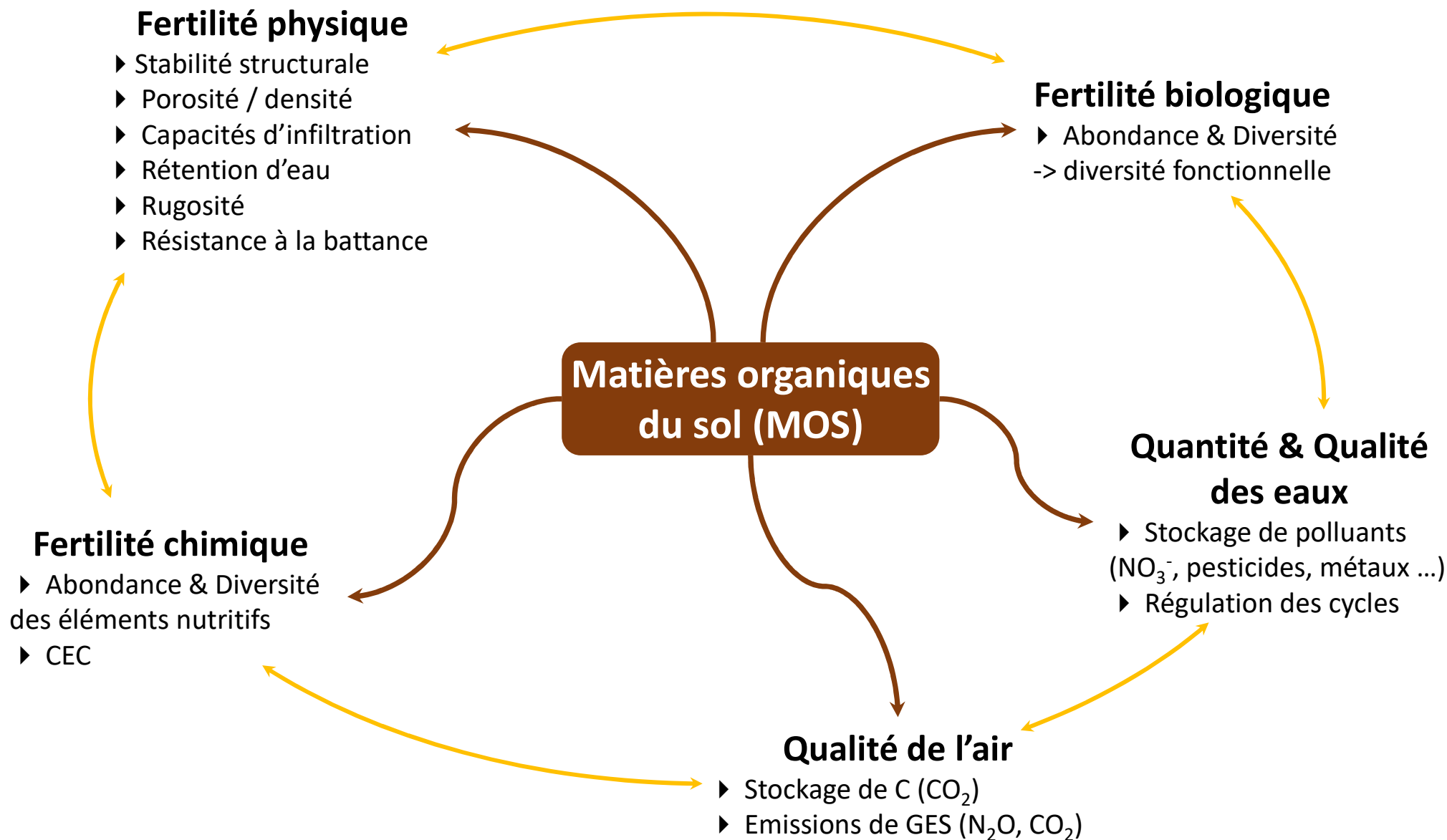


**INRAE**

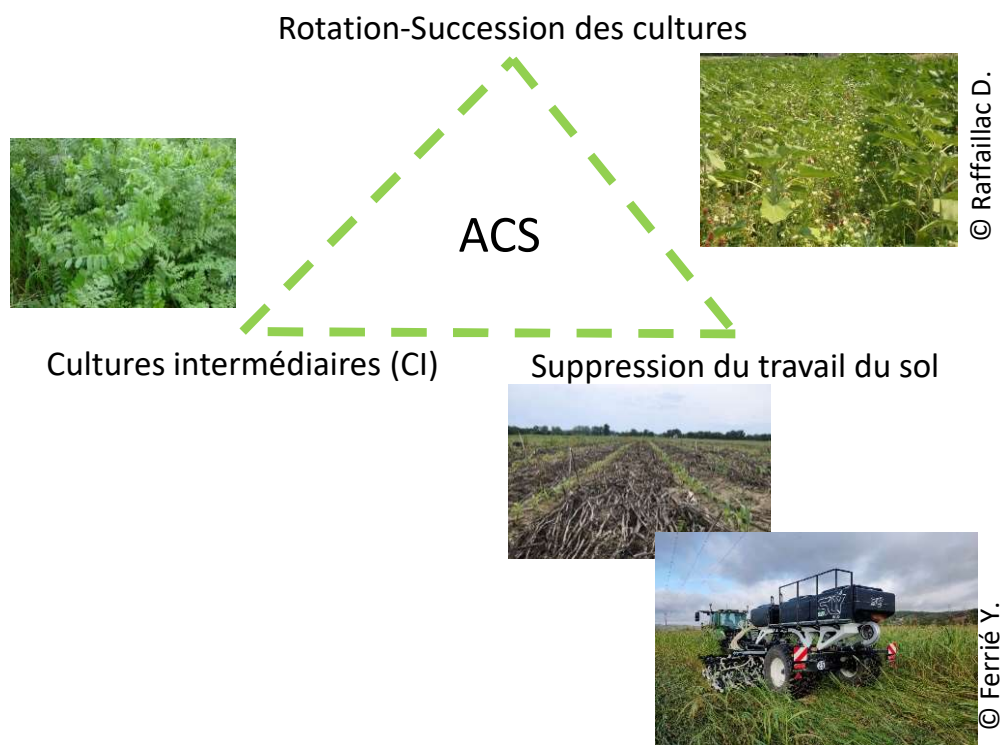
Contribution de l'Agriculture de Conservation des Sols à la Transition Agroécologique

14-12-2023, Lionel Alletto

# ➤ Éléments généraux / contexte



## ➤ L'agriculture de conservation : quels effets sur la fertilité des sols ?



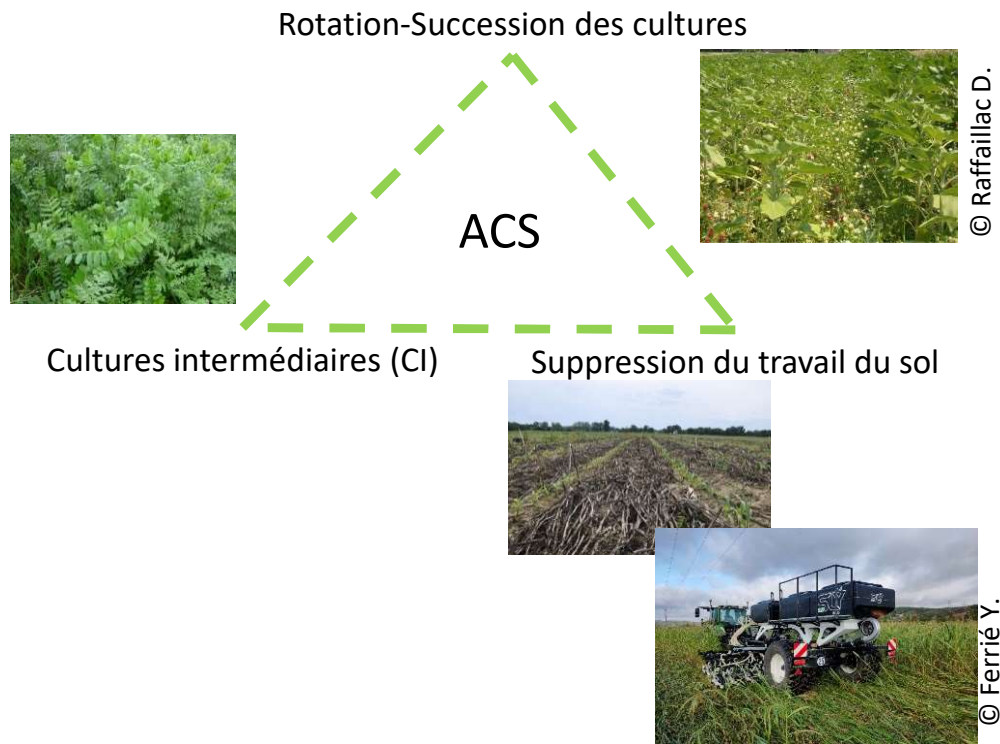
### ► Stratification du C : **pas d'effet clair sur la minéralisation et la libération d'N**

- Réduction du travail du sol = ralentissement de la minéralisation ? (Balesdent et al., 2000)

- Hypothèse non vérifiée sur le dispositif de longue durée de Boigneville (Oorts et al., 2007) ou sur d'autres études comparant différentes modalités de travail du sol (Mary et al., 2020)

Mais peu d'études en ACS incluant notamment des couverts végétaux détruits tardivement : modification de la dynamique annuelle de la minéralisation pour un bilan annuel équivalent ?

# ➤ L'agriculture de conservation : quels effets sur la fertilité des sols ?



- ▶ Stratification des éléments nutritifs (P, K, autres) observée dans différentes situations (Bouthier et Labreuche, 2014 ; Deubel et al., 2011) principalement en labour...
  - niveau de fertilisation
  - propriétés physicochimiques des sols favorisant (ou non) la disponibilité pour les plantes
  - gestion des résidus de cultures ou de couverts
- ▶ Pas d'effets clairs sur l'alimentation minérale des plantes (Li et al, 2017)

Mais encore peu d'études en ACS et nombreuses questions sur interactions plantes-microorganismes...



INRAE

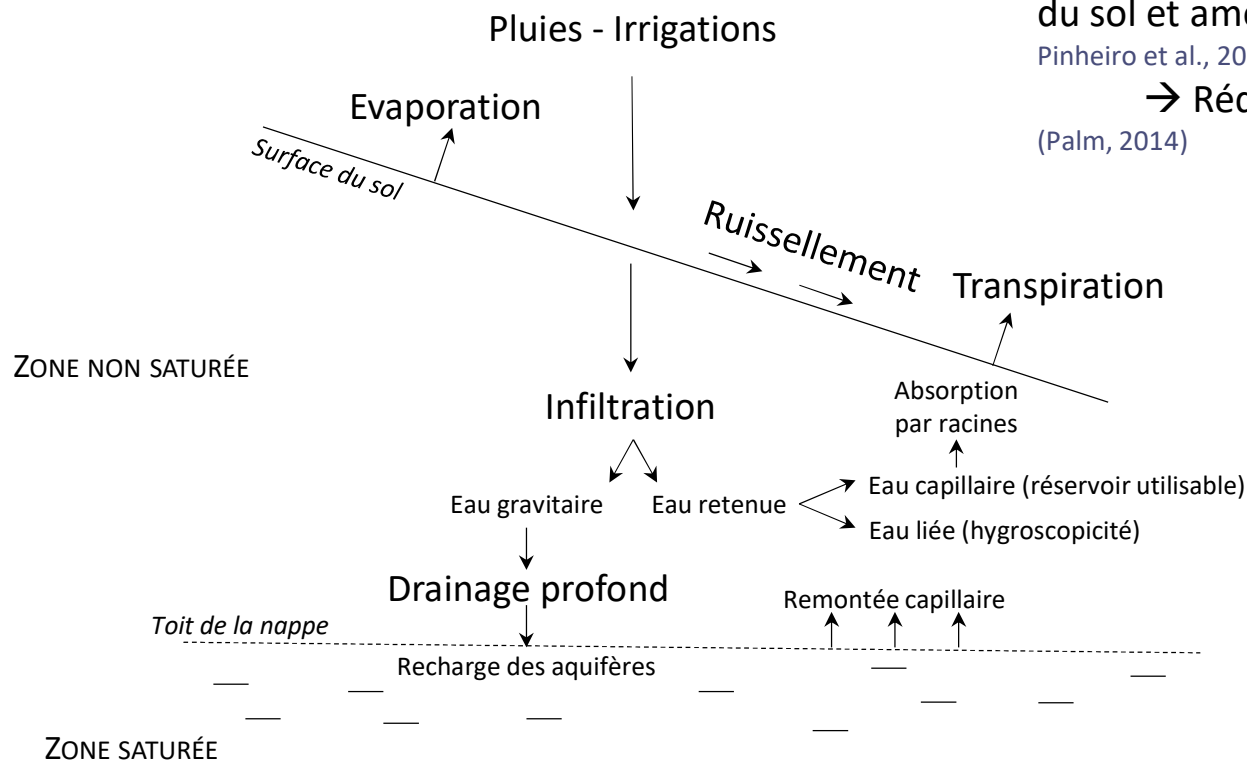
Contribution de l'Agriculture de Conservation des Sols à la Transition Agroécologique

14-12-2023, Lionel Alletto

# ➤ L'agriculture de conservation comme voie d'amélioration du fonctionnement hydrique des sols ?

*Effet sur cycle de l'eau dans les sols :*

- ▶ **LEVIERS 1&2** : réduire l'énergie cinétique des pluies et accroître la stabilité des agrégats
  - Accroissement des teneurs et stocks de C en surface du sol et amélioration de la stabilité des agrégats (Six et al., 2000; Pinheiro et al., 2004)
  - Réduction du ruissellement et de l'érosion des sols (Palm, 2014)





# ➤ L'agriculture de conservation comme voie d'amélioration du fonctionnement hydrique des sols ?



2016-2021

## Bassin Adour-Garonne : Quelles performances de pratiques AGroEcologues ?

INRAE

ARVALIS  
Institut du végétal



## Effet sur cycle de l'eau dans les sols :

- ▶ **LEVIERS 1&2** : réduire l'énergie cinétique des pluies et accroître la stabilité des agrégats
  - Accroissement des teneurs et stocks de C en surface du sol et amélioration de la stabilité des agrégats (Six et al., 2000; Pinheiro et al., 2004)
  - Réduction du ruissellement et de l'érosion des sols (Palm, 2014)
- ▶ **LEVIER 3** : retenir plus d'eau dans le sol ?
  - importance (relative) du C ? (Bagnall et al., 2022 vs. Minasny and McBratney, 2018)
  - connectivité du réseau poral ? (Wardak et al., 2022)
- ▶ **LEVIER 4** : améliorer les capacités d'infiltration ?  
Effets contrastés du non-travail du sol (Arshad et al., 1999; Gomez et al., 1999) mais peu d'études comparent rigoureusement des systèmes ayant des conditions initiales de sol équivalentes (Strudley et al., 2008)
- ▶ **LEVIER 5** : mieux valoriser le réservoir utilisable ?
  - influence de l'activité microbologique (mycorhize) ?
  - prospection racinaire ?

INRAE

Contribution de l'Agriculture de Conservation des Sols à la Transition Agroécologique

14-12-2023, Lionel Alletto

# ➤ BAG'AGES en bref



## ➤ Questions de recherche traitées

Quels sont les effets des pratiques agroécologiques (AC et Agroforesterie) sur le cycle de l'eau ?

Quantité d'eau stockée et dynamique dans le sol

Infiltration, ruissellement, transfert aux cours d'eau

Transfert de polluants (nitrate, pesticides) aux cours d'eau

Compatibilité qualité/quantité d'eau

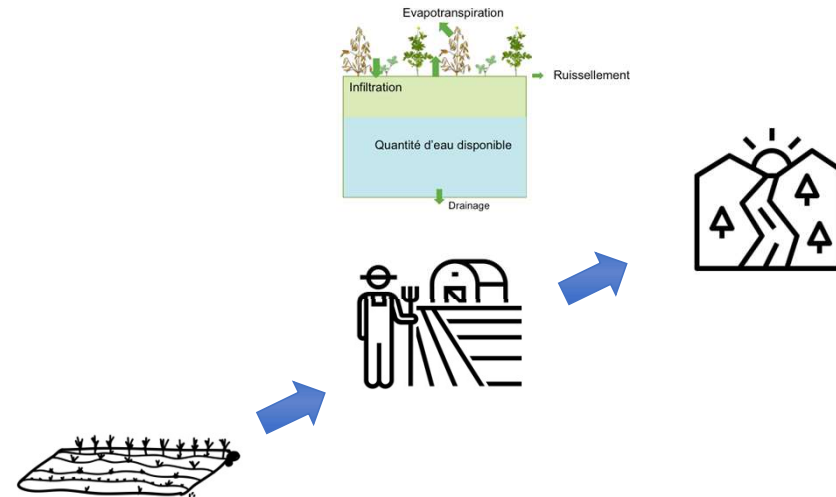
Quels effets de ces systèmes :

Dans les diverses situations pédoclimatiques du BAG ?

Sur les performances des exploitations ?

A l'échelle du bassin versant ?

Quelle vulnérabilité face au changement climatique ?



**Sites « différenciés » (8-20 ans en AC) = pas d'information sur la période de transition**



INRAE

Contribution de l'Agriculture de Conservation des Sols à la Transition Agroécologique

14-12-2023, Lionel Alletto

# ➤ Caractérisation du fonctionnement hydrique en AC

## Sites et systèmes de culture

4 sites couples ; 3 types de sol

Agriculture conventionnelle

Agriculture de conservation



3 sites simples ; 3 types de sol

Agriculture de conservation



## Estimation de propriétés physiques des sols

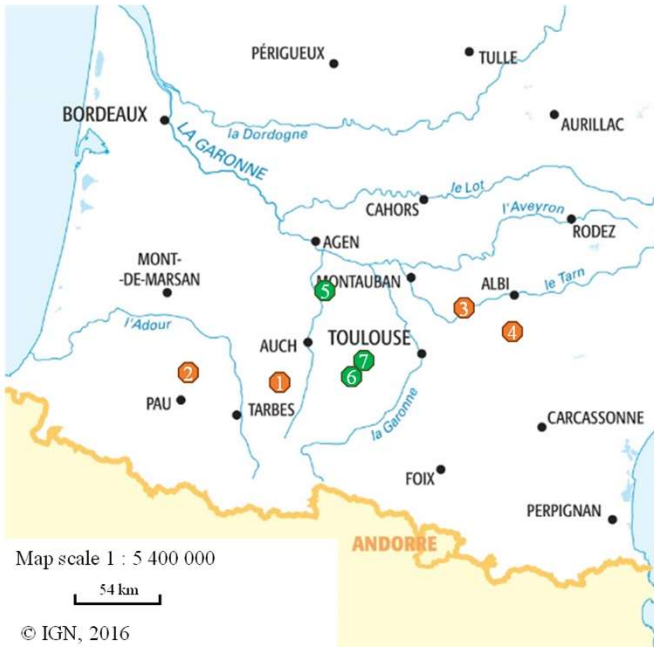
Conductivité hydraulique ( $K$ ) et masse volumique apparente ( $\rho_b$ )

Réservoir utilisable des sols



## Evaluation agronomique

Prospection racinaire  
Colonisation par mycorhizes (maïs)



ii "couple site": one plot under conservation agriculture and one plot under conventional agriculture (including ploughing)    ii "single site": one plot under conservation agriculture



## ➤ LEVIER 2 : stabiliser les agrégats des sols par un accroissement des teneurs en carbone des sols



### ▶ sur des sols initialement pauvres (32 ; 81) :

→ Augmentation des teneurs en C de 60 à 75 % en surface

→ Stock global de C accru sur 0-60 cm (maximum +30 %)

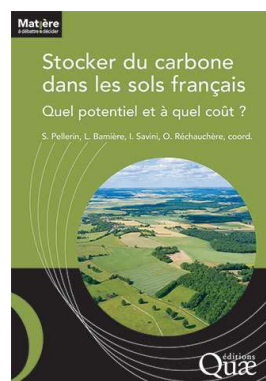
### ▶ sur des sols riches (64) :

→ Pas de modification

### ▶ sur des sols peu contrastés au niveau des pratiques (81)

→ Pas de modification

| Dpt | Site        | t C / ha |
|-----|-------------|----------|
| 32  | AC (20 ans) | ≈ 70     |
|     | Labour      | ≈ 50     |
| 64  | AC (10 ans) | ≈ 116    |
|     | Labour      | ≈ 113    |
| 81  | AC (8 ans)  | ≈ 65     |
|     | Labour      | ≈ 65     |
| 81  | AC (30 ans) | ≈ 84     |
|     | Labour      | ≈ 64     |



(Pellerin et al., 2019)



## ➤ LEVIER 2 : stabiliser les agrégats des sols par un accroissement des teneurs en carbone 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)

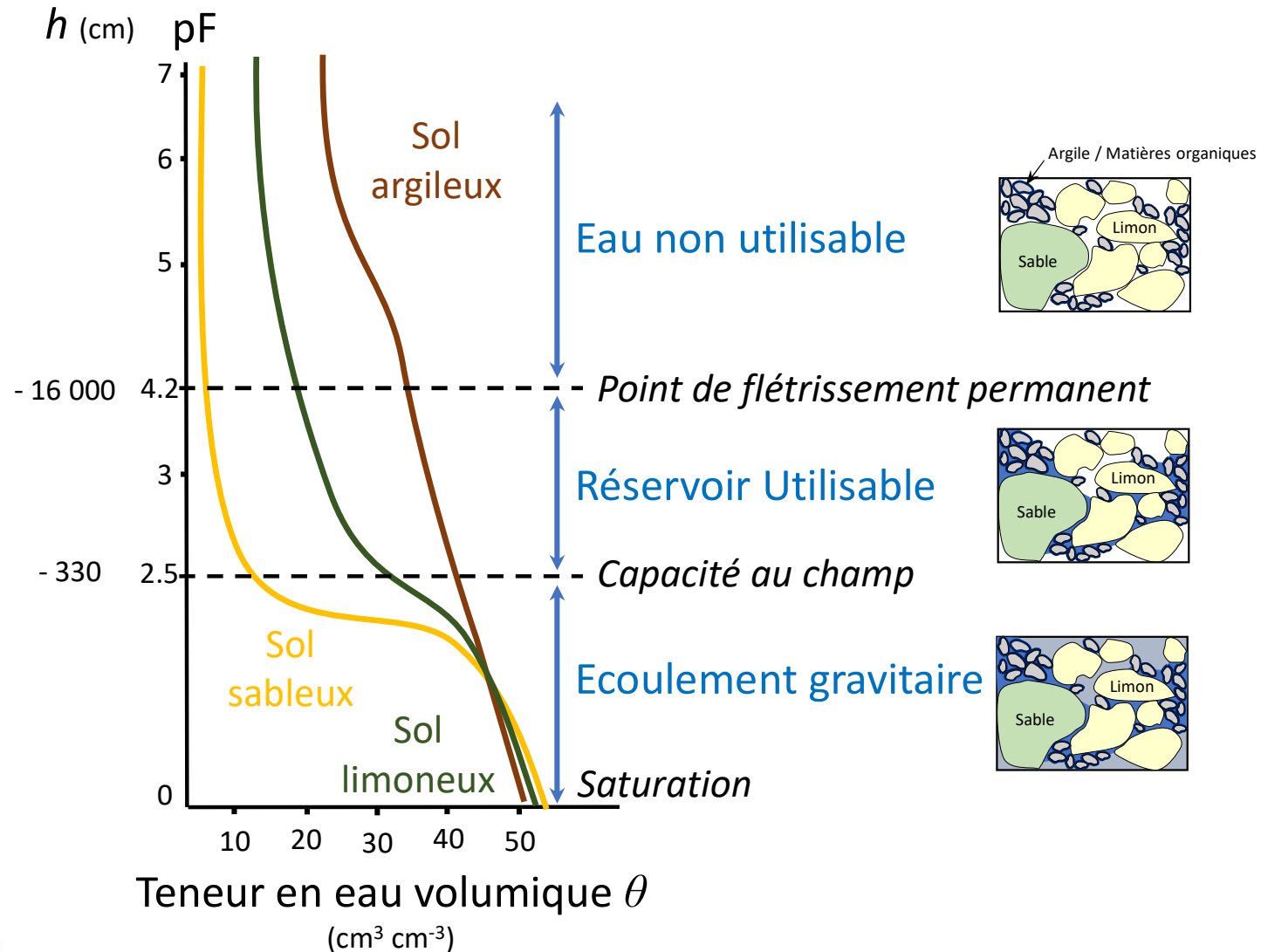
sur 60 cm d'épaisseur, sur sol en agriculture de conservation depuis 20 ans





## ➤ LEVIER 3 : retenir plus d'eau dans le sol ?

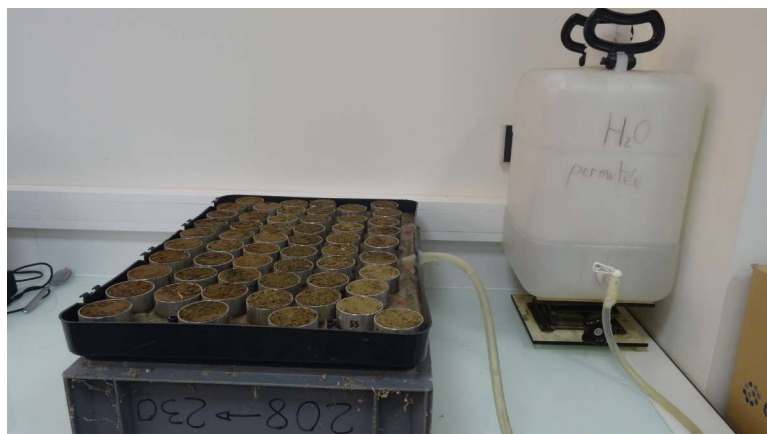
➤ Qu'est que le Réservoir Utilisable (RU) d'un sol ?





## ➤ LEVIER 3 : retenir plus d'eau dans le sol ?

- mesure de la rétention d'eau sur Presses de Richards





## ➤ LEVIER 3 : retenir plus d'eau dans le sol ?



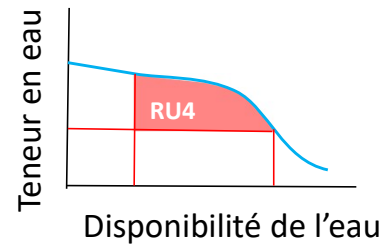
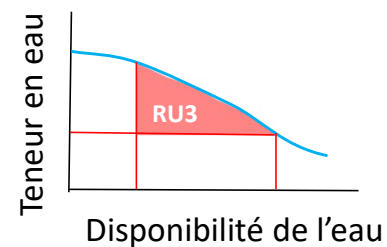
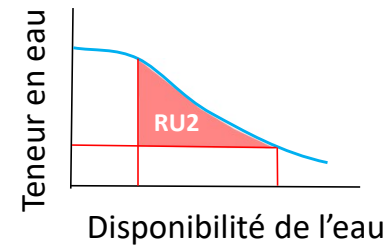
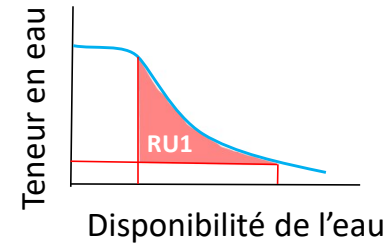
0-30 cm : horizon  
« travaillé »

30-50 cm : Bt1

50-65 cm : Bt2

65-110 cm : C1

>110 cm : C2



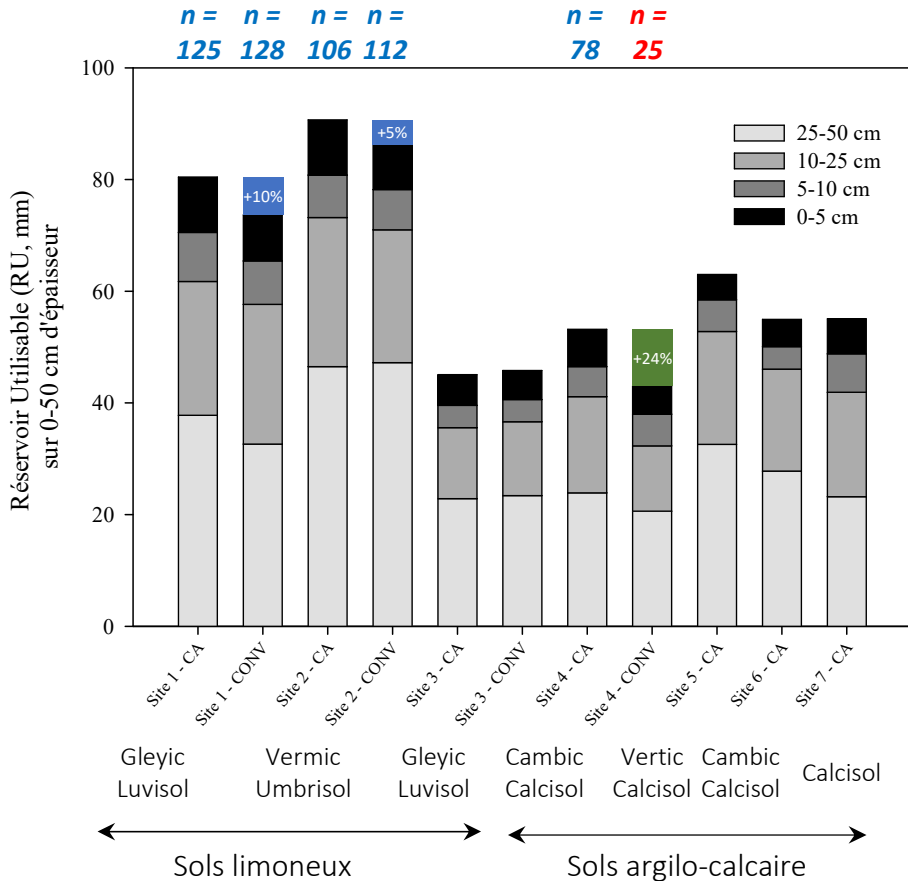
C2 : non exploré par les racines...







## ➤ LEVIER 3 : retenir plus d'eau dans le sol ?



Physical properties of soils under conservation agriculture: A multi-site experiment on five soil types in south-western France

Lionel Alletto<sup>a,\*</sup>, Sixtine Cueff<sup>a,b,\*</sup>, Julie Bréchemier<sup>a</sup>, Maylis Lachaussée<sup>a</sup>, Damien Derrouch<sup>a</sup>, Anthony Page<sup>a</sup>, Benoit Gleizes<sup>a</sup>, Pierre Perrin<sup>a</sup>, Vincent Bustillo<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup> Université de Toulouse, INRAE, UMR AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan, France  
<sup>b</sup> Université de Toulouse, Centre d'Etudes Spatiales BIOsphere CESBIO, CNRS CNRS INRAE IRD UPS, 41 Allée Jules Guesde, Toulouse 31000, France  
<sup>c</sup> IUT Paul Sabatier, 24 Rue d'Embaques, Auch 32000, France

- ▶ Effet du sol est dominant
- ▶ Augmentation de la taille du RU de 5 à 10 % sur le profil (10 à 15 % en surface (0-10 cm)) en AC
- ▶ Effet des pratiques sur RU en profondeur dépend des sols
- ▶ Vers de nouvelles fonctions « d'AgroPédoTransfert » pour estimer le RU des sols en AC ?



Estimation of soil water retention in conservation agriculture using published and new pedotransfer functions

Sixtine Cueff<sup>a,b,\*</sup>, Yves Coquet<sup>b</sup>, Jean-Noël Aubertot<sup>a</sup>, Lilliane Bel<sup>c</sup>, Valérie Pot<sup>b</sup>, Lionel Alletto<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Université de Toulouse, INRAE, UMR AGIR, F-31326, Castanet-Tolosan, France  
<sup>b</sup> Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR ECOSYS, 72050, Thiverval-Grignon, France  
<sup>c</sup> Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR MIA-Paris, 75005, Paris, France



Sixtine CUEFF



INRAE

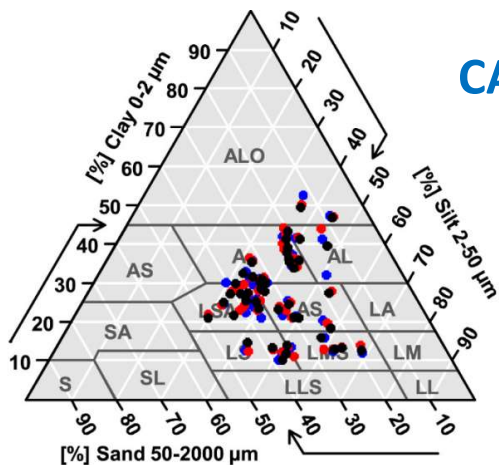
Contribution de l'Agriculture de Conservation des Sols à la Transition Agroécologique

14-12-2023, Lionel Alletto



## ➤ LEVIER 3 : retenir plus d'eau dans le sol ?

► Vers de nouvelles fonctions « d'AgroPédoTransfert » pour estimer le RU des sols en AC ?



CASDAR TTSI (2009-2012)



Données issues de 61 parcelles réparties entre 19 agriculteurs

► Utilisation de 29 Fonctions de PédoTransfert pour estimer le RU de parcelles en AC



Résultats non satisfaisants

► Nécessité de développer de nouveaux référentiels et fonctions de pédotransfert propres à l'AC pour mieux estimer le RU



Estimation of soil water retention in conservation agriculture using published and new pedotransfer functions

Sixtine Cueff<sup>a,b,\*</sup>, Yves Coquet<sup>b</sup>, Jean-Noël Aubertot<sup>a</sup>, Liliane Bel<sup>c</sup>, Valérie Pot<sup>b</sup>, Lionel Alletto<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Université de Toulouse, INRAE, UMR AGIR, F-31326, Castanet-Tolosan, France  
<sup>b</sup> Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR ECOSYS, 78850, Thiverval-Orignon, France  
<sup>c</sup> Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR MIA-Paris, 75005, Paris, France



INRAE

Contribution de l'Agriculture de Conservation des Sols à la Transition Agroécologique

14-12-2023, Lionel Alletto

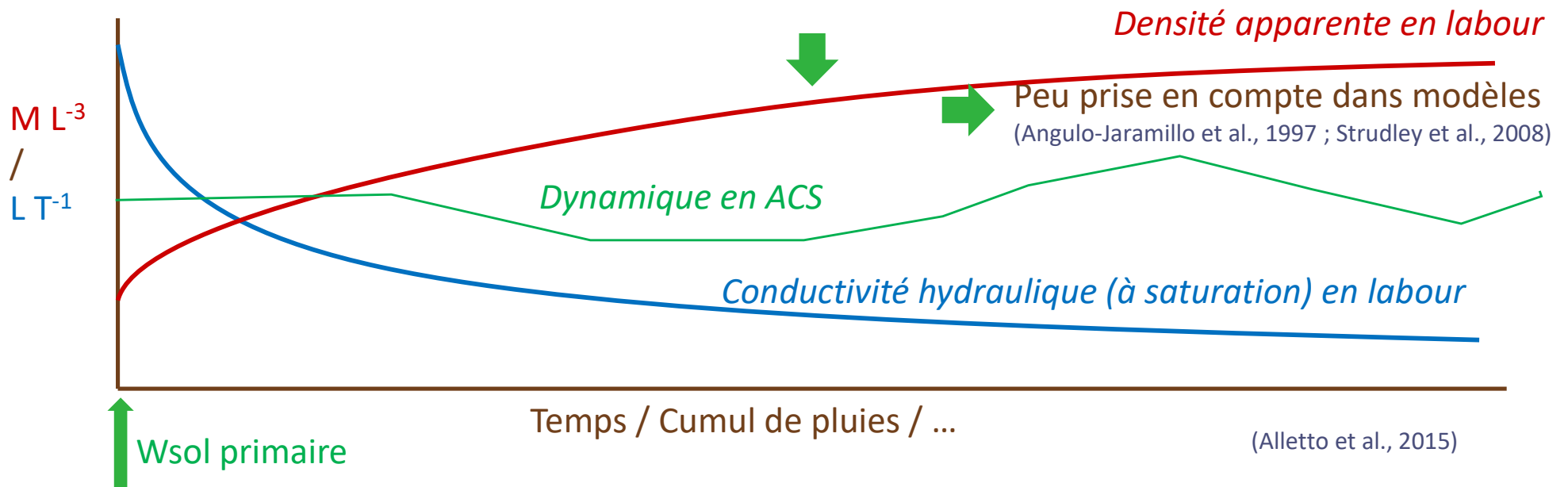


## ➤ LEVIER 4 : accroître les capacités d'infiltration ?



**Forte dynamique temporelle**

(Sauer et al. 1990 ; Green et al., 2003 ; Stange et Horn, 2005 ; Strudley et al., 2008)



INRAE

Contribution de l'Agriculture de Conservation des Sols à la Transition Agroécologique

14-12-2023, Lionel Alletto



# ➤ LEVIER 4 : accroître les capacités d'infiltration ?

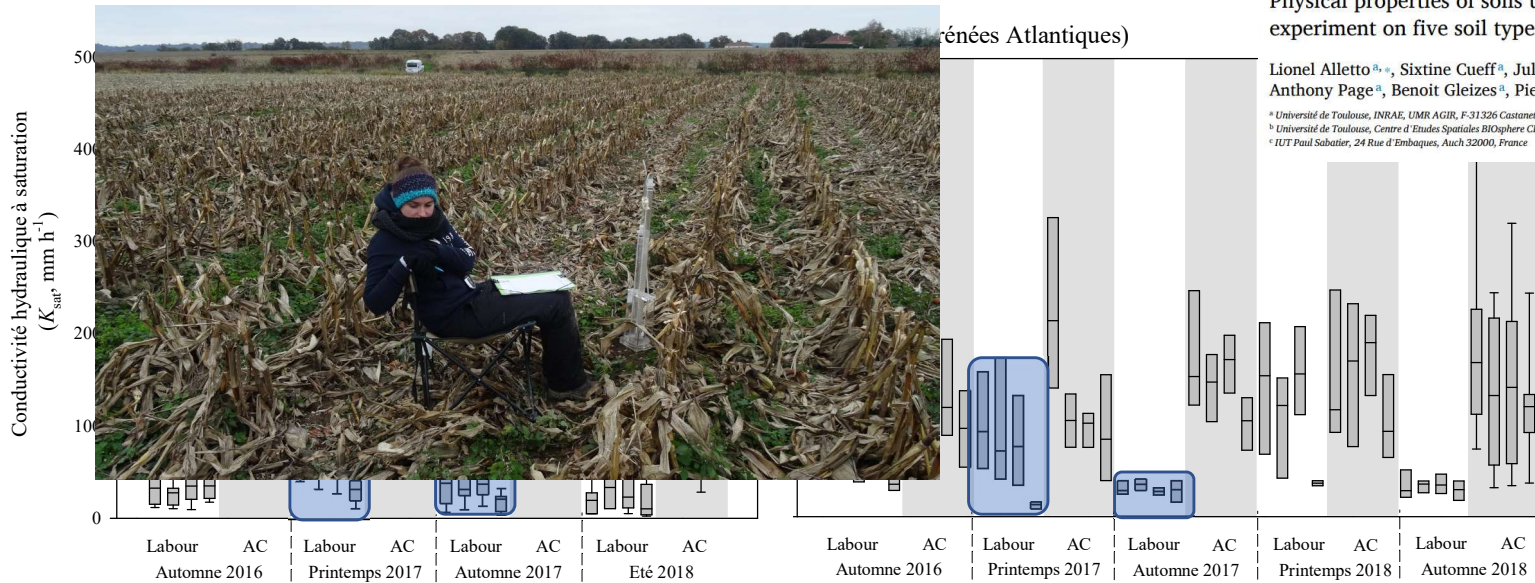
Geoderma xxx (xxxx) 116228



Contents lists available at ScienceDirect

Geoderma

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/geoderma](http://www.elsevier.com/locate/geoderma)



Physical properties of soils under conservation agriculture: A multi-site experiment on five soil types in south-western France

Lionel Alletto<sup>a,\*</sup>, Sixtine Cueff<sup>a</sup>, Julie Bréchemier<sup>a</sup>, Maylis Lachaussée<sup>a</sup>, Damien Derrouch<sup>a</sup>, Anthony Page<sup>a</sup>, Benoit Gleizès<sup>a</sup>, Pierre Perrin<sup>a</sup>, Vincent Bustillo<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup> Université de Toulouse, INRAE, UMR AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan, France

<sup>b</sup> Université de Toulouse, Centre d'Etudes Spatiales Biosphère CESBIO, CNRS CNRS INRAE IRD UPS, 41 Allée Jules Guesde, Toulouse 31000, France

<sup>c</sup> IUT Paul Sabatier, 24 Rue d'Embaques, Auch 32000, France



**Attention : moyenne non pondérée par la durée de la période**

▶ Augmentation de la conductivité à saturation en AC sur les 3 sites « couple »

|             |                        |             |                        |            |                        |
|-------------|------------------------|-------------|------------------------|------------|------------------------|
| AC (20 ans) | 160 mm h <sup>-1</sup> | AC (10 ans) | 150 mm h <sup>-1</sup> | AC (8 ans) | 100 mm h <sup>-1</sup> |
| Labour      | 50 mm h <sup>-1</sup>  | Labour      | 70 mm h <sup>-1</sup>  | Labour     | 70 mm h <sup>-1</sup>  |

▶ Amélioration de la stabilité temporelle au cours d'une saison culturale en AC

(Alletto et al., 2022)



INRAE

Contribution de l'Agriculture de Conservation des Sols à la Transition Agroécologique

14-12-2023, Lionel Alletto



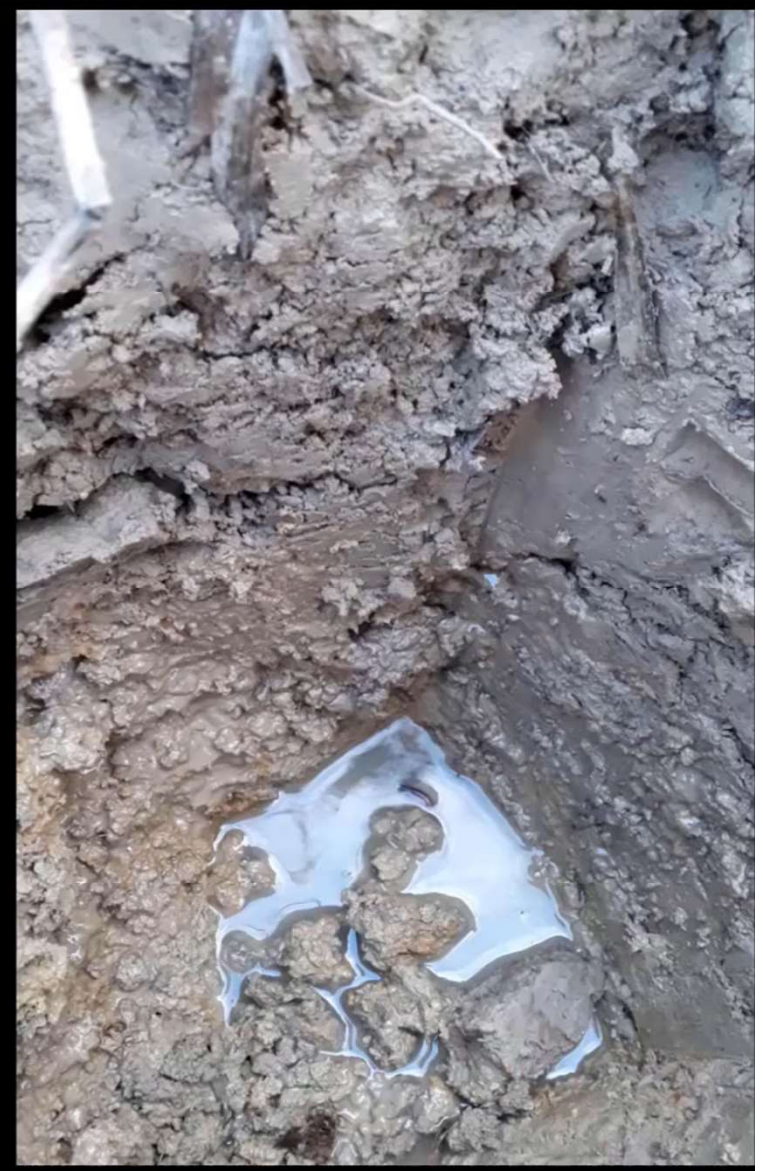
## ➤ LEVIER 4 : accroitre les capacités d'infiltration ?





## ➤ LEVIER 4 : accroitre les capacités d'infiltration ?

- ▶ Modification de la connectivité du réseau poral -> publication de Cueff et al. à venir

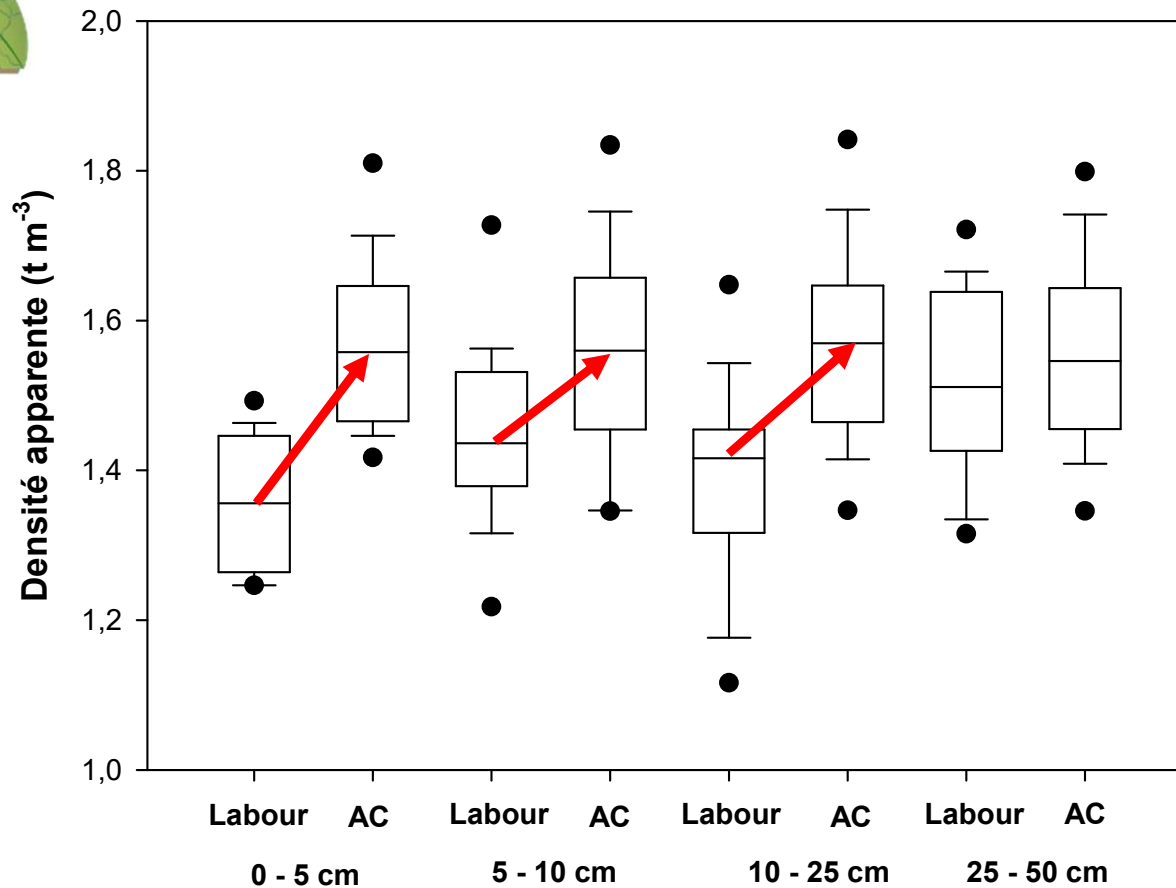




## ➤ LEVIER 4 : accroître les capacités d'infiltration ?

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 C<sub>org</sub> / ha**



INRAE

Contribution de l'Agriculture de Conservation des Sols à la Transition Agroécologique

14-12-2023, Lionel Alletto

## Explication de la variance des propriétés physiques des sols

|                   | Densité    | Infiltration | RU |
|-------------------|------------|--------------|----|
| SITE              | NS         | NS           | ++ |
| SYSTEME           | ++ (26 %)  | +++ (52 %)   | +  |
| PERIODE           | +          | +            |    |
| PROF.             | +          | +            |    |
| SITE x SYSTEME    | +++ (32 %) | +            | +  |
| SITE x PERIODE    | NS         | NS           |    |
| SITE x PROF.      | NS         | NS           |    |
| SYSTEME x PERIODE | +          | ++ (28 %)    |    |
| SYSTEME x PROF.   | NS         | NS           |    |
| PERIODE x PROF.   | NS         | NS           |    |

► Malgré des valeurs de densité apparente plus importantes (donc une porosité totale plus faible), la conductivité hydraulique est plus élevée en AC

→ Rôle majeur de la connectivité du réseau poral (Wardak et al., 2022)



Zero tillage has important consequences for soil pore architecture and hydraulic transport: A review

D. Luke R. Wardak<sup>a,\*</sup>, Faheem N. Padia<sup>b</sup>, Martine I. de Heer<sup>b</sup>, Craig J. Sturrock<sup>a</sup>, Sacha J. Mooney<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Division of Agriculture and Environmental Sciences, School of Biosciences, University of Nottingham, Sutton Bonington, Loughborough, UK  
<sup>b</sup> Jealotts Hill Research Centre, Syngenta Ltd, Bracknell, UK

D.L.R. Wardak et al.

Geoderma 422 (2022) 115927

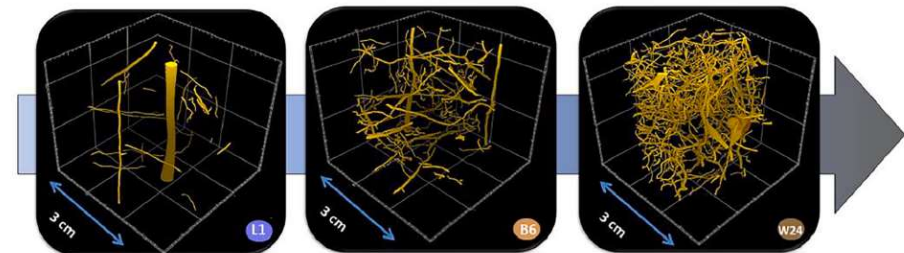


Fig. 2. Biopores in undisturbed soil from 1, 6 and 24 years at 50 cm depth, pores characteristic from root structures established in the first few years are still observable after 24 years (Lucas et al., 2019b).



INRAE

Contribution de l'Agriculture de Conservation des Sols à la Transition Agroécologique

14-12-2023, Lionel Alletto





## ➤ LEVIER 5 : mieux valoriser le réservoir utilisable ?

▶ intérêt probable des mycorhizes dans l'alimentation hydrominérale des plantes

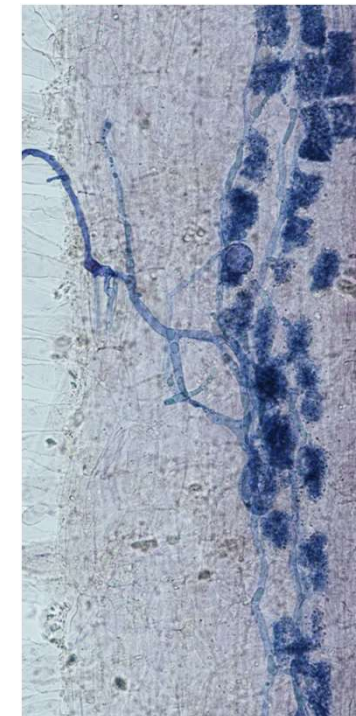
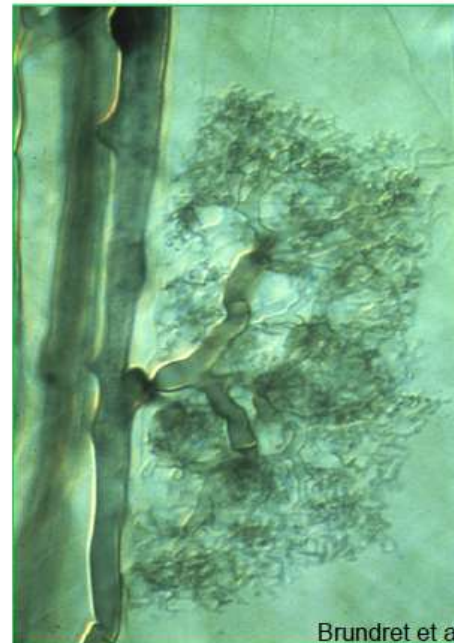
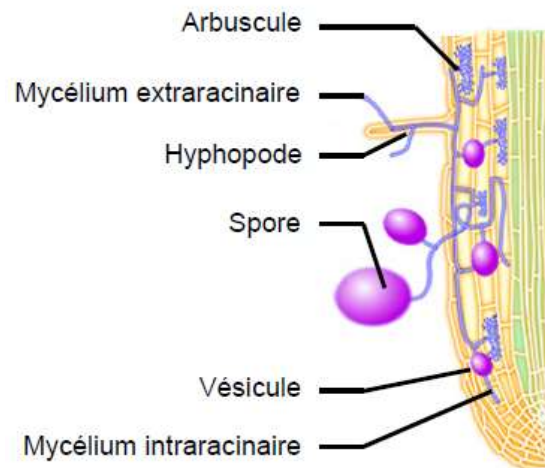


Arthur MAES – 2018-2021

### Symbiose mycorhizienne

> Champignons (endo)Mycorhizien Arbusculaire (CMA) :

- ↳ Symbiose mutualiste.
- ↳ Symbiose très ancienne (450 Ma).
- ↳ Symbiose répandue (80% des plantes).



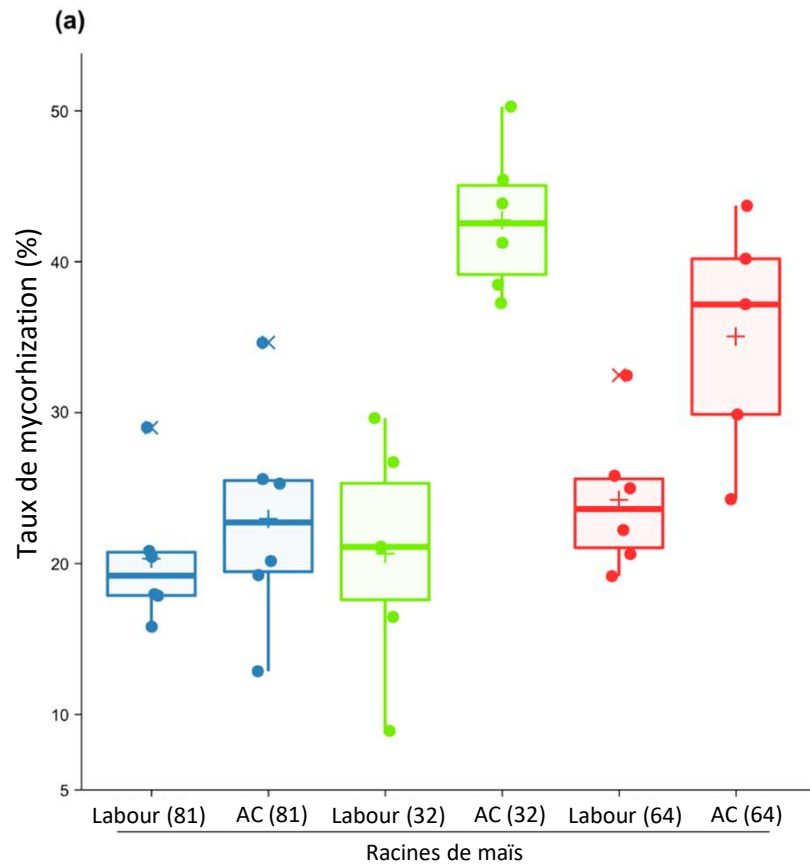


# ➤ LEVIER 5 : Valorisation du réservoir utilisable et alimentation minérale : intérêt probable des mycorhizes ?

▶ intérêt probable des mycorhizes dans l'alimentation hydrominérale des plantes

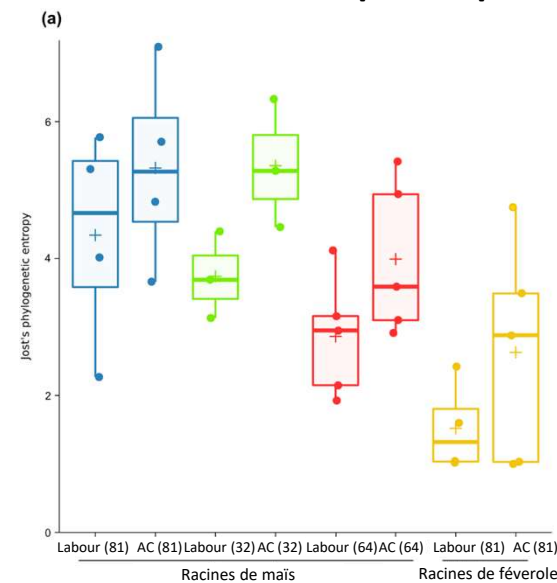


Arthur MAES – 2018-2021



▶ **Mycorhization plus importante en AC**  
 → Lien à explorer entre durée de couverture des sols / biomasse des couverts et taux de mycorhization

▶ **Diversité des CMA plus importante en AC**

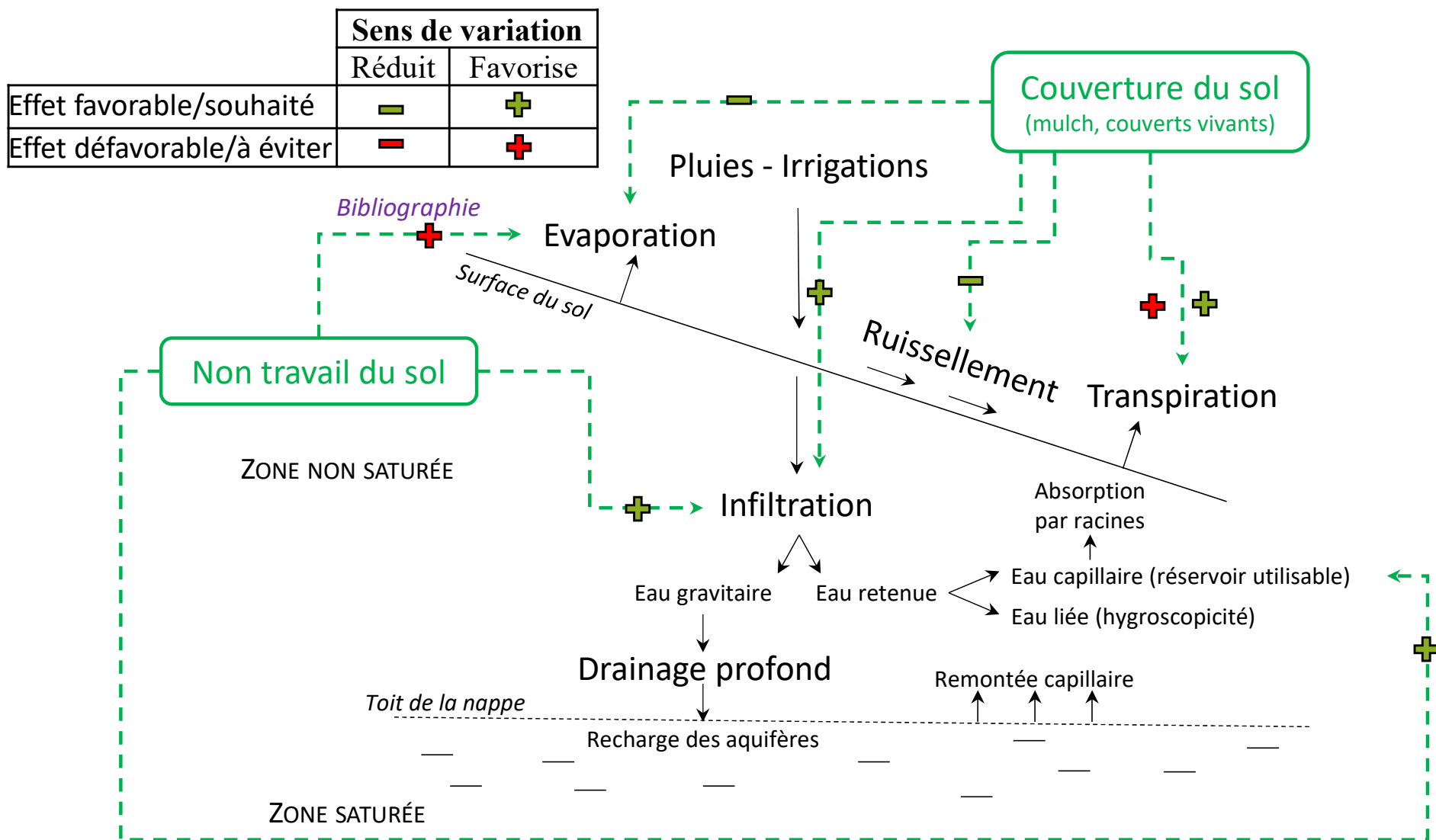


INRAE

Contribution de l'Agriculture de Conservation des Sols à la Transition Agroécologique

14-12-2023, Lionel Alletto

# ➤ En synthèse : sur le fonctionnement hydrique



## ➤ Quelques enjeux de recherche

- ▶ Améliorer nos connaissances sur les dynamiques temporelles des processus : minéralisation, rétention d'eau, infiltration
- ▶ Intégrer ses connaissances dans les formalismes de modélisation
- ▶ Développer des référentiels adaptés aux systèmes ACS tenant compte de la connectivité du réseau poral : densité apparente & porosité totale / infiltration
- ▶ Evaluer les dynamiques de restauration de propriétés si introduction de travail du sol occasionnel
- ▶ Poursuivre les travaux sur des systèmes ACS sans pesticides et en évaluer les performances -> ABC...



INRAE

***BAGHEERA : Bassin Adour-Garonne : Hydrologie, Environnement et Economie Réunis par l'Agroécologie***



*Merci de votre attention*

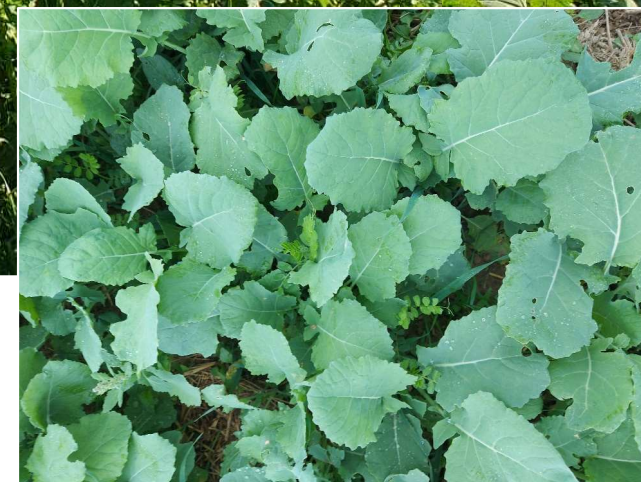
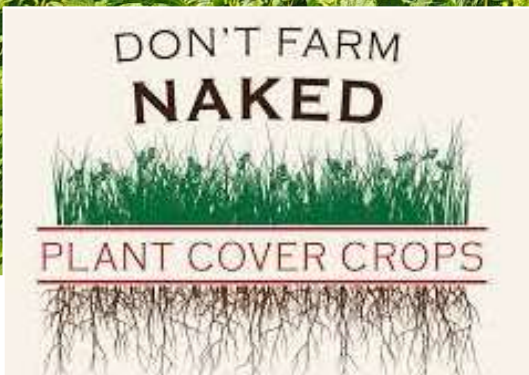
# FairCarbon

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



PROGRAMME  
DE RECHERCHE

CARBONE ET  
ÉCOSYSTÈMES  
CONTINENTAUX



**INRAE**

Contribution de l'Agriculture de Conservation des Sols à la Transition Agroécologique

14-12-2023, Lionel Alletto

[lionel.alletto@inrae.fr](mailto:lionel.alletto@inrae.fr)