

# Les puits de carbone

---

Jean Louis Morel

Laboratoire Sols et Environnement (LSE), UMR 1120, Université de Lorraine, INRAE



INRAE



中山大學  
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



# L'Accord de Paris.

12 décembre 2015.

Son objectif primordial est de maintenir « l'augmentation de la température moyenne mondiale **bien en dessous de 2°C** au-dessus des niveaux préindustriels » et de poursuivre les efforts « pour **limiter l'augmentation de la température à 1,5°C** au-dessus des niveaux préindustriels. »

PLANÈTE • CLIMAT

## 2024, année la plus chaude jamais enregistrée et première à dépasser le seuil de 1,5 °C de réchauffement climatique

Le principal moteur de la surchauffe réside dans l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, essentiellement en raison de la combustion de charbon, de pétrole et de gaz. Elle a entraîné une multiplication des canicules, inondations, sécheresses et incendies.

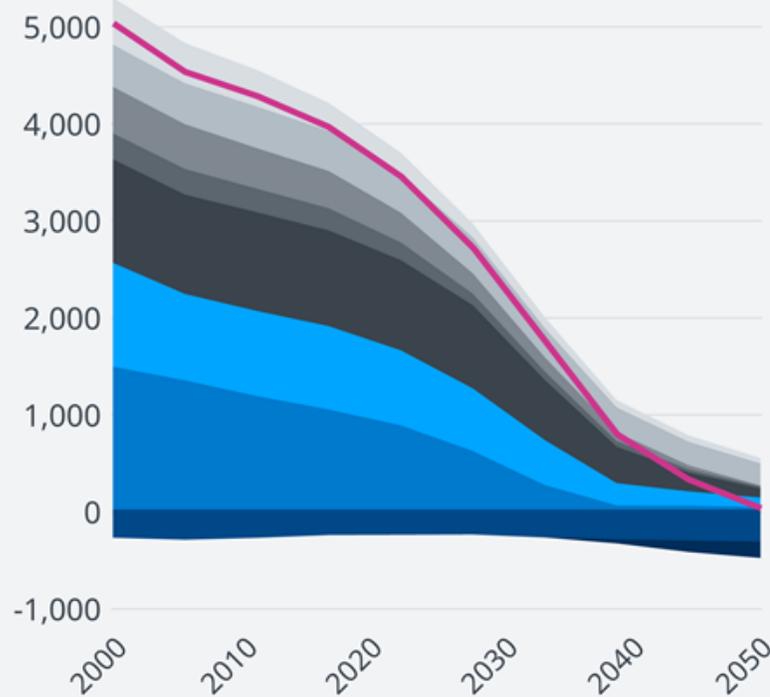
Par Audrey Garric

Le Monde, 10 janvier 2025

Le rapport du GIEC de 2018 établit que pour contenir la hausse de la température en deçà de +1,5°C par rapport à la période préindustrielle, il serait nécessaire d'atteindre la neutralité carbone à l'échelle du globe en 2050.

## Stratégie de l'Union Européenne

EU emissions trajectory in a 1.5 °C scenario (MtCO<sub>2</sub>eq)



Réduction des émissions

Emissions résiduelles

Puits de carbone

Concept

d'émissions négatives

- « En 2050, chaque tonne de CO<sub>2</sub> que nous émettrons devra être compensée par une tonne que nous éliminerons de l'atmosphère. »
- « Tous les secteurs de la société et de l'économie joueront un rôle :  
du secteur de l'énergie à l'industrie, en passant par la mobilité, le bâtiment, l'agriculture et la sylviculture. »

Source: European Commission 2050 strategic vision ©DW

# Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC)

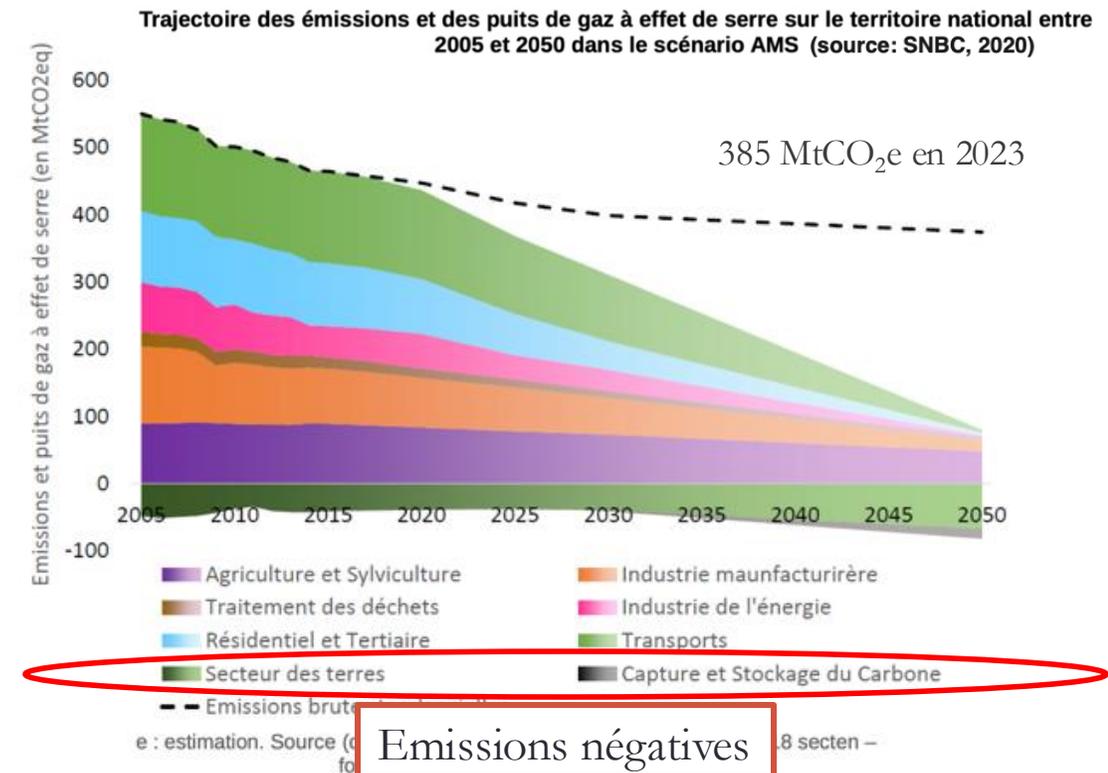


## Stratégie nationale bas-carbone



### • Feuille de route de la France pour conduire la politique d'atténuation du changement climatique

- transition vers une économie bas-carbone, circulaire et durable.
- Deux ambitions :
  - atteindre la **neutralité carbone** à l'horizon 2050.
    - parvenir au « *zéro émissions nettes* » sur le territoire national
    - diviser par six les émissions de GES par rapport à 1990
  - réduire l'empreinte carbone des Français.



# Emissions négatives



- L'Alliance **ANCRE** (Coordination de la Recherche sur l'Energie) a mené une réflexion prospective, dénommée « **Puits de carbone** », sur les possibles solutions de stockage de carbone (2022).

- **Six principales familles** de solutions de puits de carbone ont été identifiées, comprenant :

- le stockage naturel (trois familles)
- le stockage technologique (trois familles)



[https://www.allianceenergie.fr/wp-content/uploads/2022/11/ANCRE-Position-paper\\_Les-puits-de-carbone-1.pdf](https://www.allianceenergie.fr/wp-content/uploads/2022/11/ANCRE-Position-paper_Les-puits-de-carbone-1.pdf)

# Les six familles de puits de carbone

Naturels

1

Le stockage du carbone dans la biomasse et les sols agricoles et forestiers



2

Le stockage du carbone dans la biomasse et les sols en milieux urbains et anthropisés



3

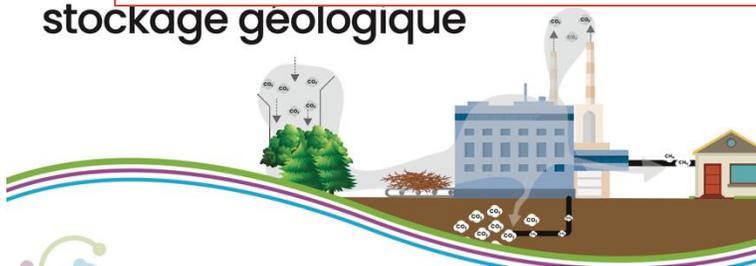
Le stockage du carbone dans les milieux aquatiques et par l'altération des roches



Technologiques

4

Les de c  
atm  
stockage géologique



Captage et stockage de CO<sub>2</sub> biogénique dans les matériaux biosourcés



et stockage long terme



La qualification d'un **puits de carbone** dépend de la **durée de séquestration** du CO<sub>2</sub>, idéalement estimée à **100 ans**.

## 5 Technologiques<sub>a</sub>

Stockage de CO<sub>2</sub> dans les matériaux via la minéralisation



# Stockage dans des matériaux

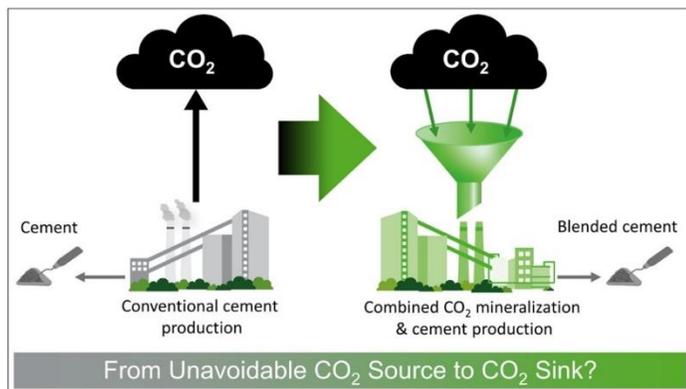
## 5 Technologiques<sub>b</sub>

Captage et stockage de CO<sub>2</sub> biogénique dans les matériaux biosourcés



- **Formation de carbonates stables** (Ca, Fe, Mg) à partir de roches, résidus miniers, sous-produits industriels ou déchets (e.g. béton, plâtre, cendres, mâchefers, laitiers)
- Au **niveau mondial**, la minéralisation pourrait réduire les émissions anthropiques annuelles de CO<sub>2</sub> de **12,5 %**.

- **Produits biosourcés** (e.g. bâtiment, textiles, emballages, revêtements routiers) en substitution aux produits d'origine fossiles fortement émetteurs :
  - le bois de construction a un potentiel de stockage estimé à 21 Mt CO<sub>2</sub>e/an d'ici 2050 (25% des puits de C envisagés).
- Valorisation de **nouvelles biomasses**
  - chanvre, lin, liège
- **Allongement de la durée de vie** des produits
  - réutilisation, recyclage



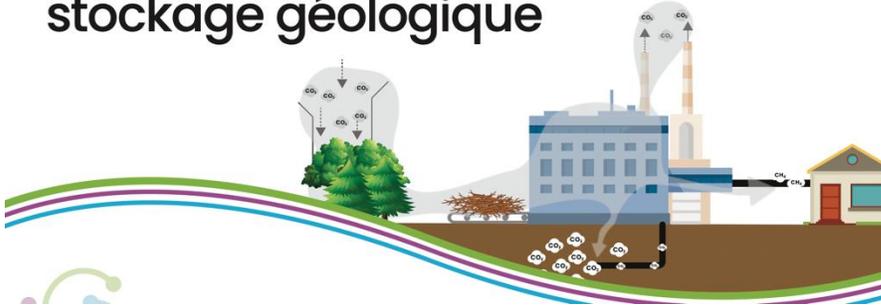
Ostovari et al., 2021, Environ. Sci. Technol.



4

## Technologiques

Les solutions technologiques de captage de CO<sub>2</sub> d'origine atmosphérique en vue d'un stockage géologique

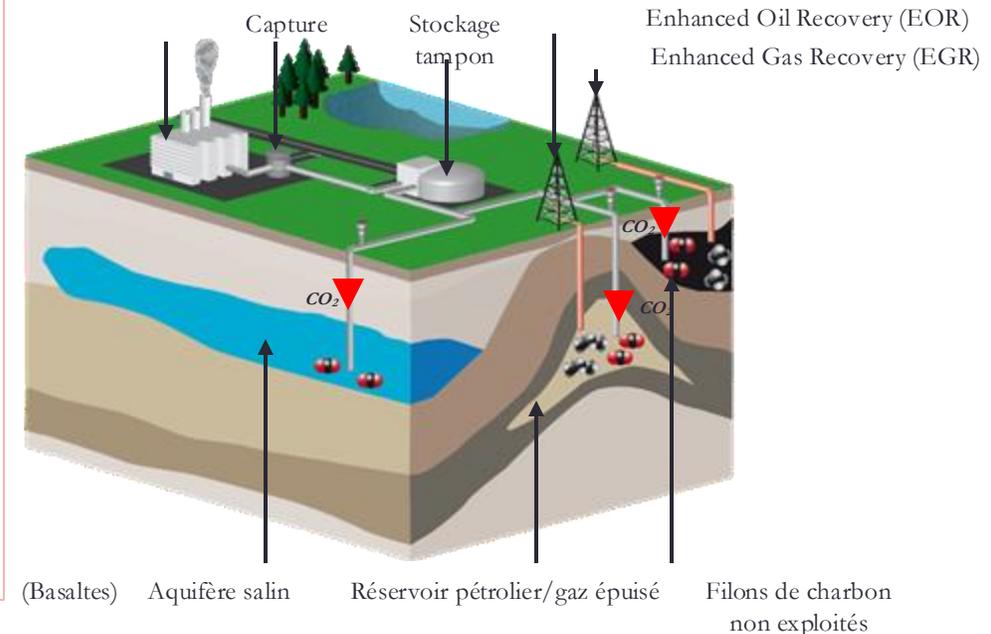


# Captage/stockage géologique (CSC)



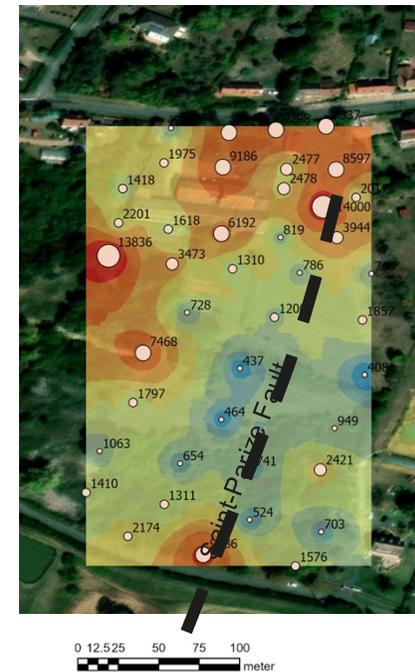
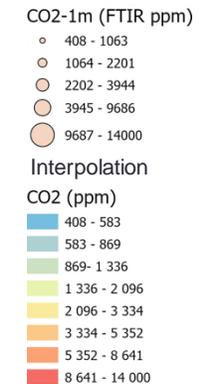
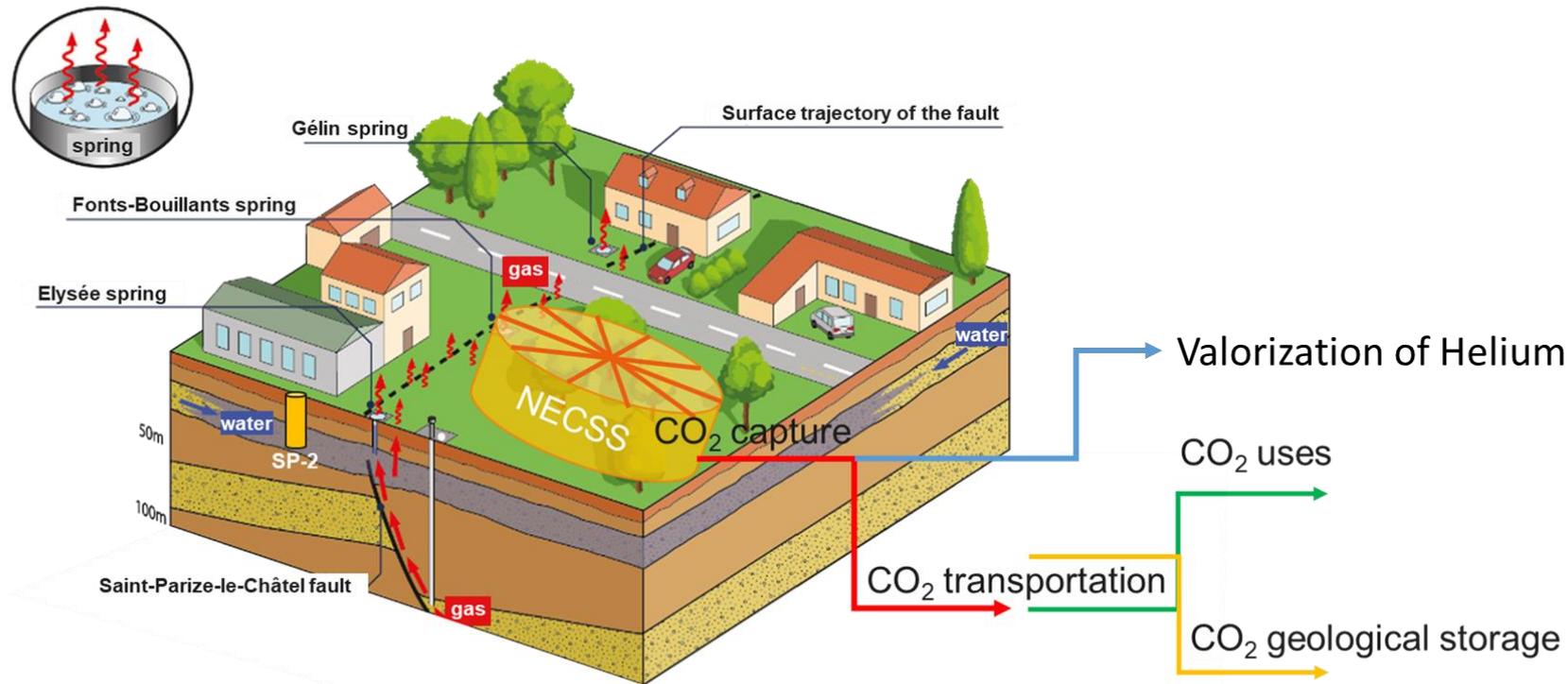
- Les technologies de **captage et stockage du CO<sub>2</sub>** permettent d'atteindre des émissions négatives :

- Le CO<sub>2</sub> peut être capté **directement dans l'atmosphère (DACSC)** ou **à partir de combustion la biomasse – bioénergie (BECSC)** puis il est **stocké dans le sous-sol**.
  - Le biochar est une variante qui permet de fixer durablement du carbone biogénique par pyrolyse.
- La technologie **NECCS** permet de **capturer les émissions naturelles** de CO<sub>2</sub> puis de les séquestrer.



# What's NECCS?

- **NECCS** : « *Emission naturelle de dioxyde de carbone avec capture et séquestration* »
  - analogue au DACSC et au BECSC (capture/stockage)
- **Exemple** : une émission naturelle de **1 700 tonnes de CO<sub>2</sub> par an** sur une surface de 400 m<sup>2</sup> a été quantifiée dans la Nièvre sur le site de l'entreprise "45-8" qui y capte le CO<sub>2</sub> via le procédé NECCS imaginé par le **Laboratoire GeoRessources** de l'UL et du CNRS.



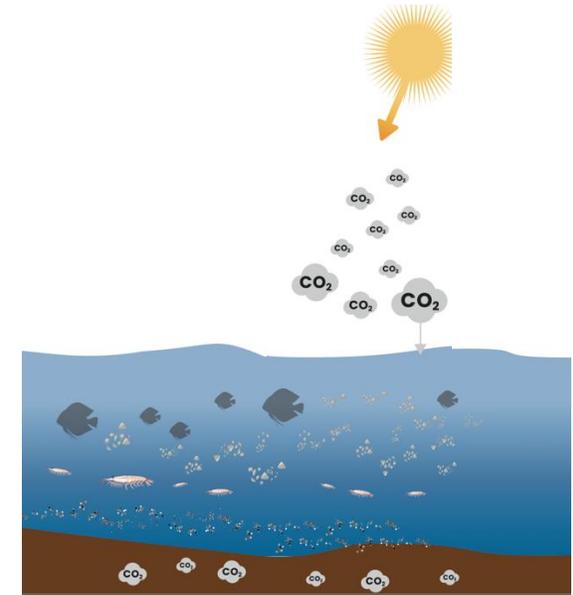
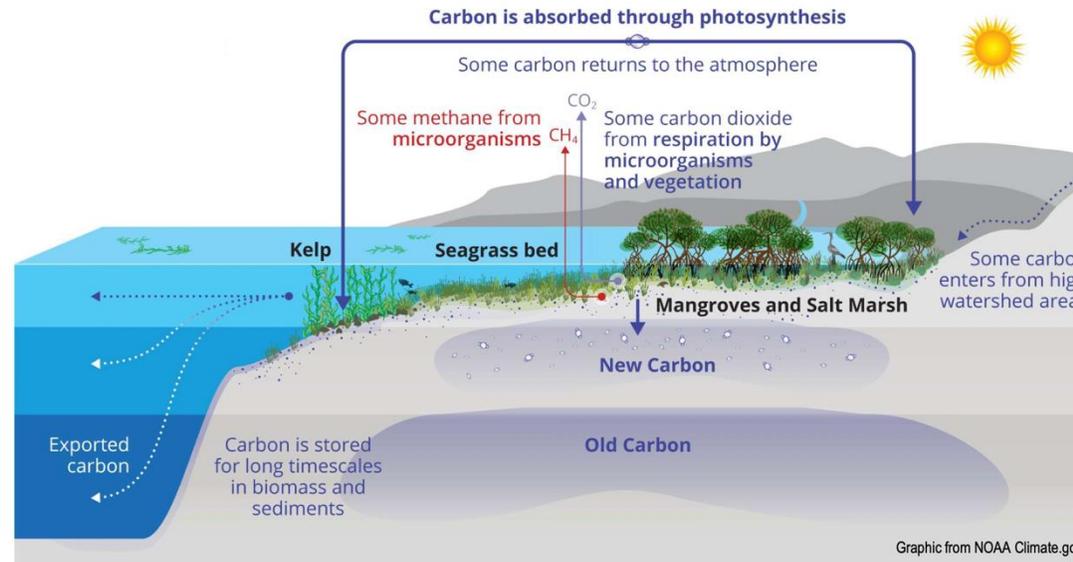
3

## Naturels

Le stockage du carbone dans les milieux aquatiques et par l'altération des roches



## Milieux aquatiques



- **Transfert de  $\text{CO}_2$**  vers les milieux aquatiques :
  - **enfouissement de matière organique (MO)** continentale et côtière ;
  - **pompe à carbone** océanique et stockage via des processus physiques, chimiques et biologiques ;
  - **altération des roches** silicatées et carbonatées par l'acide carbonique.
- Echelles de temps des processus allant de **plusieurs décennies** à **des millions d'années**

## 2 Naturels

Le stockage du carbone dans la biomasse et les sols en milieux urbains et anthropisés



# Milieux anthropisés

Espaces verts urbains (parcs, jardins, toits & façades végétalisés),  
Friches industrielles, minières, militaires et commerciales,  
Zones autour des infrastructures (routes, voies ferrées, aéroports).



- Le potentiel de stockage en France se situe principalement dans les **friches industrielles** avec 3,5 à 4,7 Mt CO<sub>2</sub>e

- zones aéroportuaires : 0,65 Mt,
- routes & voies ferroviaires : 0,001 Mt.

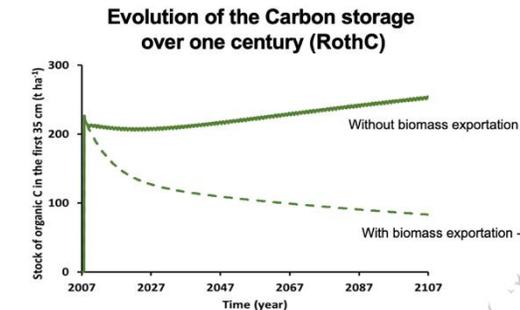
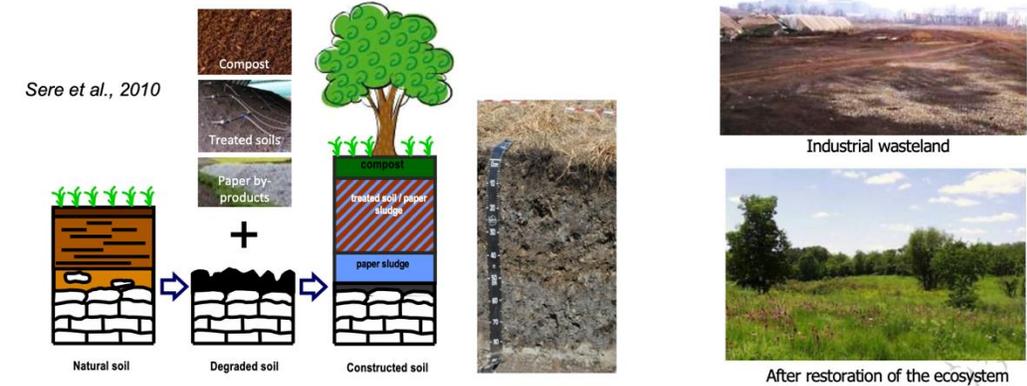
- Le potentiel en zones urbaines

- La désimperméabilisation des **friches commerciales** et des espaces dédiés à la voiture puis leur conversion en espaces végétalisés

- Toits et murs végétalisés, **agriculture urbaine** (0,13 Mt CO<sub>2</sub>)

- Conditions

- Construire des sols** capables de fournir une gamme large de services écosystémiques
- Disposer de **sources de carbone stable** à stocker (e.g. boues, sous-produits industriels, biochar)



carbon storage,  
biodiversity,  
biomass  
.../

1

# Naturels

Le stockage du carbone dans la biomasse et les sols agricoles et forestiers

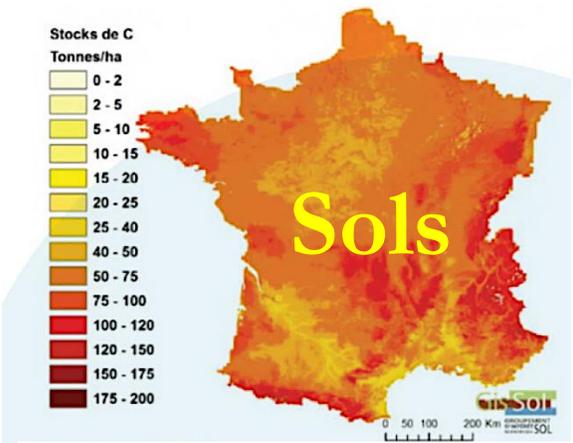


# Milieux agricoles et forestiers

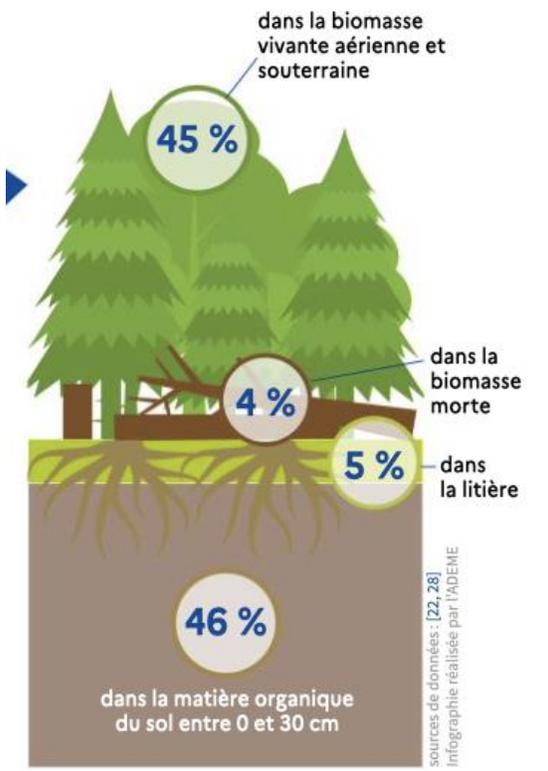
**4 à 5 milliards de tonnes**  
de carbone seraient stockées dans les sols et forêts de France métropolitaine (et pourraient être restituées dans l'atmosphère en cas de destruction).

Ademe, 2022 - Puits de carbone : les naturels d'abord

**20 %**  
des émissions françaises sont captées chaque année par ces puits de carbone naturels.



- La **photosynthèse** permet le stockage du CO<sub>2</sub> sous forme de matière organique à part égale dans la **biomasse** et dans les **sols**.
- Les **écosystèmes terrestres** français stockent 90 MtCO<sub>2</sub>e/an (EFESE 2019) (>20% des émissions, 385 Mt en 2023).
- En **Outre-Mer**, il est considéré que ces forêts sont arrivées à leur capacité maximale de stockage de carbone.
- Les **sols forestiers** représentent 38% du stock total de carbone, les sols de **prairies permanentes** 22% et ceux des **grandes cultures** 26,5%.



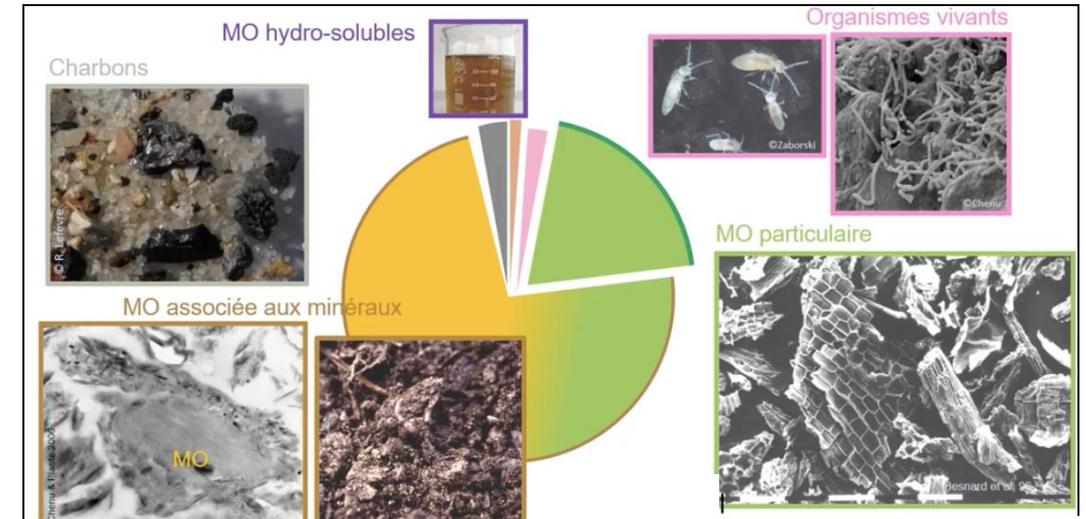
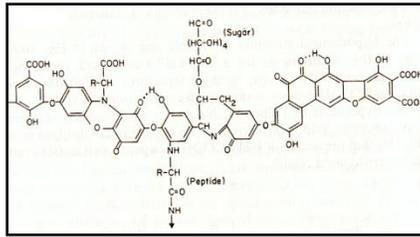
# La matière organique des sols

- **un mélange complexe**

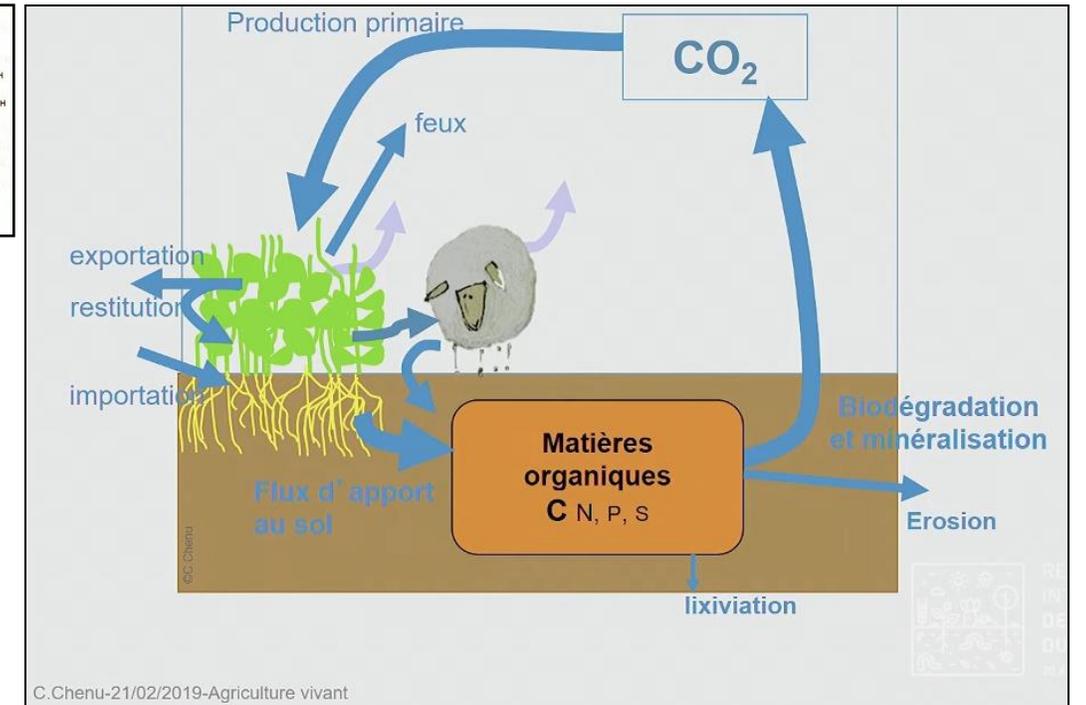
- débris végétaux plus ou moins fragmentés :
  - litière, racines, exsudats racinaires
- organismes : microorganismes, faune du sol
- déchets animaux, urbains et industriels
- molécules organiques : **humus**

- **en transformation permanente**

- par la faune et la microfaune du sol
  - consommation de la matière organique,
  - formation de composés stables (humus)
  - **minéralisation : émissions de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$**
  - lixiviation, érosion



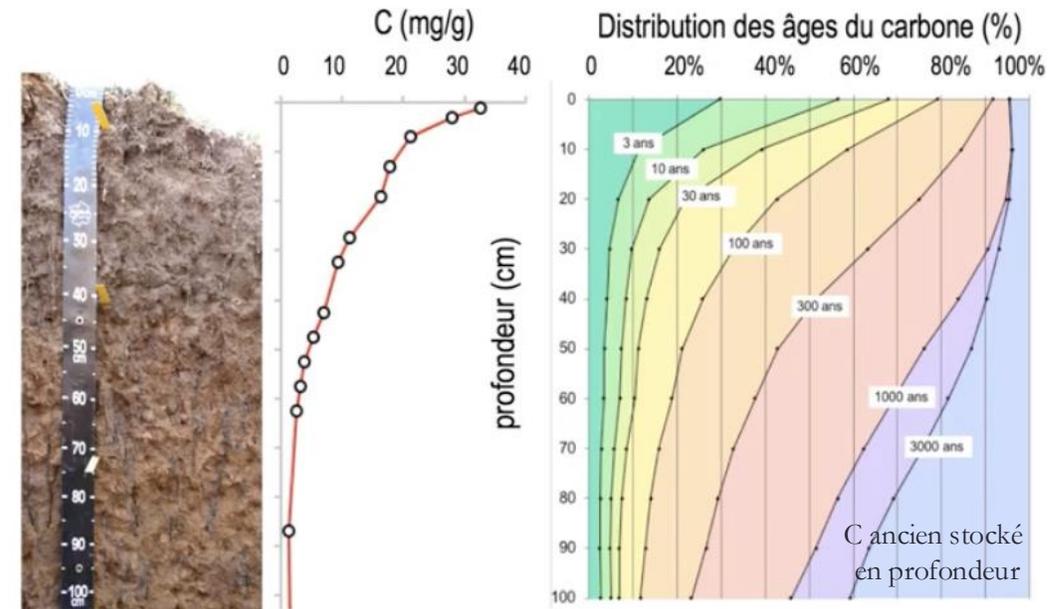
Chenu, 2021



C.Chenu-21/02/2019-Agriculture vivant

# Les stocks de matière organique dans les sols

- **La MO représente environ 1 à 10% de la masse totale du sol.**
  - **Le sol est le plus important réservoir de C continental.**
    - Entre 1 500 et 3 000 milliards de tonnes de C dans le premier mètre de sol
  - **Les stocks de C dans les sols sont plus élevés que la totalité du C de la biomasse et du C atmosphérique.**



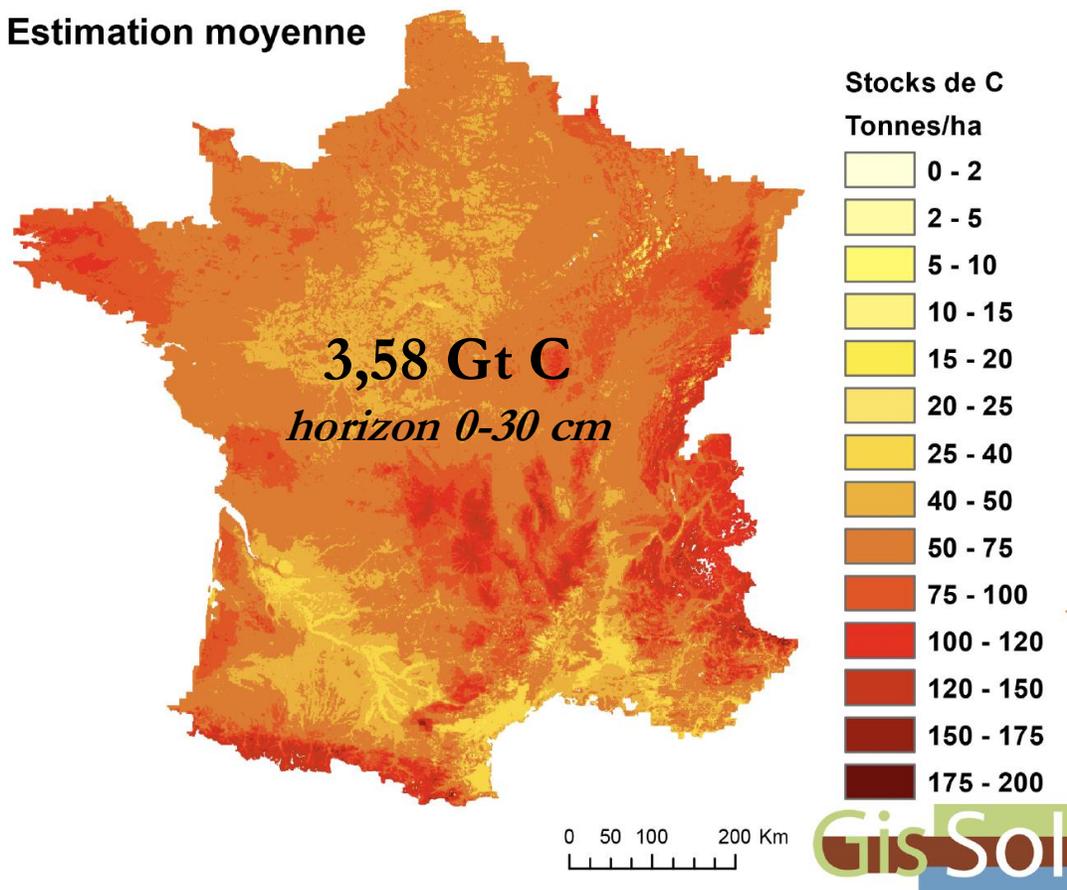
Temps de résidence du C en fonction de la profondeur du sol  
Balesdent *et al.*, 2018, Letter Nature

- **Mais la capacité de stockage varie :**
  - **en fonction de l'usage des terres :**
    - les sols de prairie contiennent de l'ordre de 5 à 6% de MO dans les 15 premiers cm ;
    - dans les terres cultivées, les MO ne s'accumulent pas, les résidus de récolte sont consommés rapidement par les microorganismes.
  - **en fonction de la nature du sol :**
    - un sol sableux peut contenir moins de 1% de MO ;
    - les tourbières contiennent jusqu'à 99% de MO sur de grandes épaisseurs.

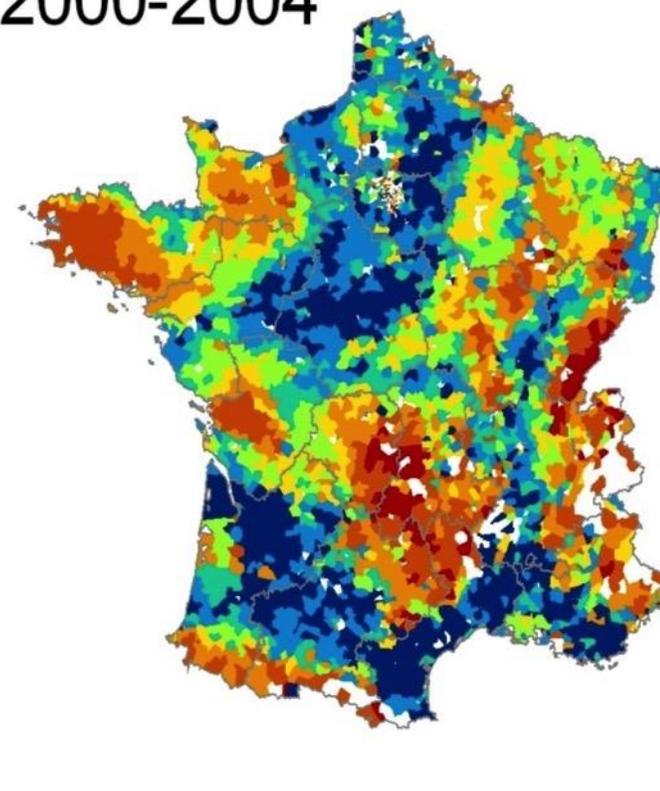
# Les stocks de carbone dans les sols français (0-0,3 m)

## Evolution des stocks

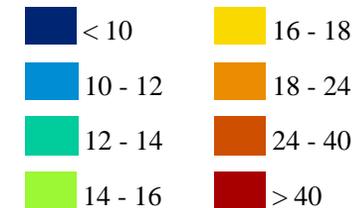
### Estimation moyenne



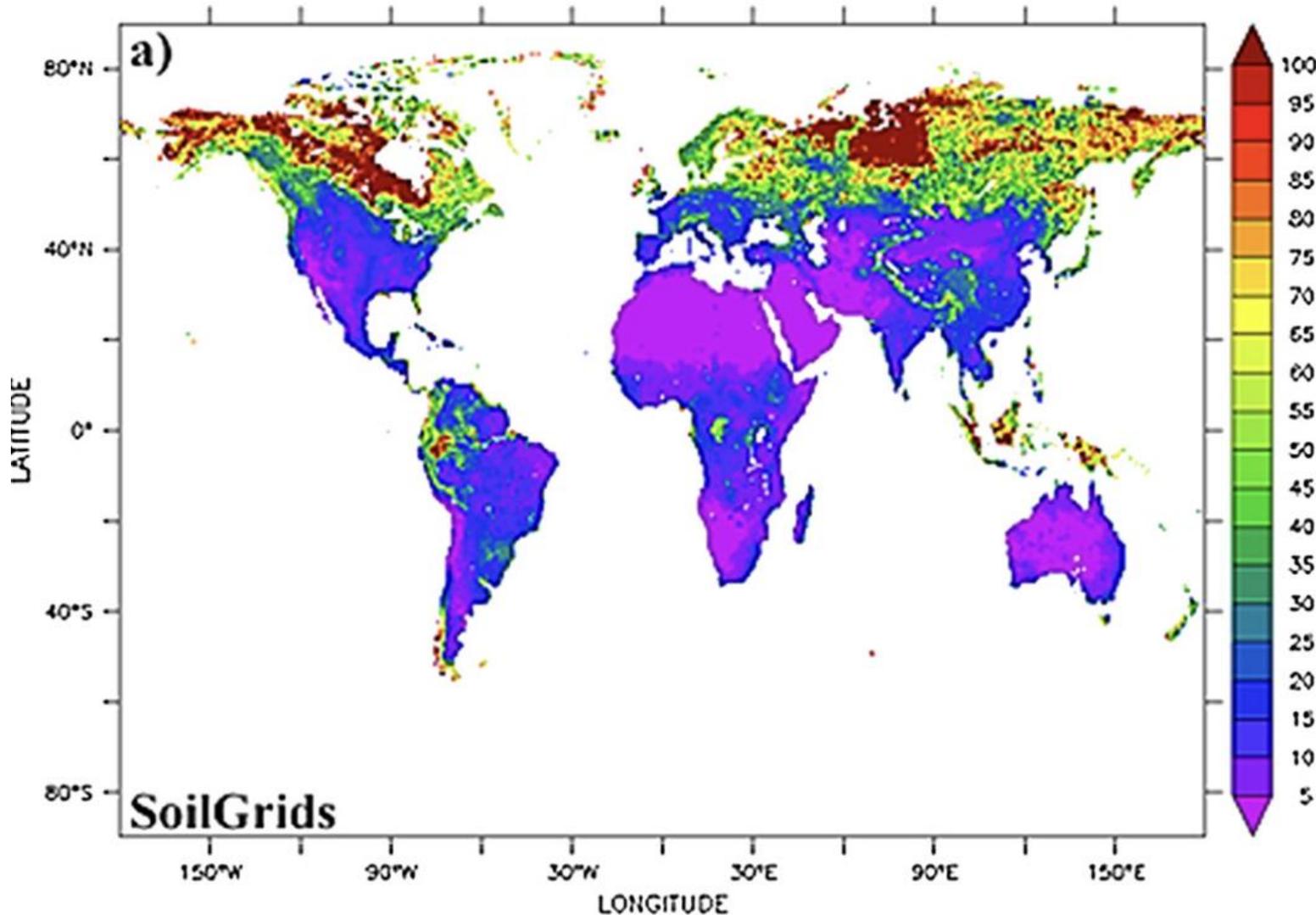
### 2000-2004



### Médiane par district - Corg (‰)



# Distribution globale du carbone dans le premier mètre de sol ( $\text{kg C m}^{-2}$ )



- **Climat**

- température, précipitations
- production primaire
- décomposition
- stabilisation

- **Nature des sols**

- argiles, pH, rétention d'eau

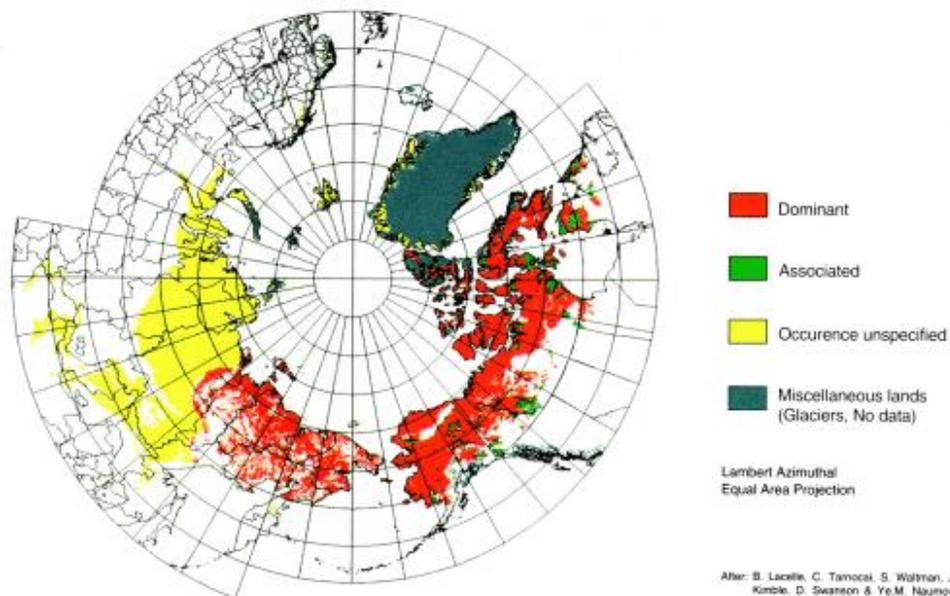
- **Usage des sols**

- cultures, prairies, forêts

# Absence ou quasi-absence de décomposition : les Cryosols (permafrost)

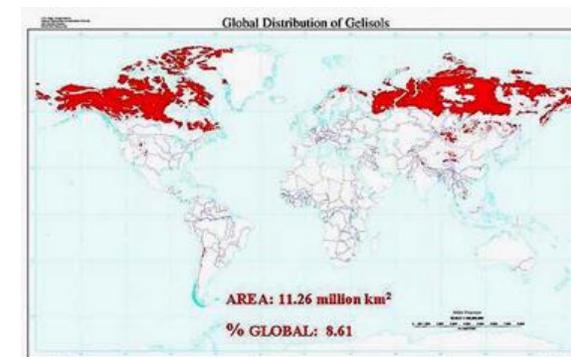
- Régions arctiques et subarctiques (Canada, Alaska, Russie, Groenland)
- Antarctique
- Présents aussi à haute altitude
  - Gélisols, sols du permafrost,

- production primaire faible
- mais températures basses, gel, excès d'eau, acidité



After: B. Lacelle, C. Tamocai, S. Walman, J. Kimble, D. Swanson & Ye M. Naikov. 1997. Northern Circumpolar Soil Map. Agriculture and Agri-food Canada, USDA and V.V. Dokuchayev Soils Institute.

## Distribution zonale (climat)



## Importance des Cryosols dans le cycle global du C

- **> 50 % du C organique global** (1 700 Gt de Corg dans les 3 premiers m)
- Le réchauffement de l'atmosphère **libère le C stocké dans le permafrost.**
- Les Cryosols sont une **source majeure de GES** (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>).

# Stabilisation physique de la matière organique : sols calcaires

Plateau de Haye



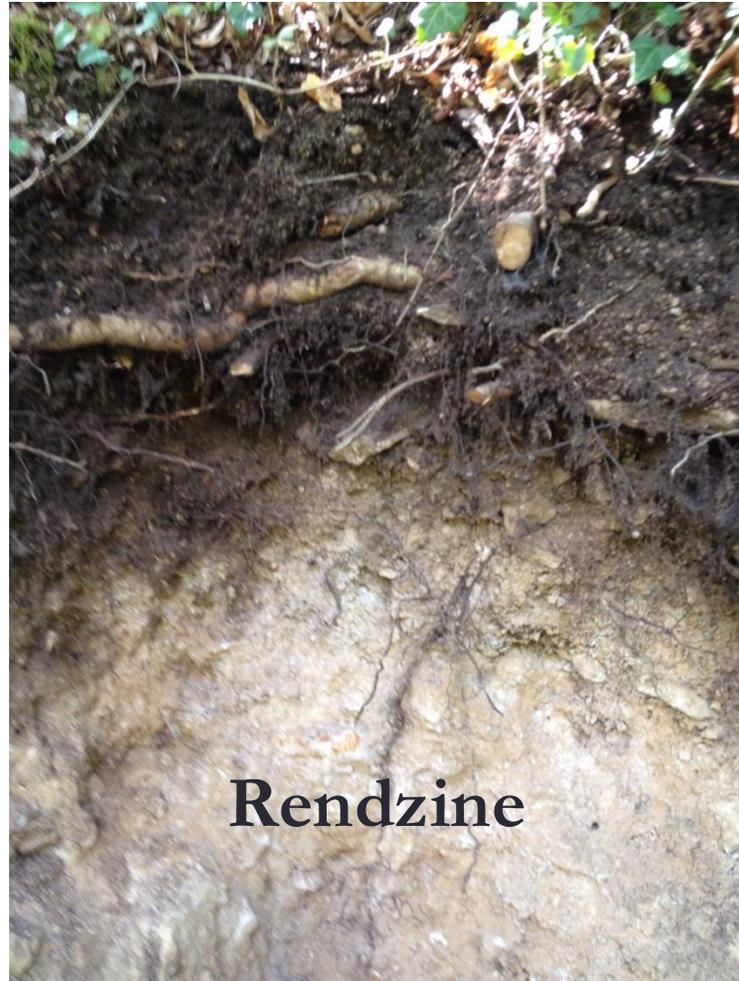
- Surabondance de carbonate de calcium
- Stabilisation de la matière organique
  - enrobage des matières organiques par le carbonate de calcium
- Minéralisation ralentie



**Accumulation  
de matière organique**

=

**Sols noirs épais**



Rendzine

A<sub>1</sub>

A<sub>1</sub>C

C

# Stabilisation chimique de la matière organique : mélanisation

- **Mélanisation**

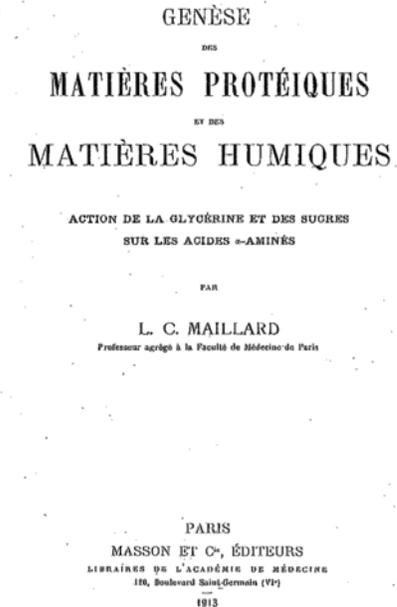
- formation de **composés organiques noirs et très stables**

- **Mécanisme : réaction de Maillard (Louis Camille, 1913)**

- réaction entre sucres réducteurs et acides aminés produits par l'hydrolyse des polysaccharides et des protéines
  - réaction entre les groupements carbonyle (CHO) et amine (NH<sub>2</sub>)
- formation de **polymères bruns** de Maillard (mélanoides) très stables qui s'accumulent dans les sols.

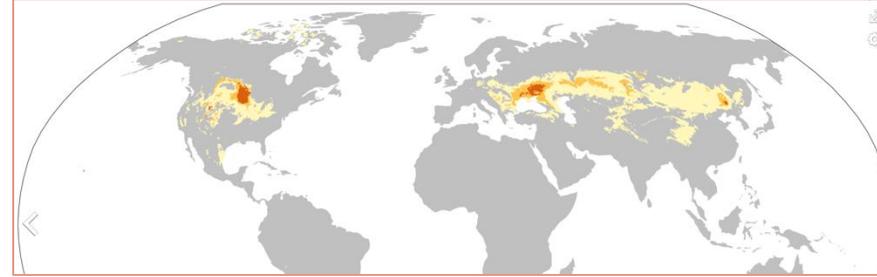
- **Conditions**

- en climat tempéré et humide, la mélanisation est observée dans les **milieux calcaires filtrants** (e.g. Rendzines) ;
- elle est fréquente en **climats chauds et contrastés** (e.g. Chernozems).



# Stabilisation chimique : l'enjeu des Chernozems

- Climats à forts contrastes saisonniers
- Steppes, Graminées
- Accumulation de matière organique
  - e.g. réaction de Maillard
- Sols à très haute fertilité



Distribution zonale (climat)



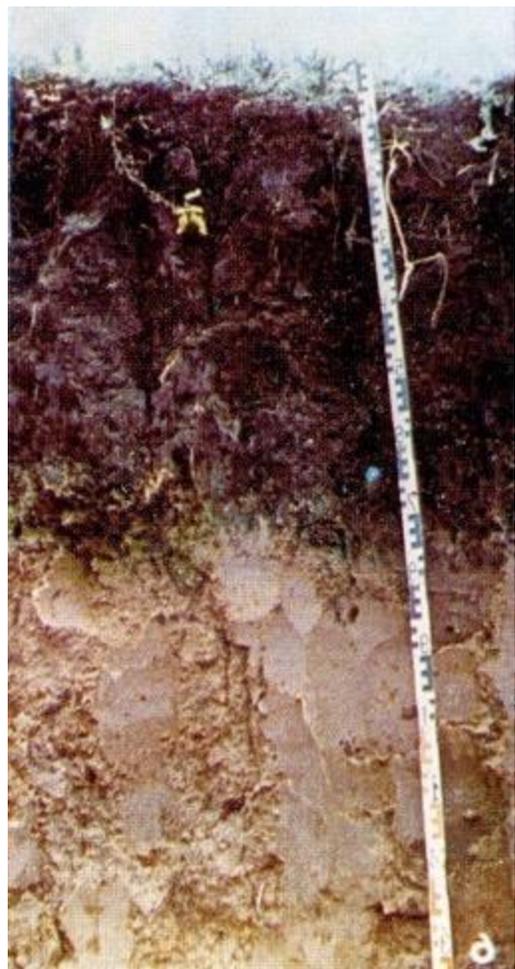
Enjeux :

- Approvisionnement
- Stockage de C
- Distribution :
  - 52% en Russie
  - 9% en Europe



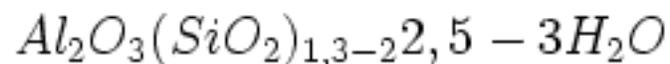
[https://esdac.jrc.ec.europa.eu/Projects/Soil\\_Atlas/Download/Atlas.pdf](https://esdac.jrc.ec.europa.eu/Projects/Soil_Atlas/Download/Atlas.pdf)

# Stabilisation physico-chimique : e.g. sols volcaniques



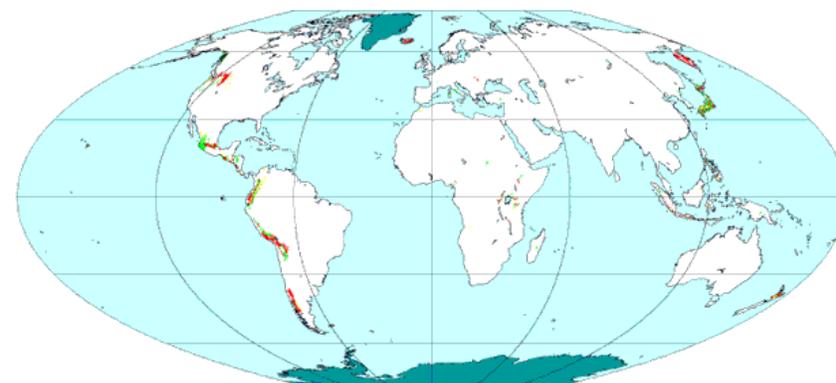
Andosol, Antilles

- Abondance de minéraux mal cristallisés (allophanes)



- Forte rétention d'eau et de cations
- Piégeage de la matière organique
  - sols très noirs
- Problème de la chlordécone

Distribution of ANDOSOLS  
Based on WRB and the FAO/Unesco Soil Map of the World



photos JL Morel

# Comment faire pour augmenter le taux de MO des sols ?

- Augmenter les **entrées**

- accroître la **photosynthèse**

- culture de rente, intermédiaires, enherbements intercalaire, pérennes (prairies)
- agroforesterie (restitution aériennes et racines des arbres)

- **bannir les feux**

- **restituer** le plus possible les résidus de culture

- ex: pailles

- **apporter** des MO exogènes (effluents, composts, urbains)

- gérer les **résidus d'élevage**

- Réduire les **sorties**

- **érosion** : protéger la surface du sol par une couverture permanente du sol

- réduire les **perturbations physiques** du sol

- = limiter les processus de biodégradation/minéralisation
- couverture du sol, non-labour, semis direct, agriculture de conservation



# Stratégies agricoles de stockage – *Initiative 4‰*

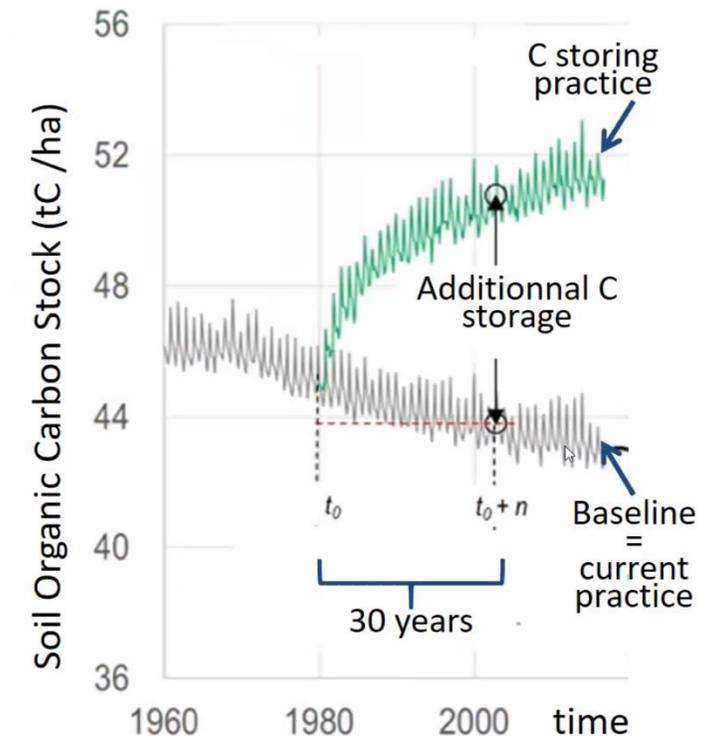
« portée par la France en 2015 à l'occasion de la COP 21

→ « une augmentation annuelle de 4‰ des stocks de C des sols mondiaux permettrait de compenser les émissions anthropiques (2 400 Gt CO<sub>2</sub>) »

- En France, plus de **12%** des émissions annuelles seraient ainsi compensées.
  - L'évolution actuelle des stocks de C des sols est estimée à 2,3 ‰ par an.
  - Il existe un potentiel de stockage additionnel d'environ 2‰.
- Les **grandes cultures** représentent le plus fort potentiel de stockage additionnel.
  - couverts intercalaires ; prairies temporaires ; agroforesterie
  - amendements organiques ; plantation de haies ; suppression du travail du sol

Pellerin *et al.*, 2019 Stocker du carbone dans les sols français, Inrae

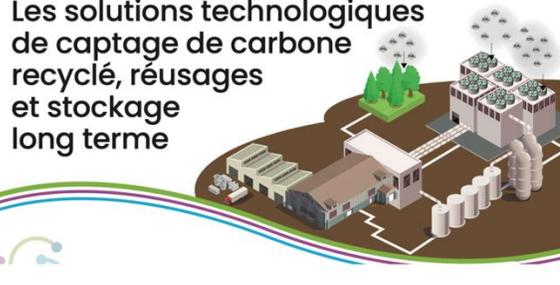
<https://www.inrae.fr/actualites/stocker-4-1-000-carbone-sols-potential-france>



Dans des conditions pédo-climatiques données, le potentiel tend vers une limite

# Conclusion

- « Puits de carbone » recouvre une large variété de possibilités complémentaires pour augmenter les émissions négatives.
- **Les puits technologiques**
  - Capturer le CO<sub>2</sub> émis, l'utiliser dans des procédés industriels, élaborer des matériaux biosourcés, le séquestrer sous la forme de carbonates ou l'injecter dans le sous-sol sont des solutions, mais plus ou moins matures.
  - Le captage/stockage (CSC) représente un potentiel de 20% des solutions de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>,
    - mais il existe des obstacles technologiques, économiques, écologiques et socio-culturels (e.g. injection de CO<sub>2</sub> dans le sous-sol).
- **Les puits naturels**
  - Constituent la meilleure garantie de stockage durable, avec deux leviers principaux :
    - Les prairies permanentes, les zones humides et les forêts, où les sols ont des stocks de carbone élevé doivent être maintenus
    - En agriculture, les grandes cultures offrent un potentiel élevé de stockage additionnel nécessitant une évolution des pratiques.
  - En général, stocker du carbone dans les sols produit des co-bénéfices pour l'eau et la biodiversité.
    - Les sols très anthropisés (e.g. urbains, industriels, commerciaux) sont un puits potentiel à l'origine de nombreux services écosystémiques.
- **L'atténuation du changement climatique ne doit pas se faire au détriment des autres grands enjeux environnementaux, tels que la biodiversité.**
  - Bannir la démarche en silos : e.g. demande en biomasse, énergies renouvelables

<b>Naturels</b>	<b>1</b>	Le stockage du carbone dans la biomasse et les sols agricoles et forestiers	
	<b>2</b>	Le stockage du carbone dans la biomasse et les sols en milieux urbains et anthropisés	
	<b>3</b>	Le stockage du carbone dans les milieux aquatiques et par l'altération des roches	
<b>Technologiques</b>	<b>4</b>	Les solutions technologiques de captage de CO <sub>2</sub> d'origine atmosphérique en vue d'un stockage géologique	
	<b>5</b>	Stockage de CO <sub>2</sub> dans les matériaux via la minéralisation	
	<b>6</b>	Captage et stockage de CO <sub>2</sub> biogénique dans les matériaux biosourcés	
		Les solutions technologiques de captage de carbone recyclé, réusages et stockage long terme	

Merci pour votre attention