



HAL
open science

Les pratiques et facteurs influençant le stockage de carbone organique dans les sols forestiers

Delphine Derrien, Laurent Augusto, Laurent Saint-andré

► To cite this version:

Delphine Derrien, Laurent Augusto, Laurent Saint-andré. Les pratiques et facteurs influençant le stockage de carbone organique dans les sols forestiers. Club Climat, Forêt & Bois, Institut de l'économie pour le climat (I4CE; <https://www.i4ce.org>), Jun 2023, Paris (France), France. hal-04642944

HAL Id: hal-04642944

<https://hal.inrae.fr/hal-04642944v1>

Submitted on 10 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les pratiques et facteurs influençant le stockage de carbone organique dans les sols forestiers :

Delphine Derrien – Laurent Augusto – Laurent Saint-André

INRAE Nancy Grand Est
INRAE Bordeaux Aquitaine

delphine.derrien@inrae.fr

INRAE



Biogéochimie des Ecosystèmes Forestiers



Les pratiques et facteurs influençant le stockage de carbone organique dans les sols forestiers :

- 1. analyse quantitative,**
- 2. facteurs de contrôle,**
- 3. possibilités d'action pour un stockage additionnel**

FORÊTS MÉTROPOLITAINES



17,1 Mha

31%
du territoire

25%

PUBLIQUES
FORÊTS PLUS ANCIENNES

75%

PRIVÉES
FORÊTS PLUS JEUNES

STOCKENT
2,8 G t C

50% dans la biomasse aérienne
50% dans le sol

SÉQUESTRENT
39,6 Mt CO₂/an



59%
futaies régulières



21%
taillis sous futaies



10%
formations ouvertes



7%
taillis



4%
futaies irrégulières

63% **ACTIVEMENT GÉRÉES**

15% **ABANDONNÉES**

11% **EN SURDENSITÉ**



50%



33%



17%



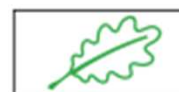
-10%
de croissance



+20%
de prélèvements



+54%
de mortalité



67%



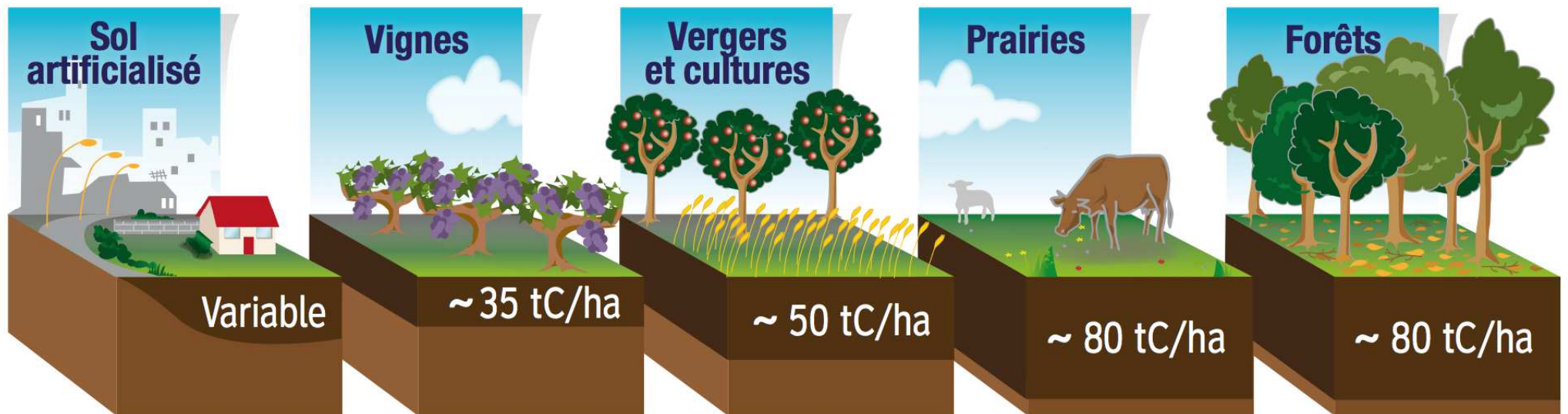
21%



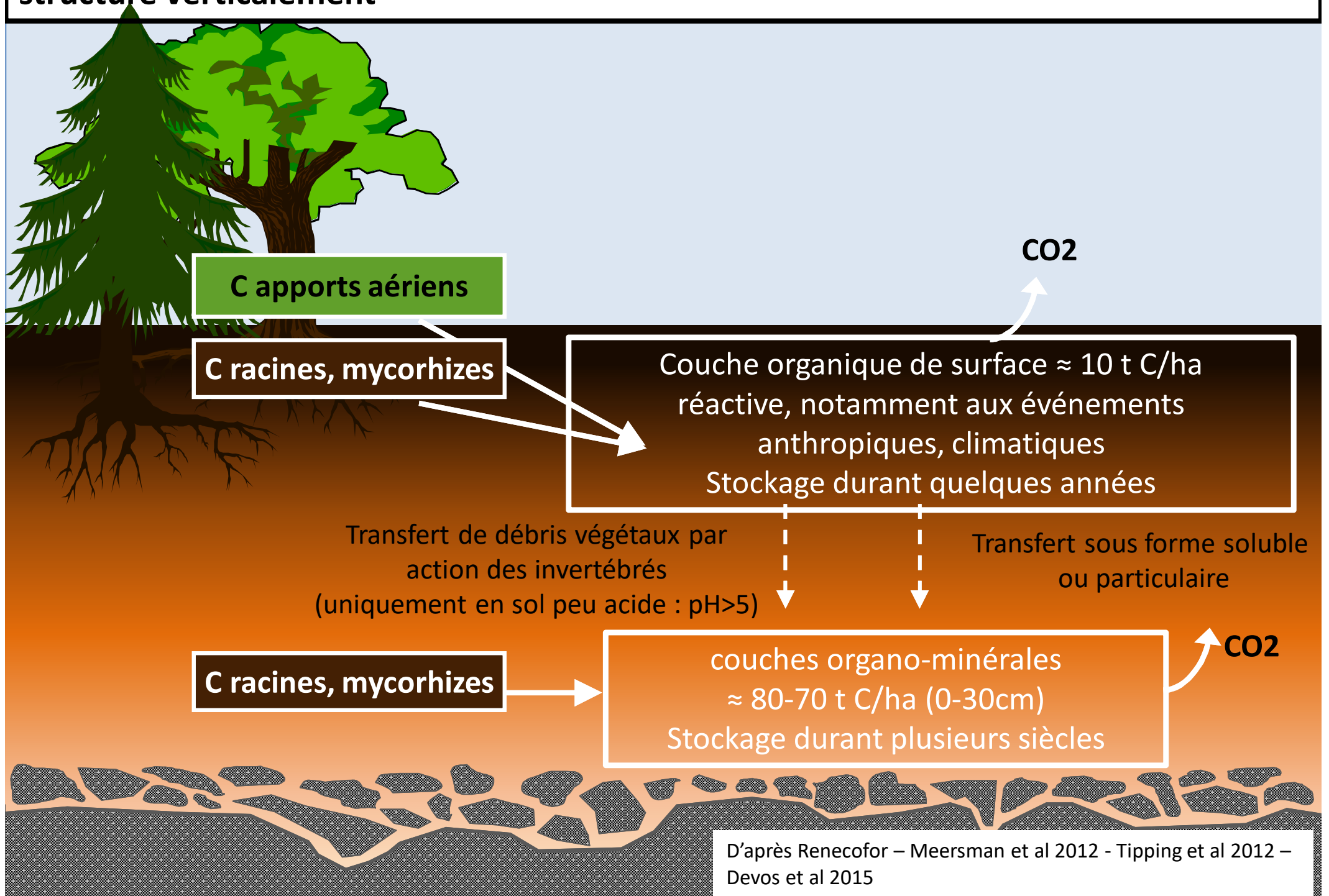
17%

Le carbone organique dans les sols forestiers:

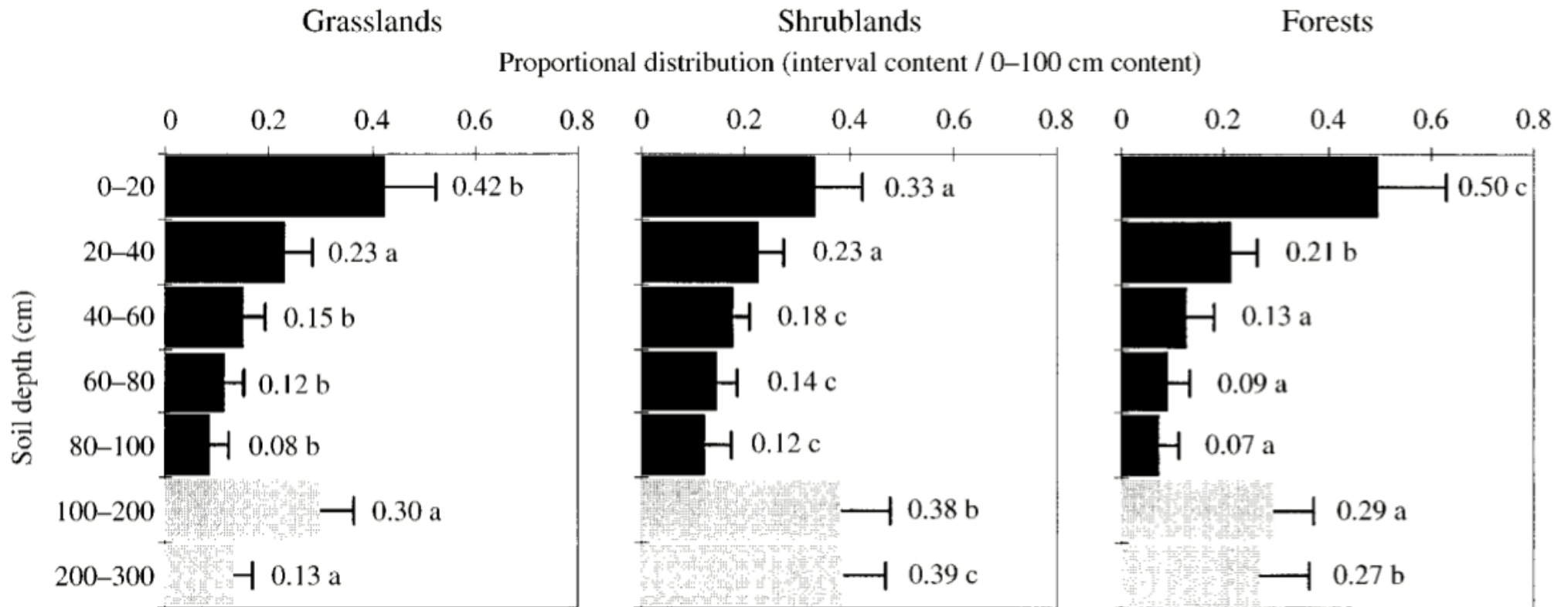
- **Contexte pédologique :**
Sols peu fertiles, souvent acides, parfois engorgés
Effet usage historique
- **Des stocks de C élevés dans les sols, par rapport aux autres usages.**
- **Une pression de prélèvement accrue dans les années à venir.**



un stock de carbone important (80-90t C/ha en France métropolitaine), structuré verticalement



Une structuration verticale : des stocks de C décroissant avec la profondeur



Vertical distribution of soil organic carbon in Jobbagy, Ecological Applications, 2000

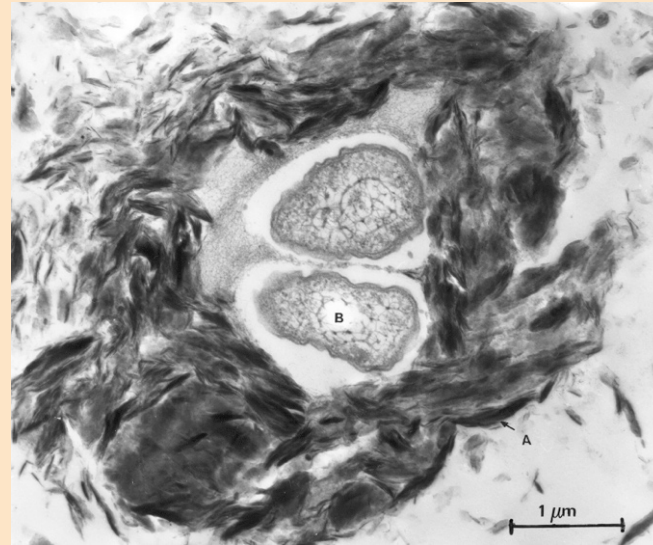
Qu'est-ce que la matière organique des sols ?

Composés avc au moins un atom d C lié à un atom d H

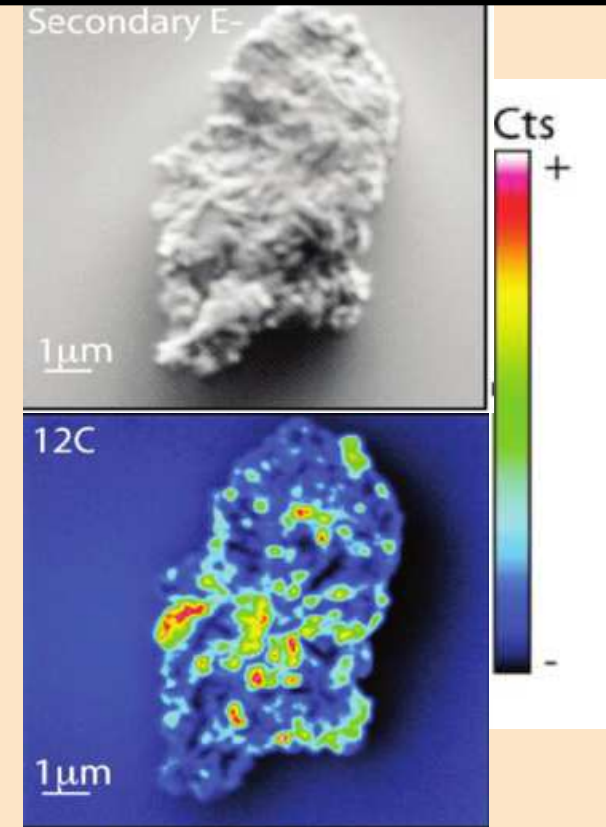
Sourc végétal, microbienn, animal



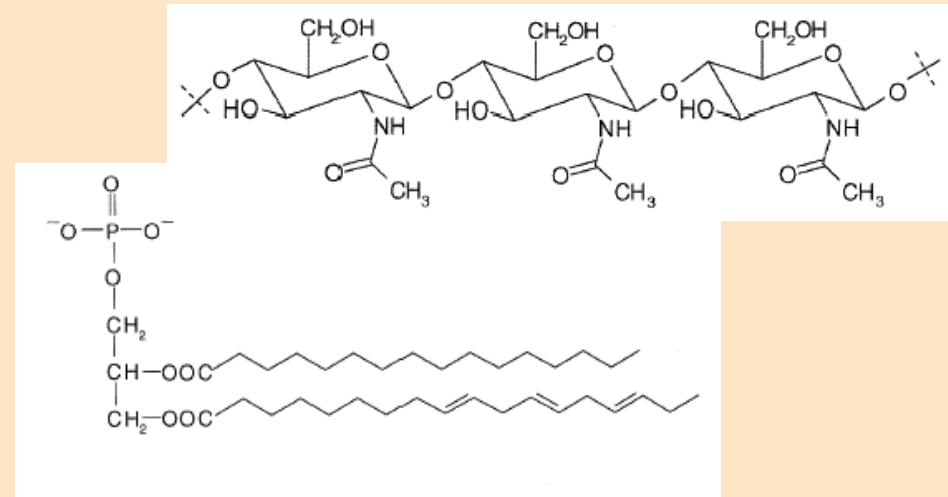
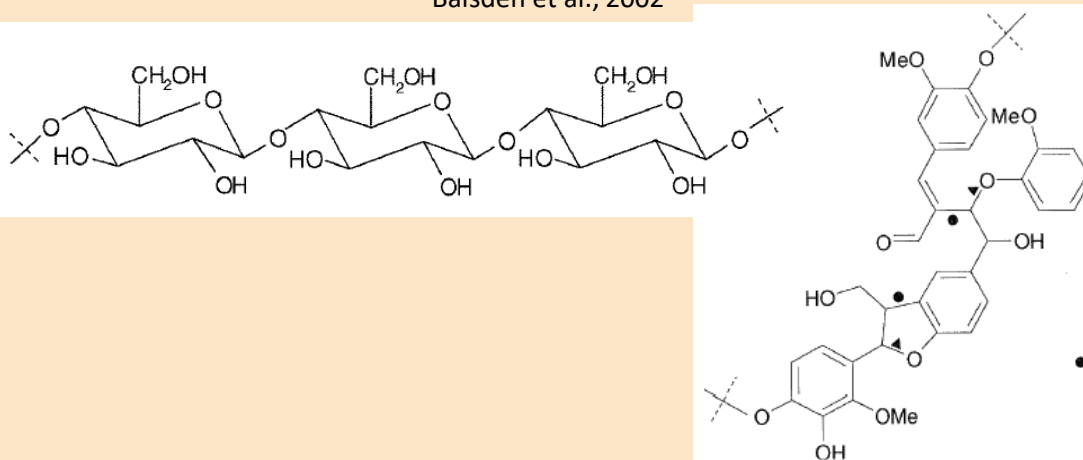
Baisden et al., 2002



Lmir



Rmusat et al, 2012

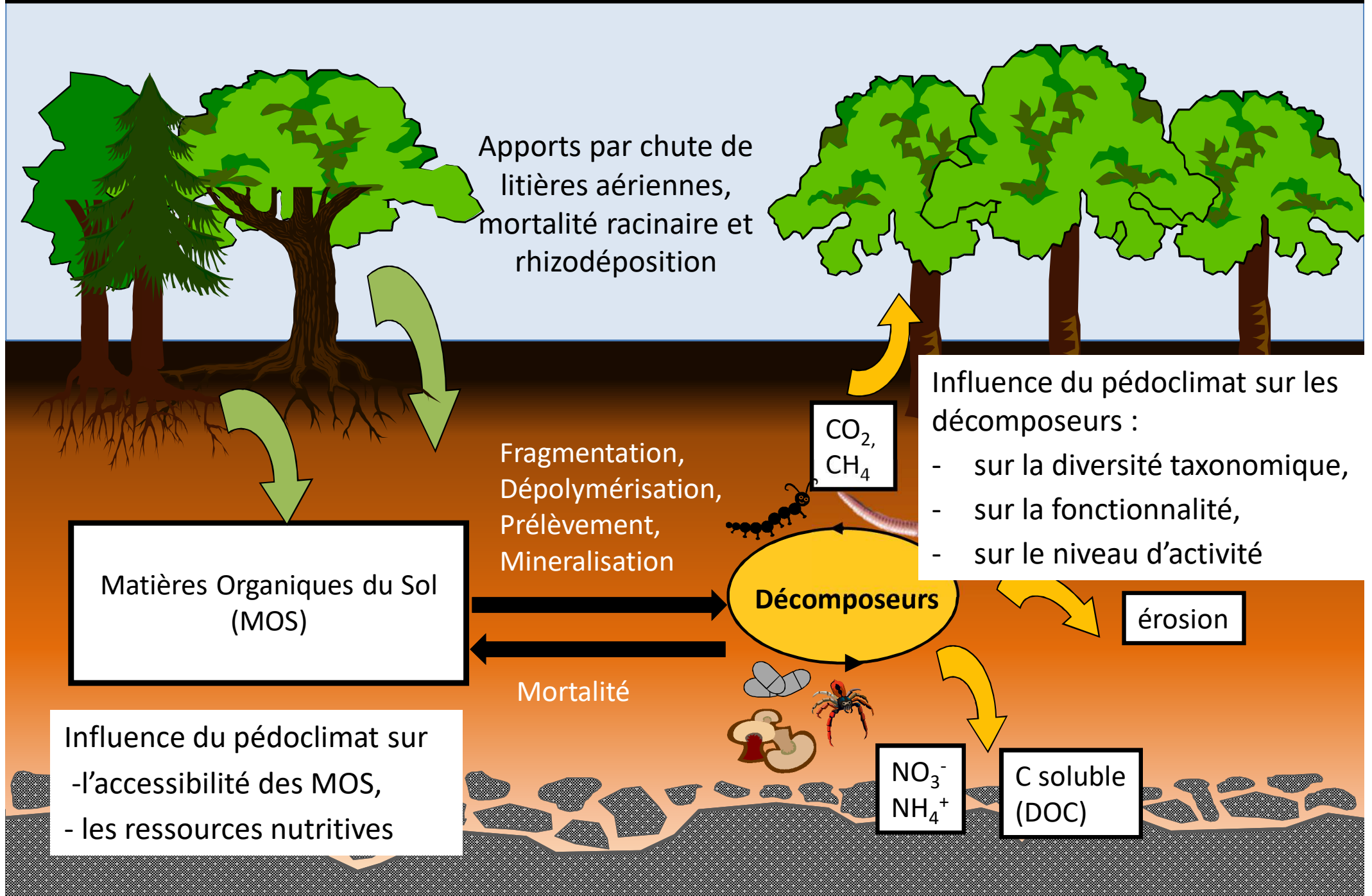




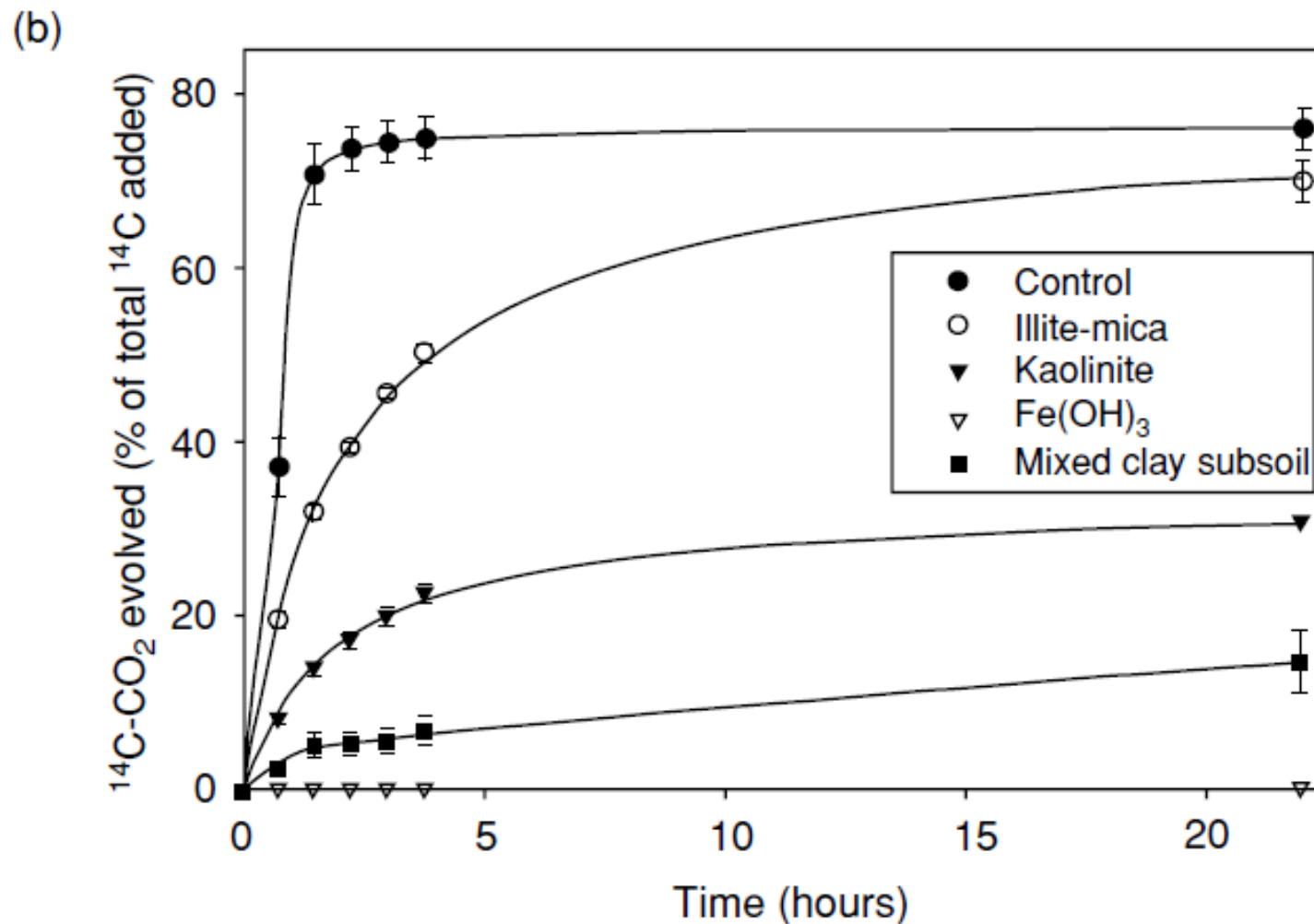
Les pratiques et facteurs influençant le stockage de carbone organique dans les sols forestiers :

- 1. analyse quantitative,**
- 2. facteurs de contrôle,**
- 3. possibilités d'action pour un stockage additionnel**

Dynamique des matières organiques dans les sols : un stock soumis à des entrées et à des sorties continues



Mécanismes à l'origine de la persistance du C dans les sols : les interactions avec les phases minérales



Jones and Edwards, SBB, 1998

Les interactions avec les phases minérales diminuent la production de CO₂ de cellules bactériennes après addition de citrate marqué au ¹⁴C

Spécificités des sols forestiers : Des sols souvent acides → une protection par les argiles, mais importance d'autres formes de protection

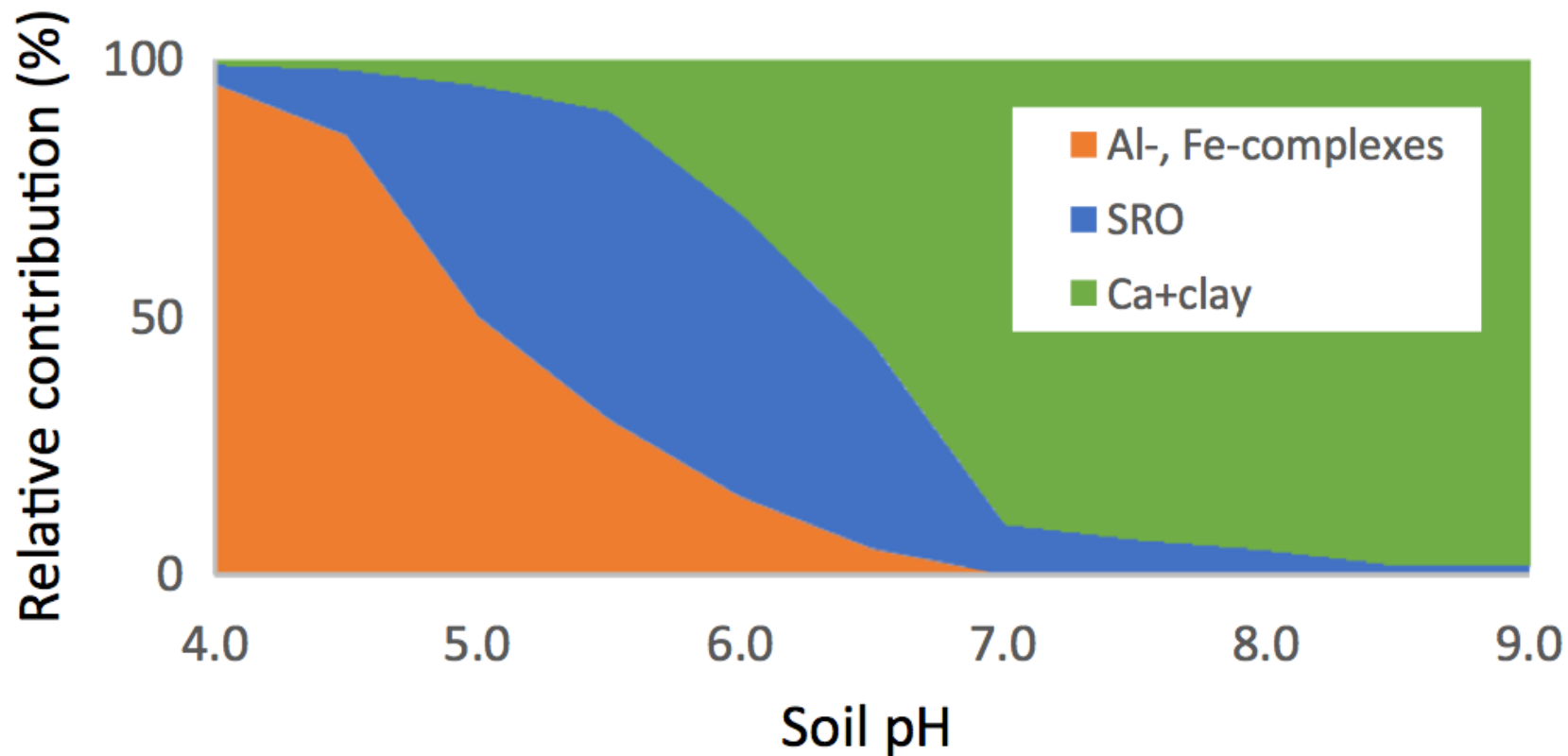
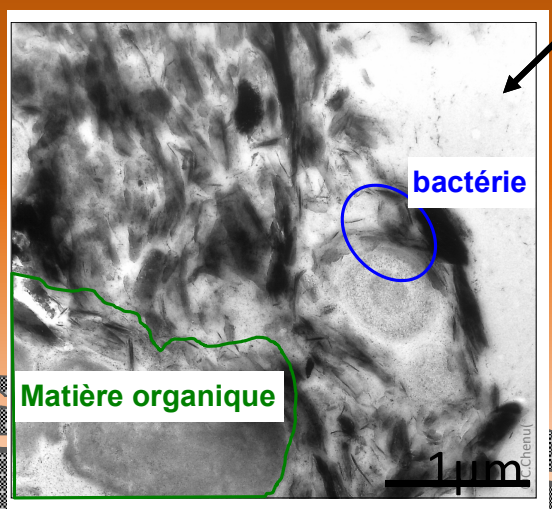
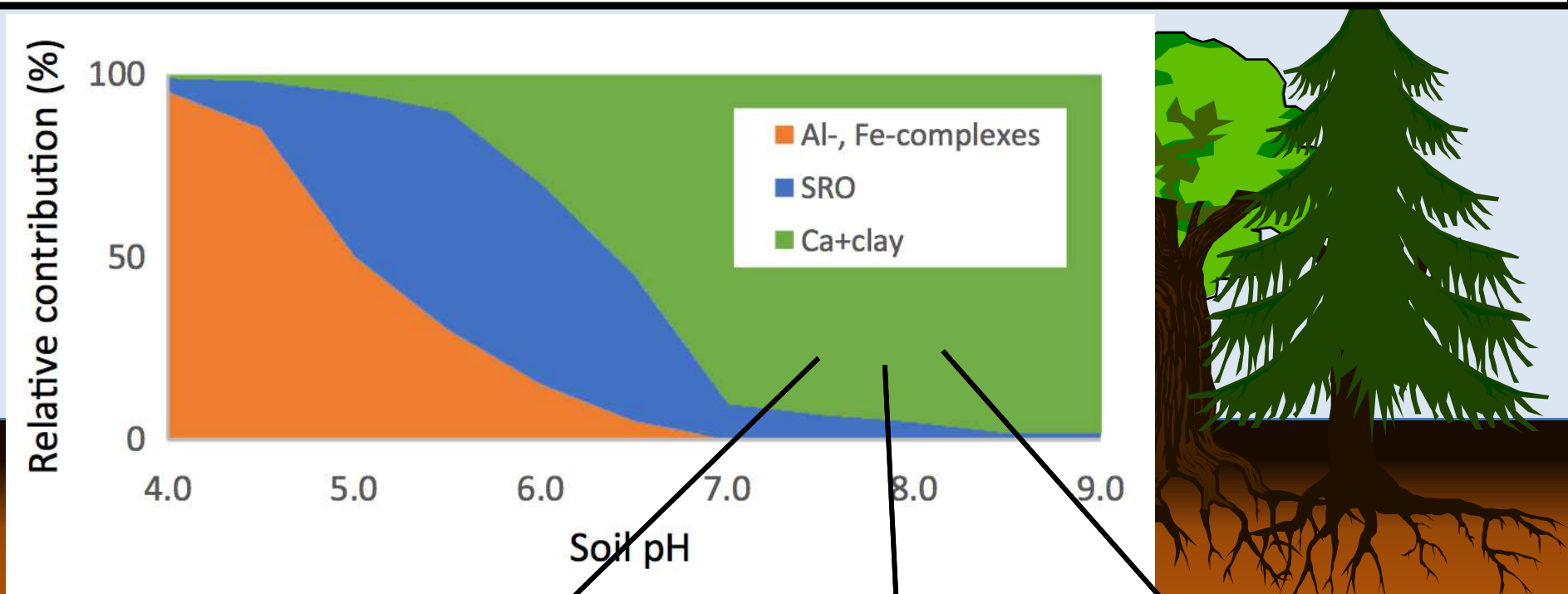
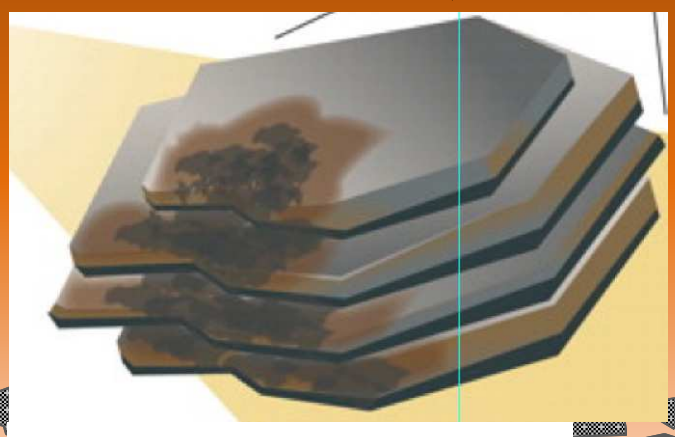


Fig. 3 Proposed conceptual model of how horizon-level soil pH controls the relative importance of SOM stabilization

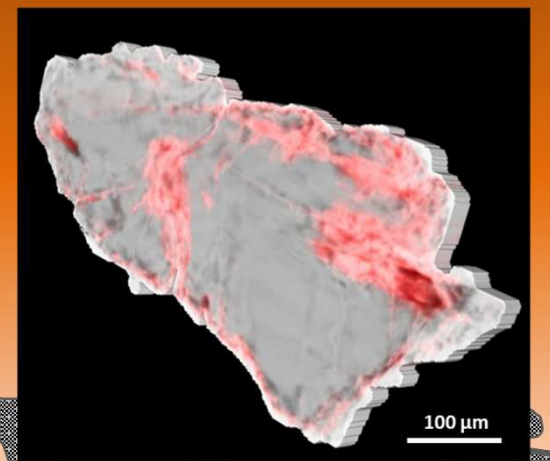
Spécificités des sols forestiers : Des sols souvent acides → une protection par les argiles, mais importance d'autres formes de protection



© Chenu

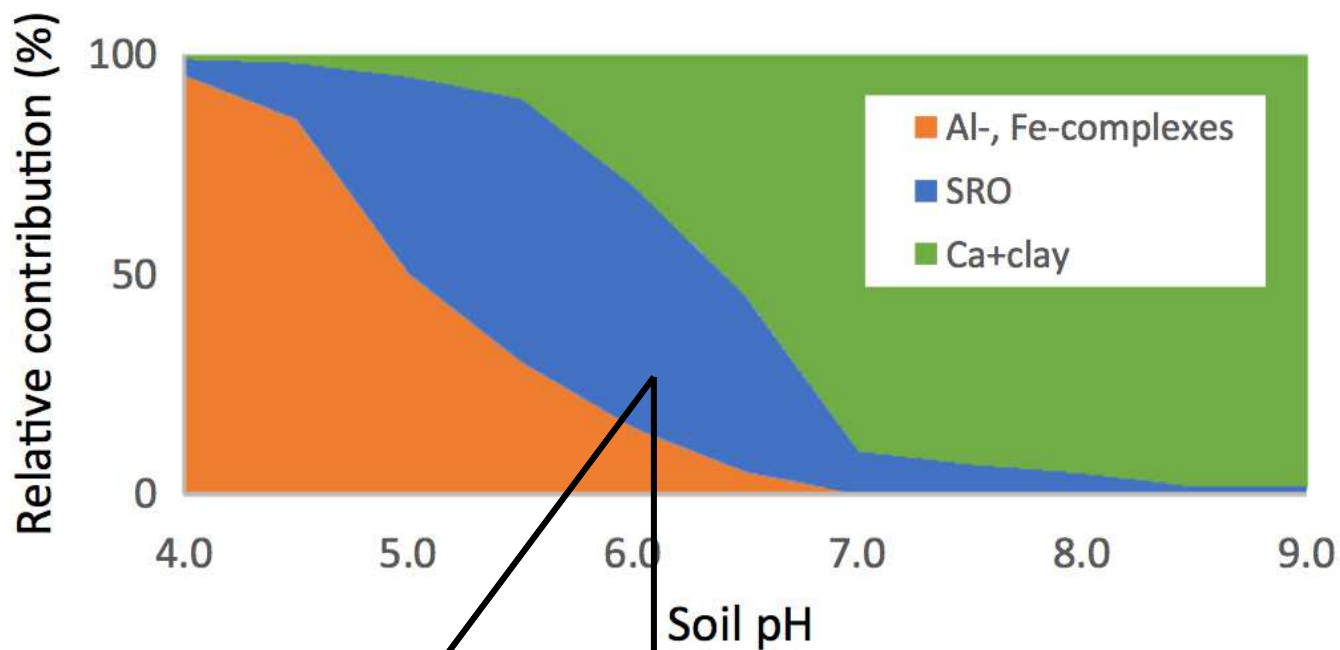


Chorover et al., Elements, 2007

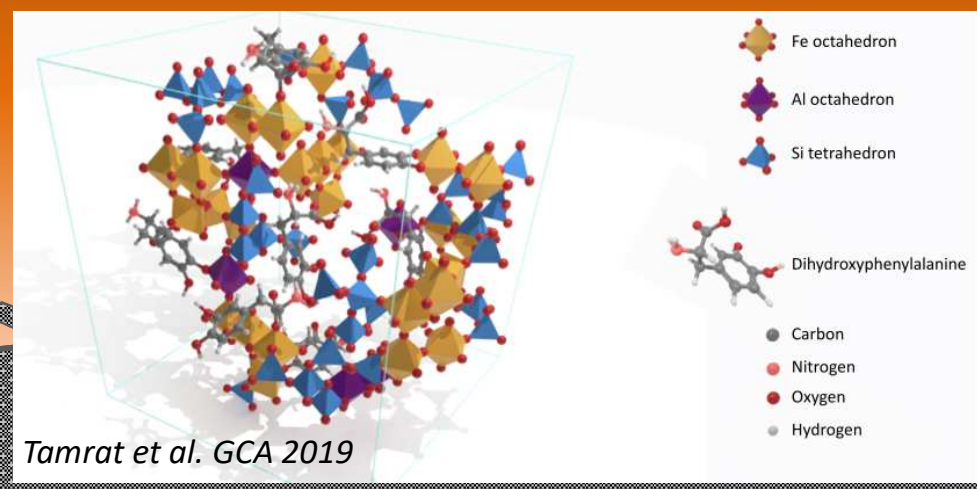
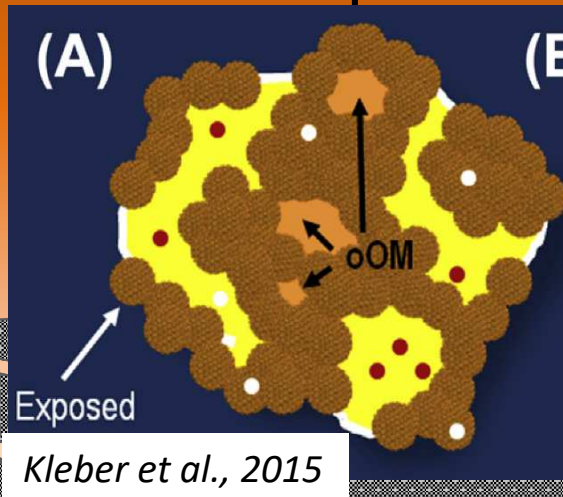
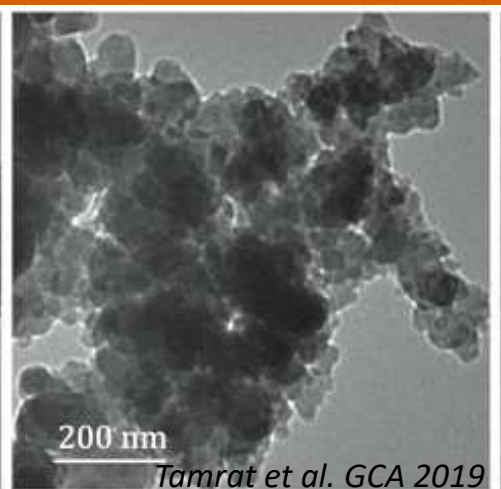


Van Der Kellen et al., in prep

Spécificités des sols forestiers : Des sols souvent acides → une protection par les argiles, mais importance d'autres formes de protection



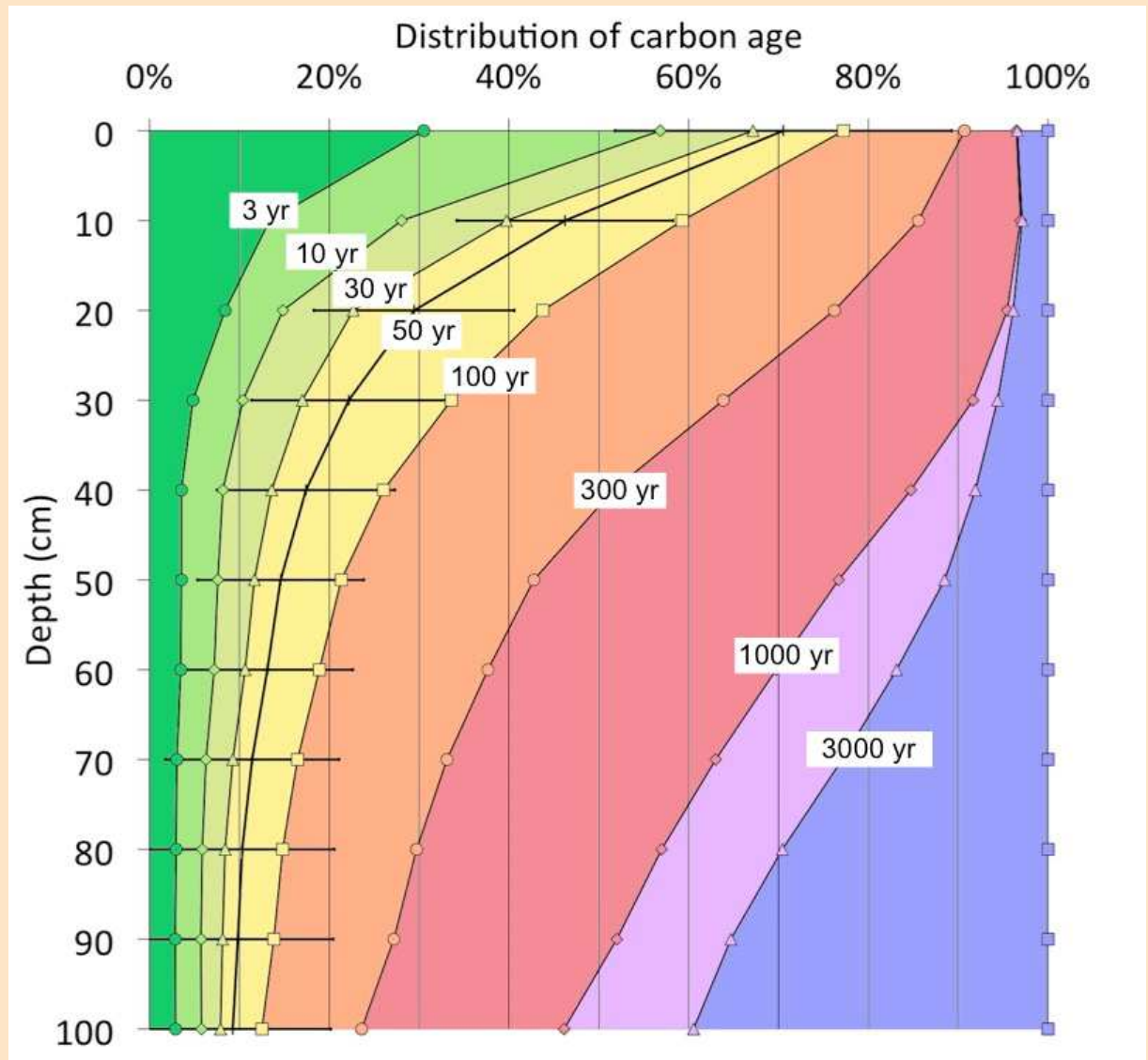
SRO = short range order minerals
minéraux à courte distance de cristallisation



Combien de temps le carbone organique reste-t-il dans le sol ?

Age moyen (sous les tropiques):

- 7 ans à 0 cm
- 1250 ans à 100cm



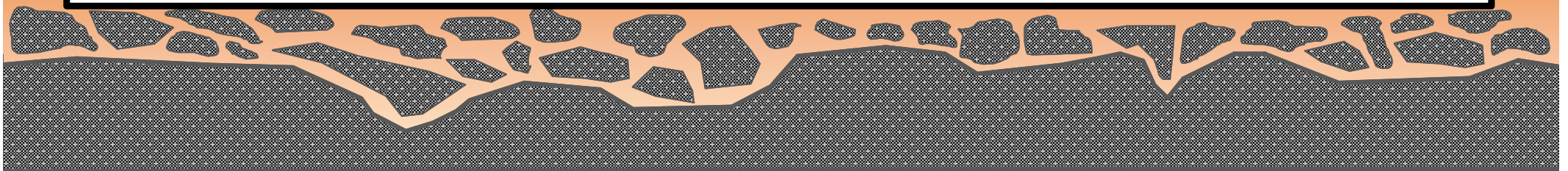
Balesdent et al, 2018. Nature

Distribution des âges obtenue pour des sols sous
forêts et prairies tropicales (> 17°C; 59 sites)

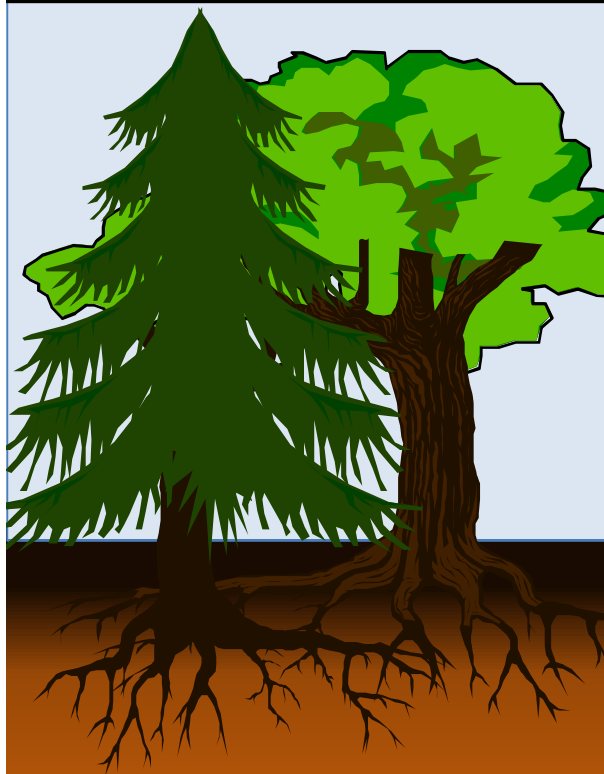


Les pratiques et facteurs influençant le stockage de carbone organique dans les sols forestiers :

- 1. analyse quantitative,**
- 2. facteurs de contrôle,**
- 3. possibilités d'action pour un stockage additionnel**



Quels enjeux concernant les sols forestiers au regard du 4P1000, de la neutralité C ?



Les enjeux

- Préserver les sols forestiers avec un stock élevé de C (forêts anciennes)
- Augmenter les plus faibles stocks (e.g. forêts plantées sur d'anciennes parcelles agricoles)
- Tout en fournissant davantage de bois pour la substitution des énergie fossiles
- Dans un climat changeant

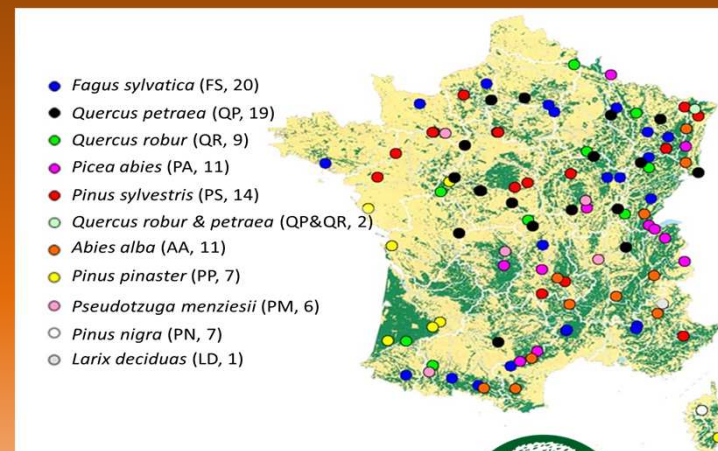
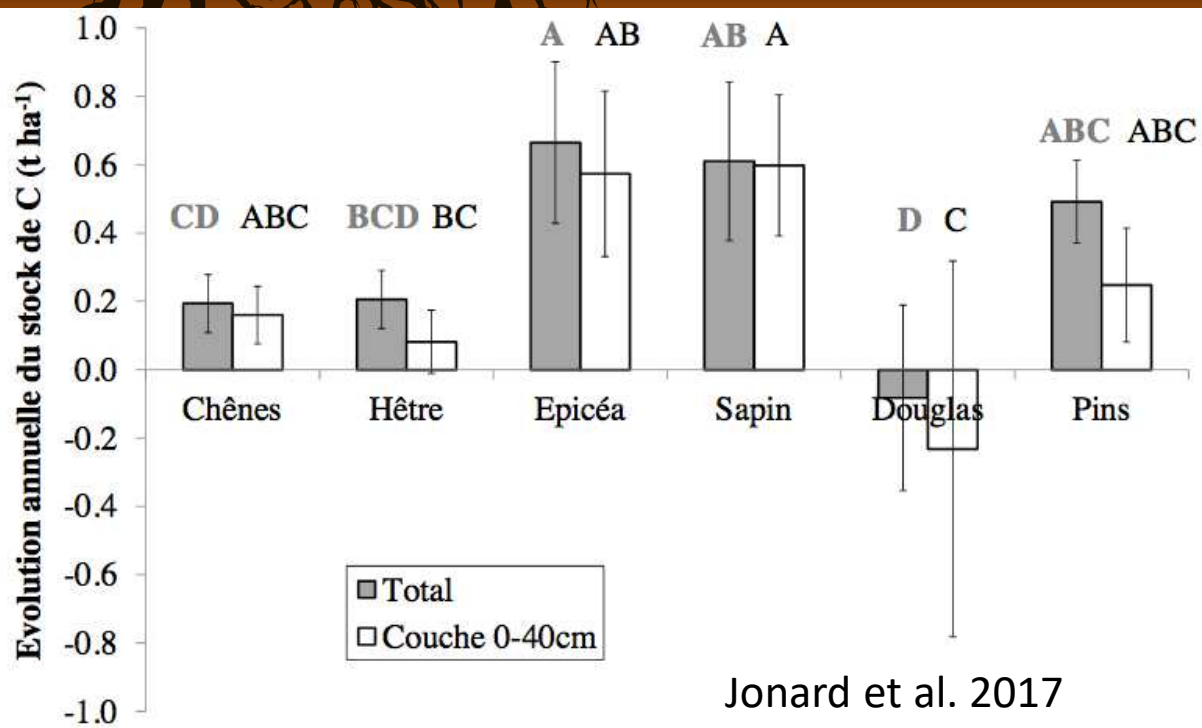
Un objectif pour la neutralité C de la France d'ici 2050

(Stratégie Nationale Bas Carbone) : stockage additionnel de **0,130 tC/ha/an dans les sols**

Quels enjeux concernant les sols forestiers au regard du 4P1000, de la neutralité C ?

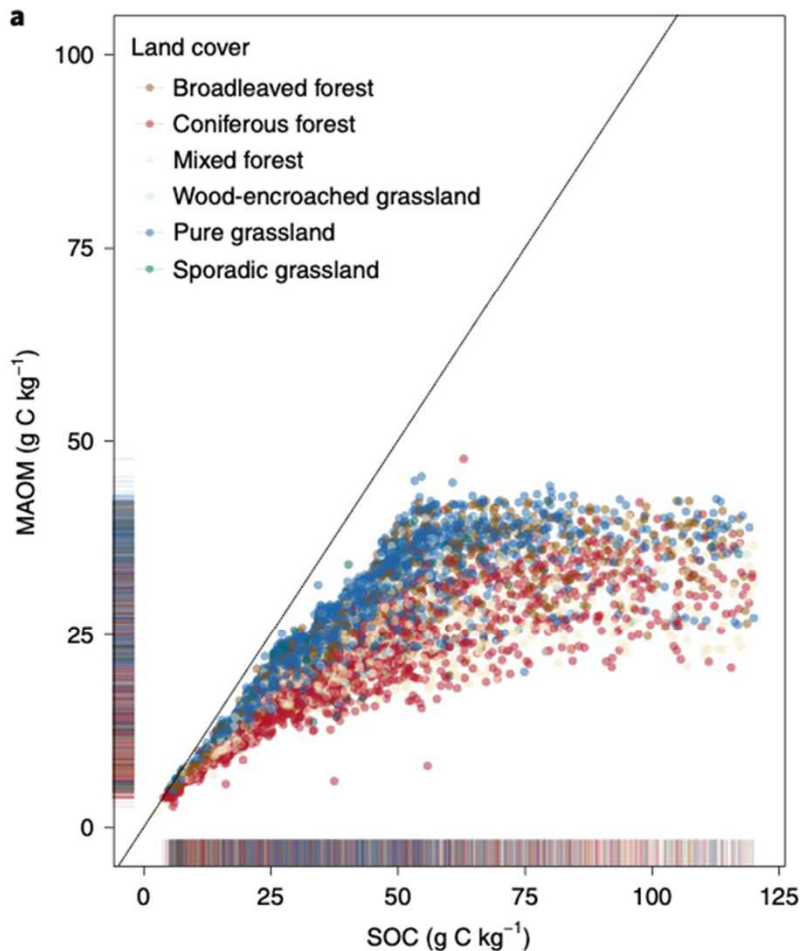


Un objectif pour la neutralité C de la France d'ici 2050 (Stratégie Nationale Bas Carbone) : stockage additionnel de 0,130 tC/ha/an

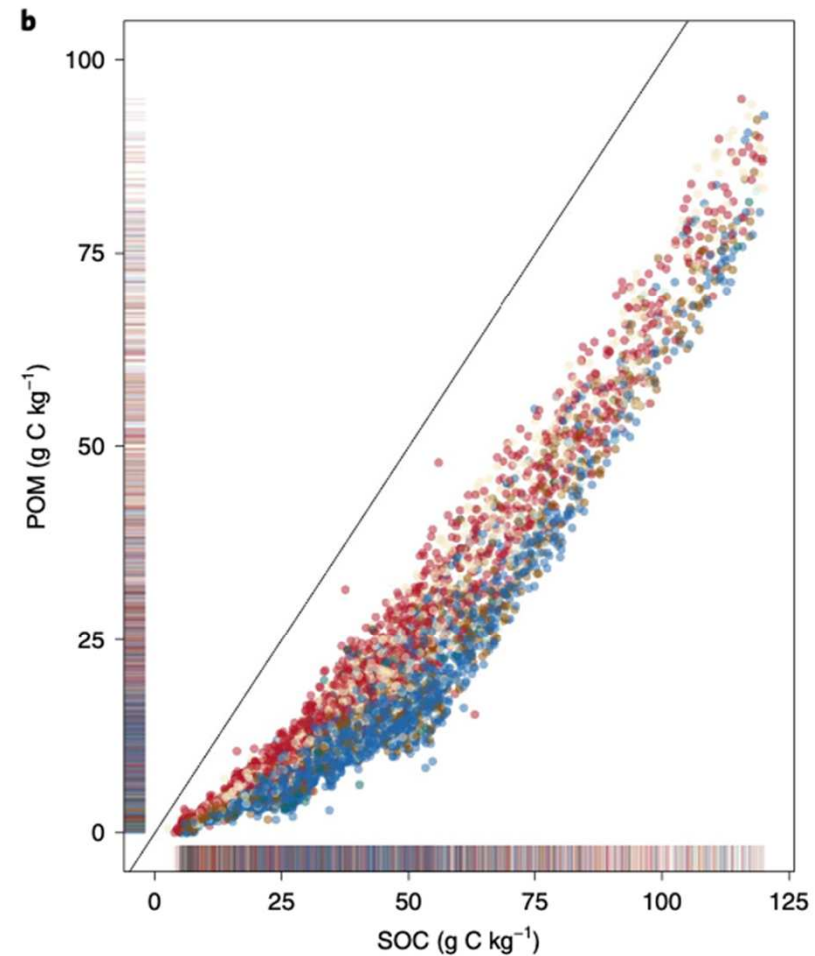


Le concept de saturation en C des sols

MAOM: C dans les associations avec les minéraux fins, qui est séquestré pendant longtemps



POM: C particulière, sous forme de débris végétaux, à durée de vie courte.

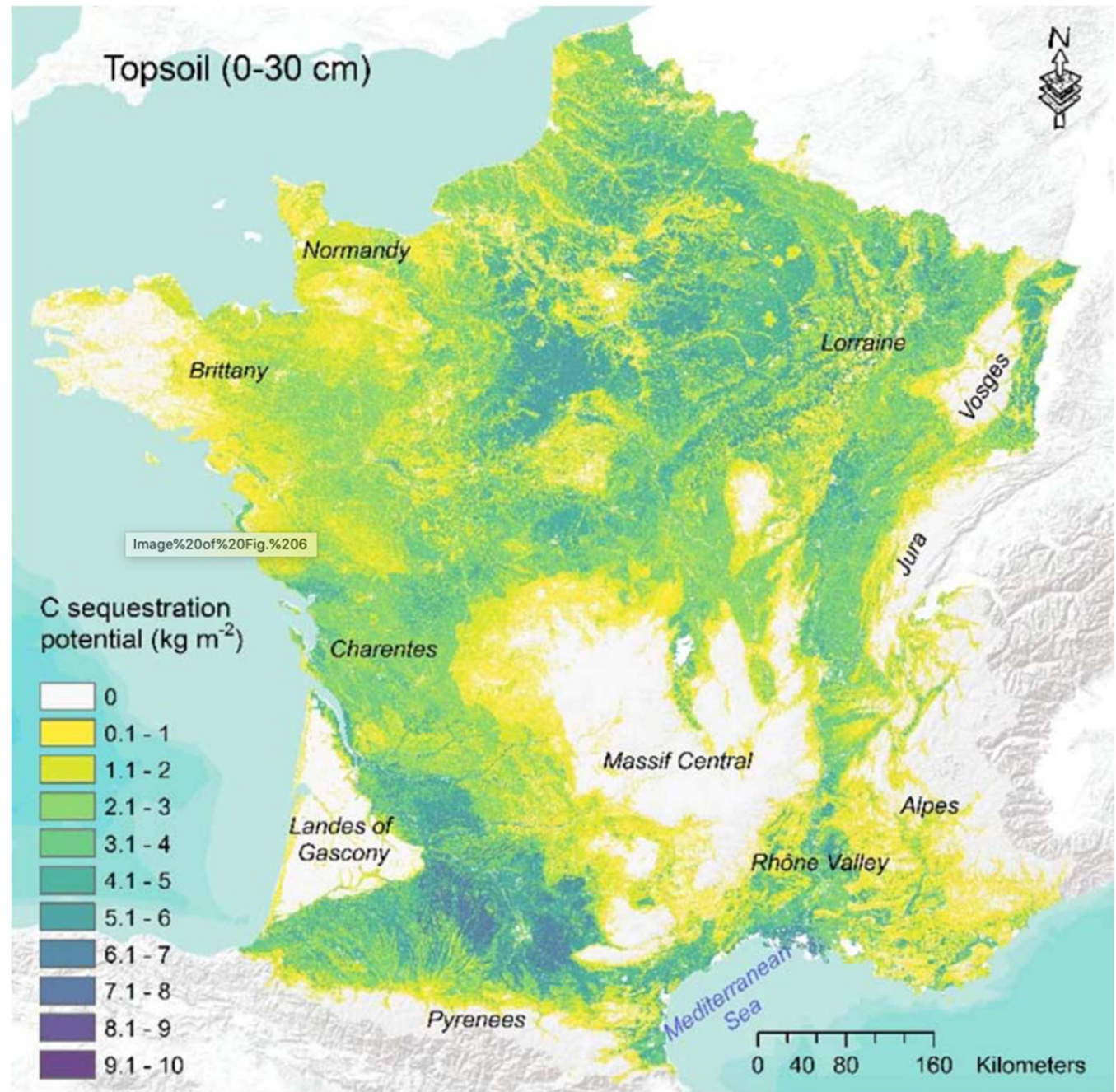
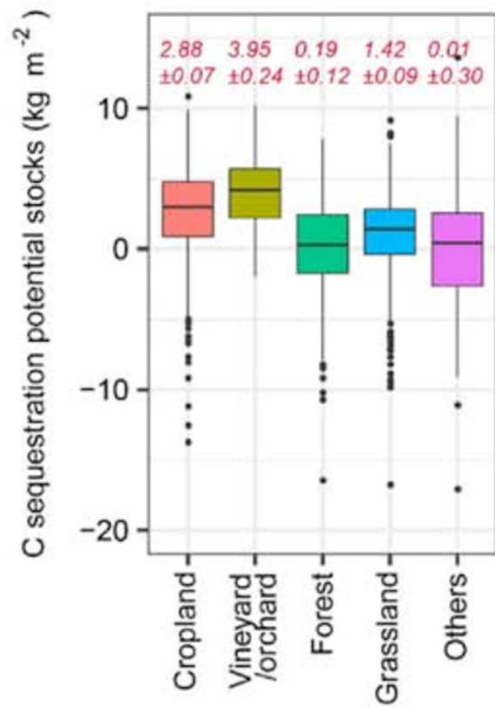


Cotrufo et al. Nat Comm 2019

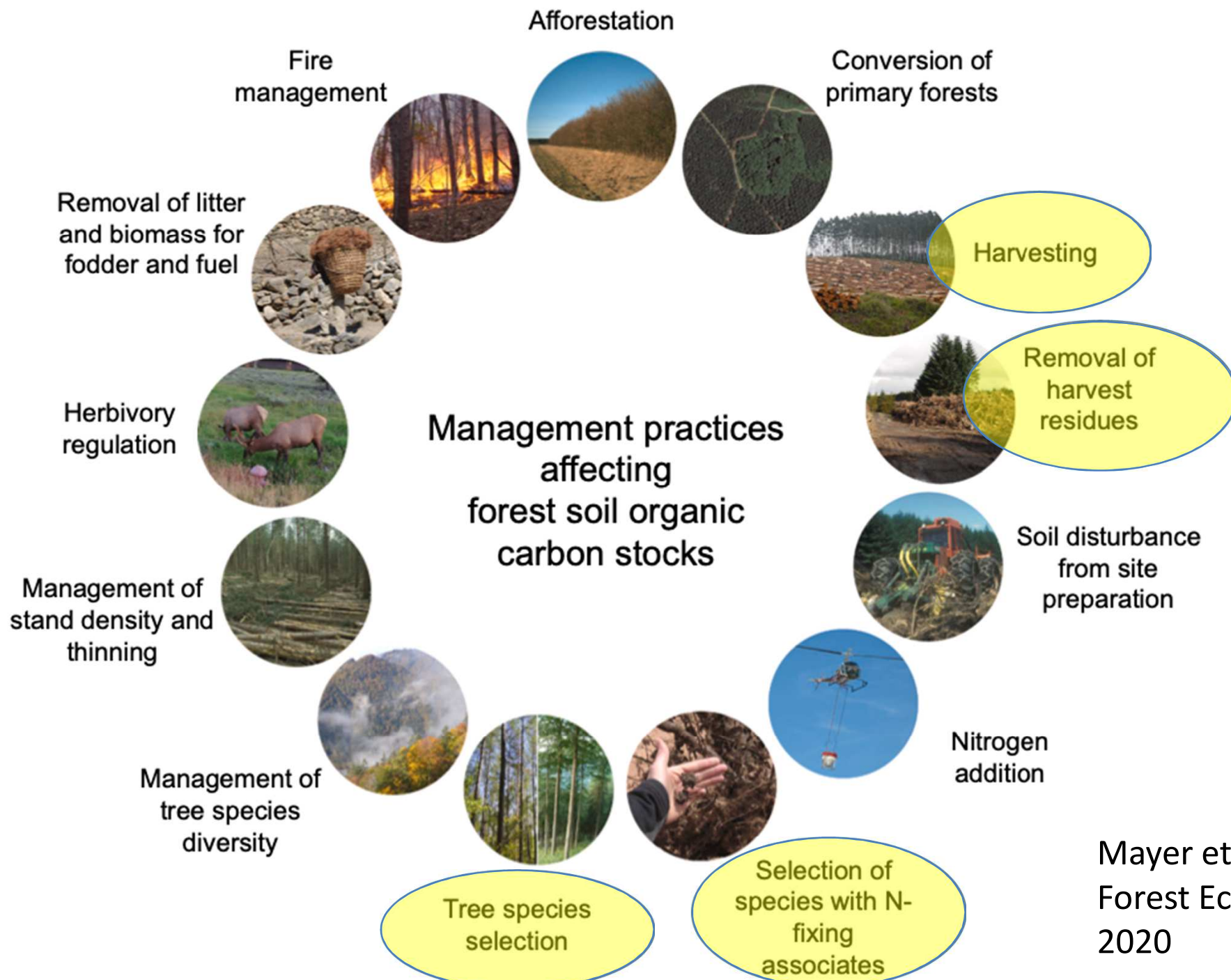
N= 9415 analyses. MAOM = fractions <53microns

On observe une saturation de la quantité de C dans un sol qui est associée aux minéraux (40 gC /kg de sol)

Quel stockage additionnel possible dans les sols forestiers ? Notion de saturation en C

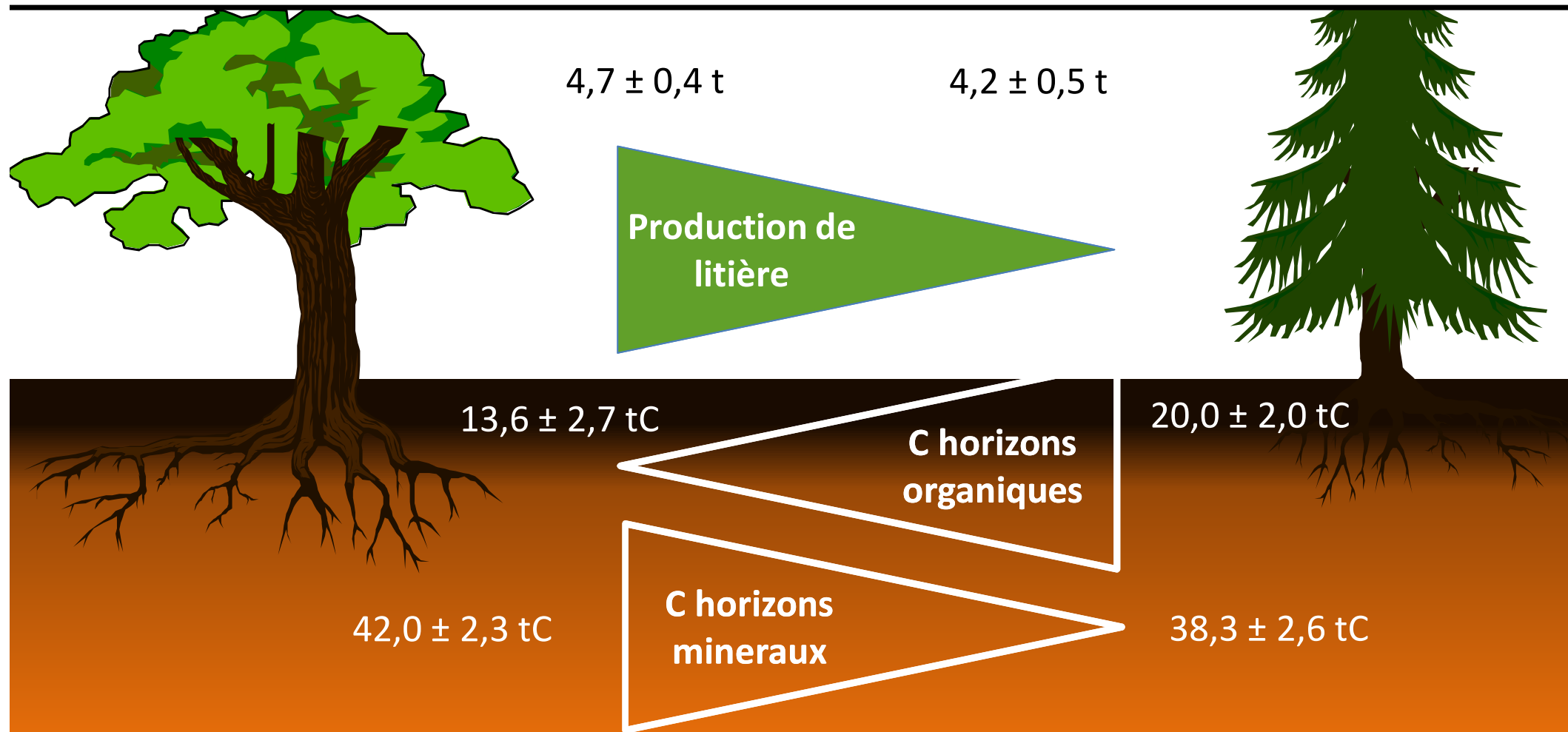


Actions de gestion qui affectent le stock de C dans les sols forestiers



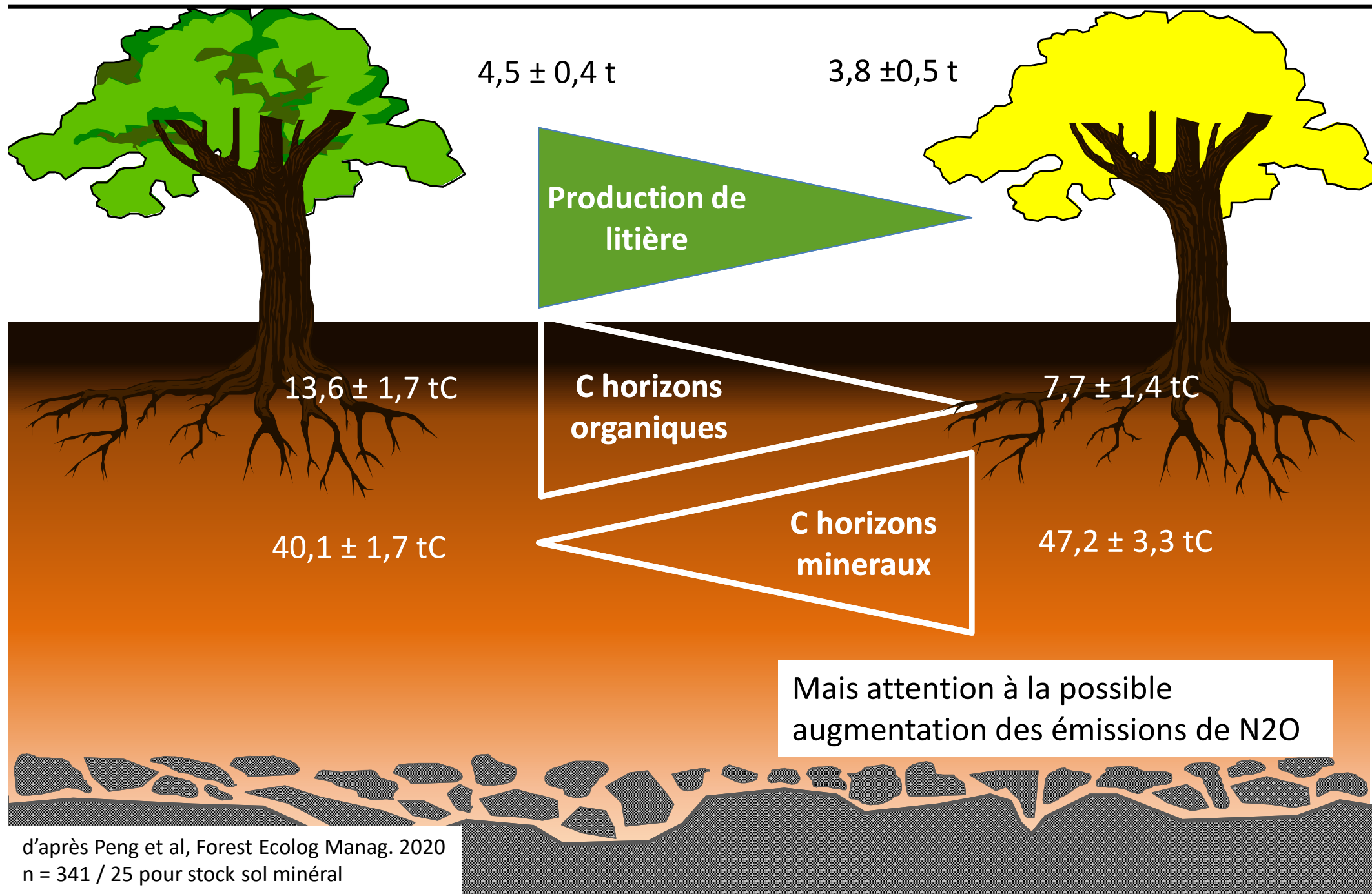
Mayer et al.,
Forest Ecol Manag
2020

Actions de gestion qui affectent le stock de C dans les sols forestiers : #1 feuillus versus résineux

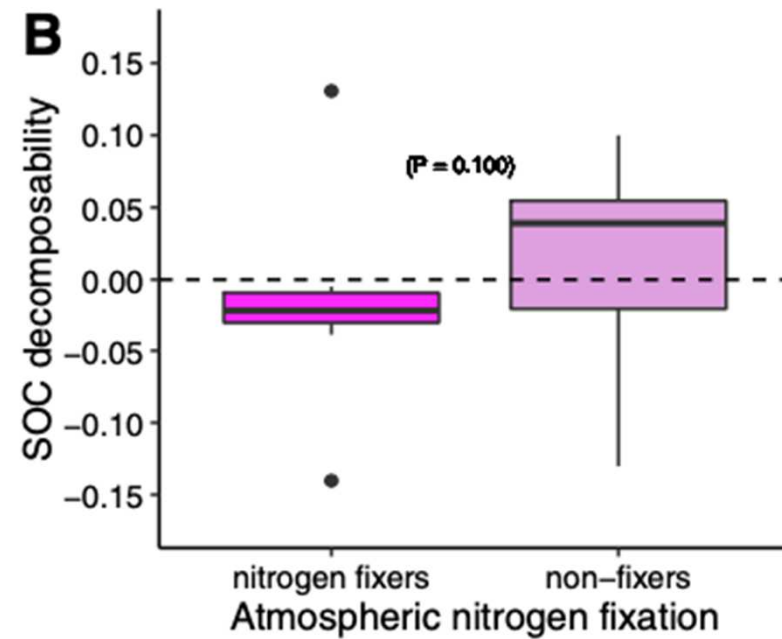
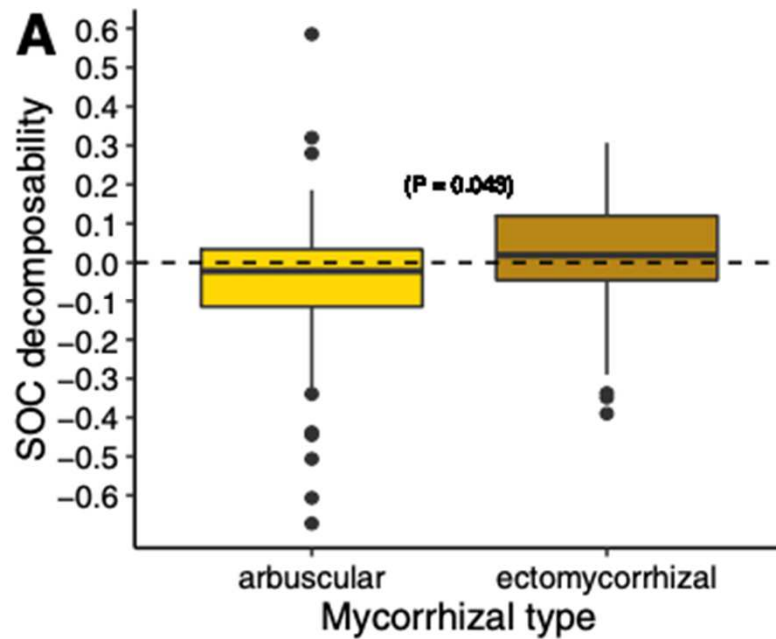


D'après Augusto et Boča 2022: les effets des essences sont plus marqués en climat défavorable et en sol acide et sableux

Actions de gestion qui affectent le stock de C dans les sols forestiers : #2 essences fixatrices d'azote

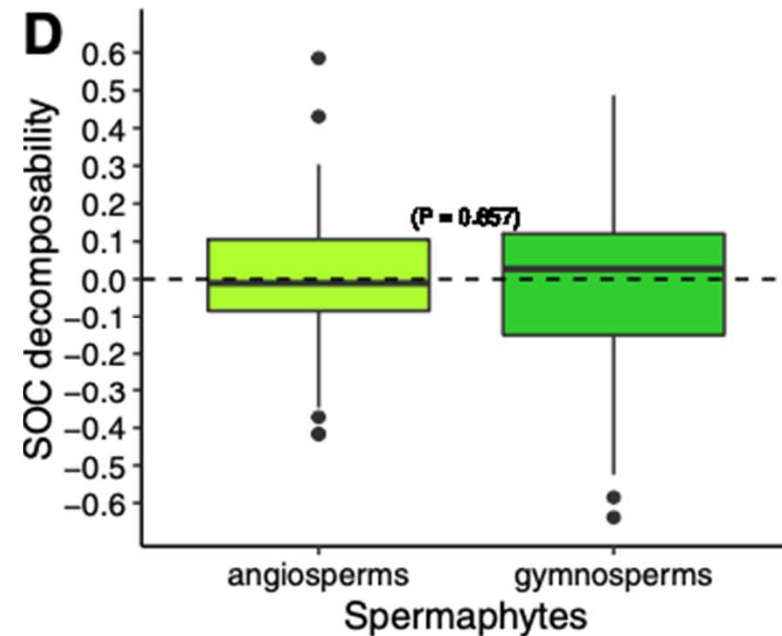


Actions de gestion qui affectent le stock de C dans les sols forestiers : les essences



Le carbone des sols est plus stable :

- sous feuillus
- sous essences à endomycorhizes
- sous fixateurs d'azote

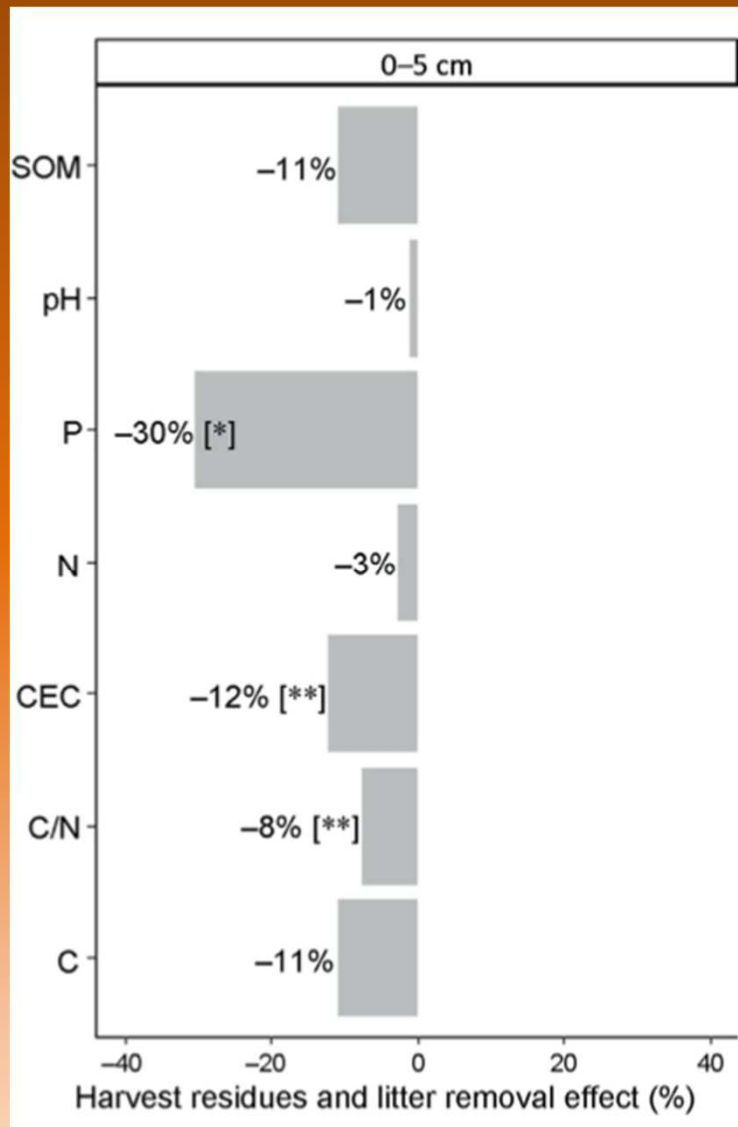


Réseau MOS :
 enlèvement des litières (4 à 12t
 biomasse/ha) et des menus bois
 (5 à 20t/ha), durant 5 ans.

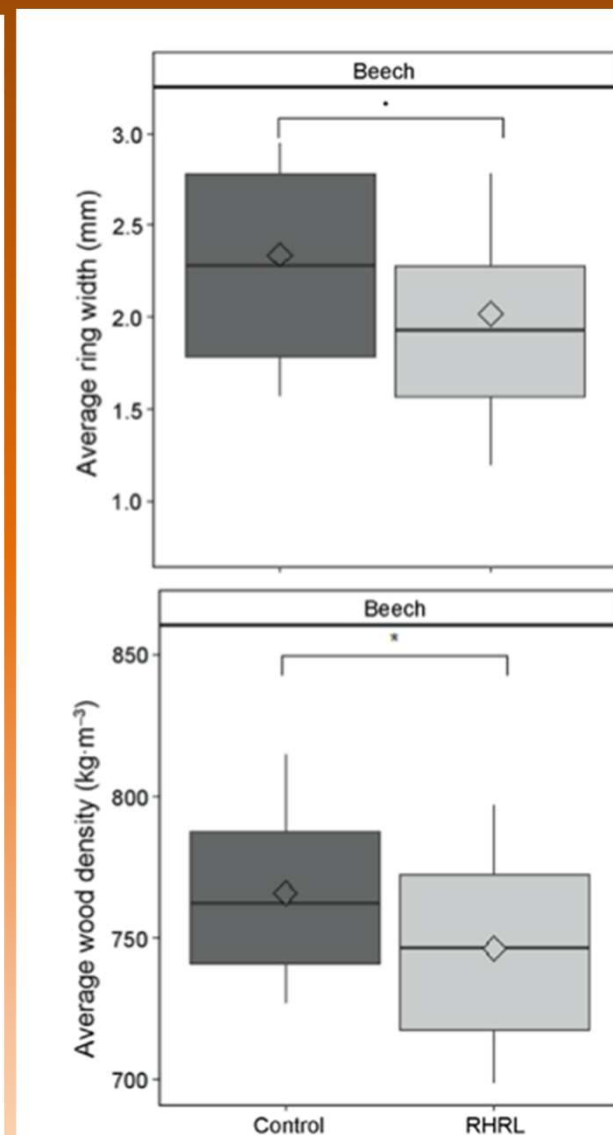
Actions de gestion qui affectent le stock de C dans les sols forestiers : #3 Export des rémanents



Roy et al, 2022



Effets dans le sol



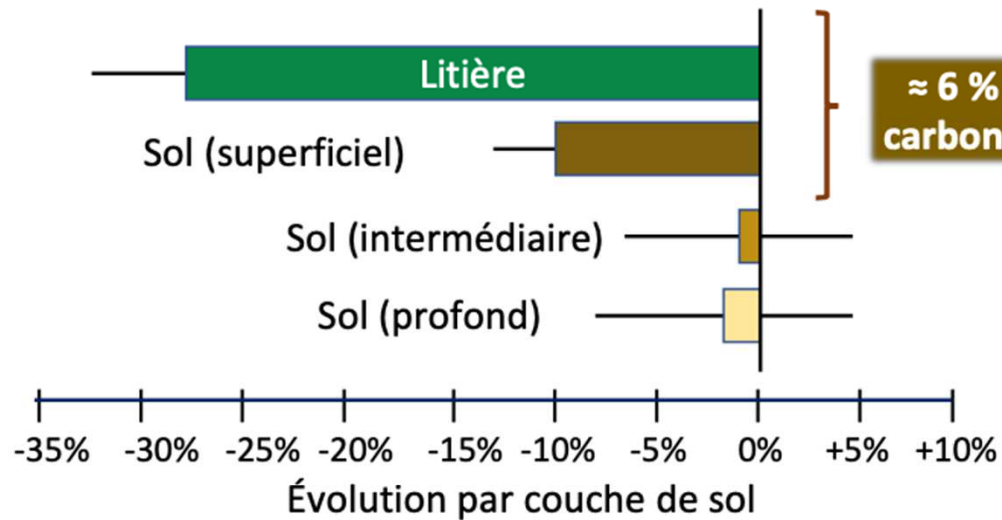
Effets sur la
 croissance des arbres

Actions de gestion qui affectent le stock de C dans les sols forestiers : #4 Coupe rase

Effets des coupes rases sur...

le carbone du sol ?

La coupe rase induit en général une **perte de carbone du sol** dans **les premières années** après la coupe...



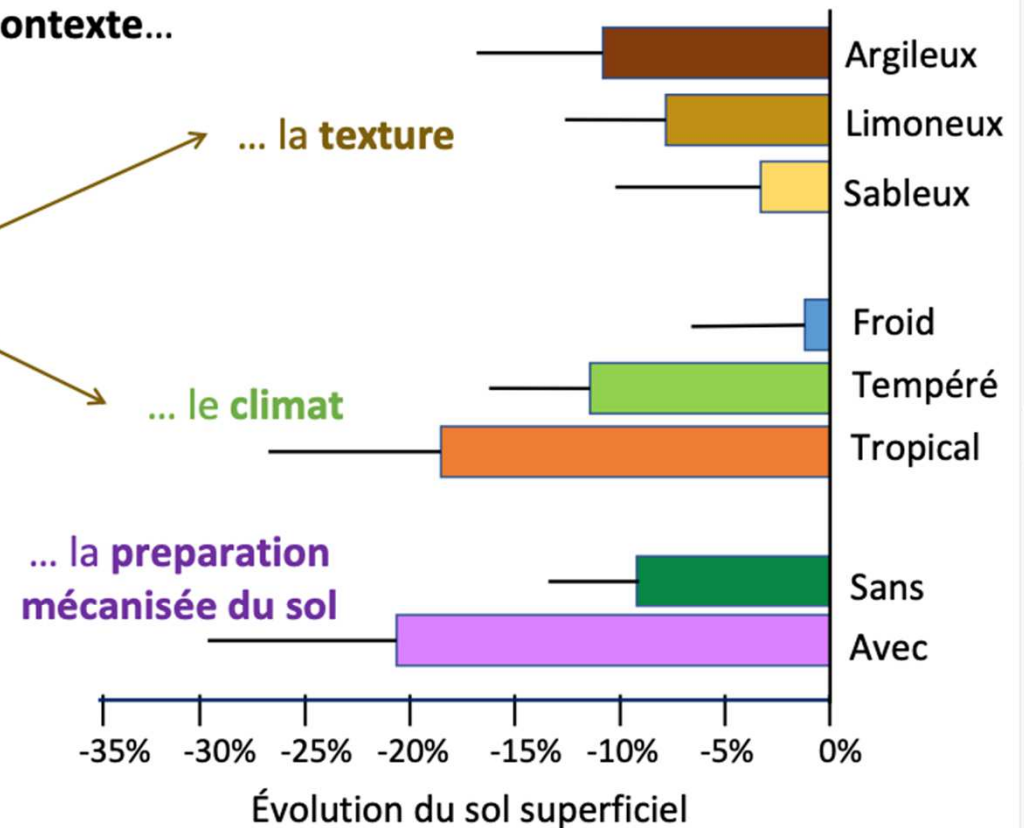
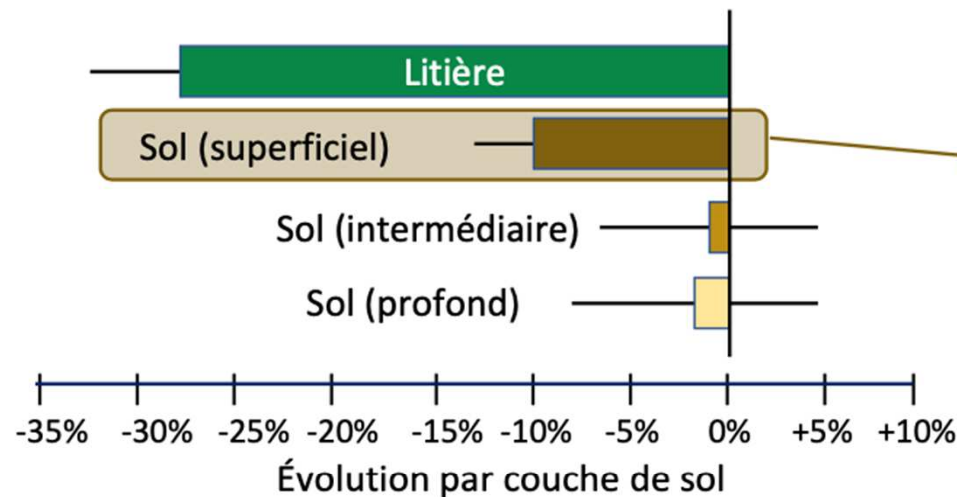
... avec une durée de récupération de l'ordre de **plusieurs décennies**

Actions de gestion qui affectent le stock de C dans les sols forestiers : #4 Coupe rase

Effets des coupes rases sur...

le carbone du sol ?

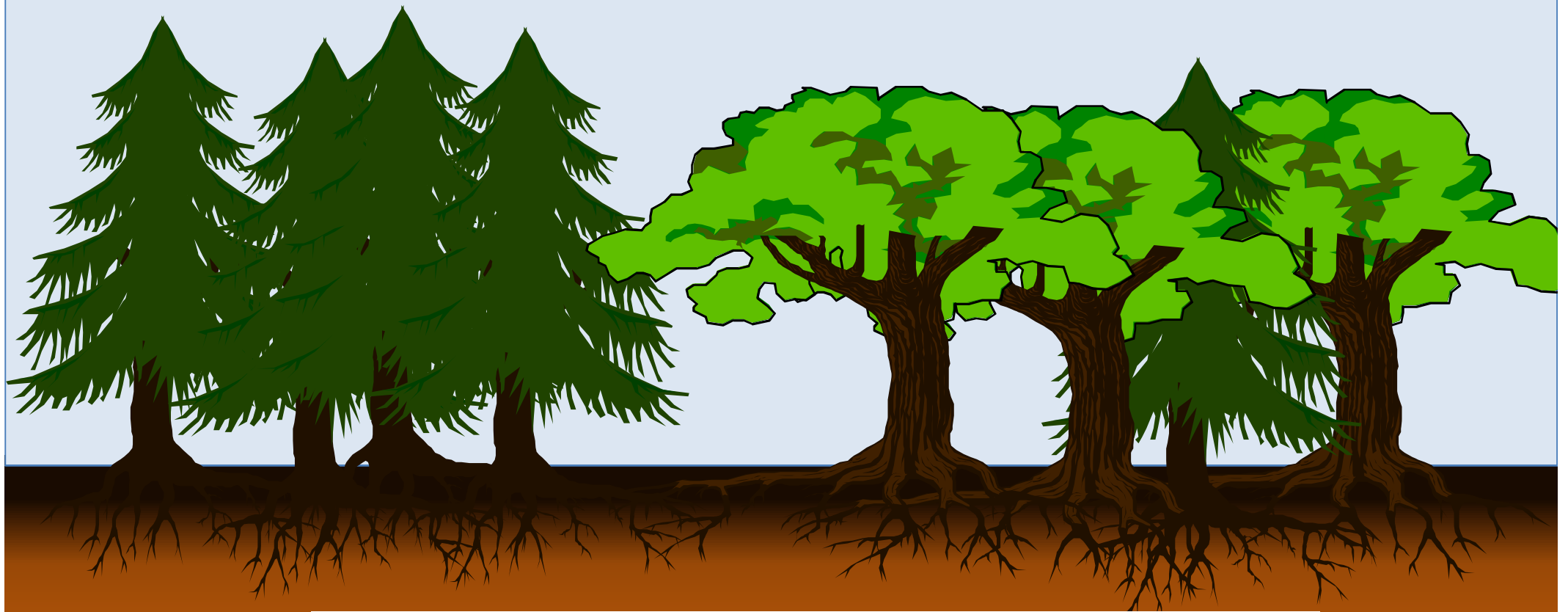
Des effets avec de fortes variations, et qui dépendent **du contexte...**



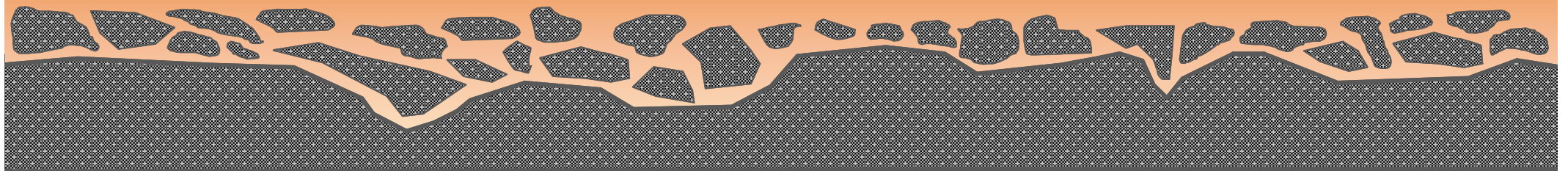


Le stockage de carbone organique des sols forestiers :

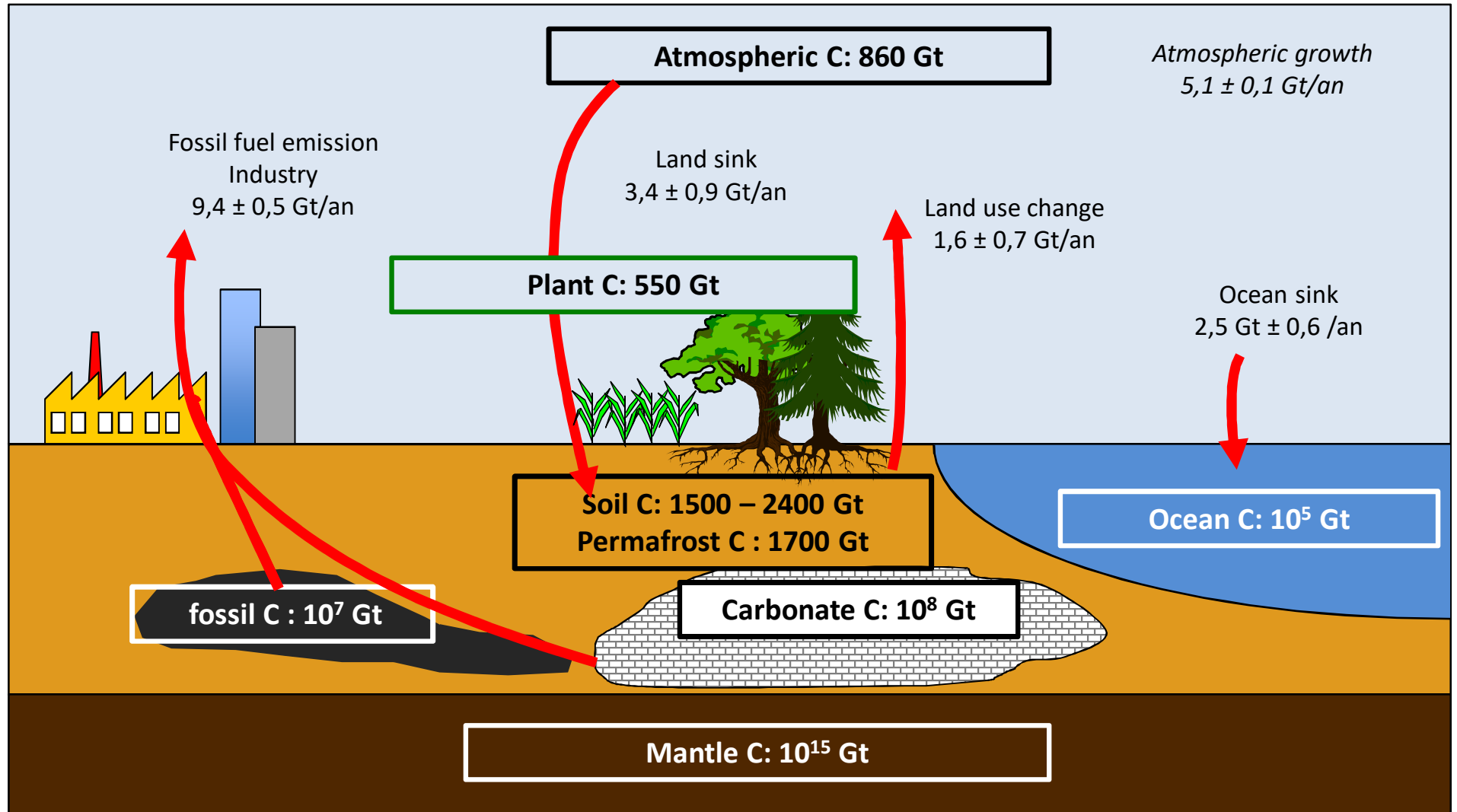
- Des stocks importants, avec une structuration verticale
- Un renouvellement de la vision des facteurs de contrôle (rôle des micro-organismes, de l'accessibilité, des besoins microbiens, contexte pédoclimatique...)
- Un potentiel de stockage additionnel, mais surtout des stocks à préserver tout en maintenant une sylviculture dynamique, à raisonner en fonction du contexte (fertilité, besoins économiques du territoire)
- De nombreux services écosystémiques co-bénéficiaires d'un stockage additionnel de C (fertilité, qualité des eaux, biodiversité...)



Merci pour votre attention !



Le cycle global du carbone

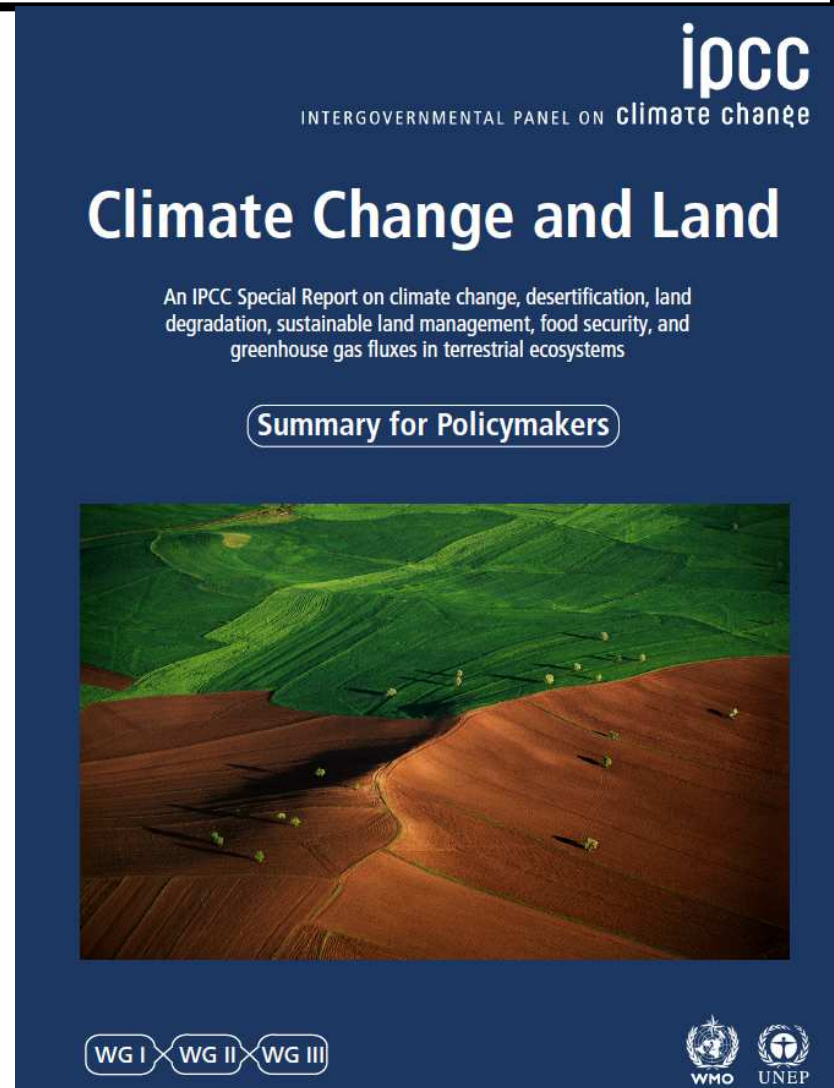


Green Deal : La neutralité C d'ici 2050

Rapport spécial du GIEC sur les Terres, 2019

→ Maintenir l'augmentation de la température moyenne en dessous de +1,5°C implique d'atteindre la neutralité carbone à l'échelle mondiale d'ici 2050 au plus tard.

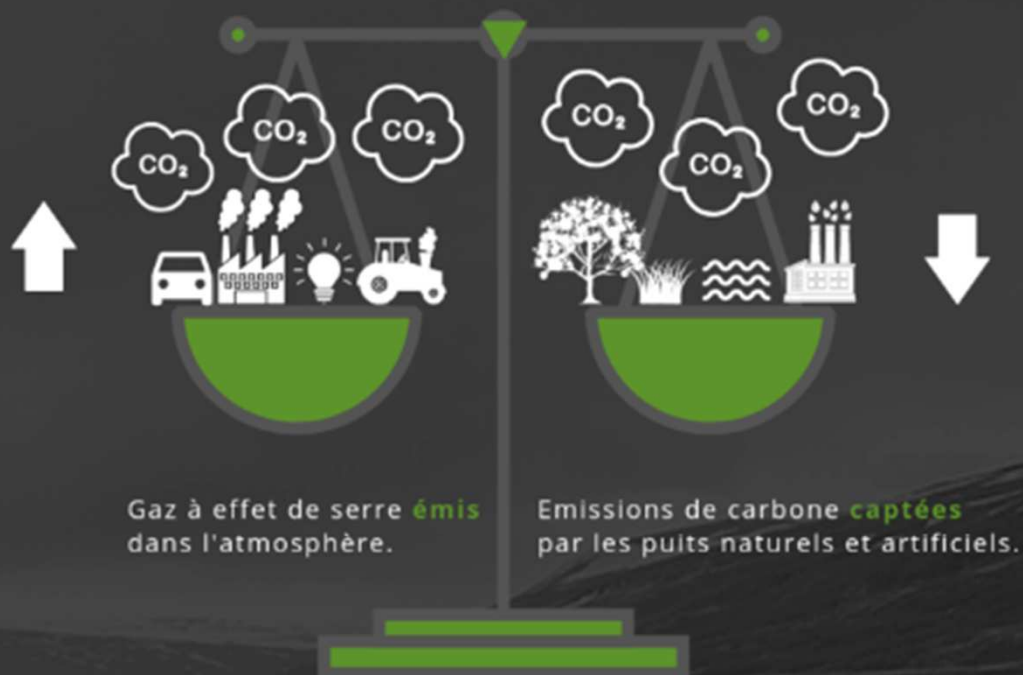
- réduction des émissions de CO₂ liées à l'utilisation de combustibles fossiles et à la déforestation, ainsi que les émissions d'autres gaz à effet de serre (N₂O, CH₄)
- Préservation et augmentation de la séquestration de CO₂ dans la biosphère (plantes et sol)



Green Deal : La neutralité C d'ici 2050

La France s'est fixée comme objectif d'atteindre la neutralité carbone en 2050. Celui-ci est inscrit dans le projet de loi Énergie-Climat.

LA NEUTRALITÉ CARBONE, C'EST QUOI ?



La neutralité carbone implique qu'il y ait un strict équilibre entre les gaz à effet de serre (GES) émis dans l'atmosphère et ceux captés par les puits naturels (forêts, sols, océans) ou artificiels (captage et stockage de CO₂).

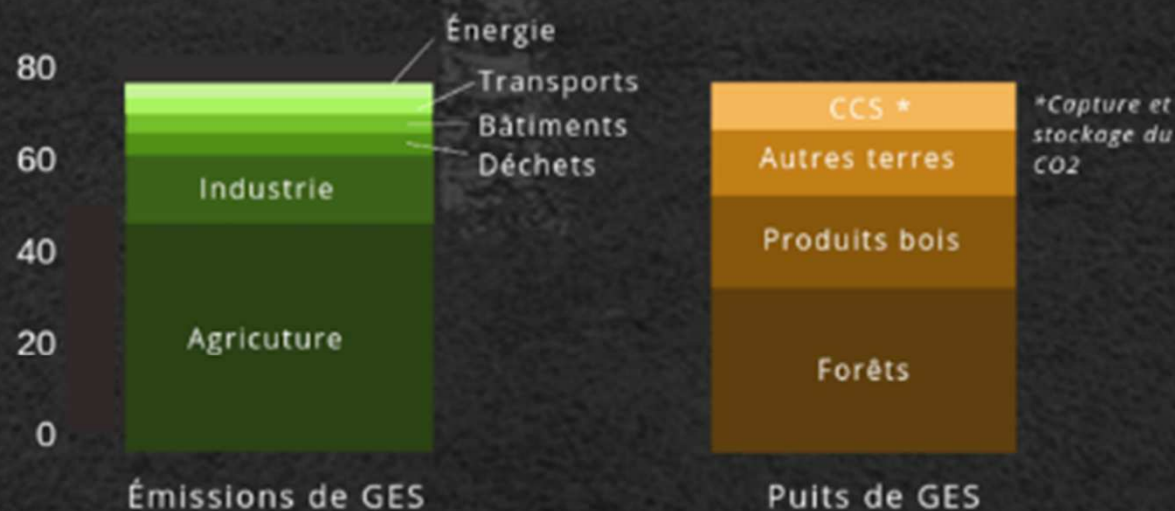
QUELS LEVIERS POUR Y ARRIVER ?

Par ordre d'importance

- 1** Réduire nos consommations d'énergie et de matières premières.
- 2** Décarboner nos modes de production.
- 3** Préserver et améliorer les capacités de stockage naturel du CO₂.
- 4** Déployer des technologies de capture et stockage du CO₂.

ÉMISSIONS ET PUIXS DE GES EN FRANCE EN 2050

En millions de tonnes équivalent CO₂



QUELS EFFORTS SECTEUR PAR SECTEUR ?



Énergie

Décarbonation quasi-complète (énergies renouvelables, nucléaire, biomasse, efficacité énergétique...)



Bâtiments

Décarbonation quasi-complète (bâtiments neutres ou à énergie positive, rénovation énergétique...)



Transports

Décarbonation quasi-complète (carburants décarbonés, mobilité électrique ou hydrogène...)



Industrie

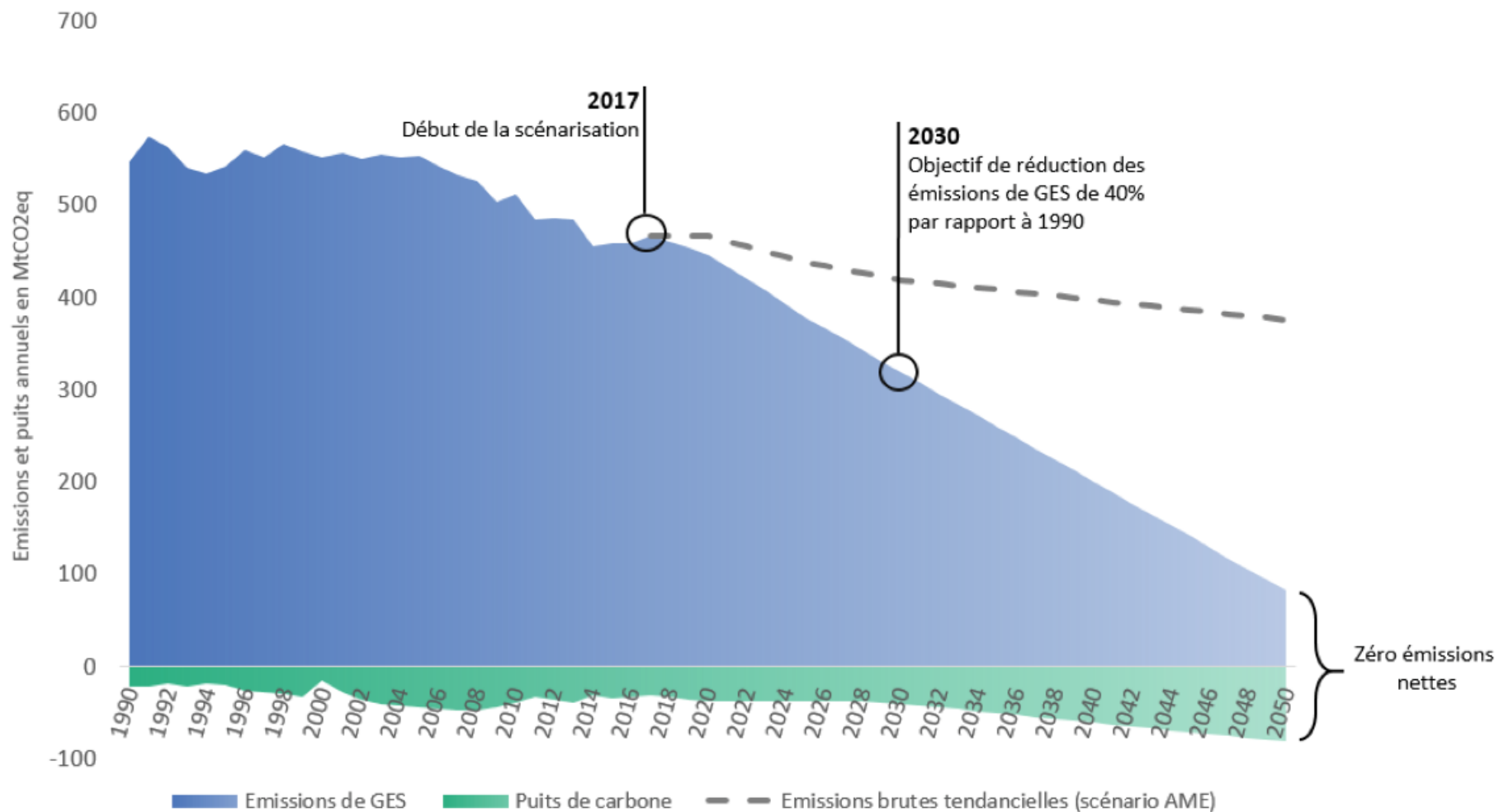
Réduction des émissions de 81 % par rapport à 2015 (économie circulaire, sobriété...)



Agriculture

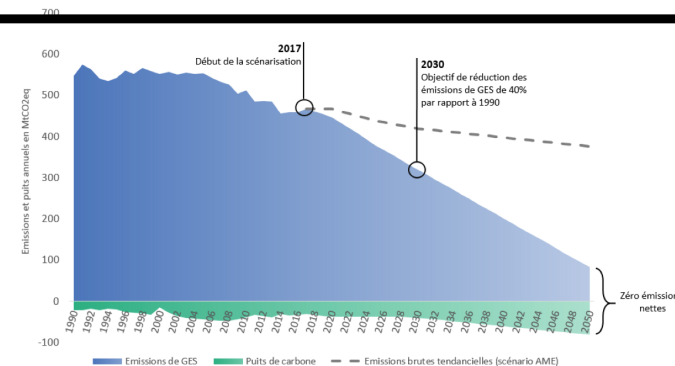
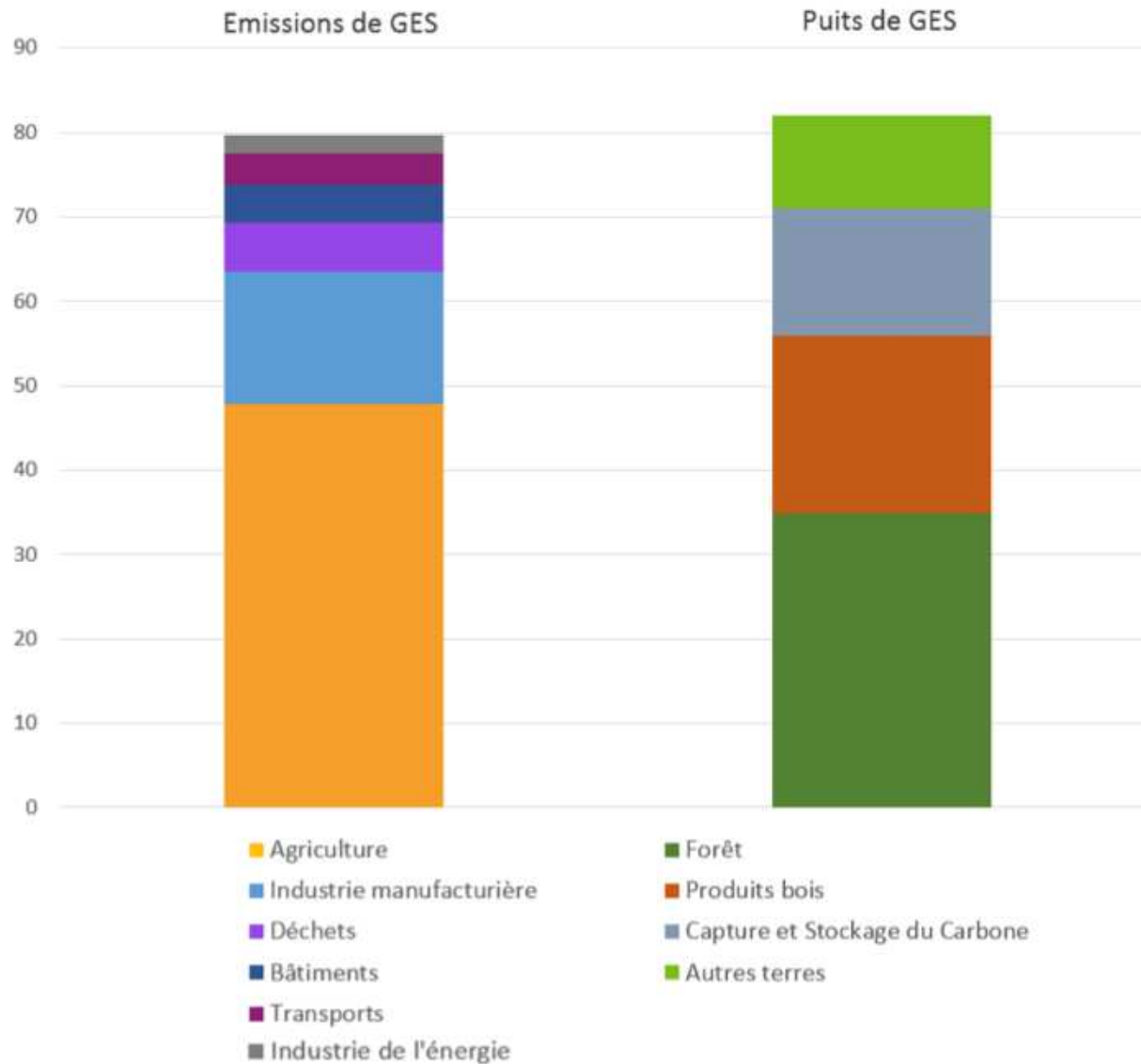
Réduction des émissions de 46% par rapport à 2015 (agro-écologie, maintien des prairies naturelles, suppression des pesticides et des engrais chimiques...)

La stratégie Nationale Bas Carbone Française pour 2050 (SNBC)



La stratégie Nationale Bas Carbone Française (SNBC)

Emissions et puits annuels en Mt eq CO₂



Séquestration de 35.10⁶ tonnes eqCO₂ attendue dans la biomasse et les sols forestiers.

Révision en cours : 20.10⁶ tonnes eqCO₂, dont 1/3 dans les sols.

NB forte contribution aussi du stockage dans les produits bois. (revision : 10Mt eqCO₂)

4 PER 1000

CARBON SEQUESTRATION IN SOILS FOR FOOD SECURITY AND THE CLIMATE

The quantity of carbon contained in the atmosphere increases by 4.3 billion tons every year

+ 4.3 bn tons carbon / year



CO₂ emissions



Human activities ⊕⊕⊕⊕

Deforestation ⊕

Forests ⊖⊖

Oceans ⊖⊖

⊖ absorption ⊕ emission

The world's soils contain 1 500 billion tons of carbon in the form of organic material

absorption of CO₂ by plants



storage of organic carbon in soils

1 500 bn tons carbon

While pursuing the indispensable effort to decrease drastically the green house gases (GHG) emissions due to human activities, increasing soil organic carbon sequestration could make a substantial contribution to GHG mitigation efforts. A theoretical annual increase of the world soil organic carbon stock by 0.4% of its value would be larger than the 2015 annual increase in CO₂ in the atmosphere, which is a major contributor to the greenhouse effect and climate change : this is the origin of the "4 per 1000" title of this initiative.

increased absorption of CO₂ by plants :



farmlands, meadows, forests...

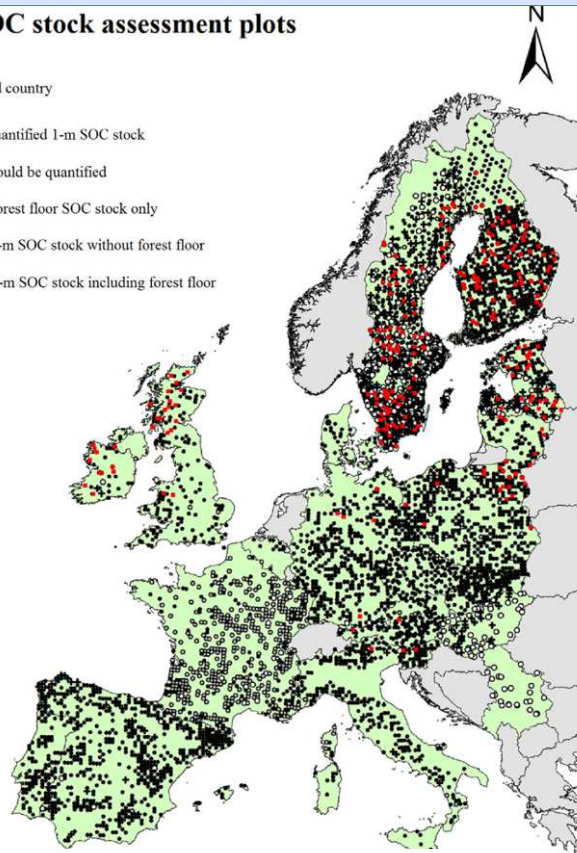


+4‰ carbon storage in the world's soils
soils better able to cope with the effects of climate change
= less CO₂ in the atmosphere

Une structuration verticale, avec des stocks/ concentrations de C décroissantes

Level I SOC stock assessment plots

- Surveyed country
- Peatsoils with quantified 1-m SOC stock
- No SOC stock could be quantified
- ✦ Assessment of forest floor SOC stock only
- Assessment of 1-m SOC stock without forest floor
- Assessment of 1-m SOC stock including forest floor



De Vos et al., Geoderma 2015

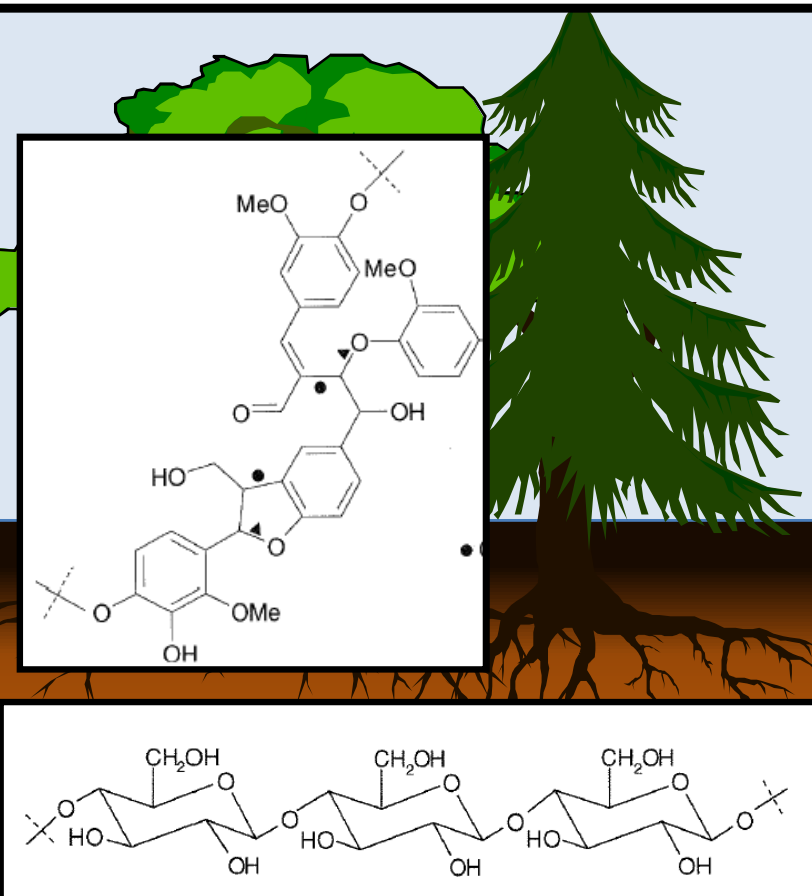
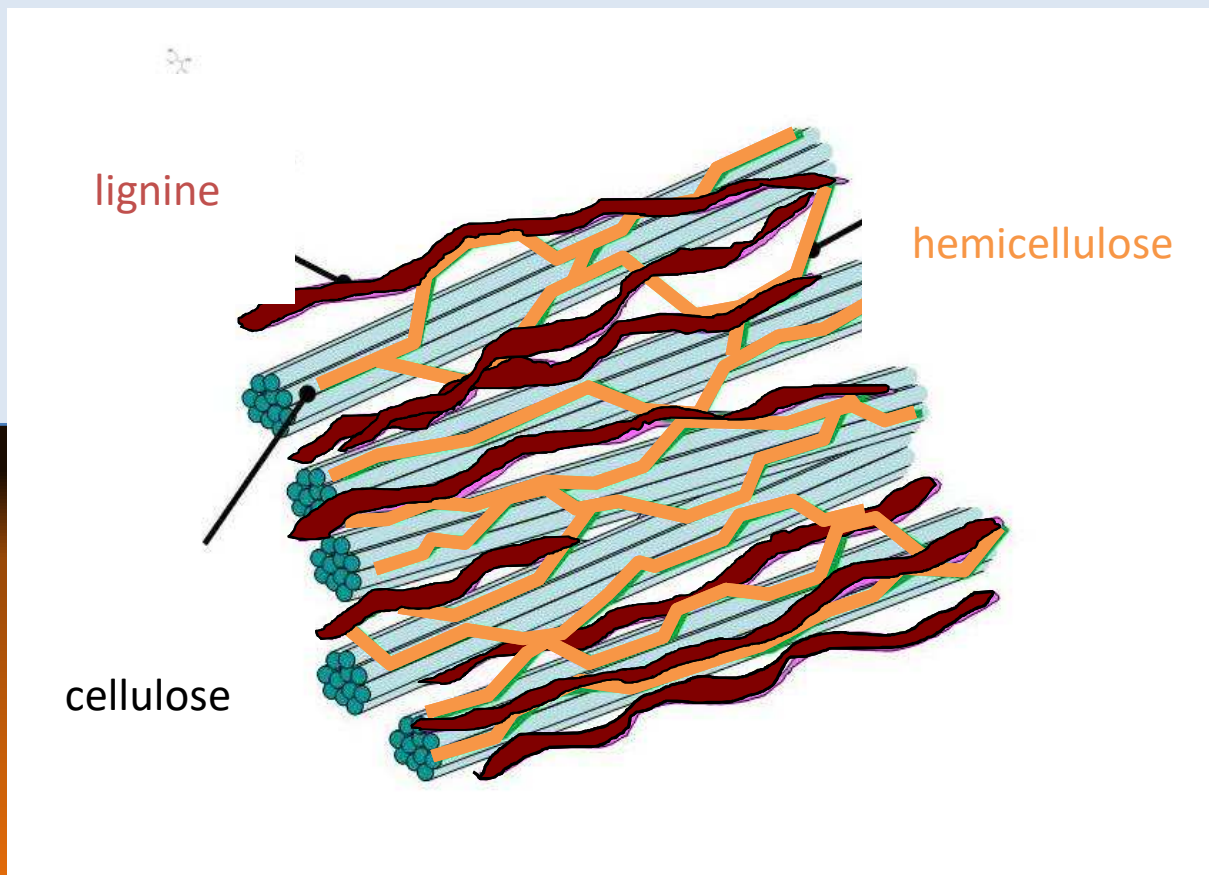
Relative importance (RI, %) of environmental variables predicting the SOC stocks in forest floors, as well as in mineral soils, at the European scale.

Rank	Forest floor SOC _s		Mineral SOC _s	
	Variable	RI%	Variable	RI%
1	Humus form	26.6	WRB RSG	18.7
2	Tree species	24.8	Ecoregion	16.8
3	WRB RSG	14.3	MAP	16.6
4	Parent material	9.3	Humus form	15.0
5	Ecoregion	8.4	Tree species	8.9
6	Altitude	6.1	Longitude	6.7
7	Latitude	3.8	Forest type	5.0
8	Longitude	2.8	Parent material	4.6
9	MAP	2.1	Altitude	3.6
10	MAT	0.9	Soil depth	1.9
11	Forest type	0.4	Latitude	1.3
12	Stand type	0.3	MAT	0.9
13	Soil depth	0.2	Stand type	0.0

MAP: mean annual precipitation; MAT: mean annual temperature; WRB: world reference base; SOC_s: soil organic carbon stock

Depth	n	OC (g kg ⁻¹)	
		Mean [#]	P _{2.5} -P _{97.5}
0-10	6078	43.6 ^a	5.9-152
10-20	4275	24.9 ^b	2.9-92.4
20-40	3297	15.4 ^c	<1.2-65.7
40-80	3043	7.7 ^d	<1.2-37.6
0-80	16,697	26.7	<1.2-113

Spécificités des sols forestiers : Des apports végétaux enrichis en lignine



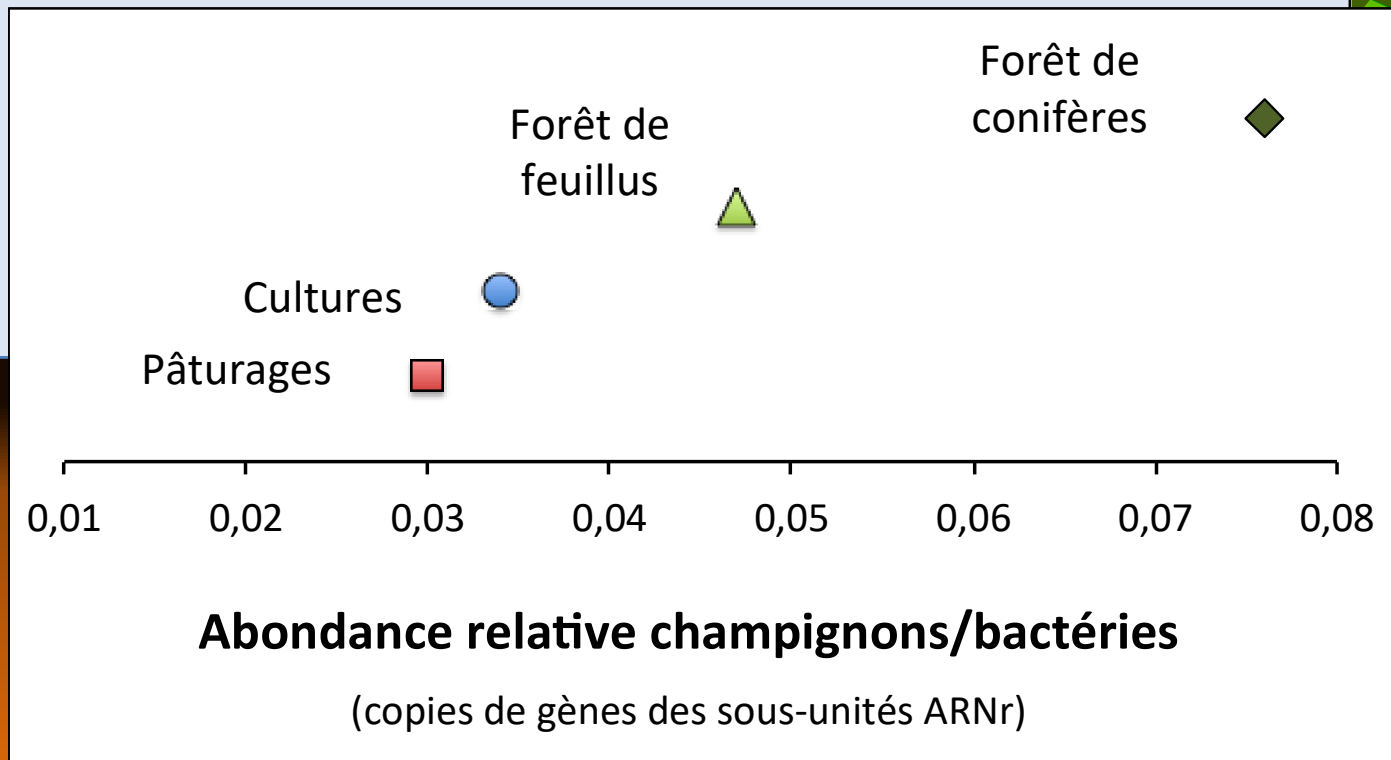
Source : https://www.mpg.de/6698004/JB_20132

Lignine = 30% du bois
Molécule beaucoup plus complexe chimiquement que les polysaccharides

D'après Mao et al., 2019,

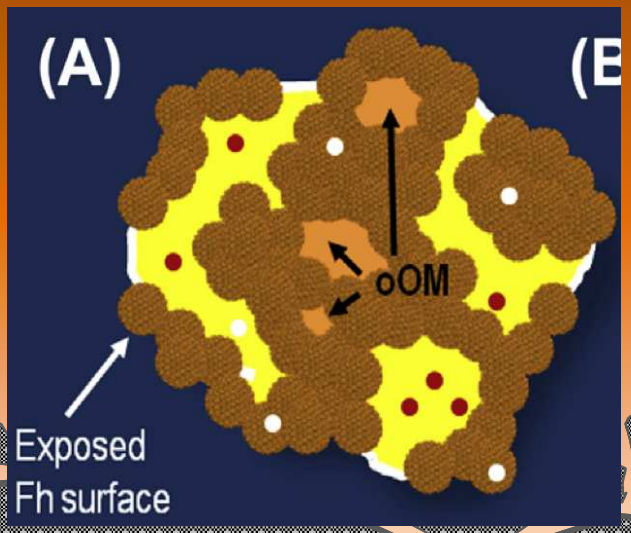
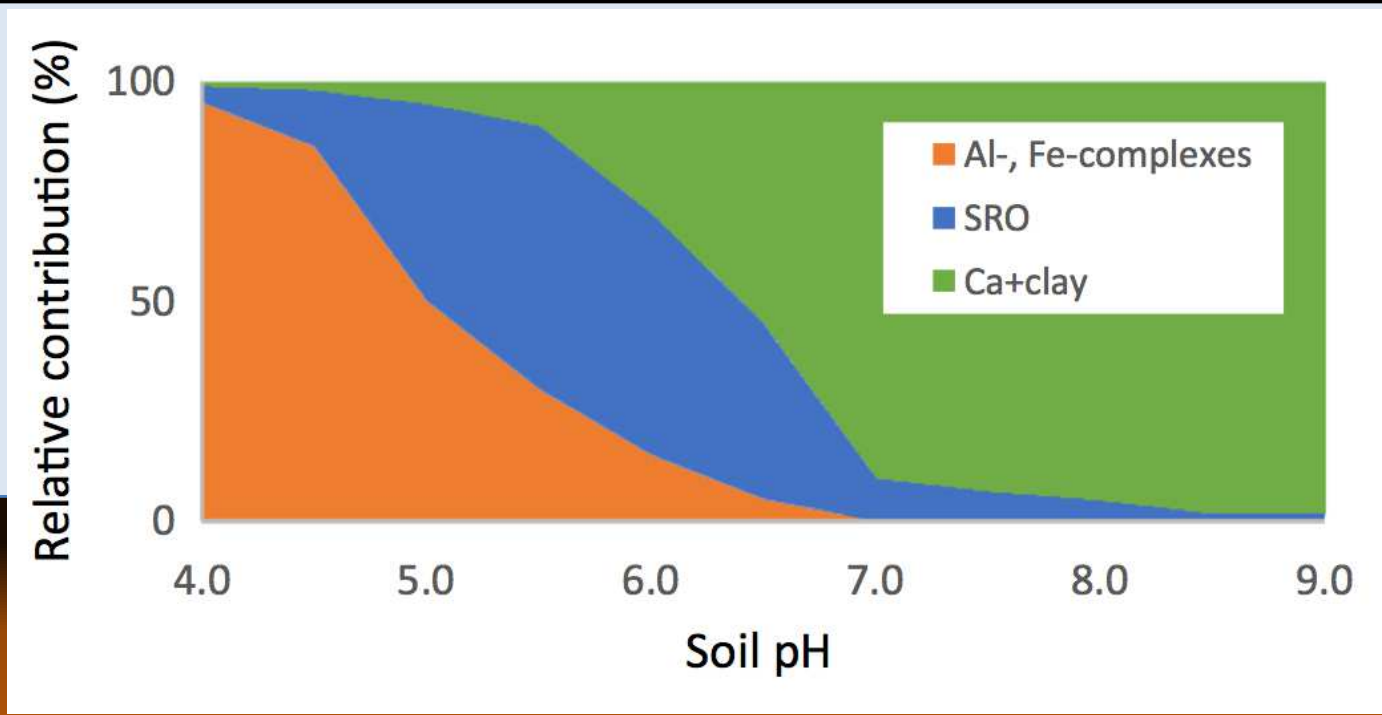
Spécificités des sols forestiers :

Des sols souvent acides → relativement riche en champignons

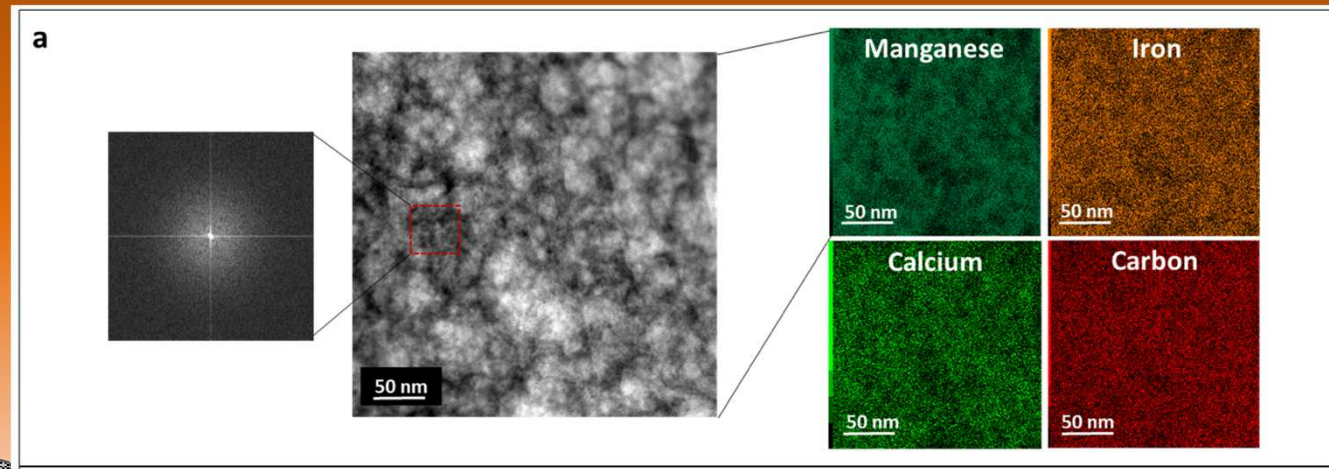


Rôle crucial des champignons capables de détruire la barrière de lignine.
Ils donnent accès aux polysaccharides riches en énergie aux autres
décomposeurs.

Spécificités des sols forestiers : Des sols souvent acides → une protection par les argiles, mais importance d'autres formes de protection

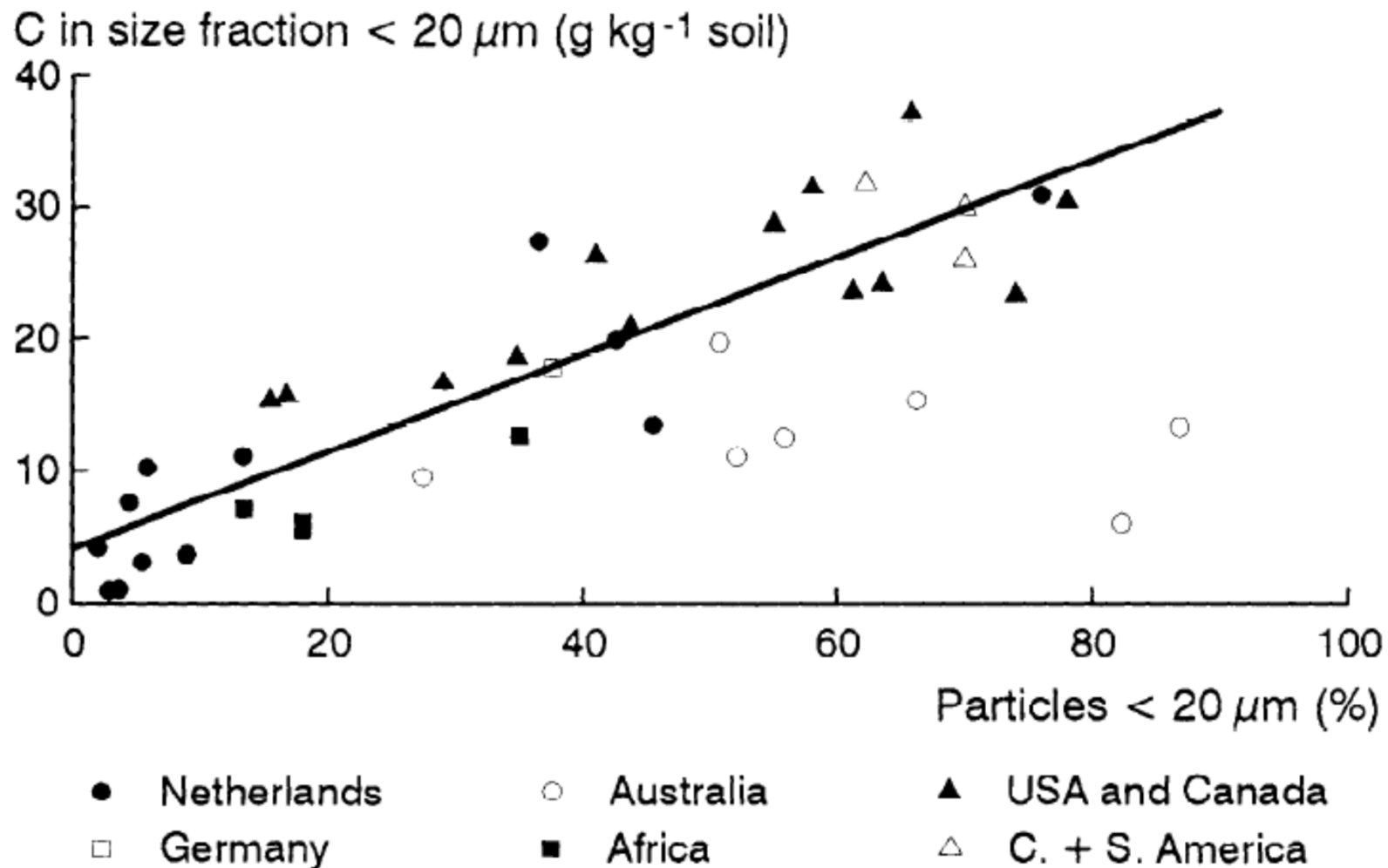


Kleber et al., 2015



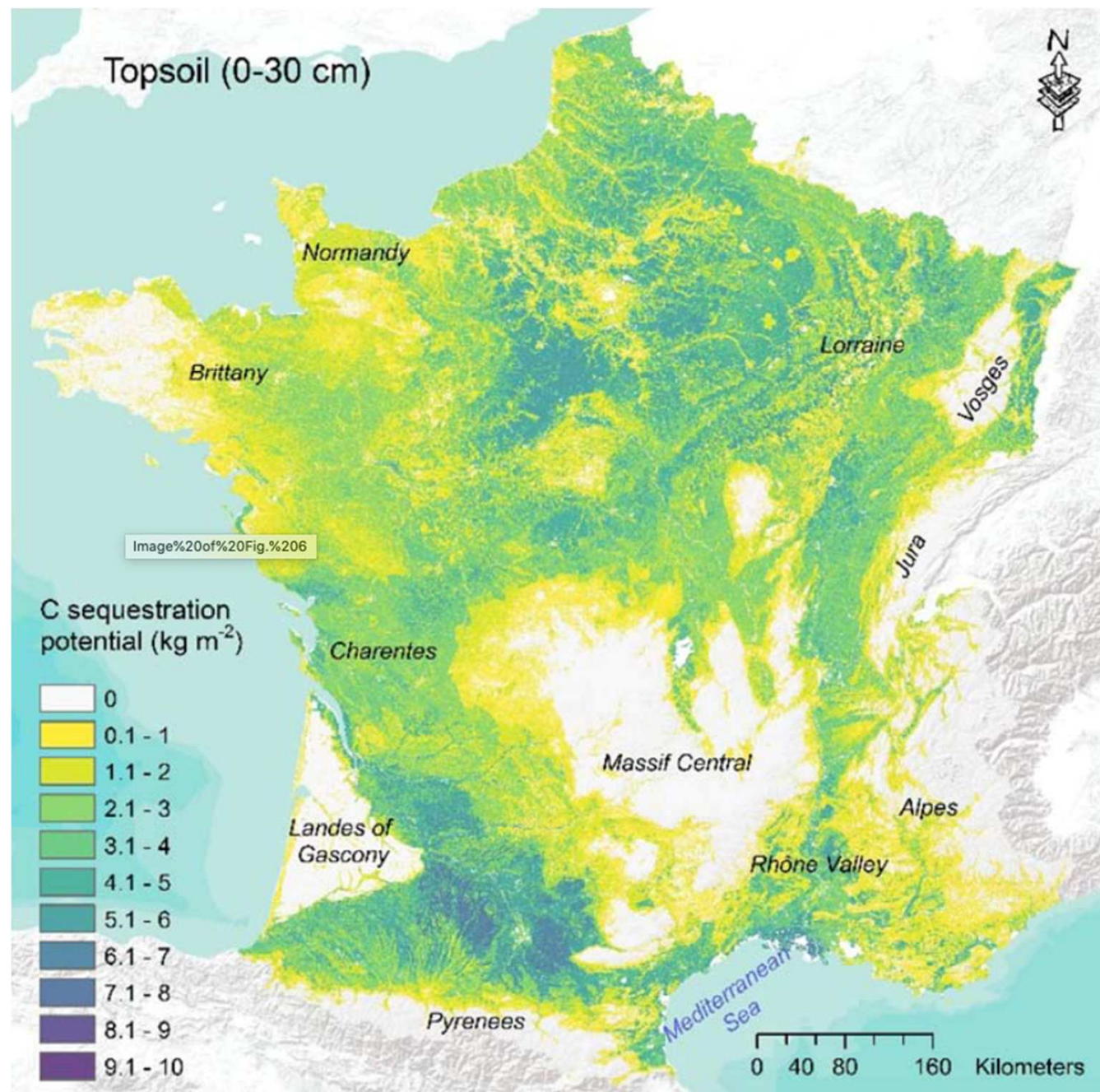
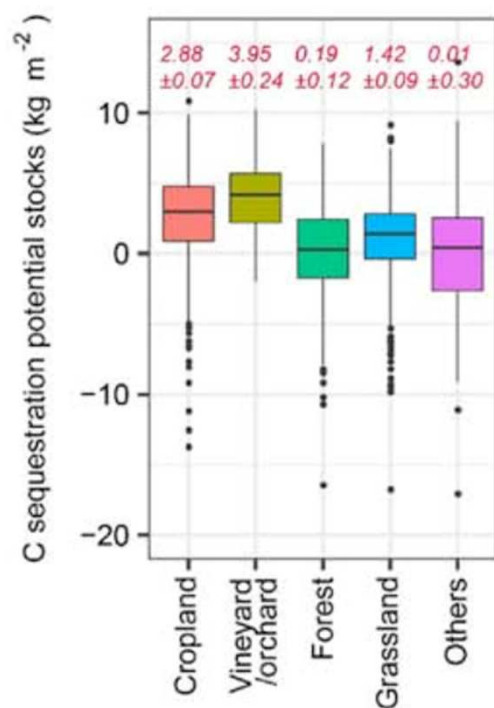
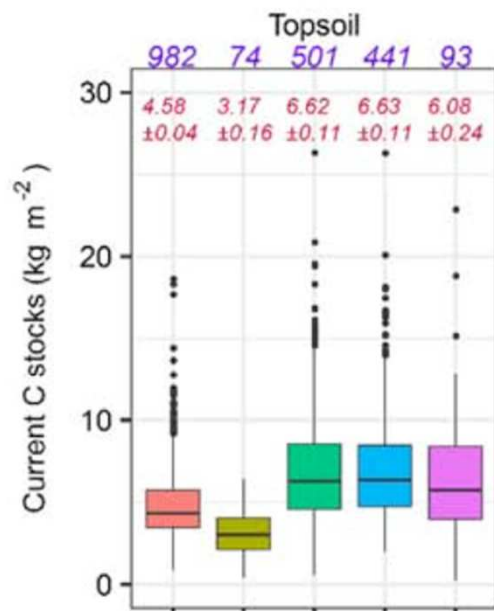
Van Der Kellen et al., 2021

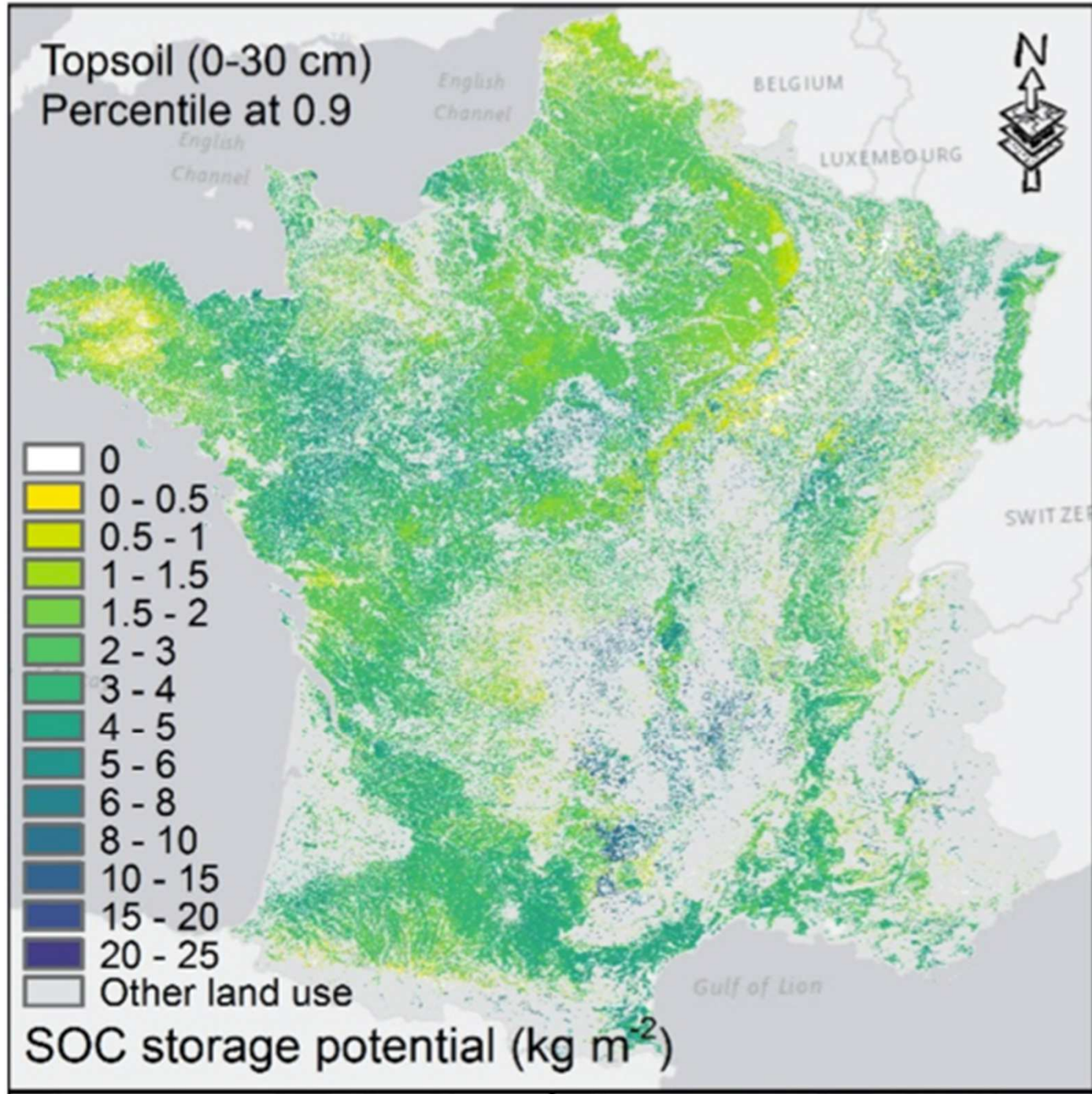
Potential for additional C storage in forest soil: the concept of C saturation



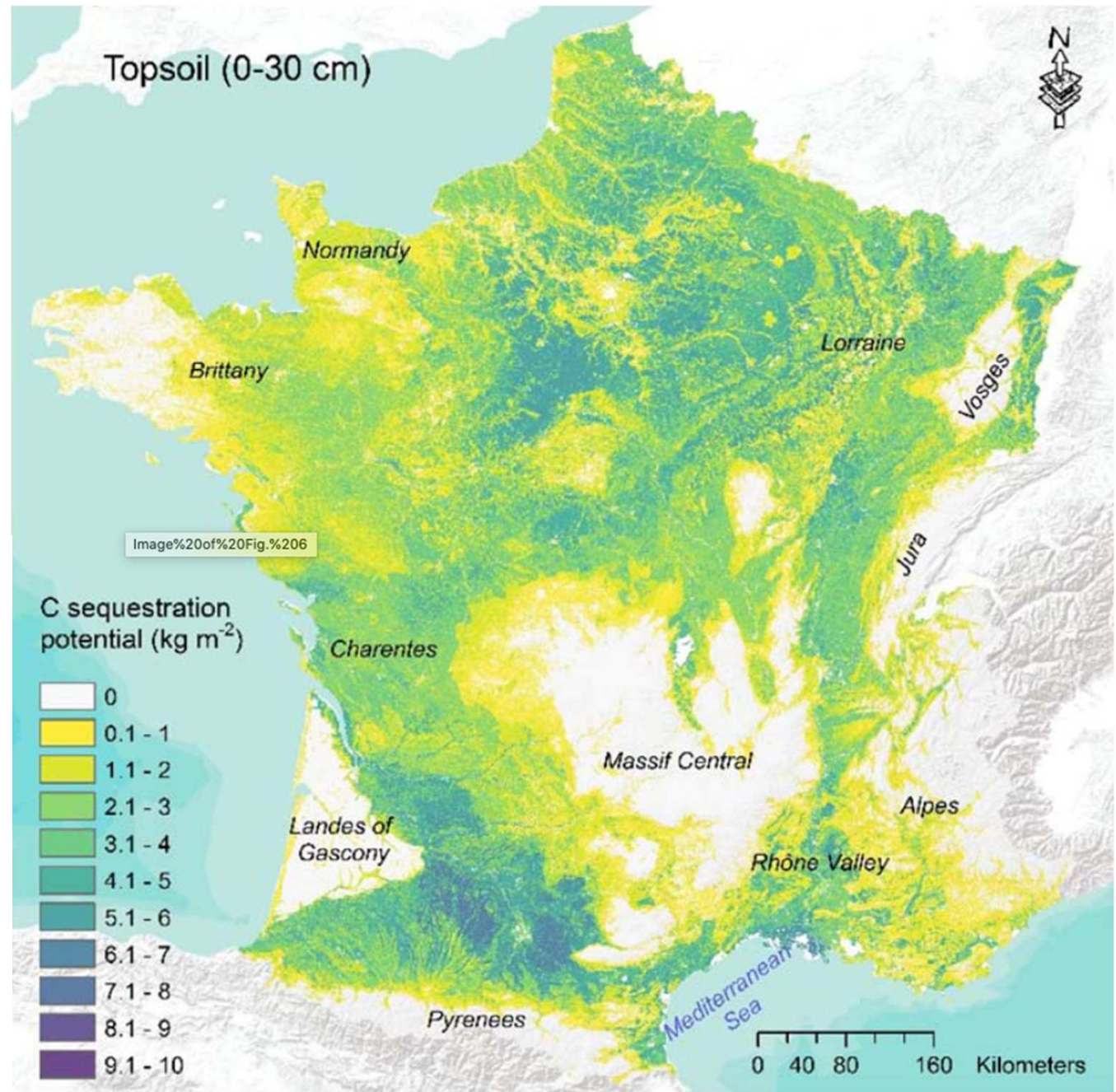
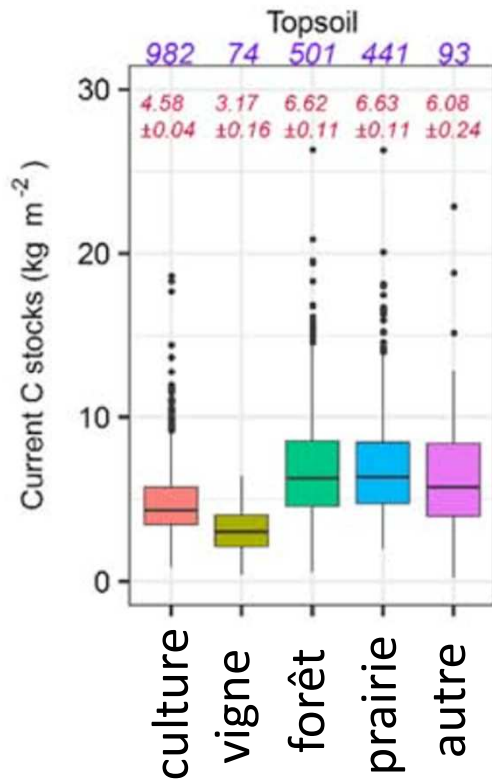
$$\text{SOC } 0\text{-}20 \mu\text{m} = 4,09 (1,59) + 0,37 (0,04) \times \% 0\text{-}20 \mu\text{m}$$

Potential for additional C storage in forest soil: the concept of C saturation

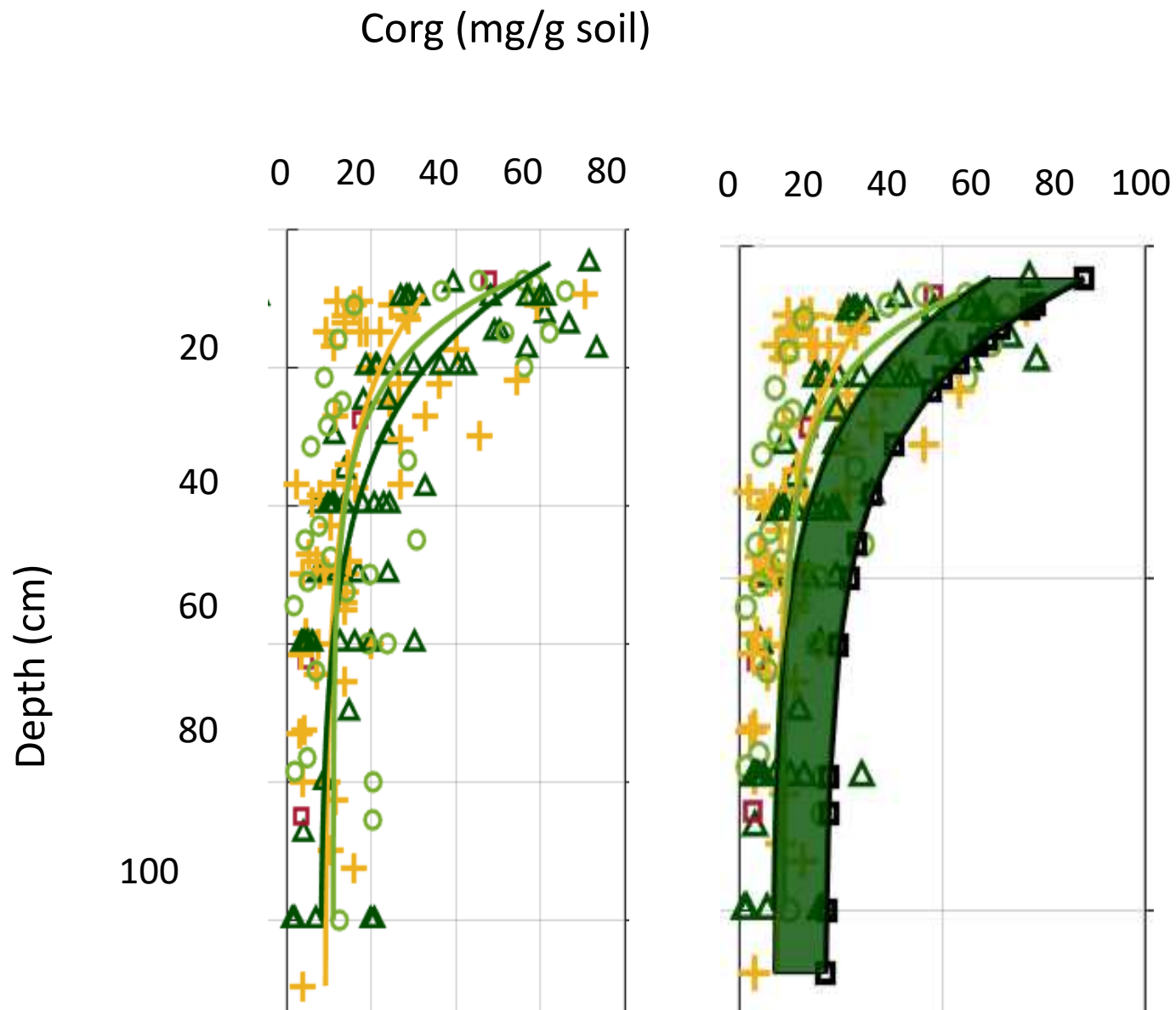




Quel stockage additionnel possible dans les sols forestiers ? Notion de saturation en C

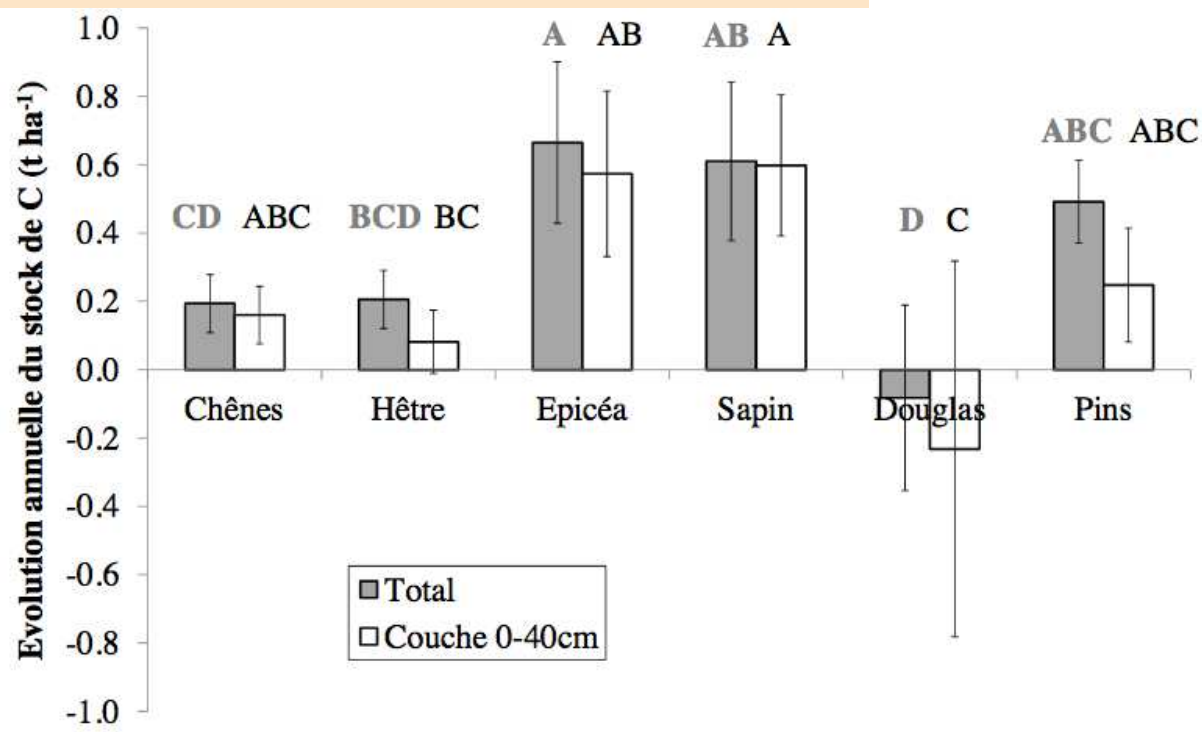
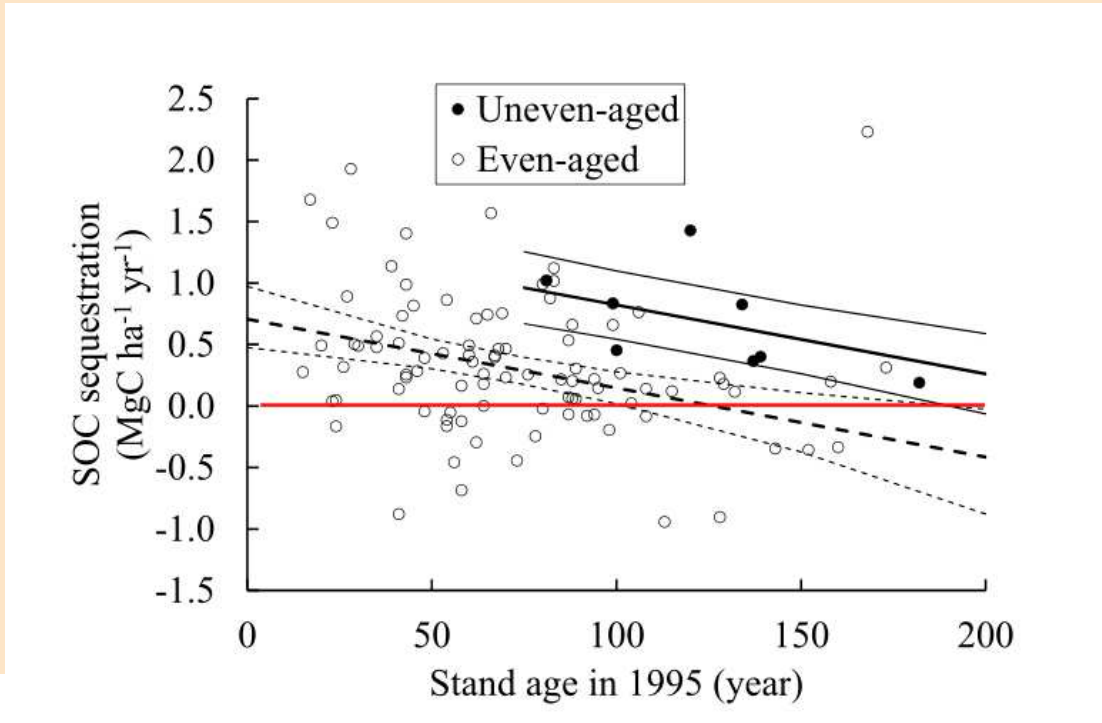
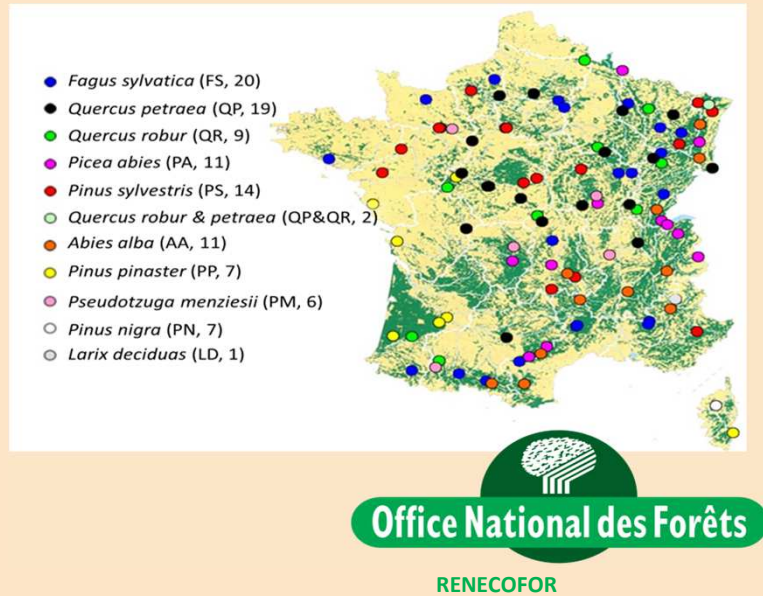


Potential for additional C storage in forest soil: geostatistical approach



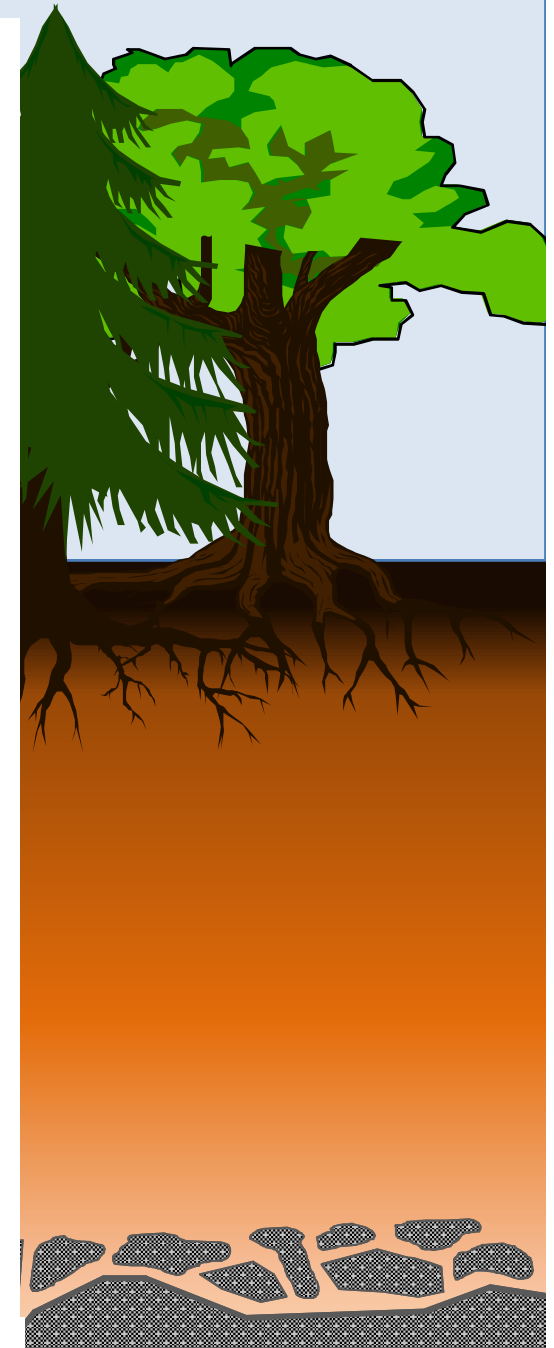
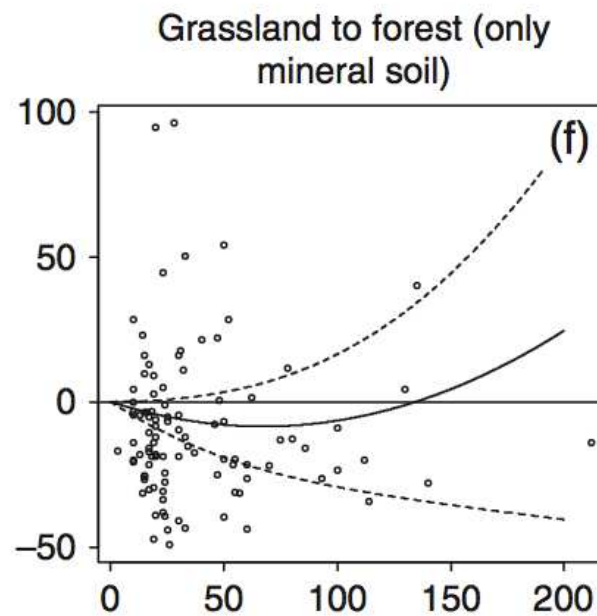
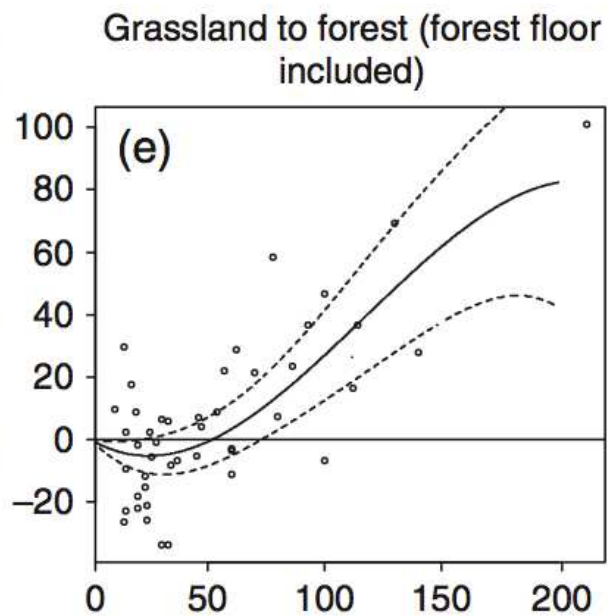
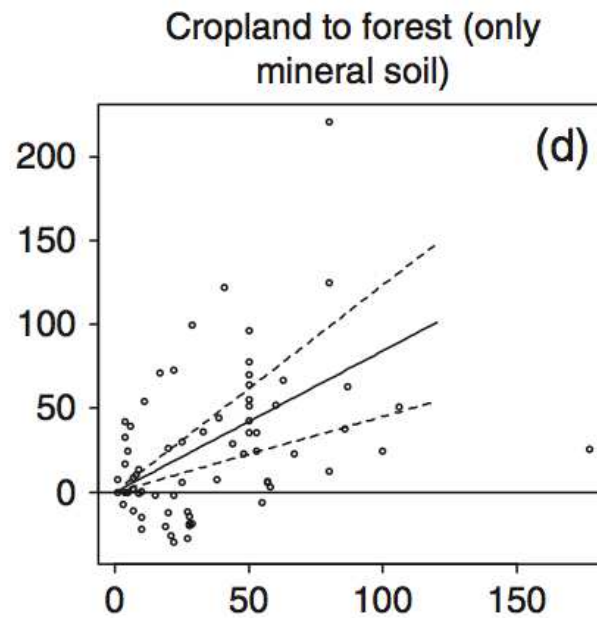
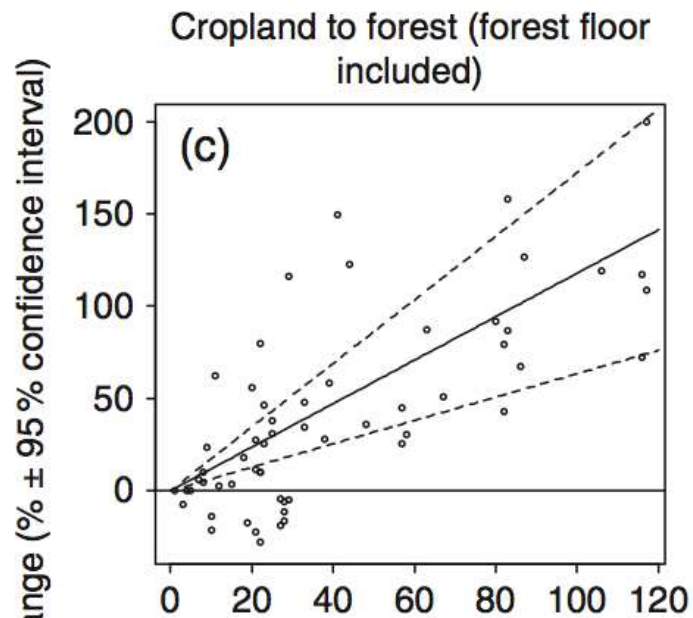
From Chirol

Forest soil as a C sink ? A French case study over a 15 year period

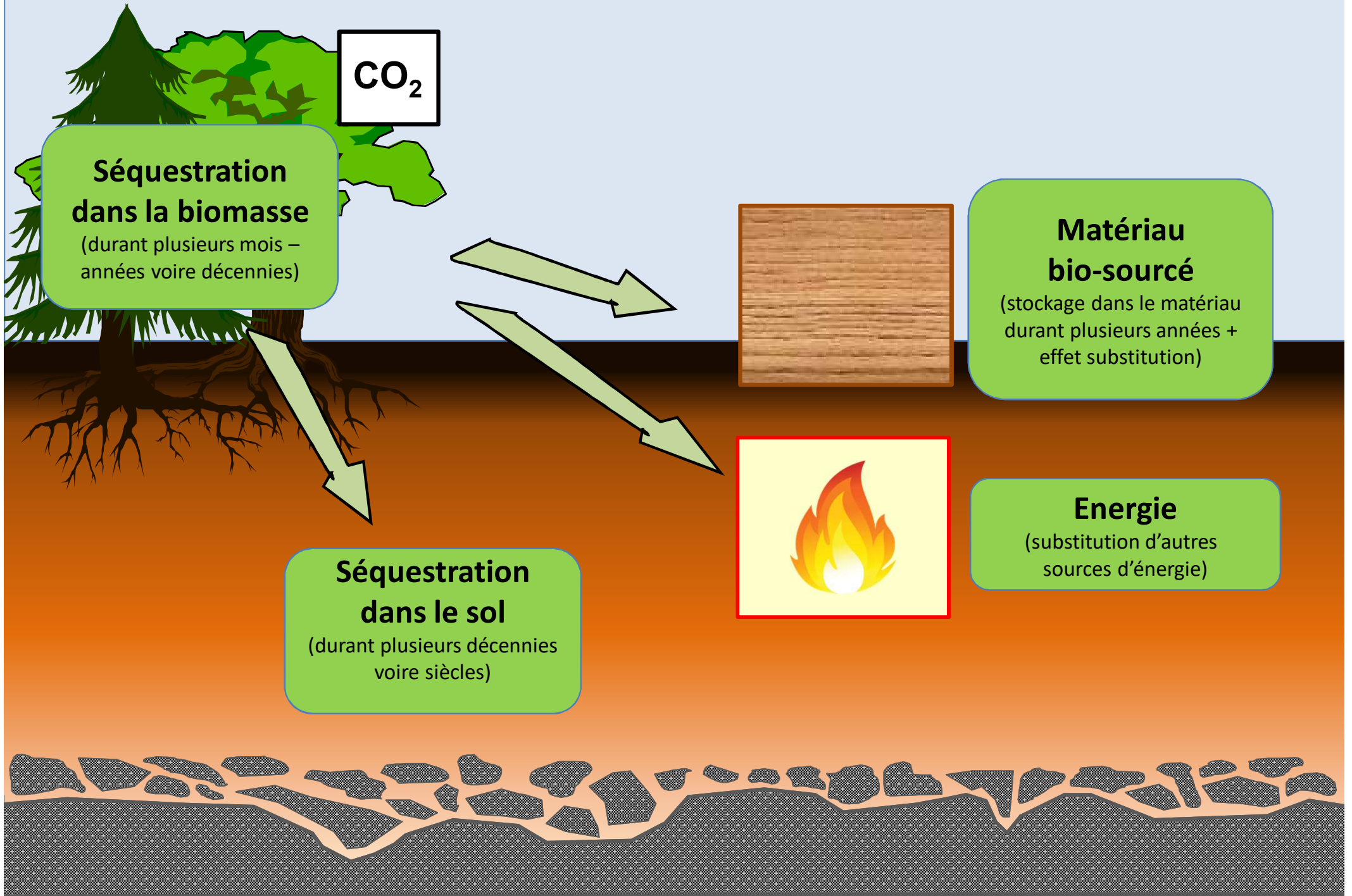


Conventiounal thinning
 Annual storage in forest floor and 0-40cm : 0.34 t.ha⁻¹.an⁻¹
 ⇒ **About 4% of the C stock !**

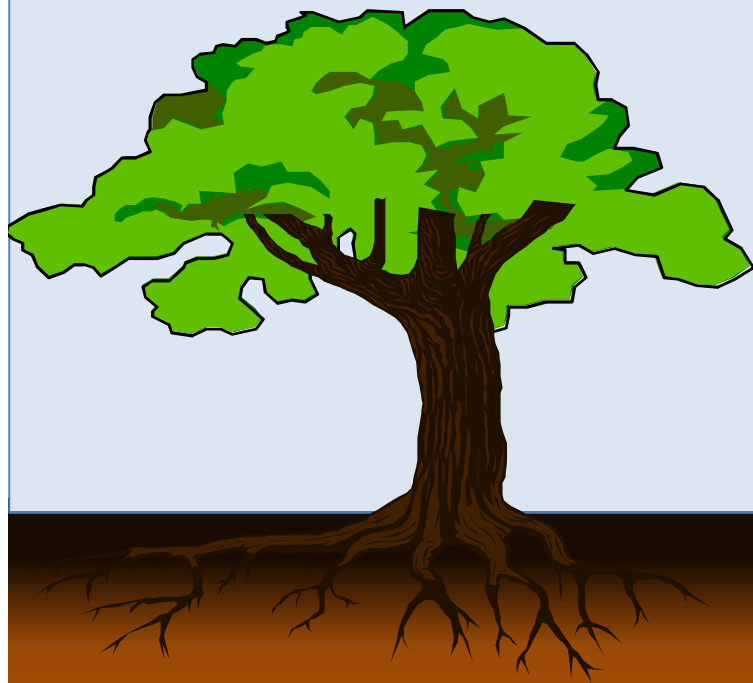
Additional C sequestration through land use change : issue of disturbance



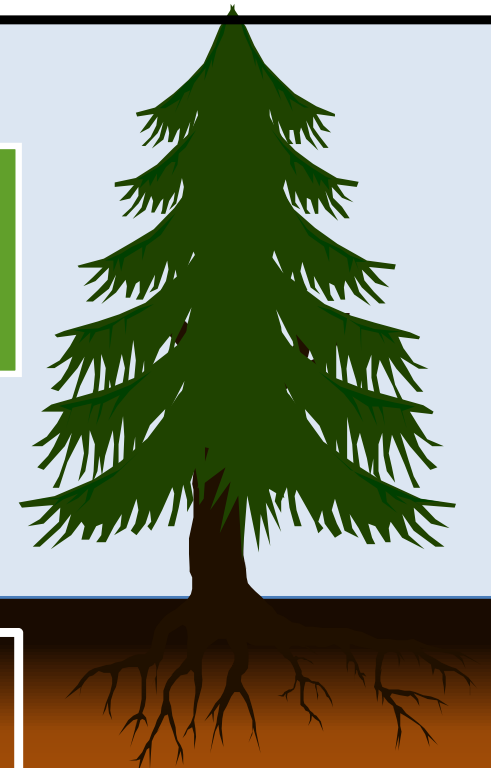
Quels enjeux concernant les sols forestiers au regard du 4P1000, de la neutralité C ?



Impact of tree species on soil C stock: Broadleaves vs coniferous



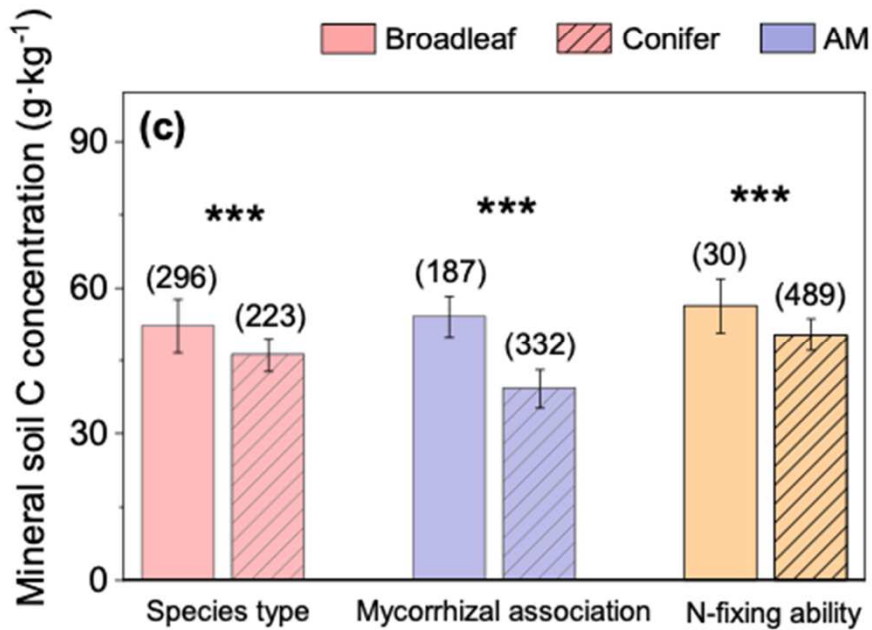
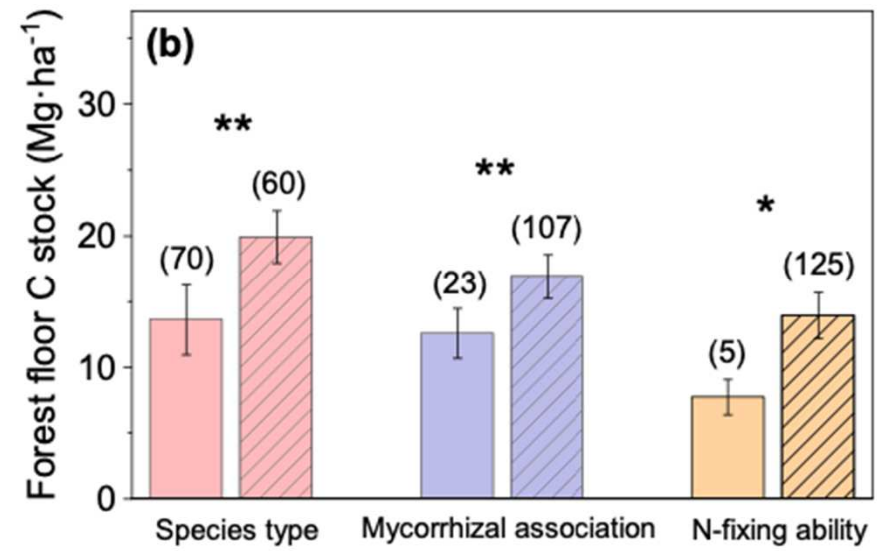
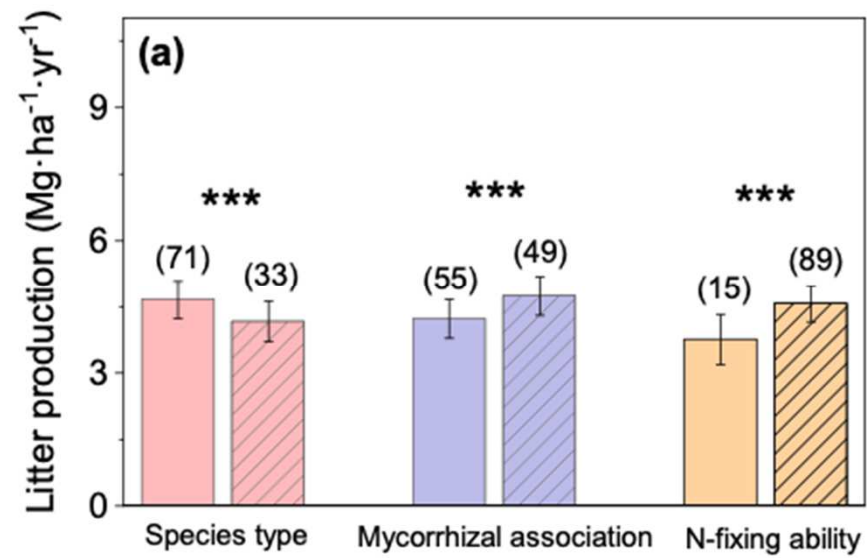
C above ground inputs
Broadleaves < coniferous
-8% ($\pm 10\%$)



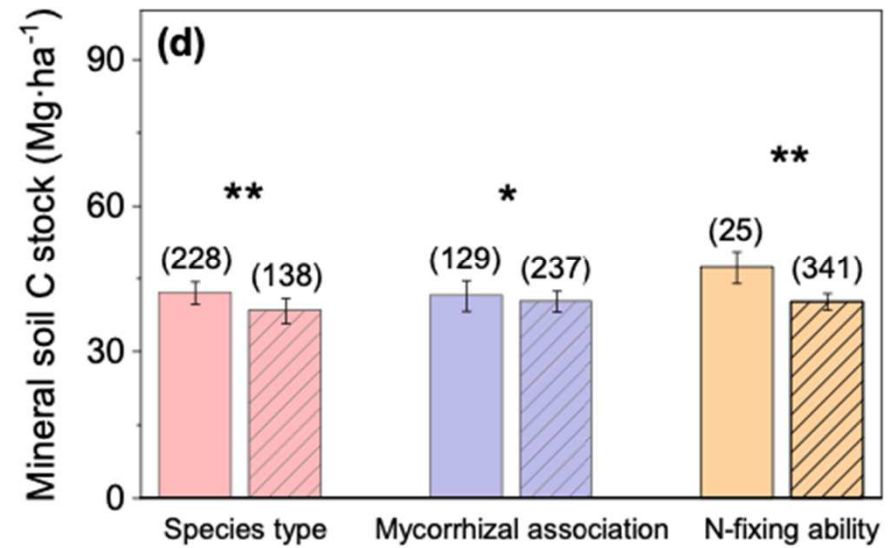
C in forest floor
Broadleaves < coniferous
-38% ($\pm 12\%$)

C in 0-30cm
Broadleaves \approx coniferous
+1% ($\pm 7\%$)

after Boča et al, 2014; Augusto et al, 2015



■ Broadleaf ▨ Conifer ■ AM ▨ ECM ■ N-fixing ▨ non-N-fixing



Impact of soil disturbance and plantation density on soil C stock:

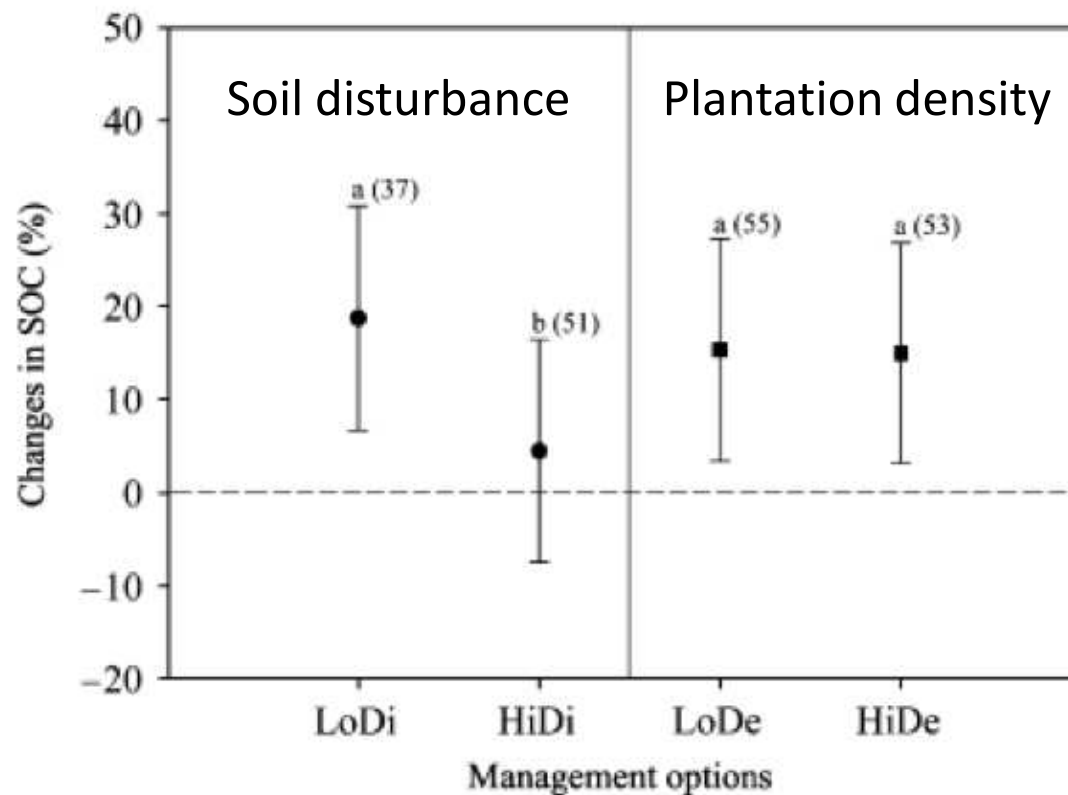
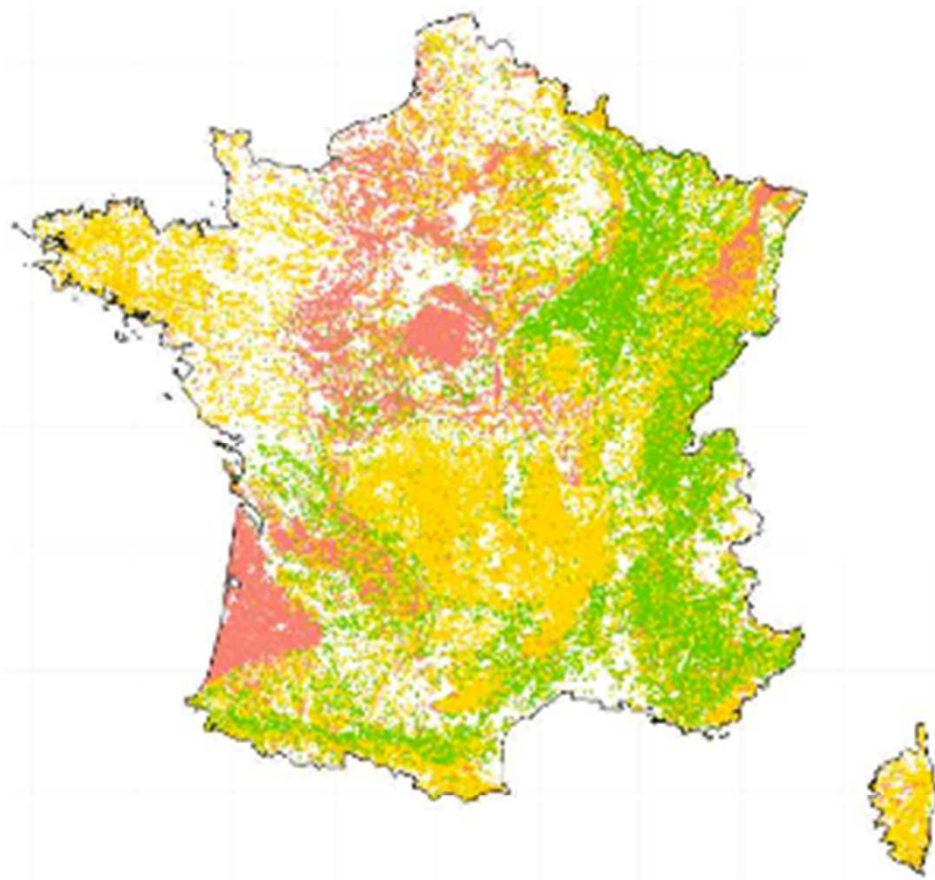


Fig. 5 Influence of preplanting disturbances (left) and plantation density (right) on changes in SOC stocks after afforestation. The error bars are the standard errors of the mean. A different letter means a difference significant at $P < 0.05$. The number of observations is indicated in parentheses. On the left side of the figure, the mean age of plantation is 19.9 years and the mean depth of sampling is 30.5 cm. On the right side of the figure, the

Des actions de gestion à décliner en fonction du potentiel de stockage ?



S Pôle sableux teneur en argile < 10 %	S1		S2					
	L1		L2		L3			
L Pôle limoneux 10 % < teneur en argile < 25 %			A1		A2		K	
A Pôle argileux teneur en argile > 25 %	Pas d'effervescence de la terre fine à HCl dilué						Effervescence	
Calcaire actif								
pH horizon A	< 4]4-4,5]]4,5-5[]5-5,5[]5,5-6[]6-6,5[]6,5-7[> 7
Humus	Mor Dysmoder	Moder	Mullmoder Dysmull	Mull oligo.	Mull méso.	Mull eutro.	Mull calcique	Mull carbonaté

- Sensibilité forte
- Sensibilité moyenne
- Sensibilité faible

Diagramme de sensibilité des sols en fonction de la texture et du niveau trophique.

Source : Guide Ademe, La récolte raisonnée des rémanents en forêt, 2006.

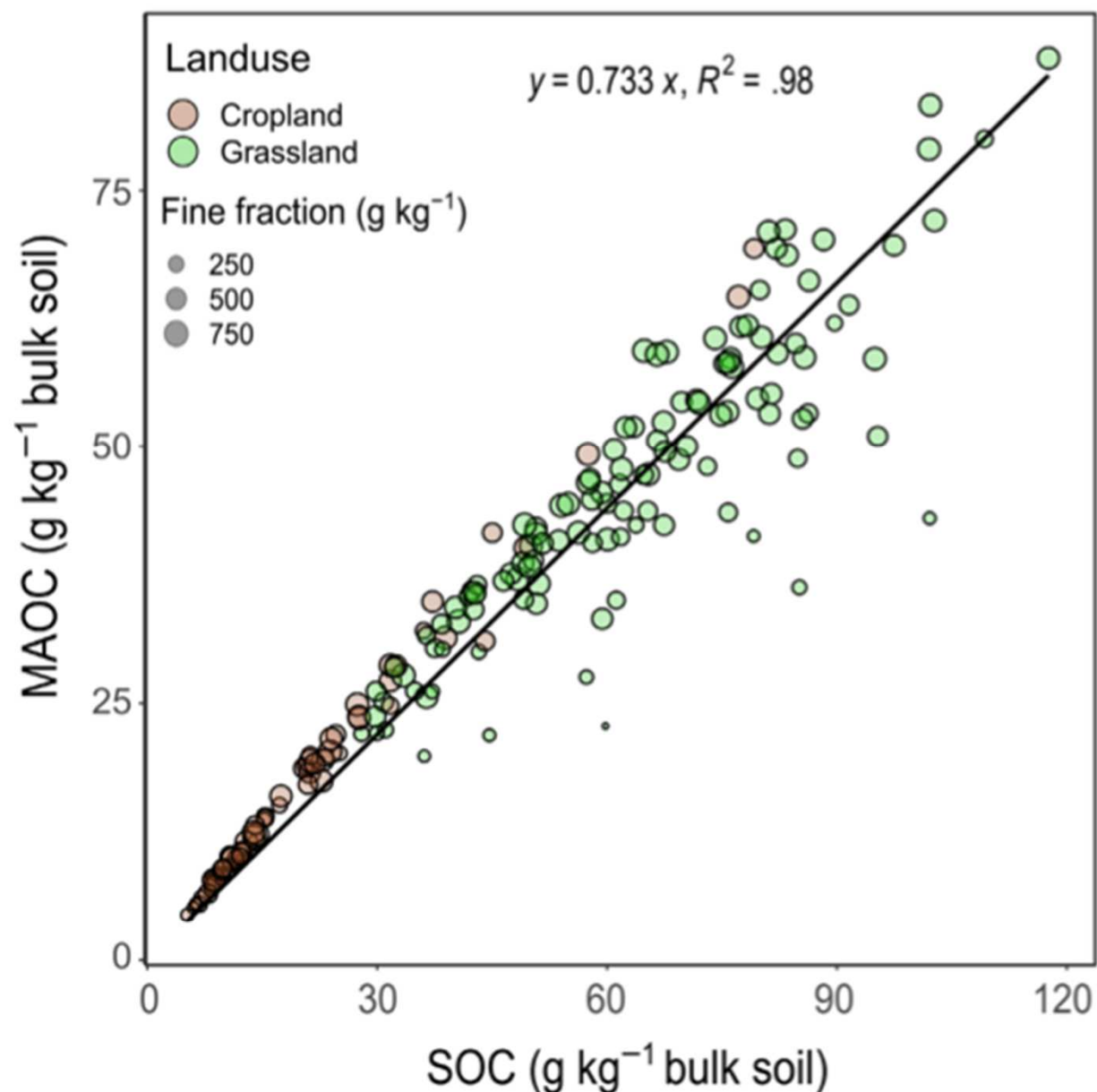
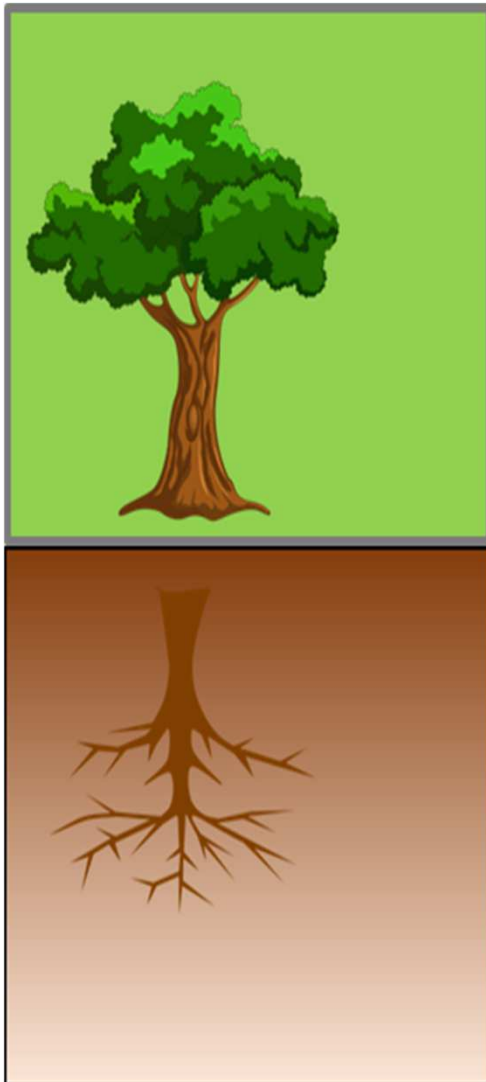


FIGURE 2 Relationship between soil organic carbon (SOC) and mineral-associated organic carbon (MAOC) for cropland ($n=71$) and grassland ($n=118$) soils. The size of the bubbles is directly proportional to the fine fraction content of the soils.

Thinnings (or shelterwood): large, and consistent, literature



Trees

stand biomass: $\Downarrow\Downarrow$ to \Downarrow
growth of remaining trees \rightarrow to $\Uparrow\Uparrow$

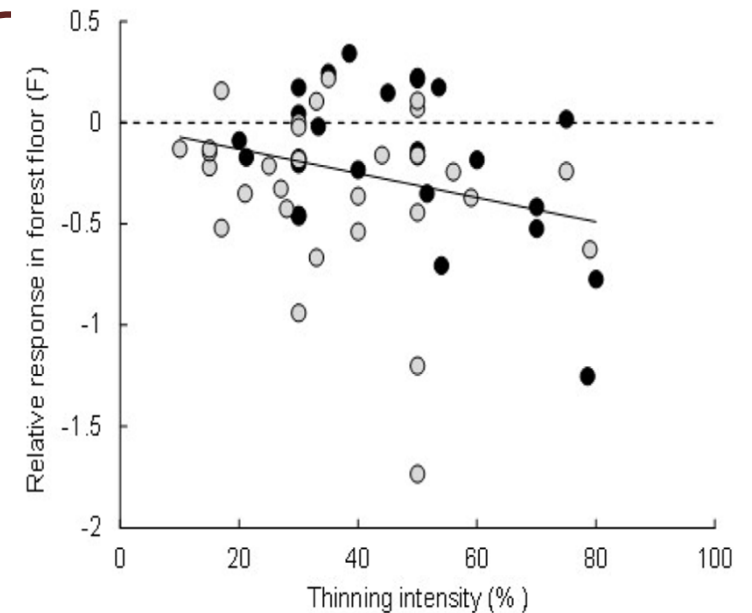
Coarse woody debris (CWD)

$\Downarrow\Downarrow$ to \rightarrow

Forest floor (FF)

\rightarrow or \Downarrow

Soil organic carbon (SOC)

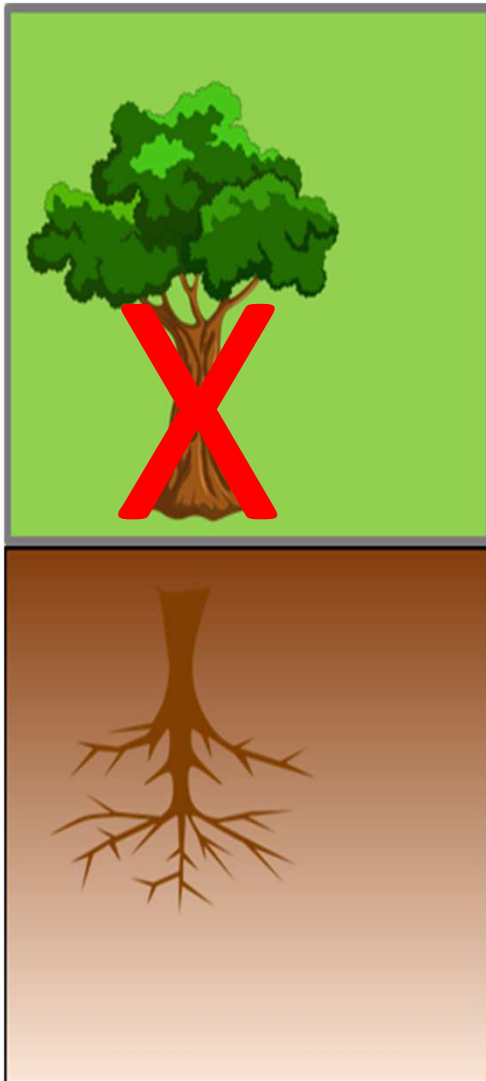


no significant effect

[Achat et al. (2015) - Sci. Reports]

SOH = stem-only harvest: large, and fairly consistent, literature

stem-only harvests



Coarse woody debris (CWD)

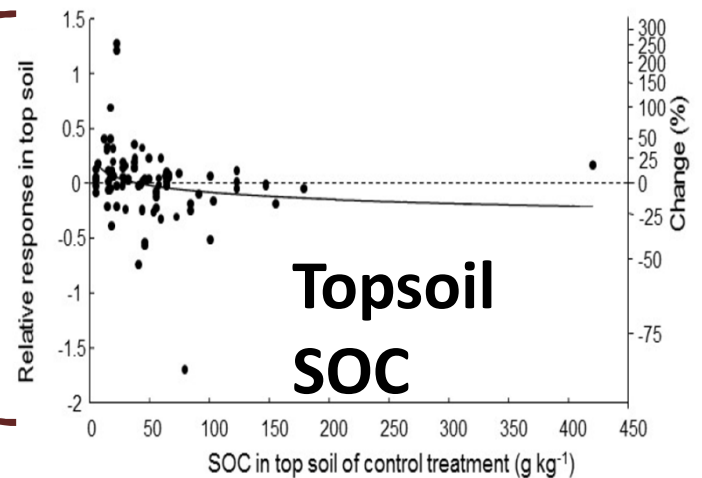
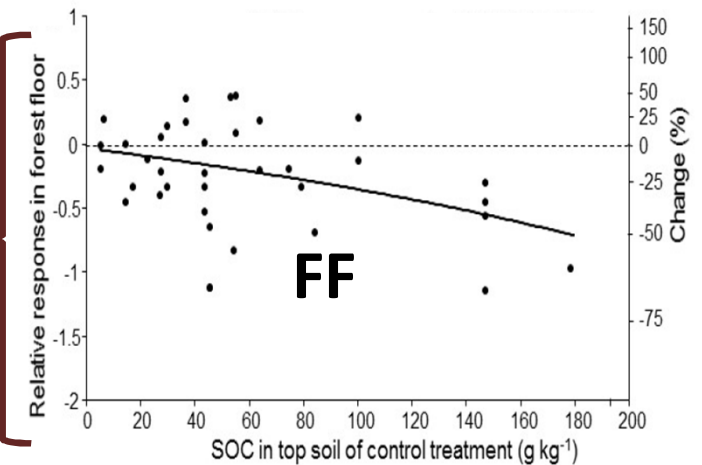


↘↘ or →

Forest floor (FF)

Topsoil (SOC)

↘ or →,



[Achat et al. (2015) - Sci. Reports]

Intensive harvests: “whole-tree harvests”



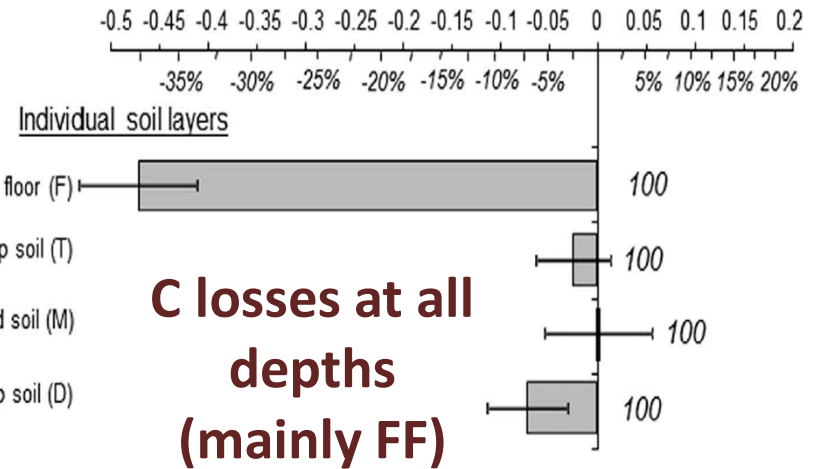
Coarse woody debris (CWD) ↘ ↘

Forest floor (FF) ↘ ↘

All soil layers (SOC) ↘ or →



↘ -11%



[Achat et al. (2015) - Sci. Reports]

Carbon in forest soil:

Specific features of C in forest soils:

- Large C stocks
- Strong influence of edaphic conditions on stocks and sources
- Chemistry of input characterized by a very high lignin content
- A fungi dominated world, with specific mechanisms to breakdown complex molecules and gain access to energy rich polysaccharides and nutrients.

Carbon in forest soil:



Impact of management practices on C stock

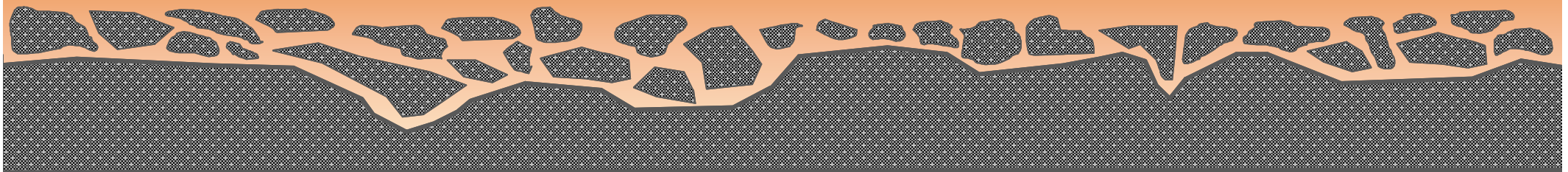
Some first indications but till many unknowns (soil tillage, liming...) due to the long duration of forest revolution and to complex interactions between trees, decomposers and soil

Carbon in forest soil:

The way forwards ...

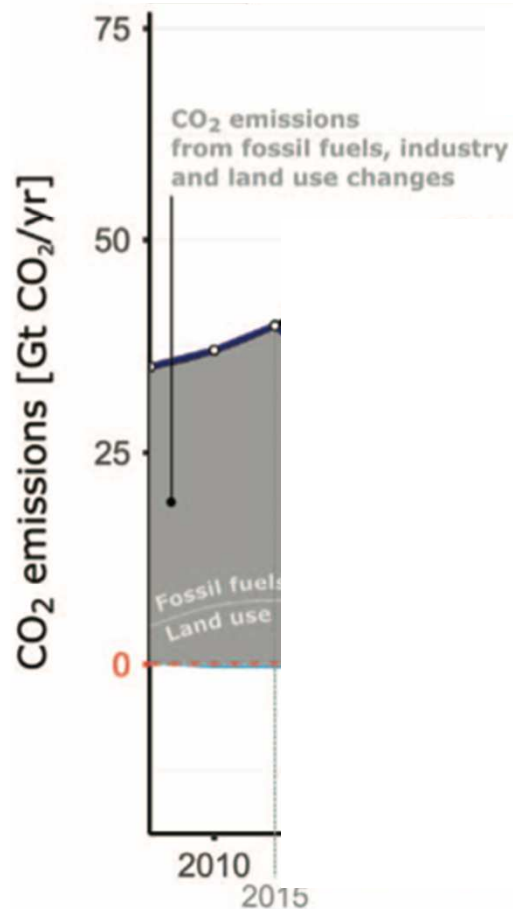
Make progress in the understanding of how very specific pedoclimatic conditions impact tree input, decomposer activity and association with protecting mineral phases

Challenge the temporal scale: Integrate the processes occurring at different ages of the forest stand and that one perturbation may have long lasting effect, possibly after a long delay.



La neutralité C :

Exemple d'un scénario de neutralité en 2070 et d'émissions nettes négatives ensuite

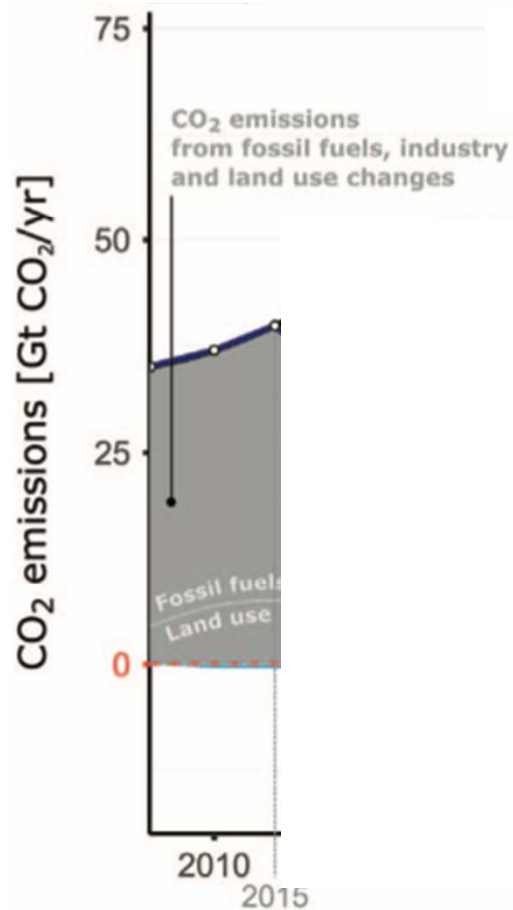


Fuss et al., 2018

Actuellement le secteur des terres est responsable de 22% des émissions de gaz à effet de serre (GES). (industrie : 33%, bâtiments, dont chauffage : 16%, transport : 15%, extraction et production d'énergie : 12% - source : IPCC)

La neutralité C :

Exemple d'un scénario de neutralité en 2070 et d'émissions nettes négatives ensuite

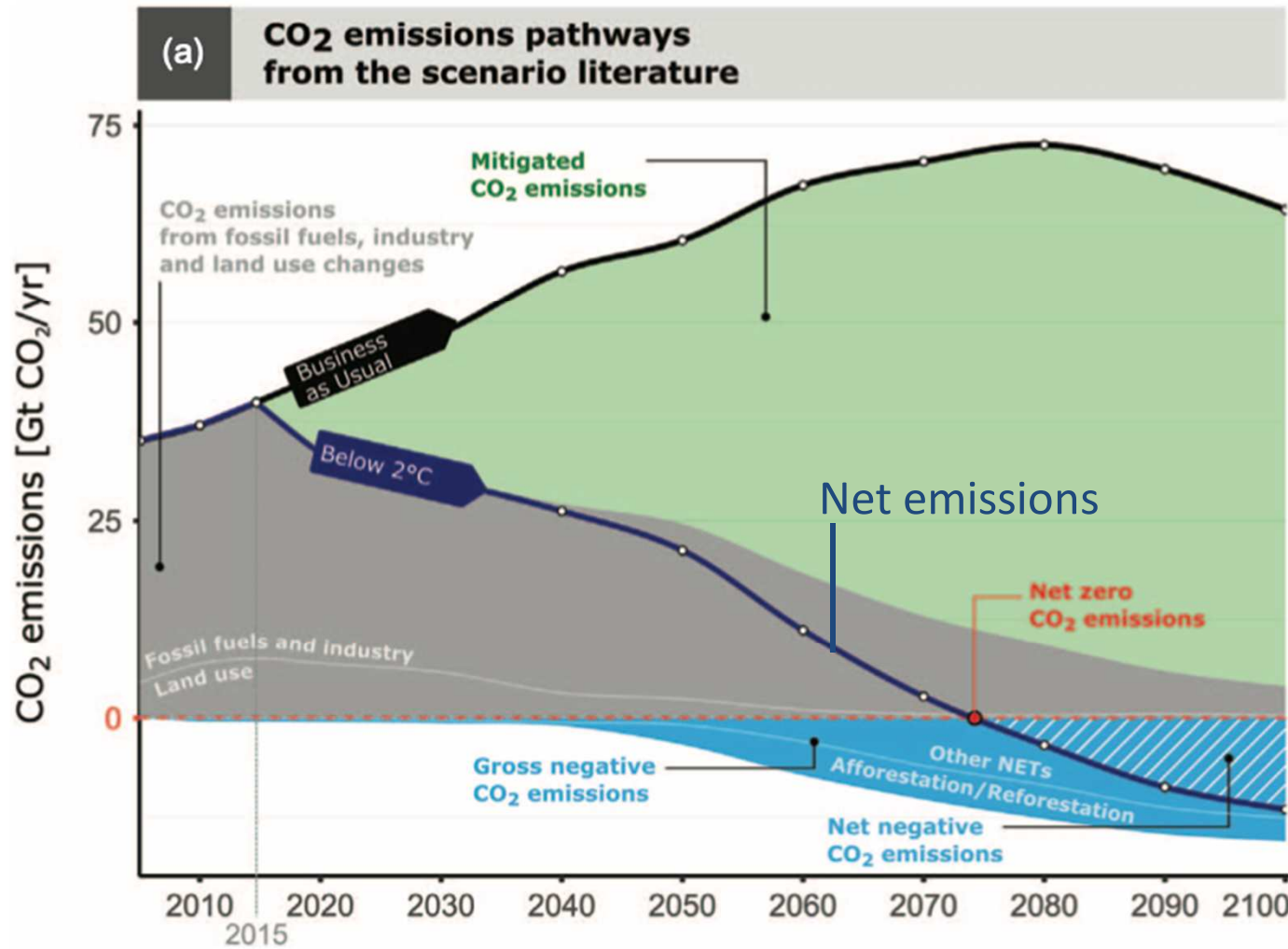


Fuss et al., 2018

Pour atteindre la neutralité C il faudra développer des technologies permettant de diminuer les émissions des GES (« conventional abatement technologies » sur les « emitting technologies »), mais également développer des technologies de piégeage (dont afforestation et reforestation)

La neutralité C :

Exemple d'un scénario de neutralité en 2070 et d'émissions nettes négatives ensuite



Pour atteindre la neutralité C il faudra développer des technologies permettant de diminuer les émissions des GES (« conventional abatement technologies » sur les « emitting technologies »), mais également développer des technologies de piégeage (dont afforestation et reforestation)

La neutralité C : estimation du potentiel de technologies d'émissions négatives (NET)

NET	Potentials	Cost	Positive impacts			Negative impacts			Permanence/ Saturation
	GtCO ₂ yr ⁻¹	US\$/tCO ₂	<i>Socio-economic</i>	<i>Environmental</i>	<i>Biophysical</i>	<i>Socio-economic</i>	<i>Environ-mental</i>	<i>Biogeo-physical</i>	
<p><i>BECCS</i></p> <p>bioenergy with C captur and storag</p>	0.5–5 [1–85]	100–200 [15–400]	Market opportunities, economic diversification, energy independence, technology development and transfer	GHG emissions substitution		Food security, health impacts	Biodiversity losses, deforestation and forest degradation, through air pollution CO ₂ leakage, impacts of fertilizer use on soil and water	Albedo change, direct and indirect LUC GHG emissions (N ₂ O, CO ₂ under leakage)	High permanency for adequate geological storage, long-term governance of storage, limits on rates of bioenergy production and carbon sequestration
<p><i>DACCS</i></p> <p>direct air C captur and storag</p>	0.5–5 [limited by upscaling and costs]	100–300 [25–1000]	Business opportunities, subject to a predictable CO ₂ price	Specific applications could improve indoor air quality		CO ₂ penalty if high (thermal) energy demand satisfied by fossil fuels; currently high front-up capital costs.	Material/waste implications not known but cannot be excluded	Some spatial requirements	High permanency for adequate geological storage
<p><i>Afforestation and re-forestation</i></p> <p>Biomass potential</p>	0.5–3.6 [0.5–7]	5–50 [0–240]	Employment (caveat: low-paid seasonal jobs), local livelihoods	Biodiversity if native and diverse species are used (in spite of lower CO ₂ storage)	Improved soil carbon, nutrient and water cycling impacts	Less agricultural exports, higher food prices	Biodiversity losses for high-carbon monocultures and under displacement	Direct and indirect LUC, albedo change (boreal: offsetting impact; temperate: neutralized)	Saturation of forests; vulnerable to disturbance; post-AR forest management essential
<p><i>Soil carbon sequestration</i></p>	2–5 [0.5–11]	0–100 [–45–100]	Improved soil resilience and improved agricultural production, Negative cost options	Mostly reduced pollution and improved soil quality	Mostly positive impacts on soil, water and air quality	None	Possible increase in N ₂ O emissions and N and P losses to water due to more N and P substrate for mineralisation	Need for addition of N and P to maintain stoichiometry of soil organic matter	Soil sinks saturate and are reversible when the management practice promoting SCS ceases
<p><i>Enhanced weathering</i></p>	2–4 [0–100]	50–200 [15–3460]	Increase in crop yields	Improved plant nutrition	Improved soil fertility, nutrient and moisture, increase in soil pH, increasing cation exchange capacity in depleted soils	Human health impacts associated to fine grained material	Ecological impacts of mineral extraction and transport on a massive scale	Direct and indirect land use change if biomass sourced from dedicated crops, potentially heavy metal release depending on the soil characteristics, risks of fine grained material, changes in soil hydraulic properties	Saturation of soil; Residence time from months to geological time scale