

Impact de la gestion forestière sur la sequestration de carbone dans les sols

Laurent Augusto, Lauric Cecillon, Sylvain Pellerin, Laurent Saint-andré

▶ **To cite this version:**

Laurent Augusto, Lauric Cecillon, Sylvain Pellerin, Laurent Saint-andré. Impact de la gestion forestière sur la sequestration de carbone dans les sols. Démarches volontaires du carbone en Europe - Etat des lieux et perspectives, Nov 2019, Paris, France. hal-03194568

HAL Id: hal-03194568
https://hal.inrae.fr/hal-03194568

Submitted on 9 Apr 2021

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.



Impact de la gestion forestière sur la sequestration de carbone dans les sols

Laurent Augusto,
Lauric Cécillon,
Sylvain Pellerin,
Laurent Saint-André
(ordre alphabétique)

Un contexte d'urgence climatique

Rapport spécial du GIEC de 2018 → contenir la hausse de la température moyenne en deçà de +1.5°C suppose d'atteindre la **neutralité carbone** à l'échelle globale au plus tard en 2050





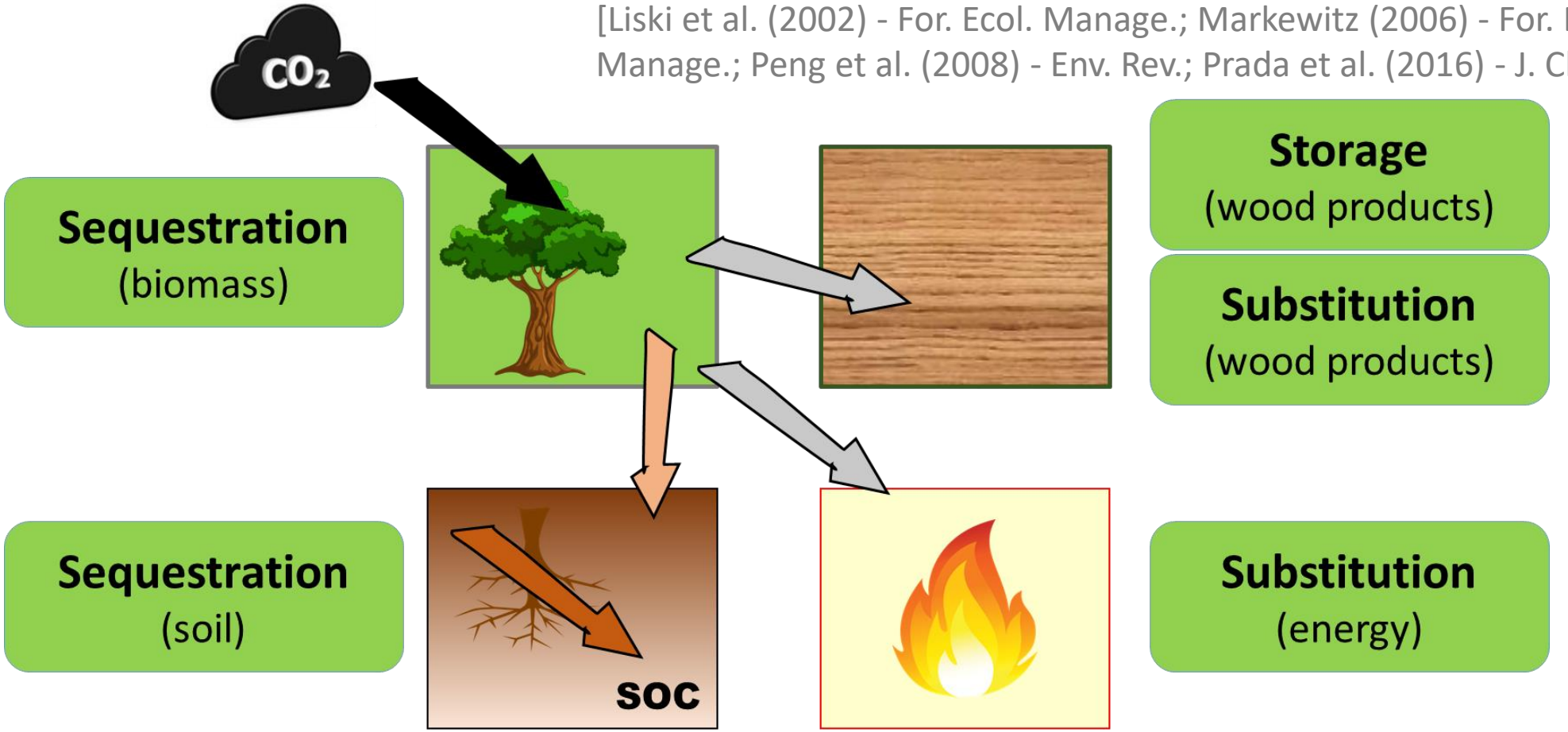
Deux leviers complémentaires

- **Réduire les émissions** de CO_2 liées à l'usage des énergies fossiles et à la déforestation, ainsi que les émissions des autres gaz à effet de serre (N_2O, CH_4)
- **Préserver et accroître le puits de CO_2** que constitue la biosphère (stockage dans la biomasse et les sols)



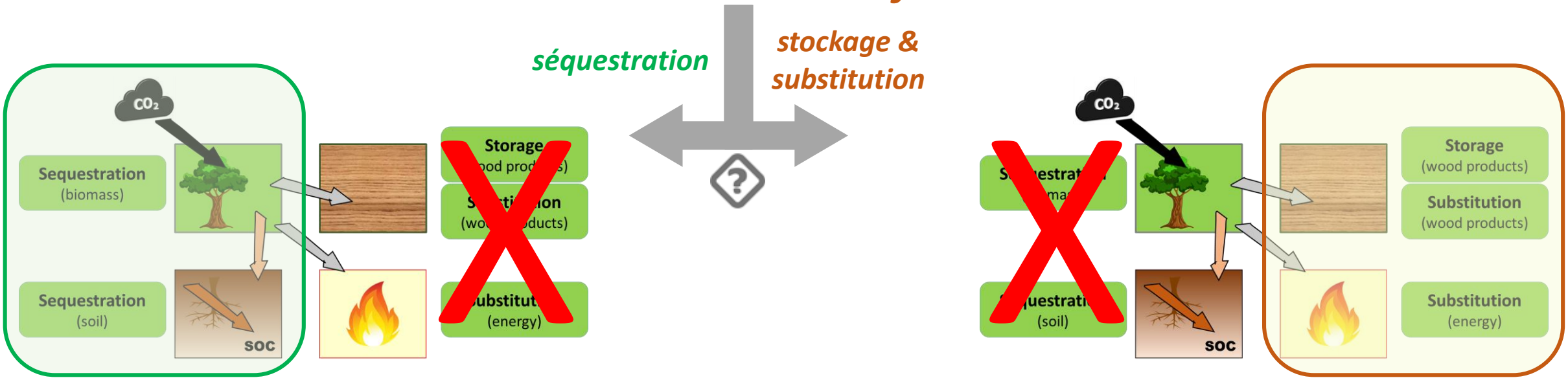
Les forêts jouent un rôle majeur dans l'atténuation du changement climatique du fait de leur cycle du carbone (C).

[Liski et al. (2002) - For. Ecol. Manage.; Markewitz (2006) - For. Ecol. Manage.; Peng et al. (2008) - Env. Rev.; Prada et al. (2016) - J. Cleaner Prod.]



Mais définir quelle est la meilleure stratégie pour optimiser l'attenuation reste un sujet vivement débattu. [Schulze et al. (2013) - Glob. Change Biol. Bioenerg.; Haberl et al. (2013) - Glob. Change Biol. Bioenerg.; Bright et al. (2013) - Glob. Change Biol. Bioenerg.; Bellassen & Luyssaert (2014) - Nature]

Question: "*Comment optimiser la contribution des forêts à l'atténuation : maximiser la séquestration dans l'écosystème ou maximiser le stockage dans les matériaux et de substitution de C fossile?*" ⇔ Le dilemme des 3-S



stratégie "Old-growth forests" ***versus*** *stratégie "Intensive plantation forestry"*



[adapté de Taeroe et al. (2017) - J. Env. Manage.]



 # Question: "*Comment optimiser la contribution des forêts à l'atténuation : maximiser la séquestration dans l'écosystème ou maximiser le stockage dans les matériaux et de substitution de C fossile?*" ⇔ Le dilemme des 3-S

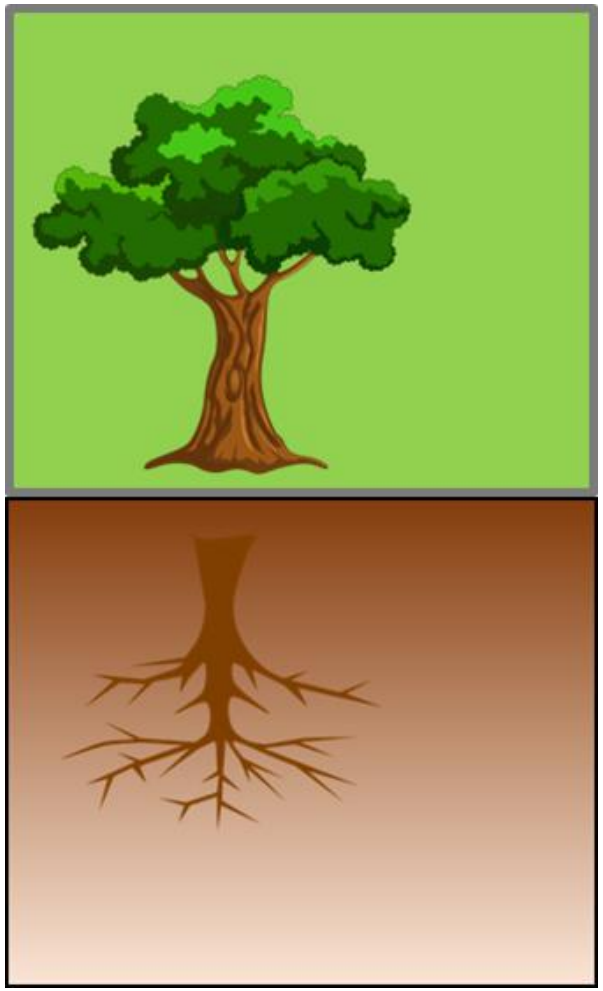
Pas de réponse unique car les simulations sont très difficiles à effectuer et sont extrêmement sensibles aux multiples hypothèses, variables, et paramètres nécessaires (coefficients de conversion énergétique, type d'énergie fossile considérée durant la substitution, matériaux considérés dans la production de la filière-bois, hypothèses sur l'état et la dynamique à long-terme du carbone dans les forêts immémoriales, etc.)

[Taeroe et al. (2017) - J. Env. Manage.]

Probablement différentes réponses pour différents contextes, en fonction du climat, des sols, de l'économie régionale, …

Les pools de carbone des forêts ne sont pas égaux en termes de vulnérabilité face aux changements globaux (feu, tempête, agressions biologiques, sécheresse, sylviculture)

[Boerner et al. (2008) ; D'Amato et al. (2011) ; Jandl et al. (2007) ; Johnson & Curtis (2011) ; Thürig et al. (2005) ; Reichstein et al. (2013) ; Wiesmeier et al. (2013)]



Biomasse aérienne

Débris ligneux (CWD; coarse woody debris)

Litière (FF; forest floor)

C organique du sol (SOC)

Vulnérabilité

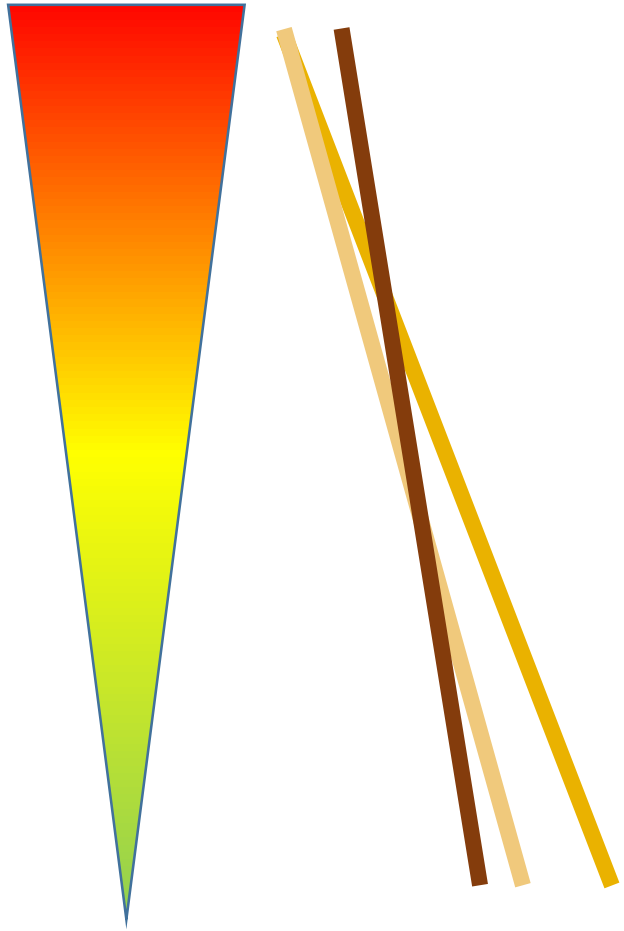
Potentiel pour une séquestration à long-terme

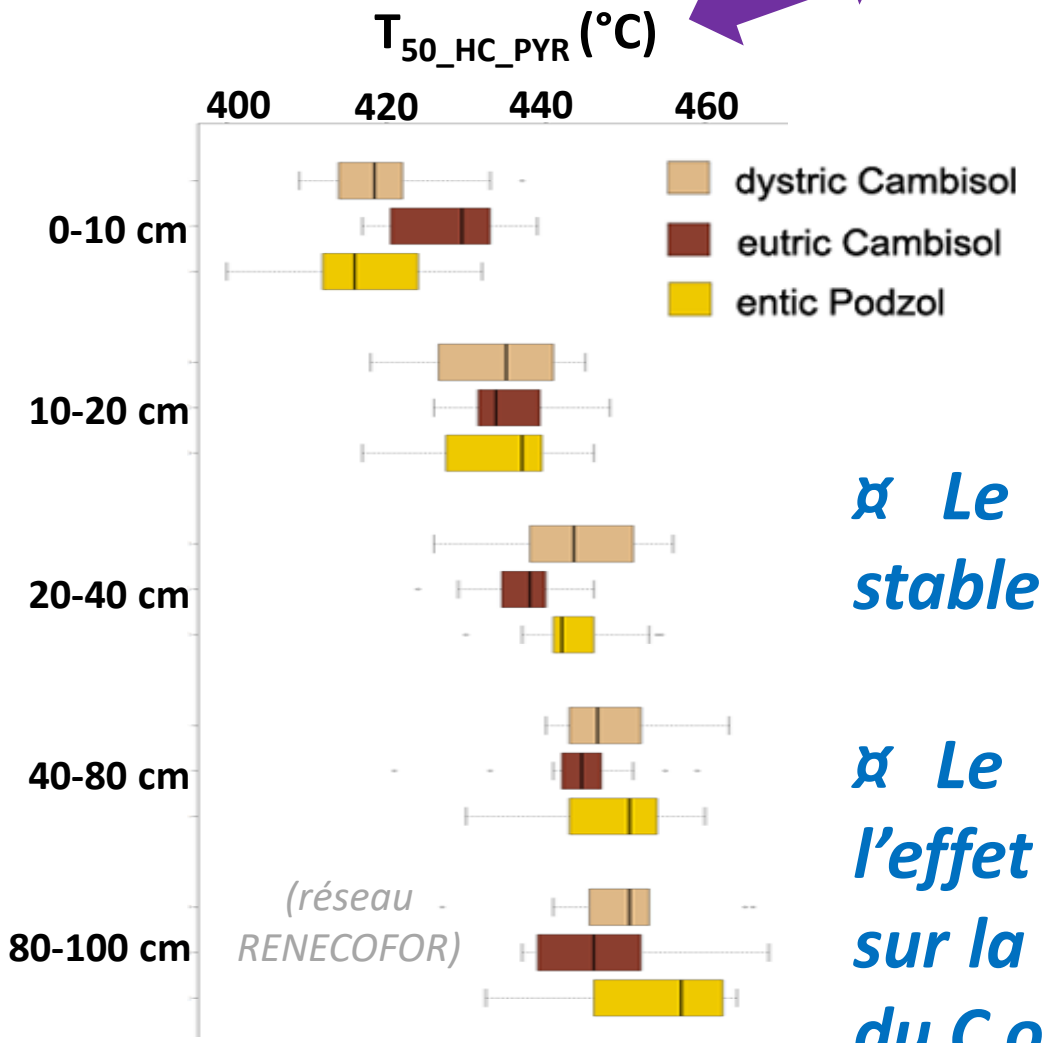
Focus sur la séquestration de C dans les sols

Les pools de carbone des forêts ne sont pas égaux en termes de vulnérabilité face aux changements globaux

méthode RockEval

Vulnérabilité du carbone du sol



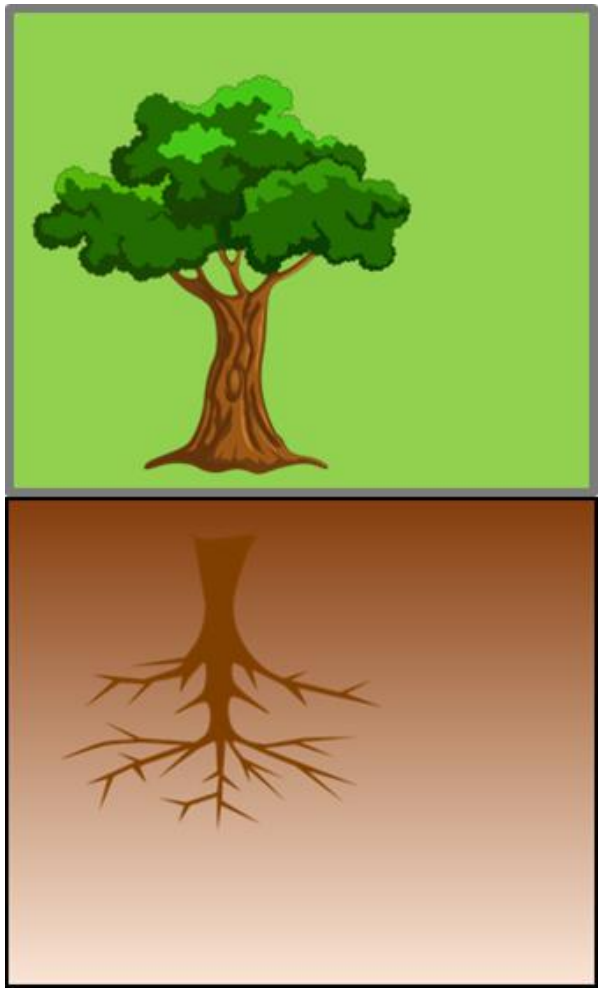


¤ Le C profond est plus stable que le C de surface

¤ Le type de sol module l'effet de la profondeur sur la vulnérabilité/stabilité du C organique du sol

Notre question:

"Est-il possible de maintenir/augmenter la séquestration de carbone organique des sols tout en continuant à récolter de la biomasse pour favoriser les processus de stockage/substitution ?"



Biomasse aérienne

Débris ligneux (CWD; coarse woody debris)

Litière (FF; forest floor)

C organique du sol (SOC)

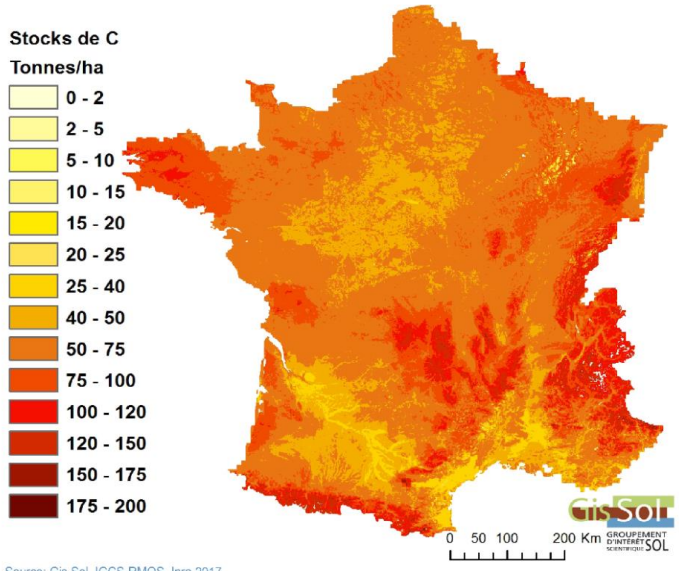
Effets ?

Outils du gestionnaire :

- **éclaircies**
- **coupes rases**
- **récoltes intensives**
- **longueur des rotations**
- **composition spécifique**
- **lutte vs les incendies**

Mais, en préambule, l'état de la séquestration de C dans les forêts :

Des stocks fortement conditionnés par le mode d'occupation du sol, en interaction avec le pédoclimat (dont altitude).



- **Plus élevés en altitude, plus faibles en zones de plaine**
- **Plus élevés sous forêt, prairie permanente, plus faibles sous grande culture**

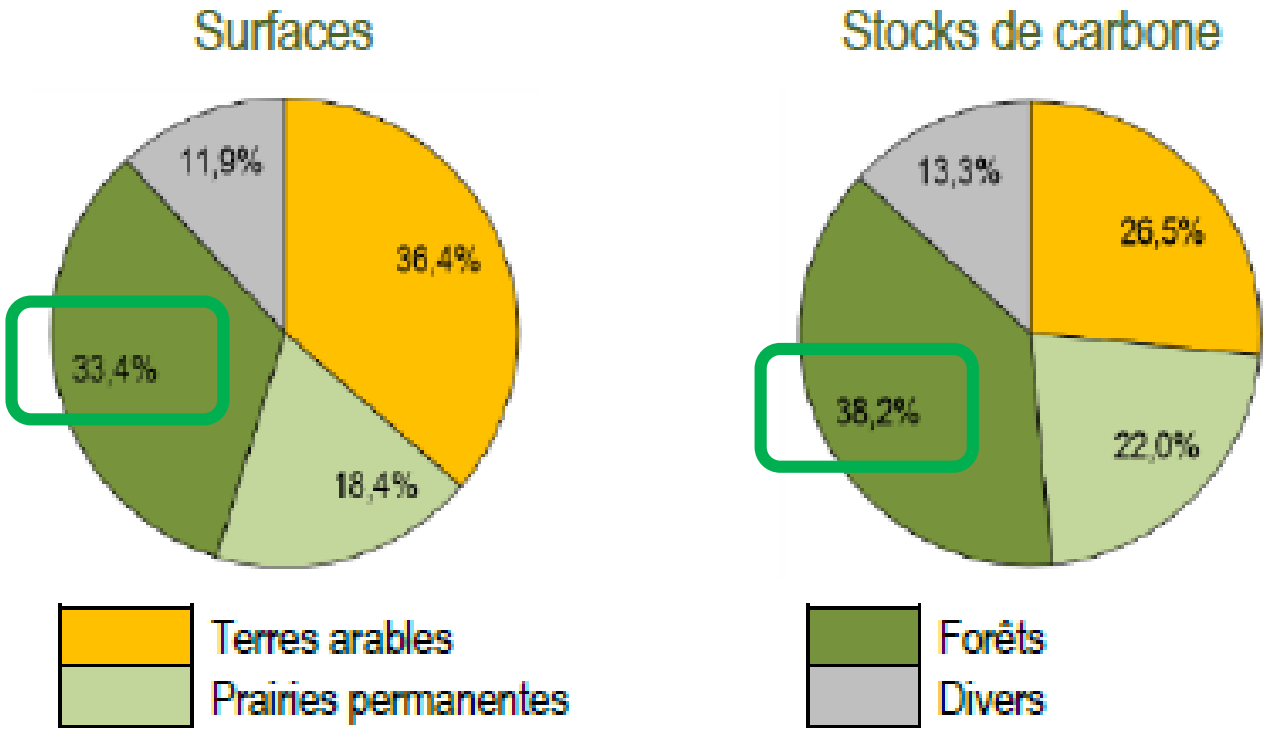
	min	moyenne	médiane	max	écart type
Stock de C organique sous prairie permanente (t/ha)	18,1	**84,6**	78,3	309	35.0
Stock de C organique sous grande culture (t/ha)	9,92	**51,6**	47,9	137	16.2
Stock de C organique sous forêts (t/ha)	6.87	**81.0**	73.4	230	35.4

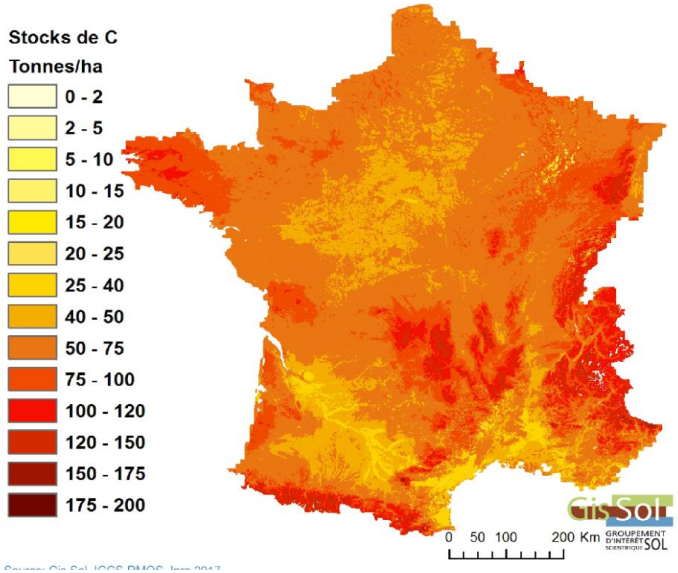
Données RMQS GIS Sol



L'état de la séquestration de C dans les forêts :

Des stocks fortement conditionnés par le mode d'occupation du sol, en interaction avec le pédoclimat (dont altitude).







Forêts = rôle majeur pour le C des sols

L'état de la séquestration de C dans les forêts :

Des évolutions tendancielles de stocks mal connues, fortement dépendantes de l'historique des parcelles

- négatives en grande culture (-170 kg C/ha/an; mais confusion fréquente avec effet retournement prairie)

- légèrement positives sous prairie permanente (+50 kg C/ha/an ; plus élevée sur prairies jeunes)

- positives sous forêt (+240 kg C/ha/an; jusqu'à +500 en cas d'afforestation récente)

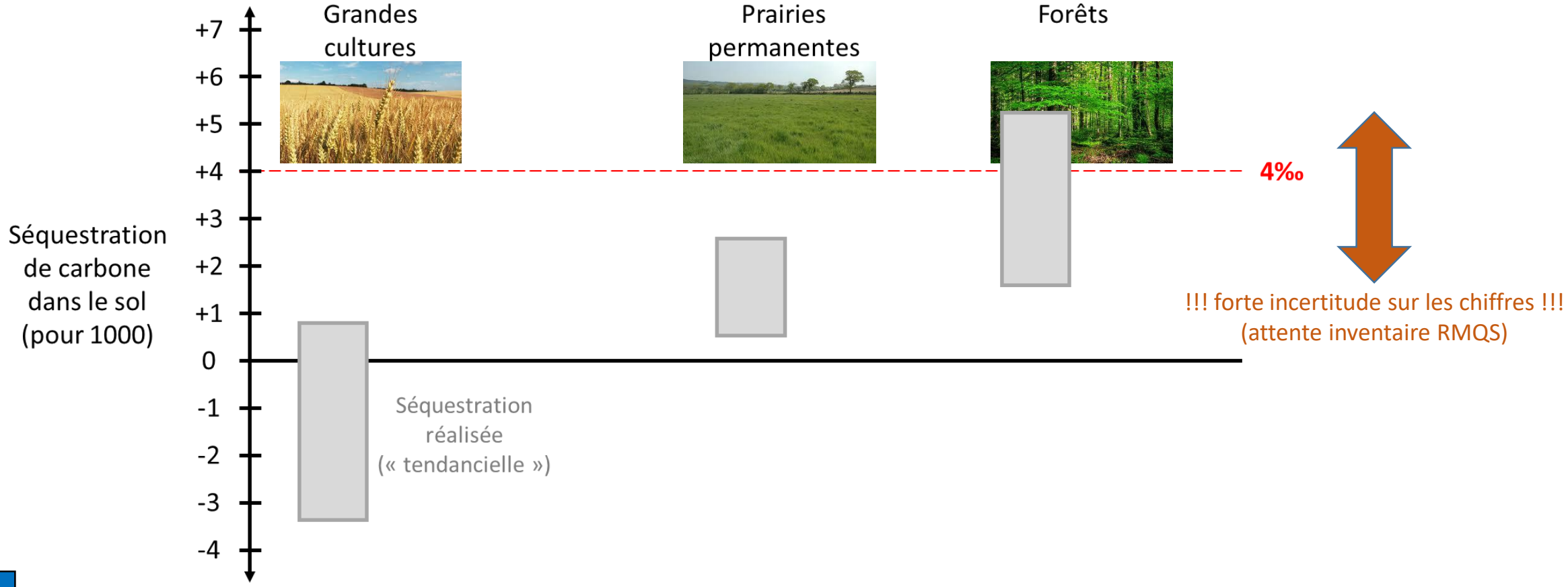






L'état de la séquestration de C dans les forêts :

Des évolutions tendancielles de stocks mal connues, fortement dépendantes de l'historique des parcelles



La forêt séquestre déjà du C dans les sols, peut-être à un taux de ~4‰

Conclusions sur l'état de la séquestration de C dans les forêts :

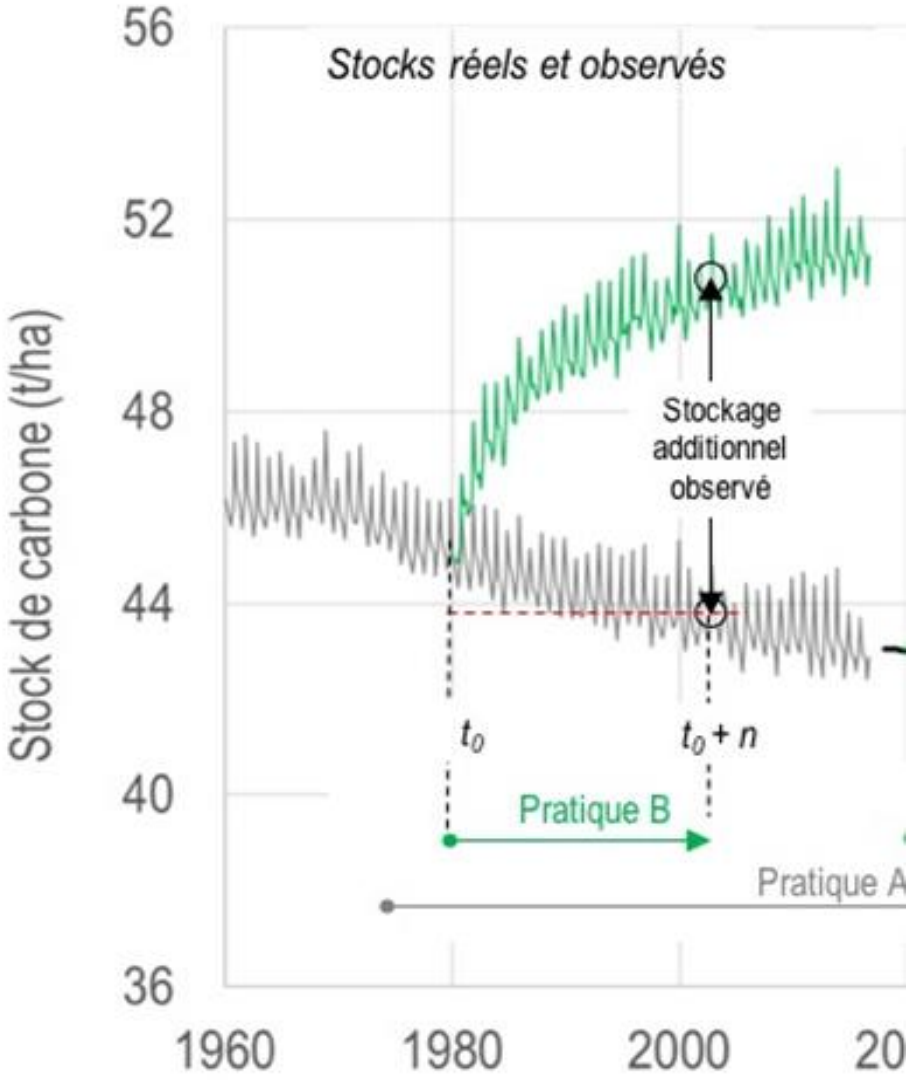
- Les forêts et les prairies permanentes séquestrent le plus de C dans les sols par unité de surface (t/ha)

- Du fait de leur surface importante (33%), les forêts représentent le premier stock de C du sol (38% des stocks nationaux métropolitains)

- Les sols forestiers continuent à séquestrer d'avantage de C dans les sols, à un rythme probablement élevé, mais qu'il reste à quantifier (inventaires RMQS 2020-2021)

Quid des changements de trajectoire en lien avec la gestion ? :

=> notions de stockage tendanciel *versus* stockage additionnel



Séquestration additionnelle suite à un changement de gestion

Séquestration tendancielle

Effets positifs ?

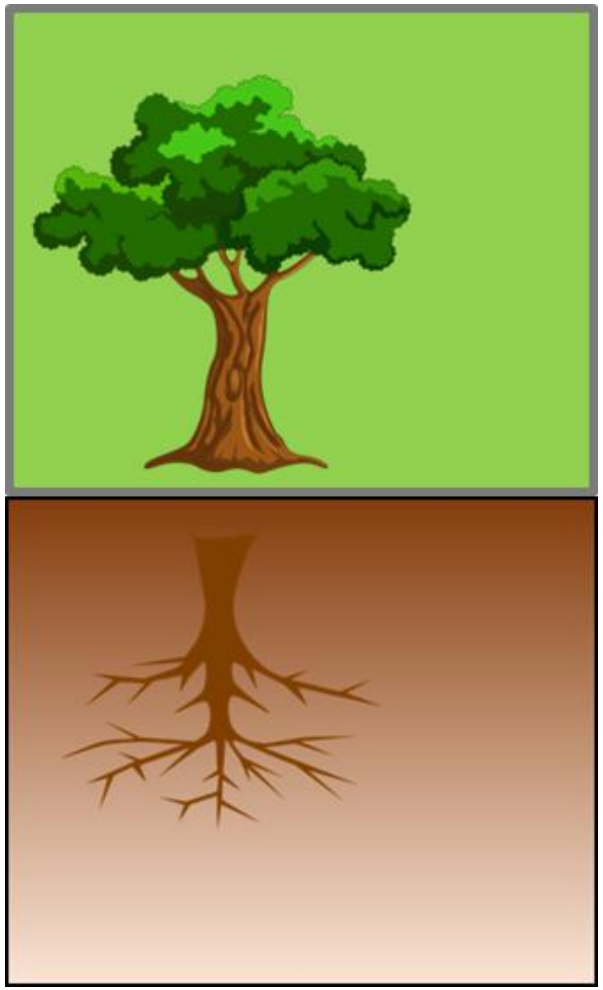
Positif dans le cas des forêts

Outils du gestionnaire :

- **éclaircies**
- **coupes rases**
- **récoltes intensives**
- **longueur des rotations**
- **composition spécifique**
- **lutte vs les incendies**

Eclaircies (ou régénération naturelles): consensus large de la littérature

[Achat et al. (2015) - Sci. Reports; Bravo-Oviedo et al. (2015) - For. Ecol. Manage.; Cheng et al. (2013) - Sci. World J.; Hoover (2011) - Carbon Balance Manage.; Jandl et al. (2007) - Geoderma; Jurgensen et al. (2012) - SSSAJ; Kim et al. (2016) - iForests; Noormets et al. (2015) - For. Ecol. Manage.; Novak & Slodicak (2004) - J. For. Sci.; Powers et al. (2011) - For. Ecol. Manage.; Powers et al. (2012) - Ecol. Appl.; Ruiz et al. (2016) - Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change; Scott et al. (2004) - Environ. Manage.; Skovsgaard et al. (2006) - Scand. J. For. Res.; Vesterdal et al. (1995) - For. Ecol. Manage.; Zhou et al. (2008) - Biogeosciences]



Biomasse aérienne

biomasse sur pied : ↘↘ to ↘

croissance des arbres restants : → to ↗↗

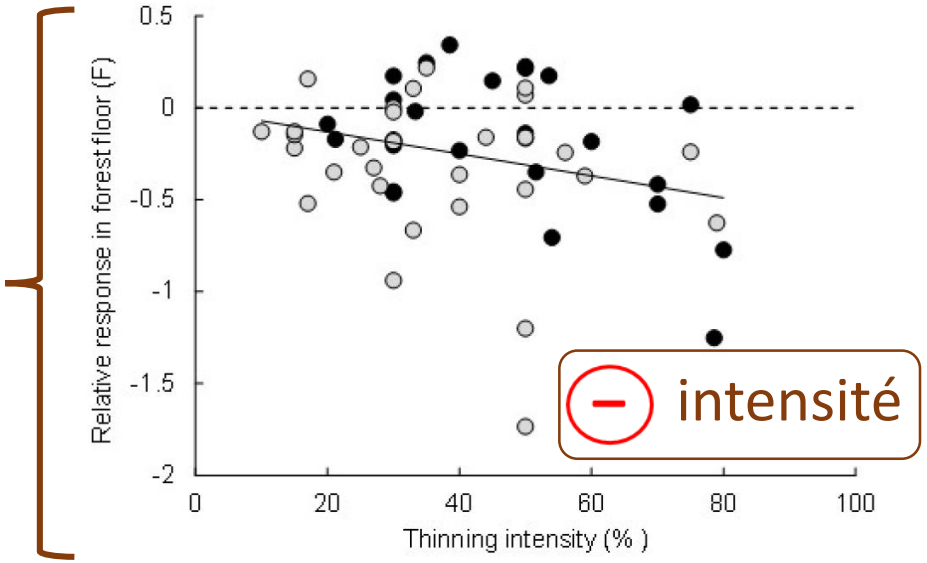
Débris ligneux (CWD; coarse woody debris)

Litière (FF; forest floor)

C organique du sol (SOC)

↘↘ à →

→ ou ↘



pas d'effet significatif

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

Après une éclaircie une ↘ SOC serait logique :
- moins d'entrées de C (chutes de litière)
- accélération de la décomposition du C?

- restauration rapide des chutes de litières (période = *f* (intensité))
- ↗↗ biomasse du sous-bois
- incorporation des résidus de coupes

effets compensatoires

[Achat et al. (2015) - Sci. Reports; Jandl et al. (2007) - Geoderma; Jimenez et al. (2011) - Forestry; Novak & Slodicak (2004) - J. For. Sci.; Zhou et al. (2008) - Biogeosciences; Zhou et al. (2016) - Env. Sci. Pollut. Res.]

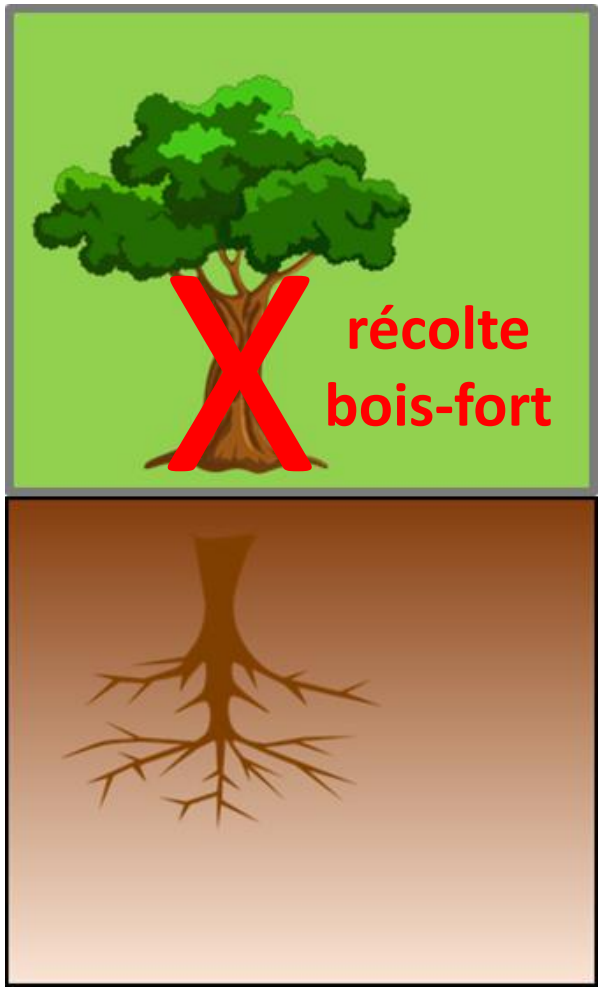
Conclusions :

➢ ***"Les éclaircies n'affectent pas la couche de litière, à condition que l'intensité de la coupe soit faible ou modérée."***

➢ ***"Les éclaircies n'affectent pas quantitativement le pool de SOC ."***

Coupe rase (tronc *bois-fort*): corpus large et globalement cohérent

[Achat et al. (2015) - Sci. Reports; Berg et al. (2009) - Can. J. For. Res.; Busse et al. (2009) - Soil Biol. Biochem. ; Hoover (2011) - Carbon Balance Manage.; Jandl et al. (2007) - Geoderma; Johnson (1992) - WASP; Johnson & Curtis (2011) - For. Ecol. Manage.; Nave et al. (2010) - For. Ecol. Manage.; Noormets et al. (2015) - For. Ecol. Manage.]



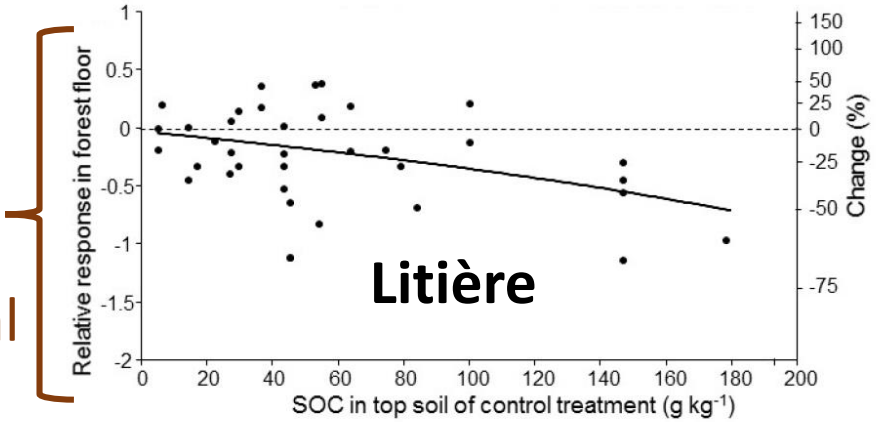
Débris ligneux (CWD; coarse woody debris)

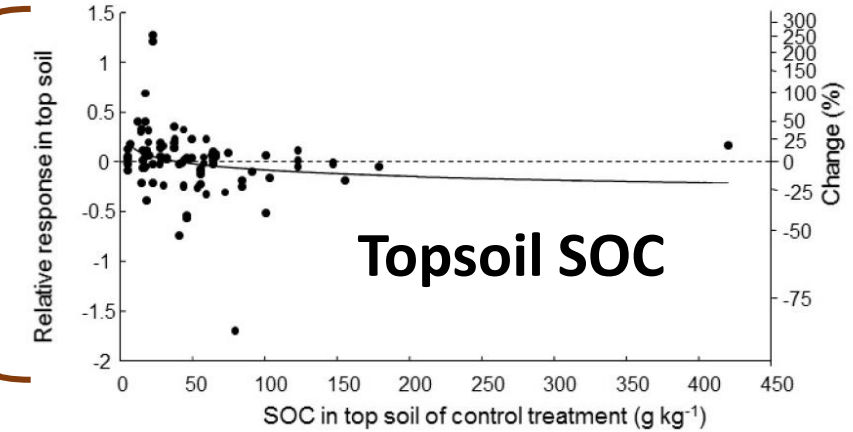
↘↘ ou →, (−) C initial

Litière (FF; forest floor)

C organique du sol (SOC)

↘ ou →, (−) C initial



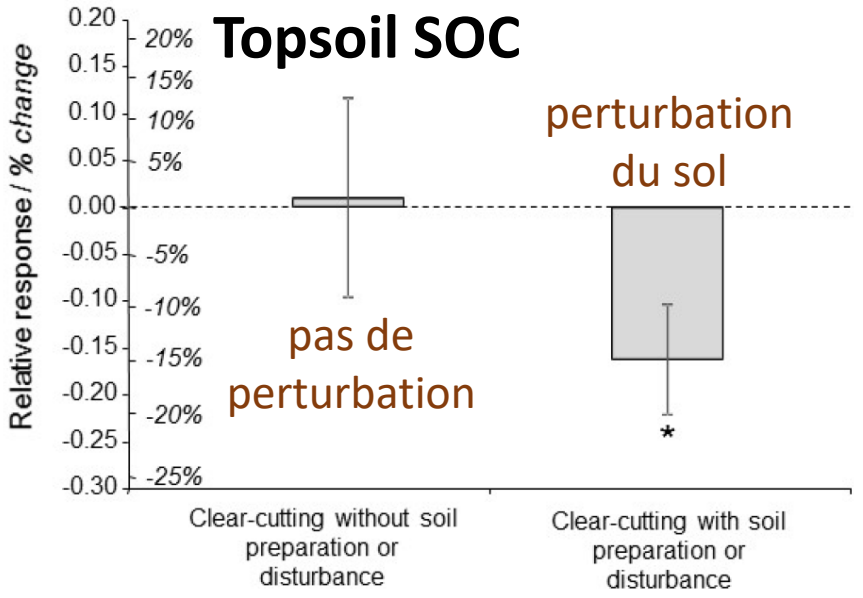


[Achat et al. (2015) - Sci. Reports]

Coupe rase (tronc *bois-fort*): corpus large et globalement cohérent

Haut du sol (*topsoil SOC*): pertes principalement dues à des perturbations :

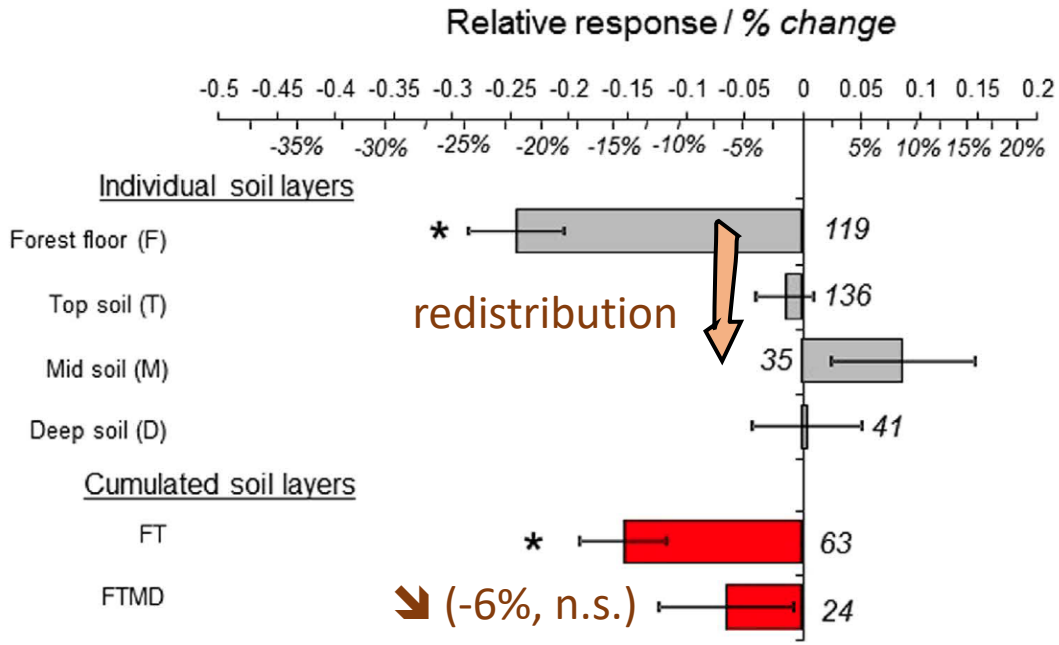
- ***slash-and-burn*** [Dean et al. (2017) - Glob. Change Biol.]
- **préparation du sol** [Achat et al. (2015) - Sci. Reports; Johnson (1992) - Water Air Soil Pollution]



A l'échelle du profil de sol (FF + SOC):

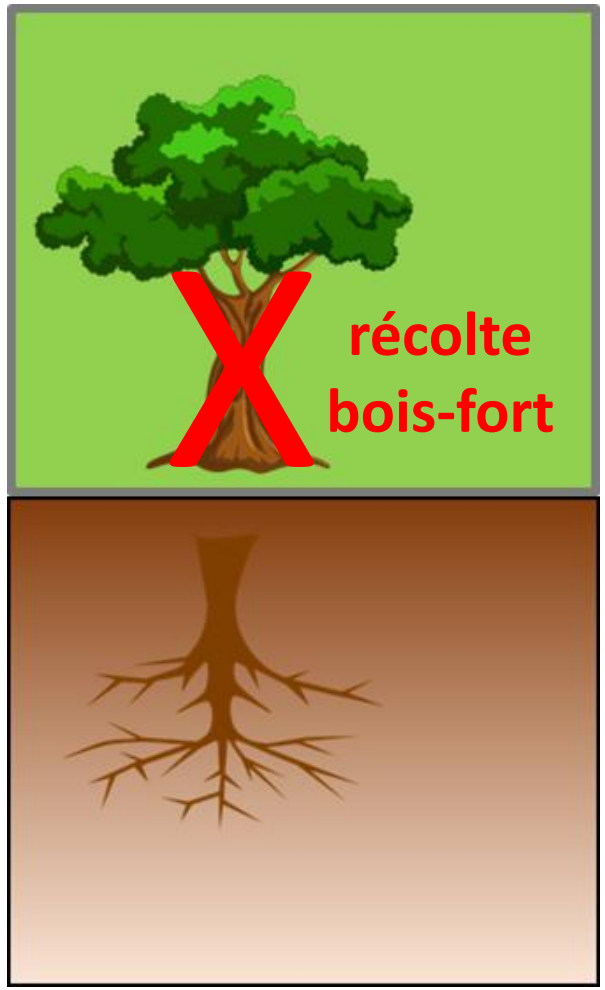
- **redistribution verticale**
- **pertes de C variables selon les sites**

(probablement un manque de puissance statistique de l'état actuel des connaissances)
[Achat et al. (2015) - Sci. Reports]



Coupe rase (tronc *bois-fort*): corpus large et globalement cohérent

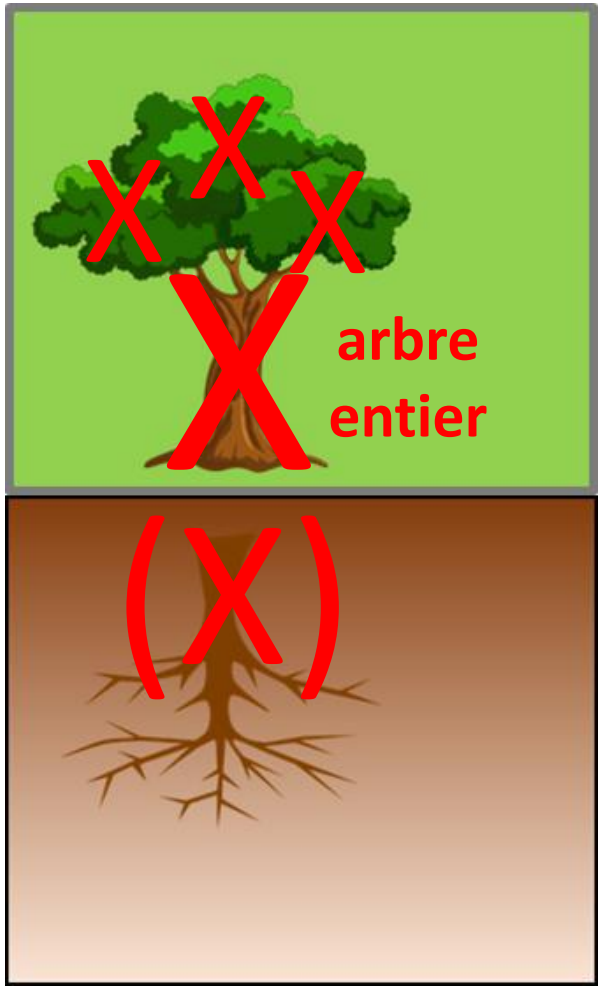
[Achat et al. (2015) - Sci. Reports; Berg et al. (2009) - Can. J. For. Res.; Busse et al. (2009) - Soil Biol. Biochem. ; Hoover (2011) - Carbon Balance Manage.; Jandl et al. (2007) - Geoderma; Johnson (1992) - WASP; Johnson & Curtis (2011) - For. Ecol. Manage.; Nave et al. (2010) - For. Ecol. Manage.; Noormets et al. (2015) - For. Ecol. Manage.]



➢ **Les coupes rases exportant uniquement les troncs de bois-fort n'affectent généralement pas la C séquestration de C, à condition de ne pas perturber les sols.**

➢ **Le risque de perte de C augmente avec la taille initiale du réservoir de C.**

Récolte intensive de biomasse : récolte arbre-entier (*whole-tree harvests*)

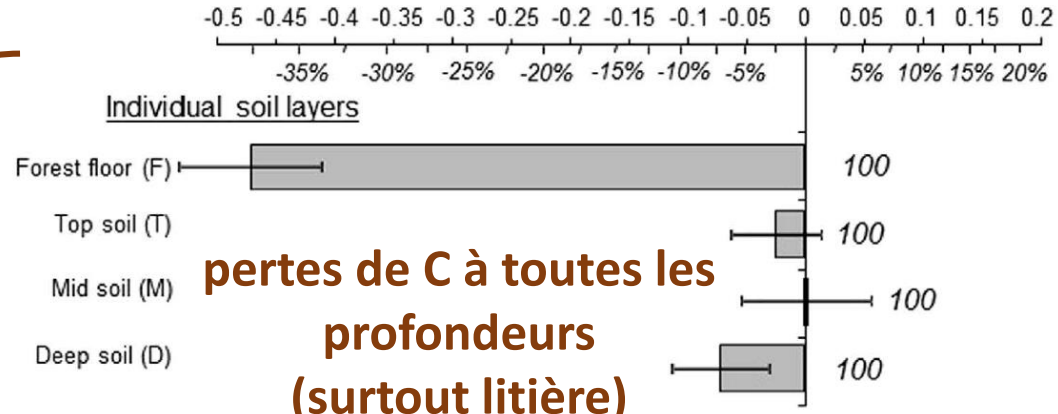


Débris ligneux (CWD; coarse woody debris) ↘↘↘

Litière (FF; forest floor) ↘↘

C organique (profil complet) ↘ ou ➔

↘ -11%



pertes de C à toutes les profondeurs (surtout litière)

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

↘ (+) climat (MAT, ETR)

➢ **Récoltes intensives affectent négativement le SOC.**

➢ **Le bilan-C du bois-énergie est réduit par les pertes de SOC, mais semble rester légèrement positif.**

[Pukkala (2014) - For. Policy Economics]

Densité des peuplements : corpus scientifique réduit et non-concluant

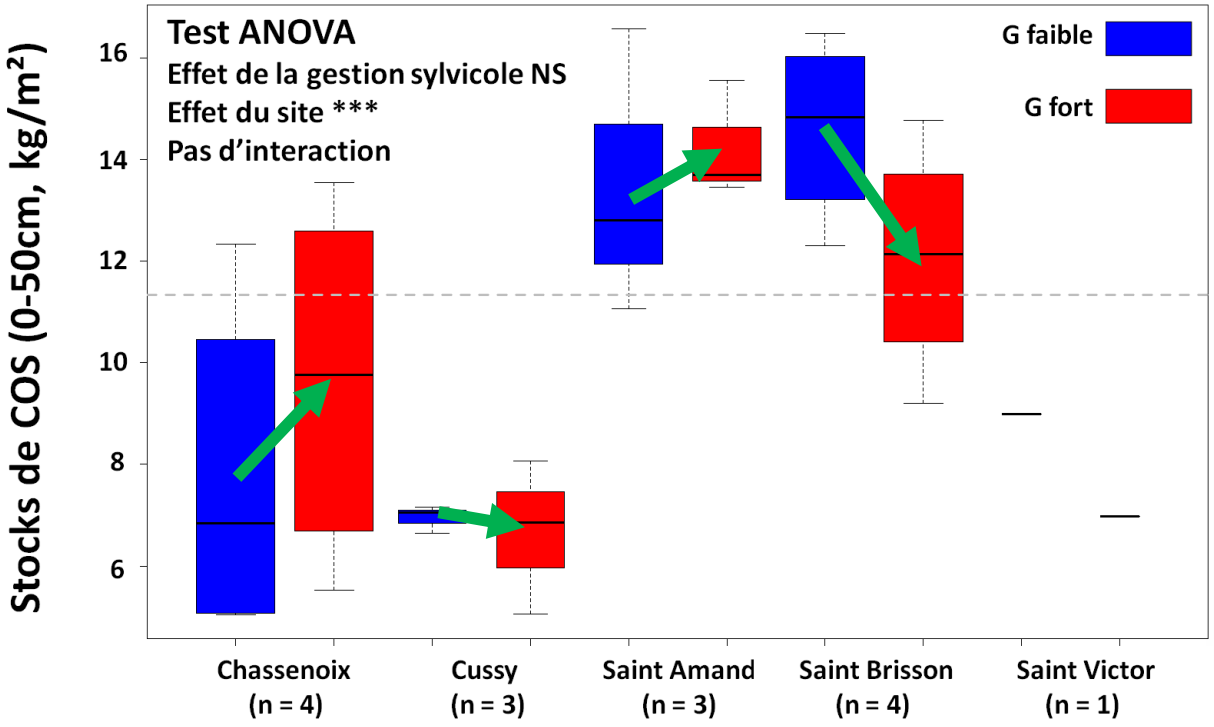
Exemple des forêts de Douglas en France

Régime d'éclaircie ou densité de plantation contrastés (extrêmes)

→ Massifs du Morvan et du Limousin

→ Durée moyenne des essais = 41 ans

→ Type de sol = Alocrisol typique

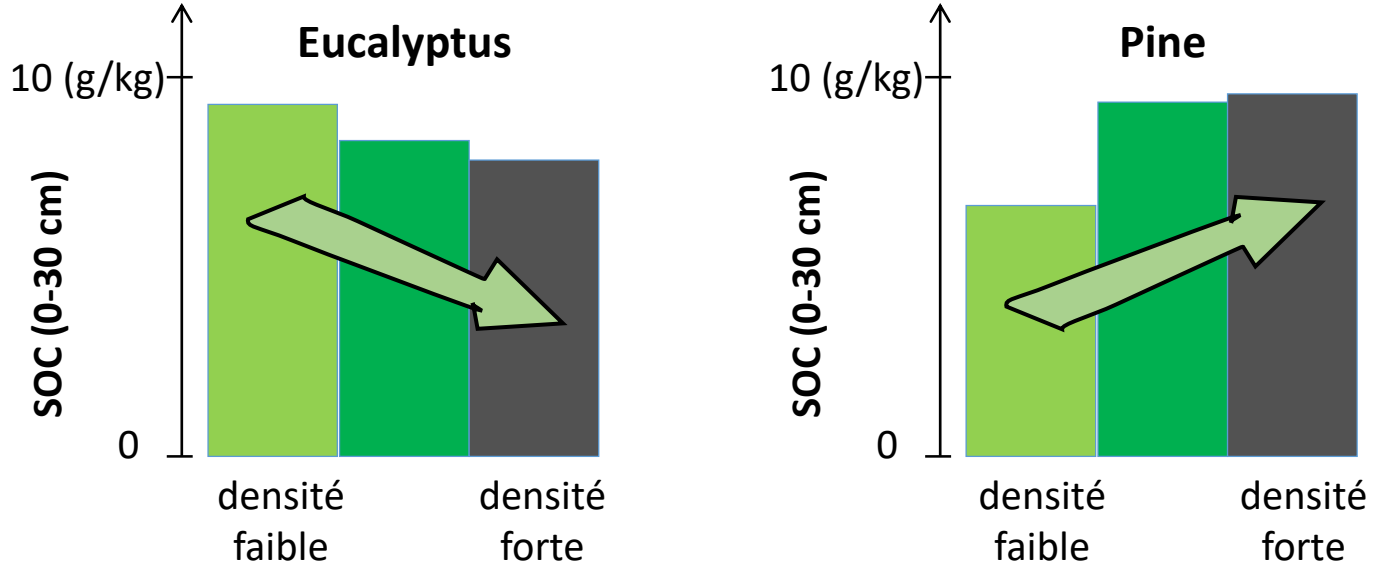




→ Pas d'effets visibles d'une augmentation de la densité (surface terrière ; G) sur le stock de C organique des sols (0-50 cm)

Densité des peuplements : corpus scientifique réduit et non-concluant

- **Pas d'effet :** Wang (W.) et al. (2013) - For. Ecol. Manage.
- **Effets contradictoires :** Hernandez et al. (2016) - For. Ecol. Manage.

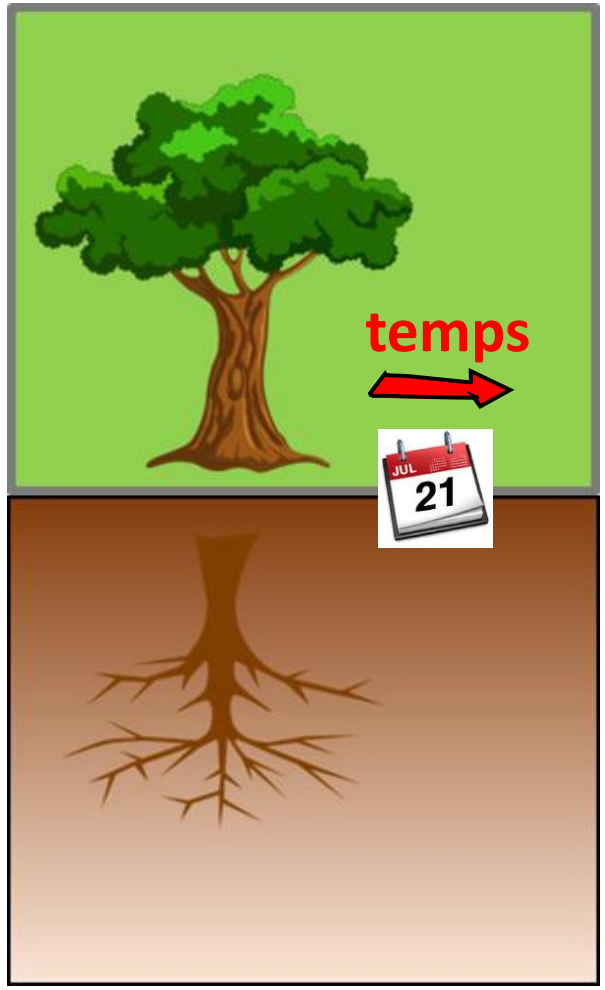


➢ **Il existe probablement de nombreux expériences de densité, mais les données ne sont pas suffisamment publiées/visibles.**

➢ **Le meilleur compromis de la densité pour la séquestration de SOC et la résistance/résilience aux sécheresses** [Sohn et al. (2016) - For. Ecol. Manage.] **n'est pas connu.**

Longueur de la rotation (→ "*old-growth*") : tendances pas si clairs

[Ji et al. (2017) - Sci. Reports; Leuschner et al. (2014) - Ecosystems; Luyssaert et al. (2008) - Nature; Naudts et al. (2016) - Science; Seely et al. (2002) - For. Ecol. Manage.; Wang (W.) et al. (2013) - For. Ecol. Manage.; Zhou (G.) et al. (2006) - Science]



Biomasse

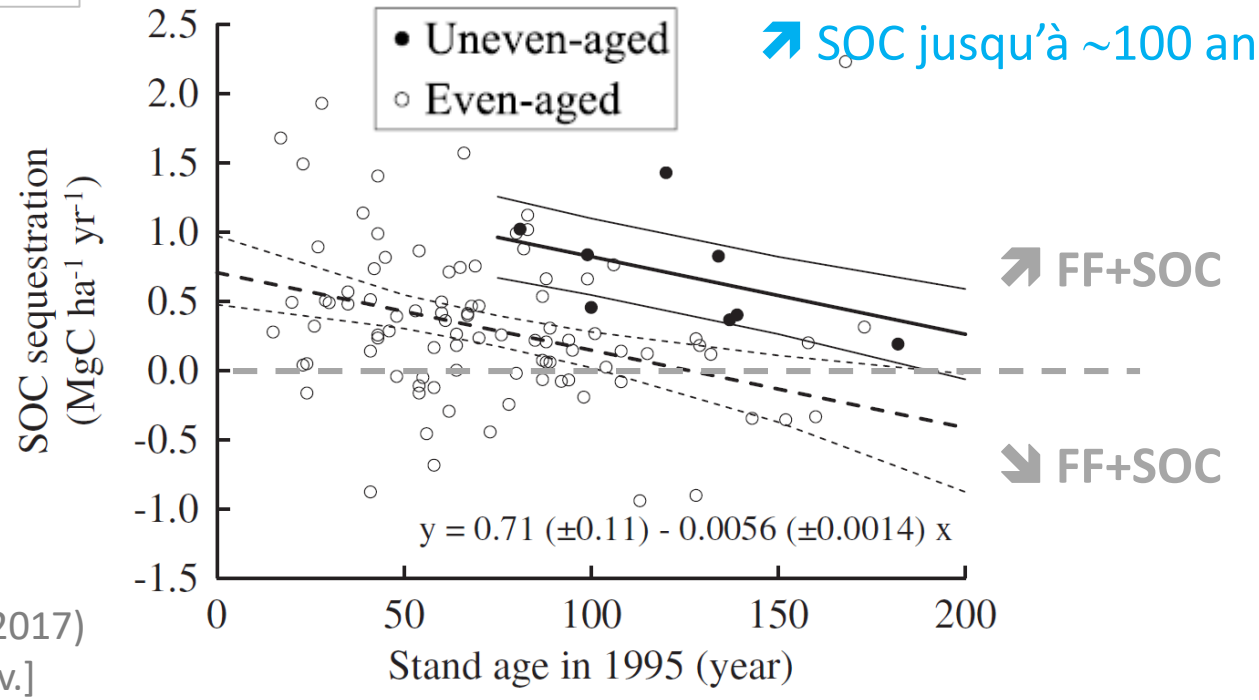
↗ (même dans les « *old-growth forests* »)

? effets de perturbations majeures
(feu, tempête, attaque biologique, sécheresse …)

Litière (FF)
+ Sol (SOC)

résultats hétérogènes : ↗ ou →

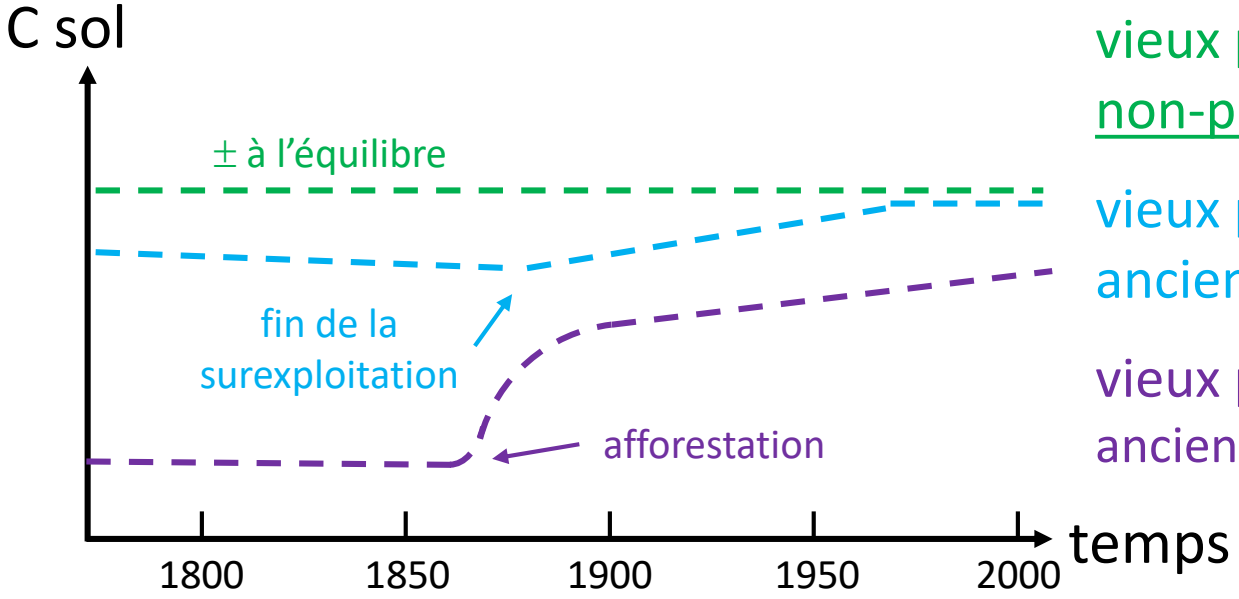
RENECOFOR :
↗ SOC jusqu'à ~100 ans



[Jonard et al. (2017) - Sci. Tot. Env.]

Longueur de la rotation (→ "*old-growth*") : tendances pas si clairs

Hypothèse = les effets du longue continuité forestière dépend de l'historique de la forêt :
SOC = *f* (occupation ancienne, sylviculture passée, anciennes perturbations)



vieux peuplements dans d'anciennes (> 200 ans) forêts non-perturbées

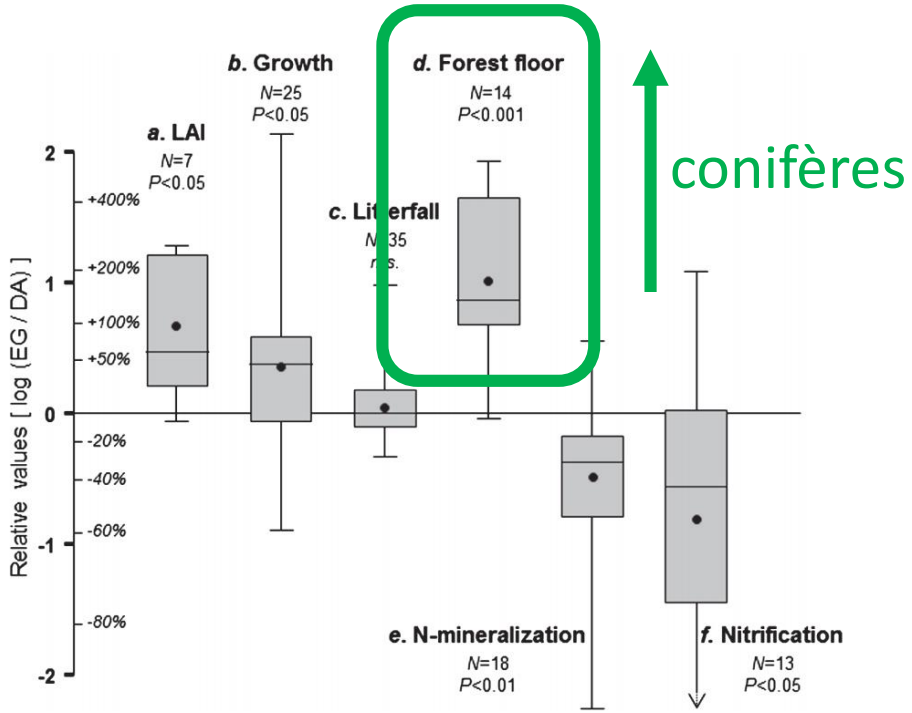
vieux peuplements dans d'anciennes forêts, mais anciennement surexploitées (RENECOFOR ?)

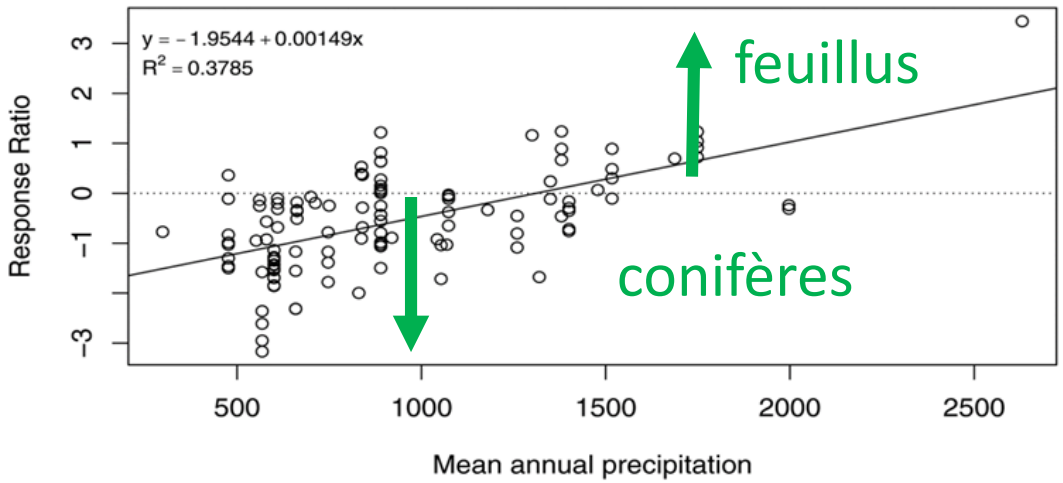
vieux peuplements dans des forêts récentes (< 200 ans ; anciennement champs agricoles)

➢ **Rallonger les rotations –et ainsi tendre vers les *old-growth forests*– peut améliorer sur le long-terme la séquestration de SOC (jusqu'à 50-100 ans ?).**

➢ **Sur le très long-terme (> 100-200 ans ?), les gains de séquestration de SOC pourraient être négligeables (en fonction de l'historique des forêts ?).**

Espèces (identité & biodiversité) : de nombreuses incertitudes



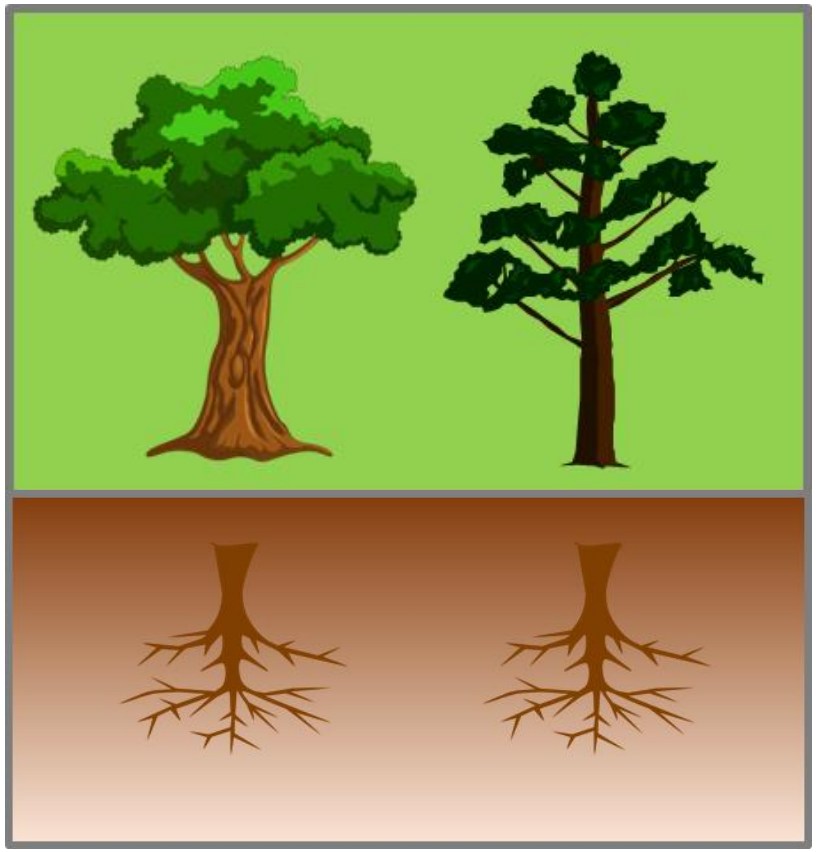


litière (FF) : feuillus << conifères

SOC : pas d'effet univoque
Tendance = plus les précipitations sont faibles, plus le bilan est en faveur des conifères

Espèces (identité & biodiversité) : de nombreuses incertitudes

[Augusto et al. (2014) – Ecol. Letters; Augusto et al. (2015) - Biol. Reviews; Boca et al. (2014) – SSSAJ; Brunel et al. (2017) - Sci. Total Env.; Dawud et al. (2016) - Ecosystems; Dawud et al. (2017) - Func. Ecol.; Gahagan et al. (2015) - For. Ecol. Manage.; Hulvey et al. (2013) - Nature Climate Change; Sullivan et al. (2017) - Sci. Reports; Wang (H.) et al. (2013) - For. Ecol. Manage.; Wiesmeier et al. (2013) - For. Ecol. Manage.]



Biomasse

sol riche : feuillus ≥ conifères
sol pauvre : feuillus ≤ conifères

biodiversité = effet stabilisateur
effet biodiversité = f (groupe fonctionnel)

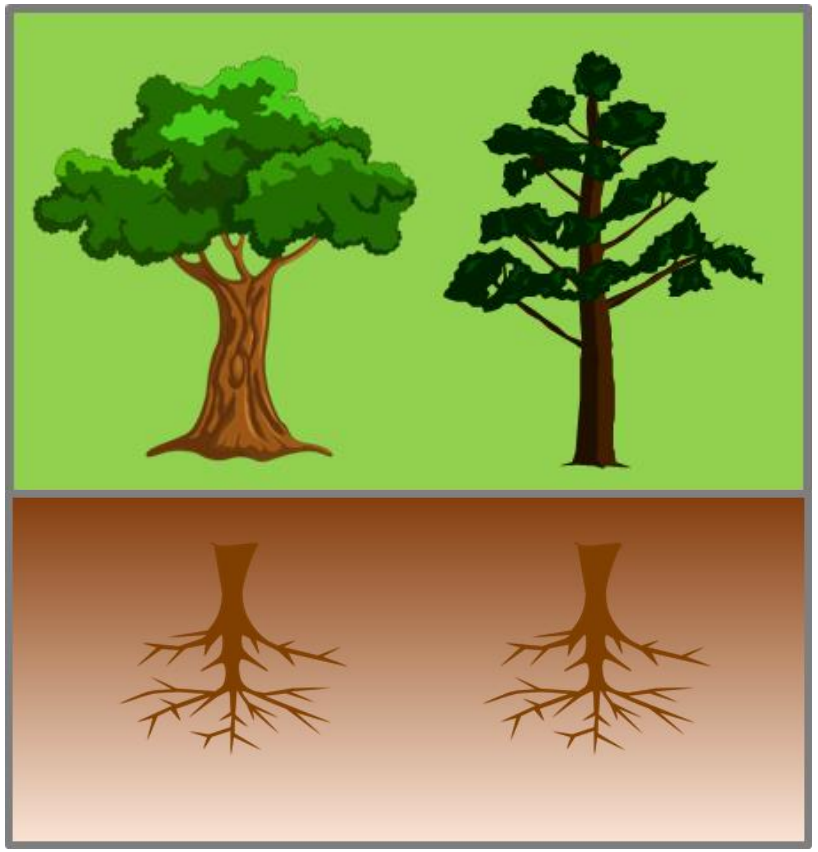
Litière + Sol (SOC)

litière (FF) : feuillus << conifères
mais FF+SOC : ? pas d'effet clair

biodiversité = pas clair (↗ or →)
effet biodiversité = f (groupe fonctionnel)

Espèces (identité & biodiversité) : de nombreuses incertitudes

[Augusto et al. (2014) – Ecol. Letters; Augusto et al. (2015) - Biol. Reviews; Boca et al. (2014) – SSSAJ; Brunel et al. (2017) - Sci. Total Env.; Dawud et al. (2016) - Ecosystems; Dawud et al. (2017) - Func. Ecol.; Gahagan et al. (2015) - For. Ecol. Manage.; Hulvey et al. (2013) - Nature Climate Change; Sullivan et al. (2017) - Sci. Reports; Wang (H.) et al. (2013) - For. Ecol. Manage.; Wiesmeier et al. (2013) - For. Ecol. Manage.]



- **De nombreuses incertitudes subsistent.**
- **L'identité est généralement un facteur plus important que la diversité.**
- **La diversité fonctionnelle (conifères, fixateur d'azote, …) pourrait mieux expliquer les tendances observées que la diversité spécifique.**

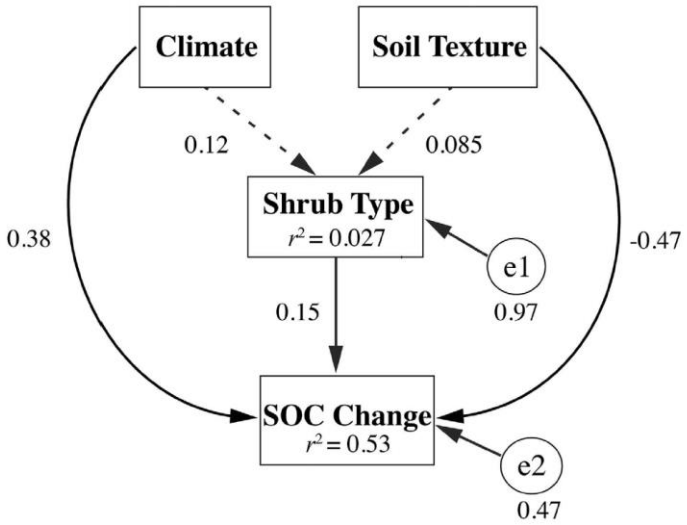
Espèces : rôle positif des espèces fixatrices d'azote

[Vidal et al 2019, Forest Ecology and Management, Liu et al. 2019 scientific reports; Li et al 2016, Scientific reports]

Soil organic matter, total carbone and total nitrogen for the top soil (0–5 cm) at the *Rousset* site.

Treatments	P fertilisation F/C	Gorse sowing G/C	SOM mg g^{-1}	C_{TOT} mg g^{-1}	N_{TOT} mg g^{-1}
CC	C	C	33.7 ± 2.0 b	21.4 ± 1.8 n.s	1.09 ± 0.09 ab
CG	C	G	39.0 ± 1.5 a	18.3 ± 3.4 n.s	0.92 ± 0.15 b
FC	F	C	33.9 ± 1.5 b	17.7 ± 1.6 n.s	0.88 ± 0.07 b
FG	F	G	39.9 ± 1.2 a	27.5 ± 4.4 n.s	1.42 ± 0.23 a

Cas d'étude (ajonc d'Europe sous Pin Maritime) : ↗ SOC



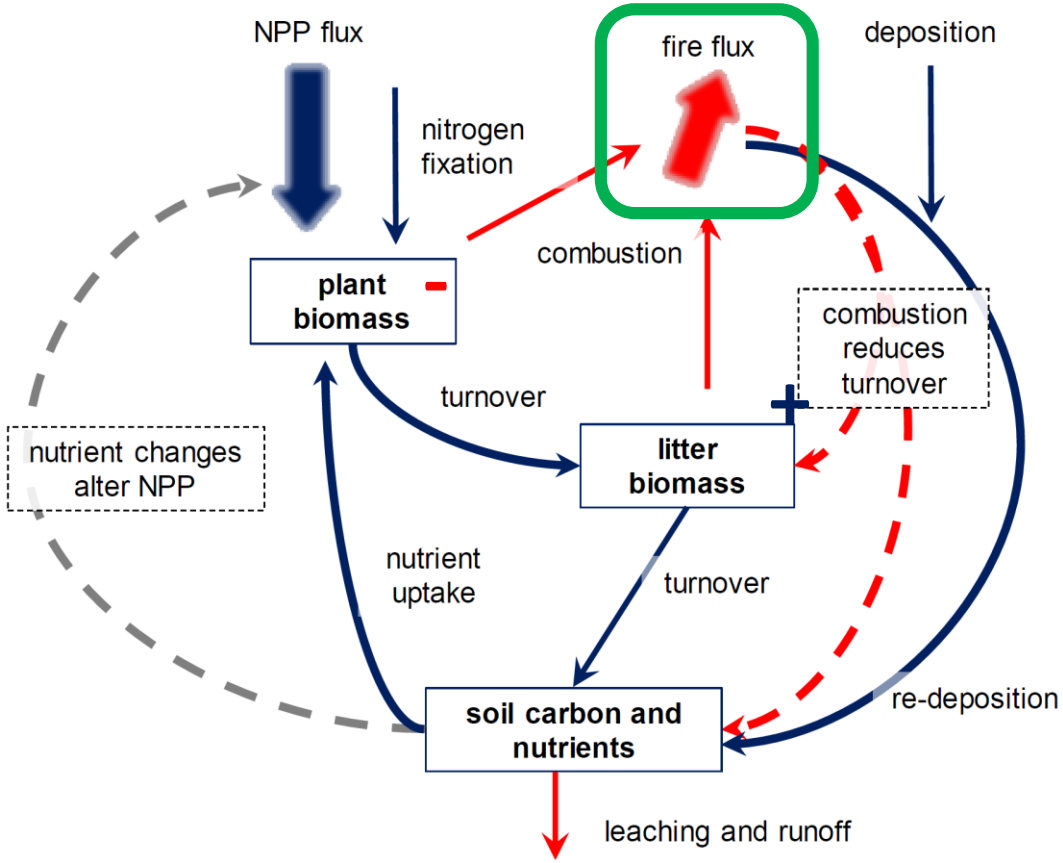
➢ **Pour les écosystèmes méditerranéens, les arbustes légumineux favorisent la séquestration de SOC.**

➢ **Mais, augmentation du risque *incendie*...**

Cas général (méta-analyse) : la présence d'arbustes fixateurs ↗ SOC

Incendies : un effet négatif sur la séquestration de SOC

[Pellegrini et al 2018, Nature; Conche et al. 2007; Adkins et al. 2019 Geoderma ; Pressler et al 2019, Oikos]



- **Baisse du SOC (surtout litière)**
- **Réduction de la faune/microbes du sol**
- **Impact augmente avec la fréquence des incendies**
- **Mais, réponse différente selon les écosystèmes** [*f* (capacité à capter les minéraux libérés dans sol après le feu – croissance racinaire rapide, et reconstituer un cycle biologique, importance des légumineuses)]

Synthèse

Les outils du gestionnaire

- éclaircie (bois-fort) — n.s. — intensité de la coupe

- coupe rase (bois-fort)
- ➢ sans perturbation du sol — n.s. — taille du réservoir initial de C
- ➢ avec perturbation du sol — (−)

- densité des peuplements — (?) — besoin de recherches

- récolte intensive (arbre-entier) — (−) — climat — besoin de recherches

- rotation longue — (+) — historique — besoin de recherches

- composition spécifique
- ➢ identité — (?)
- ➢ diversité — (?)

— besoin de recherches

Sequestration (soil)



Synthèse

Les outils du gestionnaire

	Sequestration (soil)	Sequestration (biomass)	Storage (wood products) Substitution (wood products)	Substitution (energy)
				
- éclaircie (bois-fort)	**n.s.** (intensité faible-modérée)	−	+	
	intensité de la coupe			
- coupe rase (bois-fort)	**taille du réservoir initial de C**			
➢ sans perturbation du sol	**n.s.**	−	+	
➢ avec perturbation du sol	− 	−	+	
- densité	?			

Synthèse

Les outils du gestionnaire

	Sequestration (soil)	**Sequestration** (biomass)	**Storage** (wood products) **Substitution** (wood products)	**Substitution** (energy)
				
- récolte intensive	− climat	− −	+ +	+
- rotation longue	+ historique	+ perturbations majeures		
- composition				

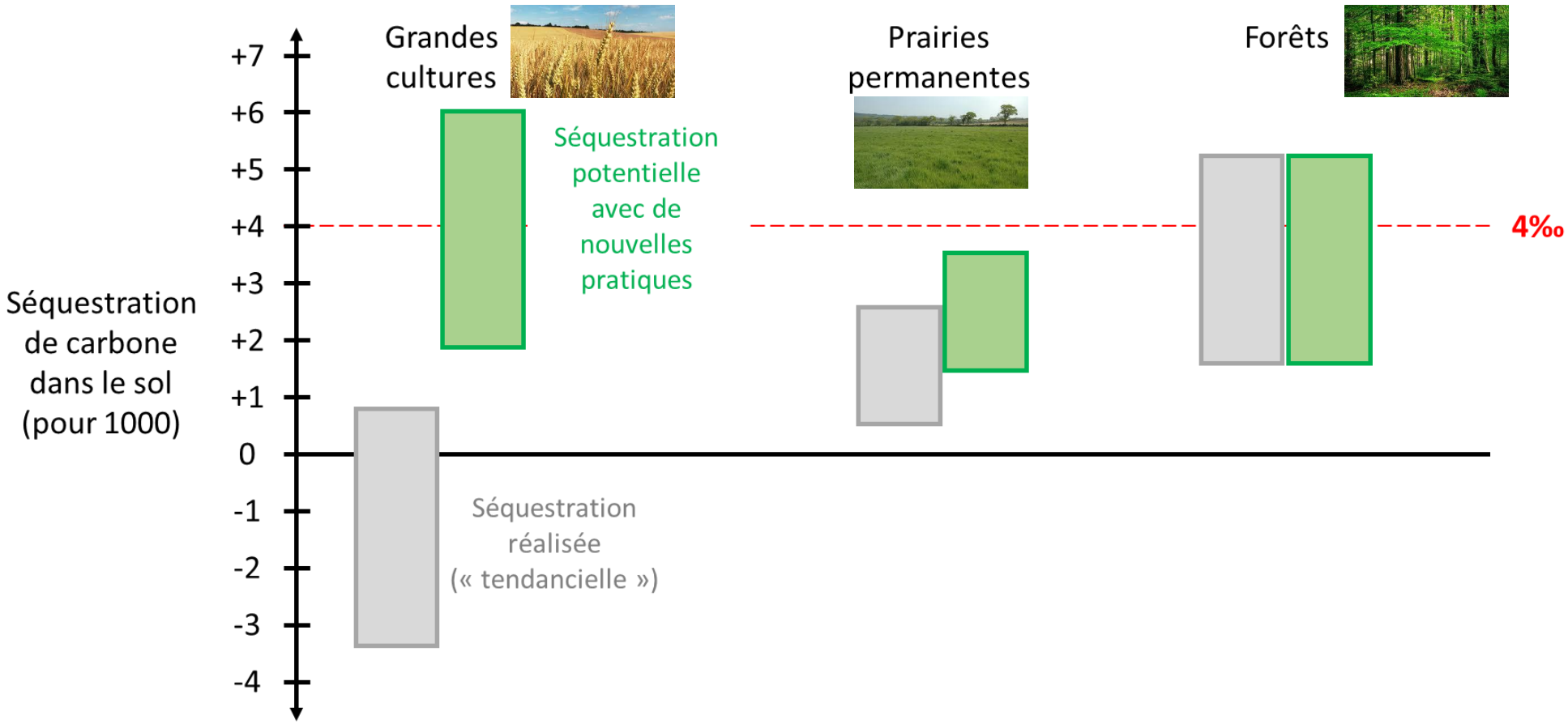
- ➢ identité
- ➢ diversité

besoin de recherches

Synthèse

¤ Intrinsèquement, il y a pas/peu de pratiques de gestion plus-stockantes en forêt ⇔ rôle positif de la sylviculture *traditionnelle* (« à papa »).

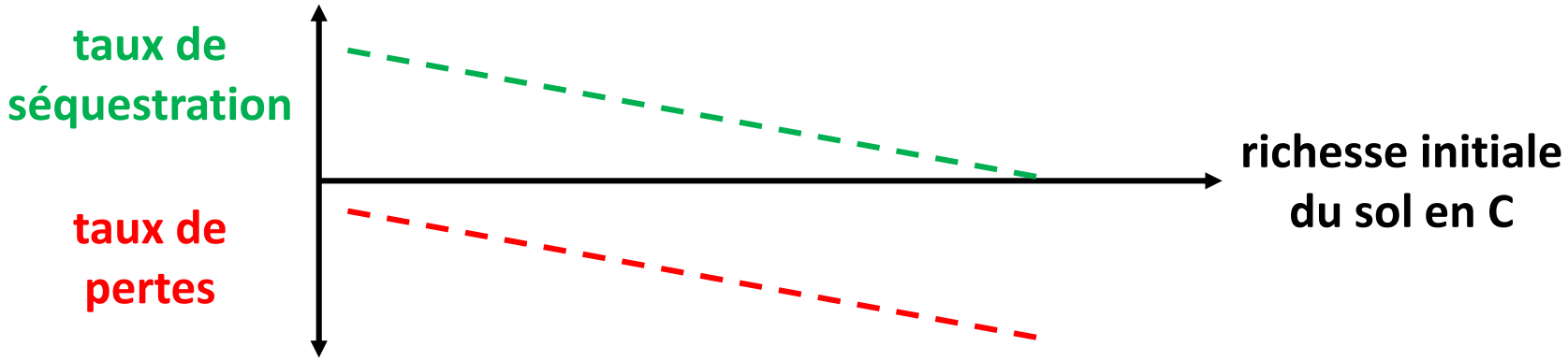
¤ Les forêts françaises « font déjà le job »



Proposition de plan de bataille

Question initiale : ***"Est-il possible de maintenir/augmenter la séquestration de carbone organique des sols tout en continuant à récolter de la biomasse pour favoriser les processus de stockage/substitution ?"***

- **Notre réponse est basée sur deux postulats :**
  - ¤ **séquestration de SOC diminue quand le réservoir initial de SOC est élevé**
  - ¤ **pertes de SOC augmentent quand le réservoir initial de SOC est élevé**



[Achat et al. (2015) - Sci. Reports; Boulmane et al. (2017) - Ann. For. Sci.; Cook et al. (2016) - For. Ecol. Manage.; Li et al. (2012) - New Phytol.; Moradi et al. (2017) - iForests; Poeplau et al. (2011) - Glob. Change Biol.; Smith et al. (1997) - Glob. Change Biol.; Wei et al. (2014) - Sci. Reports; Zheng et al. (2008) - For. Ecol. Manage.]

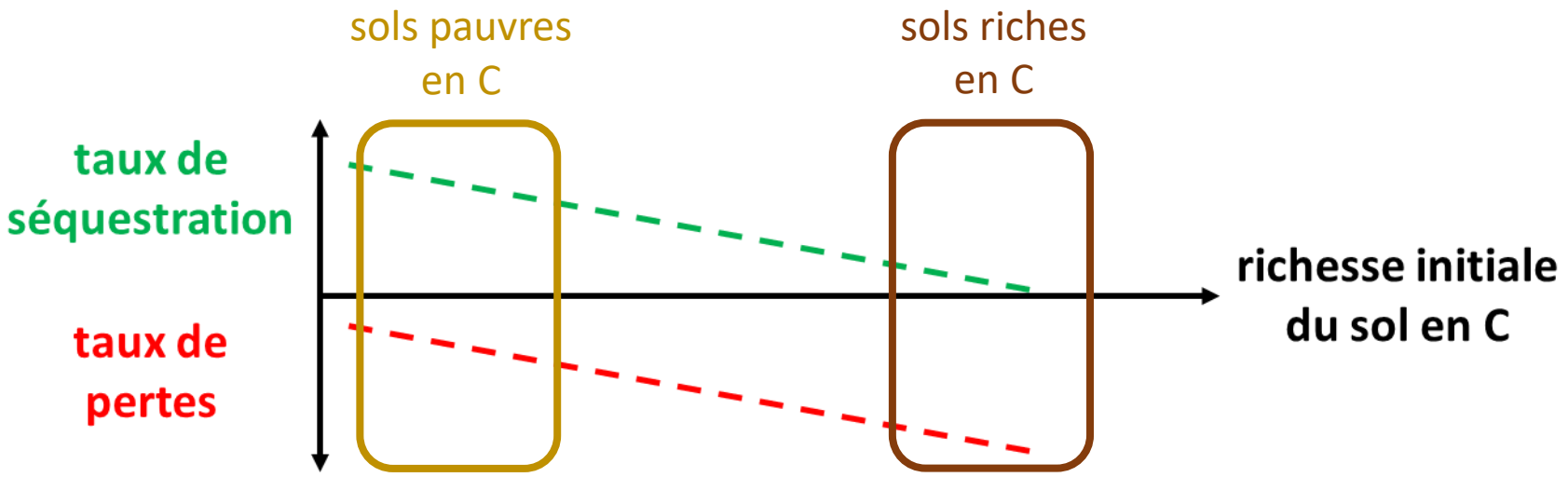
➢ **Proposition = "*si possible, vaincre sur tous les fronts*"** [≈ Bellassen & Luyssaert (2014) – Nature]

"sur sols pauvres en SOC, augmenter SOC et récolter de la biomasse"

⇔ plan offensif

"sur sols riches en SOC, maintenir SOC et maintenir des récoltes modérées"

⇔ plan défensif



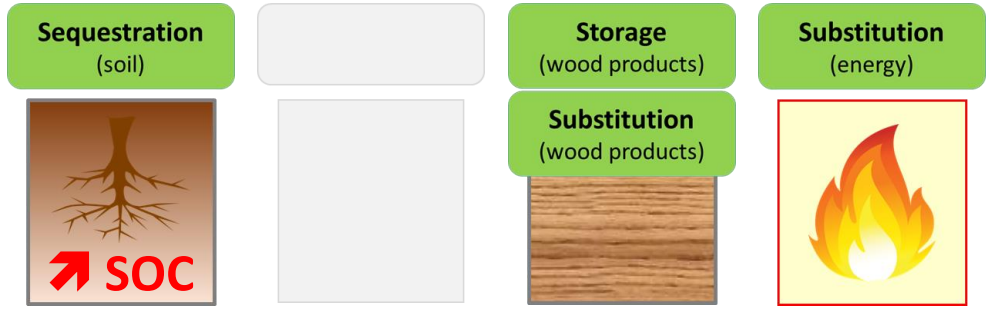
[Achat et al. (2015) - Sci. Reports; Boulmane et al. (2017) - Ann. For. Sci.; Cook et al. (2016) - For. Ecol. Manage.; Li et al. (2012) - New Phytol.; Moradi et al. (2017) - iForests; Poeplau et al. (2011) - Glob. Change Biol.; Smith et al. (1997) - Glob. Change Biol.; Wei et al. (2014) - Sci. Reports; Zheng et al. (2008) - For. Ecol. Manage.]

➢ Sols pauvres en C

(p.ex. afforestation de sols cultivés ou dégradés)

- ¤ essences à croissance rapide
- ¤ sylviculture intensive

[e.g. Boulmane et al. (2017) - Ann. For. Sci.; Cook et al. (2016) - For. Ecol. Manage.]



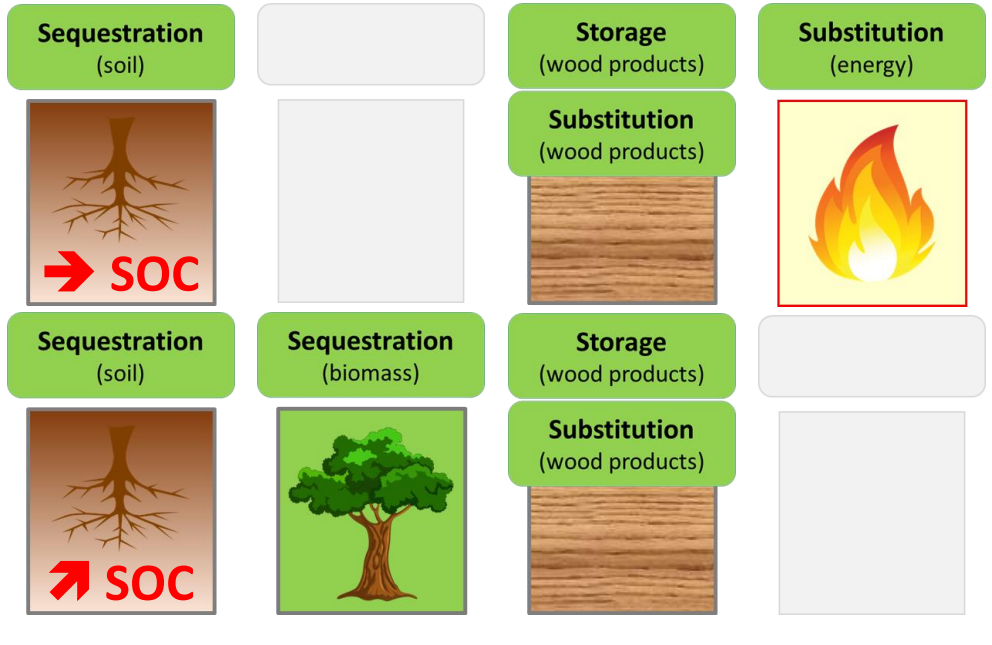
➢ Sols moyennement riche en C

(p.ex. forêts ± perturbées)

- ¤ pas de récolte (intensive) de biomasse
- ¤ augmenter la fertilité du sol (fixation N)
- ¤ limiter les perturbations du sol

[e.g. Janssens et al. (2010) - Nature Geosci.; Johnson & Curtis (2011) - For. Ecol. Manage.]

Ou

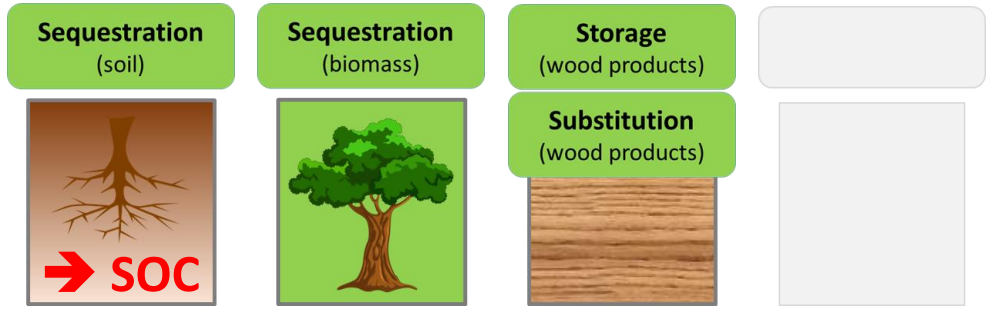


➢ Sols riches en C

(p.ex. forêts anciennes)

- ¤ sylviculture à couvert continue
- ¤ pas de perturbation du sol durant les récoltes

[D'Amato et al. (2011) - For. Ecol. Manage.; Thornley & Cannell (2000) - Tree Physiol.]



 # “*in a nutshell*”

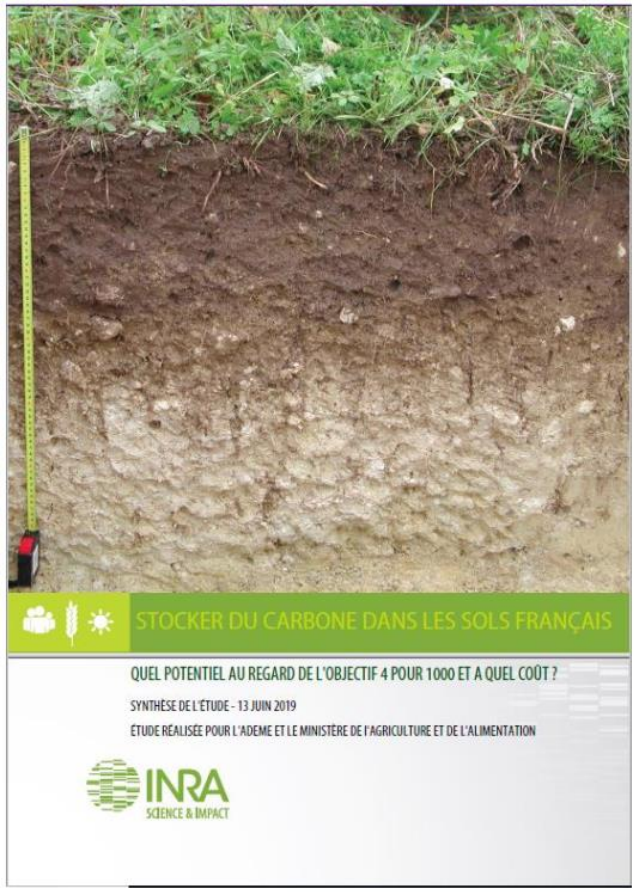


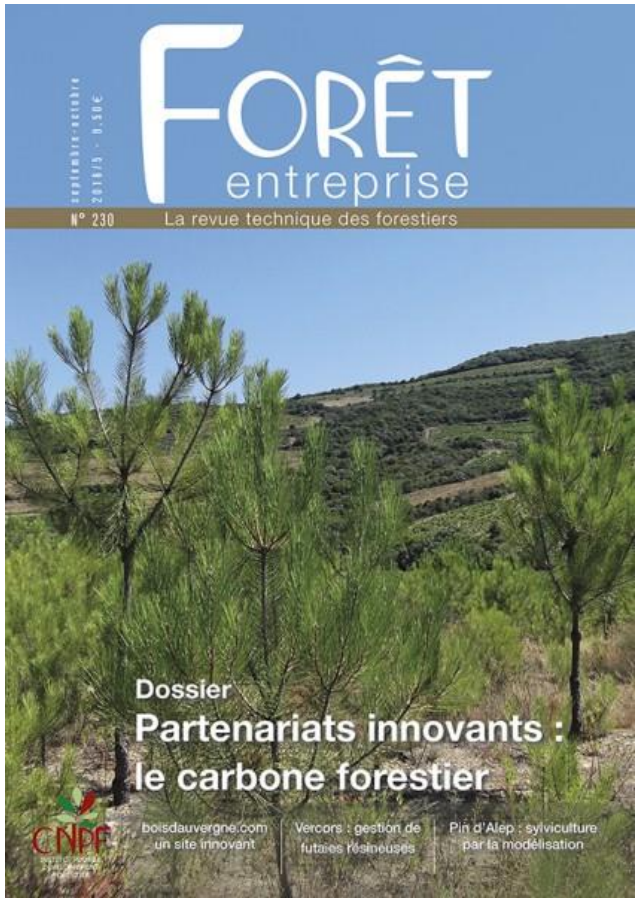
(si vous ne deviez retenir qu’une diapo)

“*si possible, vaincre sur tous les fronts*”

- **Utiliser le C du sol comme un indicateur de gestion**

- **Prendre en compte :** **climat**
  type de sol
  historique de la forêt
  économie régionale forêt-bois



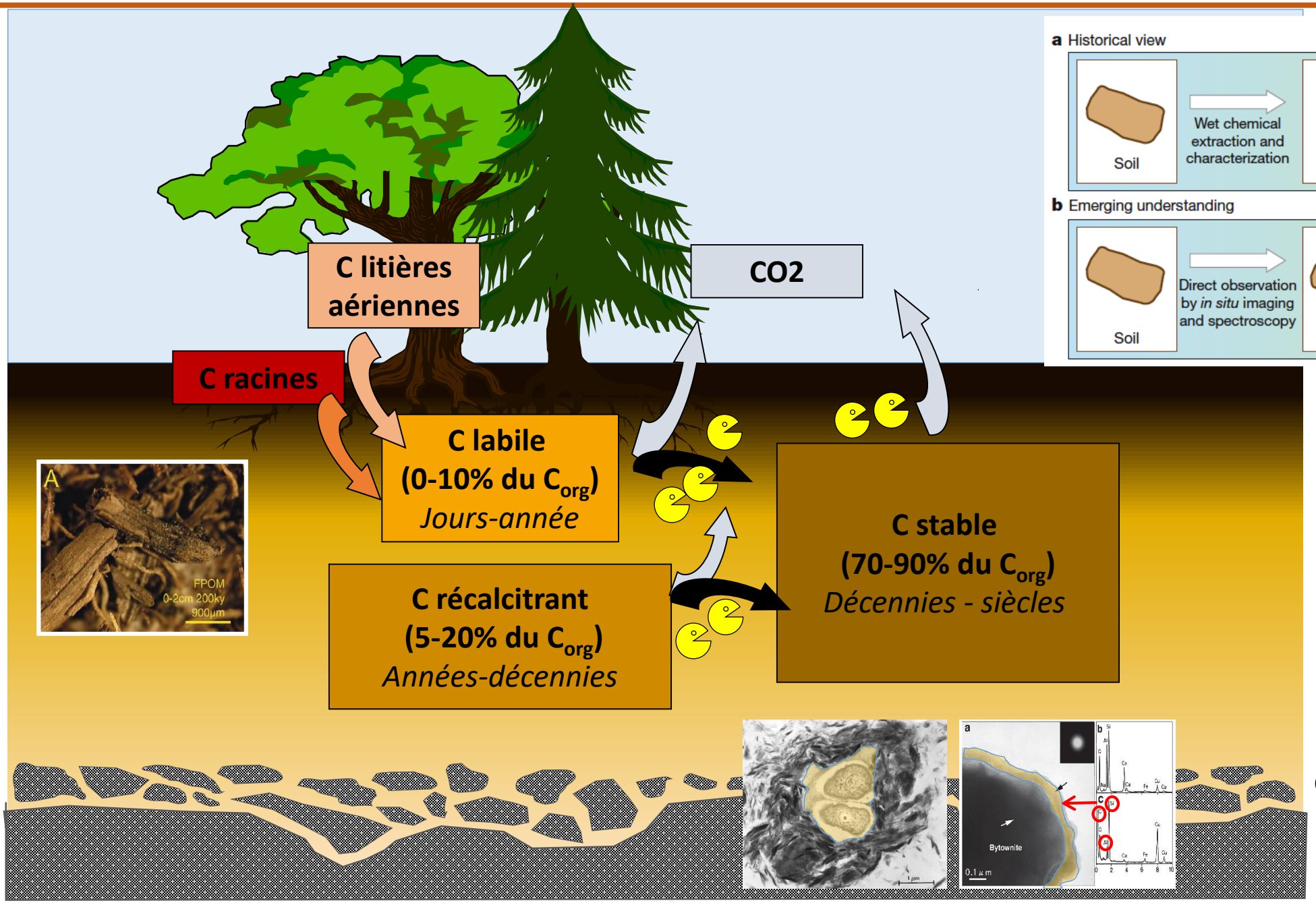


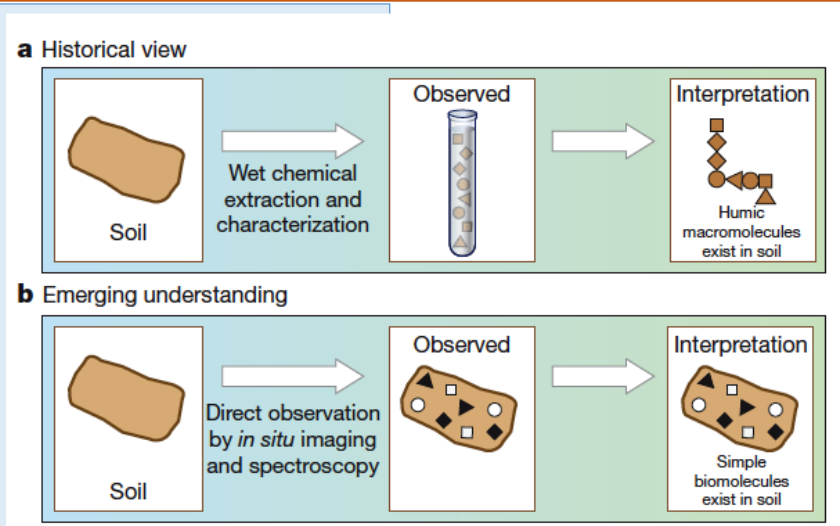
à venir (2021) :
Synthèse scientifique internationale

FAO
FIAT PANIS

Informations additionnelles :
Le cadre théorique

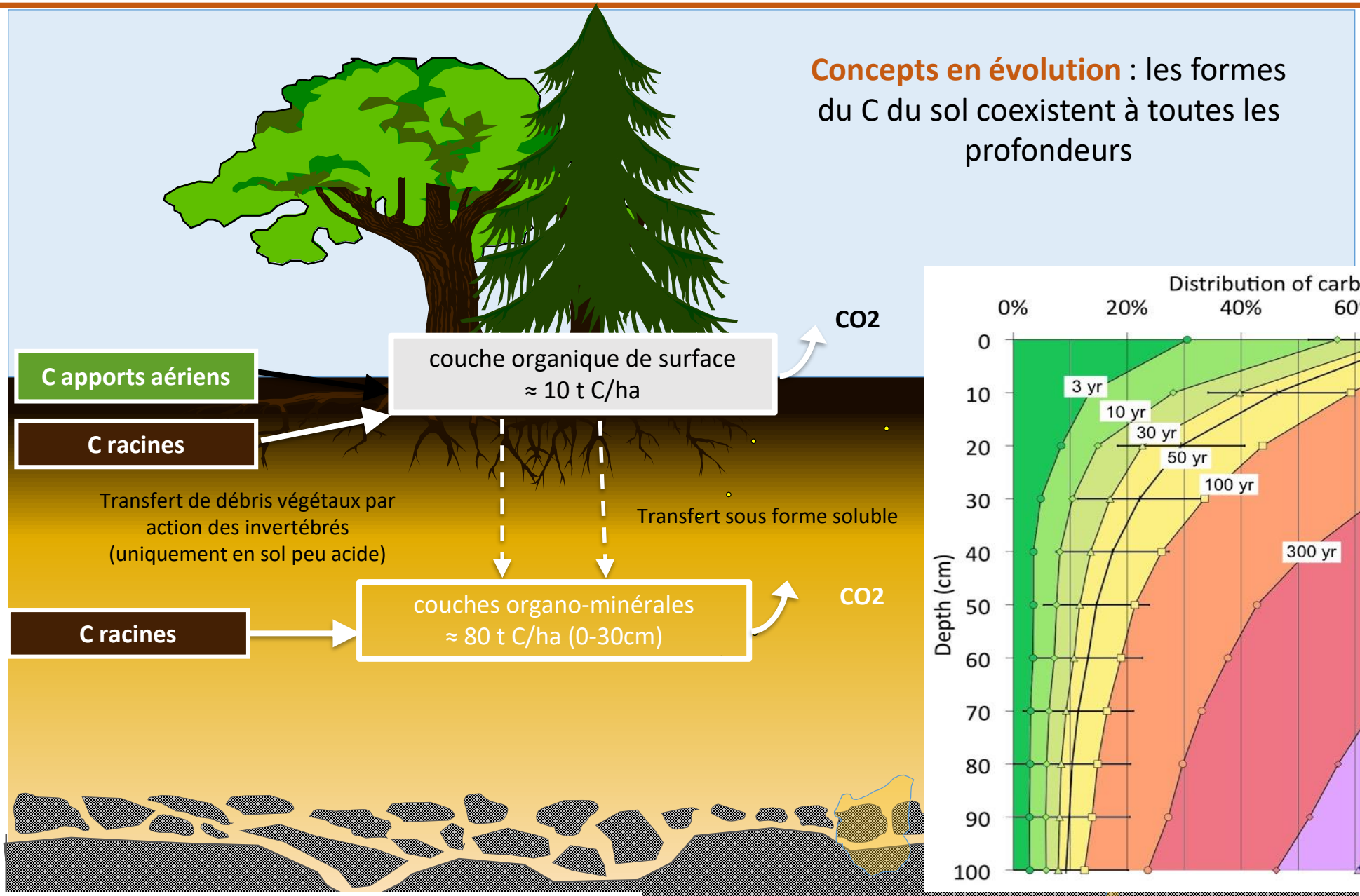
MATIERE ORGANIQUE DU SOL : des formes et des temps de résidence variées, concepts en évolution





Concepts en évolution : de la condensation des résidus organiques (substances humiques) à celui de dépolymérisation progressive de composés organiques

MATIERE ORGANIQUE DU SOL : des formes et des temps de résidence variées, concepts en évolution



Concepts en évolution : les formes du C du sol coexistent à toutes les profondeurs

[Balesdent et al. (2019) –Nature.]

D'après Renecofor – Meersman et al 2012 - Tipping et al 2012

MATIERE ORGANIQUE DU SOL : Les mécanismes et les leviers

Stocker du C dans le sol =
Augmenter les apport ET
Réduire les sorties

