



FORÊTS

Anita VAN QUYNH, Pierre BARRÉ,
Nicolas DELPIERRE & Mathieu SANTONJA



PROGRAMME
DE RECHERCHE

CARBONE ET
ÉCOSYSTÈMES
CONTINENTAUX

www.pepr-faircarbon.fr

Avril 2025

© INRAE / NICOLAS Bertrand

- 1. PRÉSENTATION DE L'ÉCOSYSTÈME : DÉFINITIONS ET CHIFFRES-CLÉS**
- 2. STOCKS ET FORMES DE CARBONE ORGANIQUE**
- 3. FLUX DU CARBONE ORGANIQUE**
- 4. DYNAMIQUE DU CARBONE DANS LES FORÊTS ET CHANGEMENTS GLOBAUX**
- 5. LEVIERS D'ACTION POUR STOCKER LE CARBONE DANS LES FORÊTS**
- 6. CONCLUSIONS**



1 Gt = 1 milliard de tonnes
= 10⁹ tonnes

1 Gt C = 1 Pg C

1 Mt = 10⁶ tonnes

1 Gt C = 3,666 Gt CO₂

GIEC	=	IPCC
Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat		Intergovernmental Panel on Climate Change

GES (Gaz à Effet de Serre) :

constituants gazeux de l'atmosphère, à la fois naturels et anthropiques, qui absorbent des radiations à des longueurs d'onde spécifiques dans le spectre infrarouge émis par la surface de la Terre, l'atmosphère elle-même, et par les nuages. Cette propriété cause l'effet de serre. Les principaux GES dans l'atmosphère de la Terre sont l'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), le protoxyde d'azote (N₂O), le méthane (CH₄) et l'ozone (O₃).

NPP : Net Primary Production (Production Primaire Nette) : caractéristique fondamentale d'un écosystème, exprimant **la conversion de dioxyde de carbone en biomasse via la photosynthèse, une fois la respiration des plantes déduite**. Il s'agit de la quantité de matière organique produite par les plantes dans un écosystème sur une période donnée. Elle s'exprime typiquement en tonnes de carbone par hectare par année (FAO).

NEP : Net Ecosystem Production (Production Nette de l'Écosystème) : quantité de NPP qui reste dans l'écosystème, une fois la respiration des microorganismes et animaux déduite. En d'autres termes, il s'agit de la production primaire brute à laquelle on soustrait la respiration autotrophe (plantes) et hétérotrophe (microorganismes et animaux). Lorsqu'elle est positive, elle exprime la quantité de carbone soustraite à l'atmosphère par l'écosystème pendant une période donnée. Elle s'exprime typiquement en tonnes de carbone par hectare par année (IPBES).

Carbone Organique du Sol (COS) : carbone stocké dans la matière organique du sol. Crucial pour la santé, et la fertilité du sol et autres services écosystémiques, notamment la production de nourriture (FAO).

Matière organique du sol : tout matériau produit initialement par des organismes vivants (plantes ou animaux), qui retourne dans le sol et suit le processus de décomposition. **À un temps t, il s'agit d'une gamme de matières allant des tissus originaux et intacts issus de plantes et d'animaux, au mélange de matières substantiellement décomposées** (FAO).

Respiration hétérotrophe des microorganismes : résulte de la minéralisation de la matière organique par les microorganismes, dans lesquelles les composés organiques sont oxydés en dioxyde de carbone et en eau, avec simultanément un prélèvement l'oxygène pour les microorganismes aérobies. Paramètre utilisé pour quantifier l'activité microbienne dans les sols.

Litière : toute **biomasse non vivante** avec un diamètre inférieur au diamètre minimal pour le bois mort (c'est-à-dire 10 cm) qui repose sur le sol minéral ou organique dans des états de décomposition variés (FAO).



FORÊTS

1. PRÉSENTATION DE L'ÉCOSYSTÈME : DÉFINITIONS ET CHIFFRES-CLÉS



PROGRAMME
DE RECHERCHE

CARBONE ET
ÉCOSYSTÈMES
CONTINENTAUX

www.pepr-faircarbon.fr

Avril 2025

© INRAE / NICOLAS Bertrand



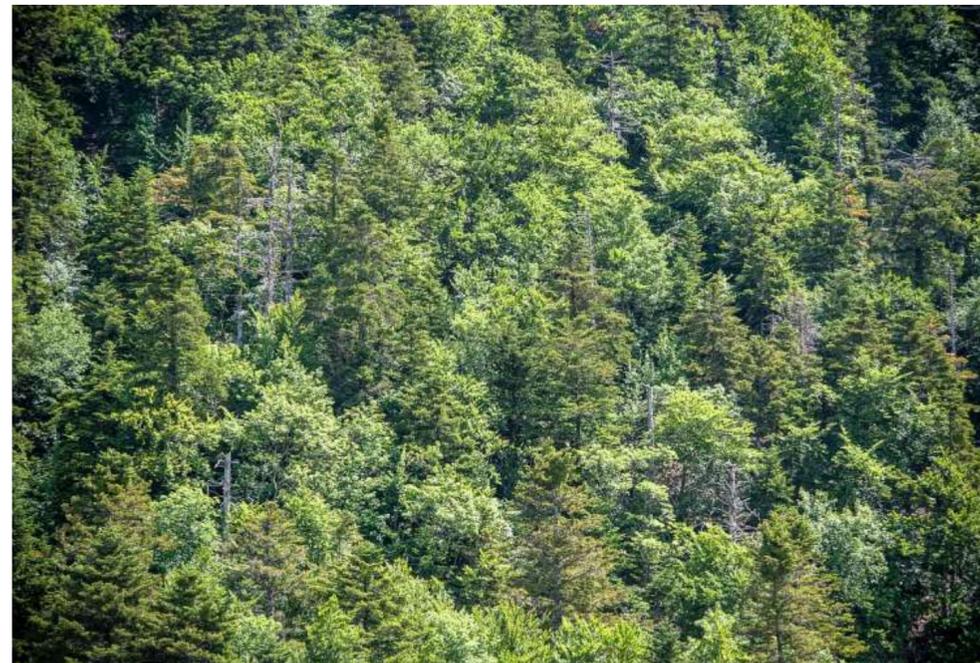
Forêt

Surface terrestre occupant une superficie de plus de 0,5 hectare avec des arbres atteignant une hauteur supérieure à 5 mètres et un couvert arboré de plus de 10 %. La définition exclut les terres dont la vocation prédominante est agricole ou urbaine.



Forêt tropicale de Guyane

© INRAE / MAITRE Christophe



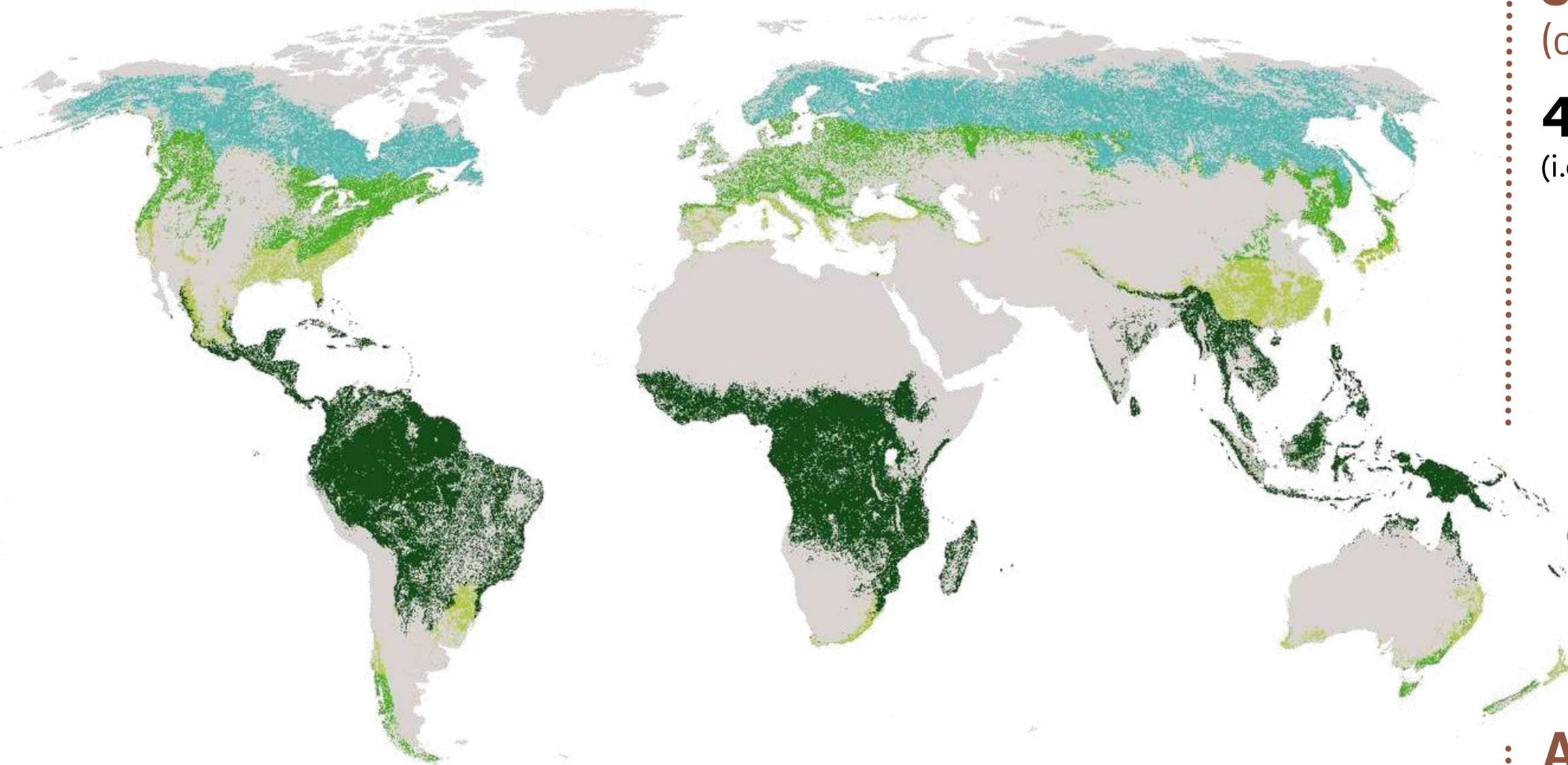
Forêt sur les pentes du Mont ventoux (région PACA)

© INRAE / NICOLAS Bertrand



Culture d'hévéa (Inde, région du Kérala)

© INRAE / LE BASTARD Rémi



Proportion et distribution des zones forestières globales par domaine climatique

(FAO, 2020 - adapté de United Nations World map, 2020)

Surface mondiale des forêts (occupation des sols)

4 060 millions d'ha
(i.e. 31 % de la surface terrestre mondiale)

45 %
tropicales



27 %
boréales



16 %
tempérées



11 %
subtropicales



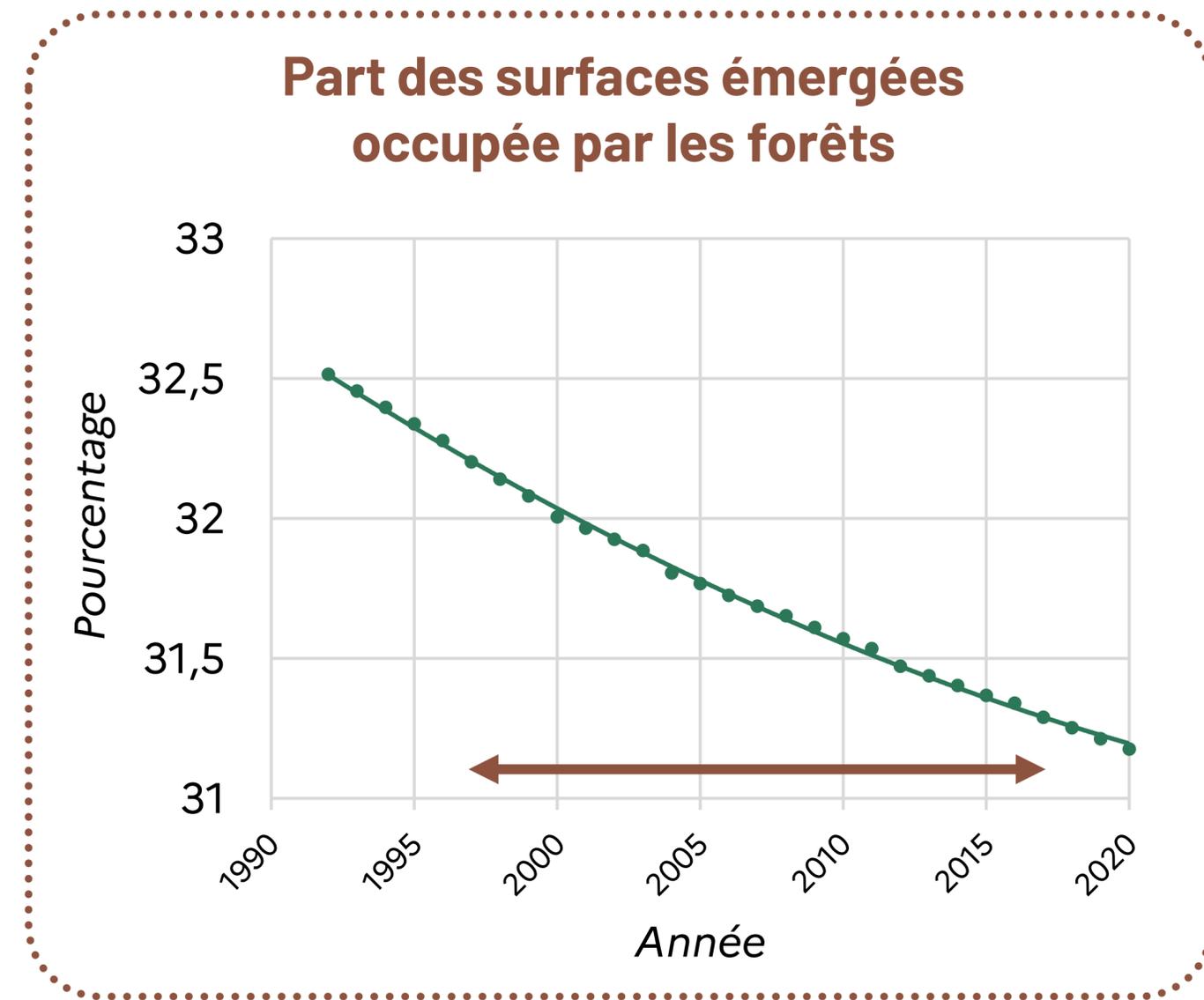
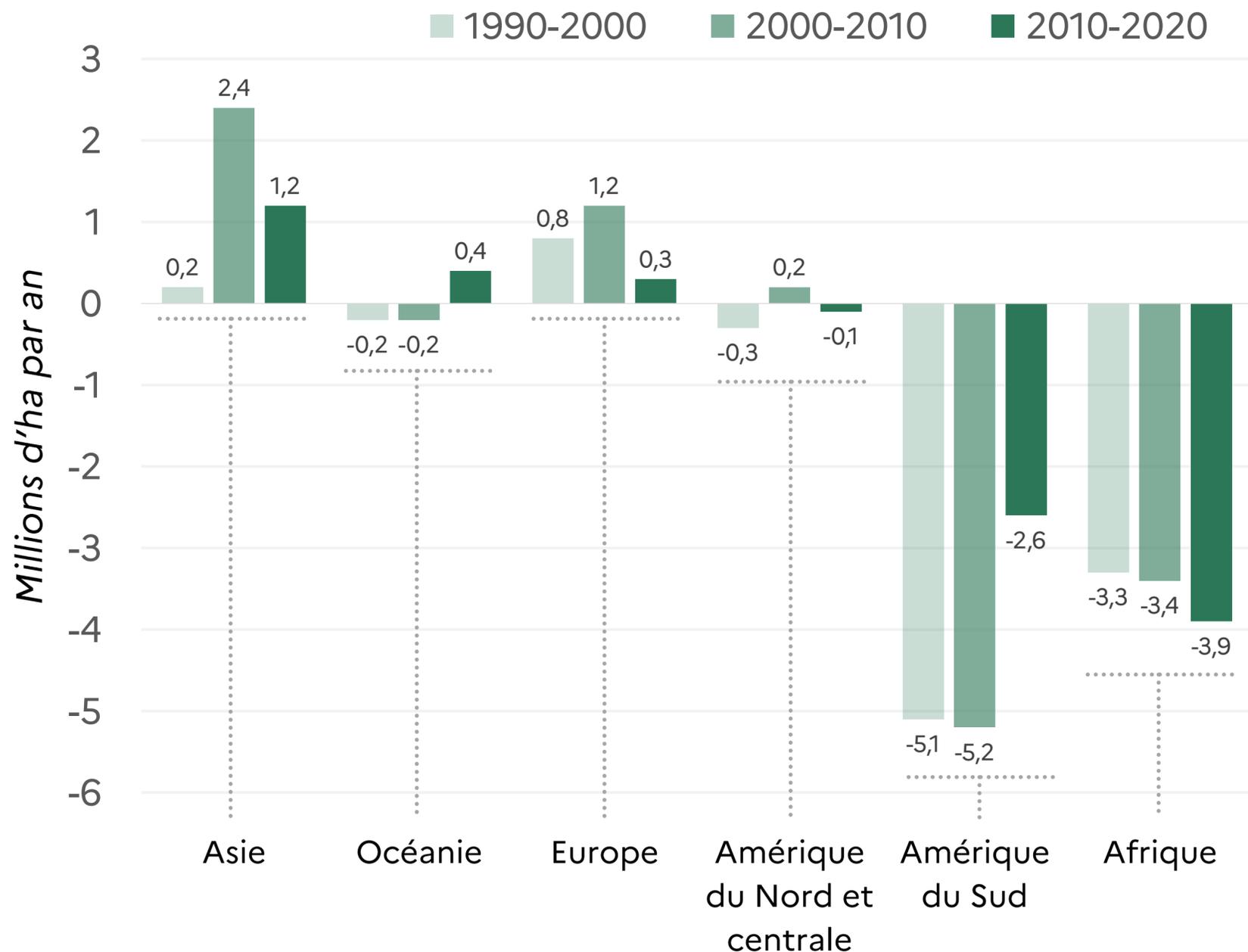
Ampleur de la déforestation entre 2015 et 2020

environ **10** millions d'ha par an

(FAOSTAT, 2020)



La surface forestière globale diminue d'année en année



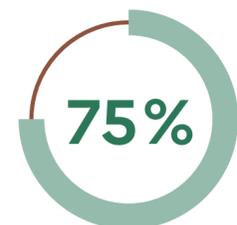
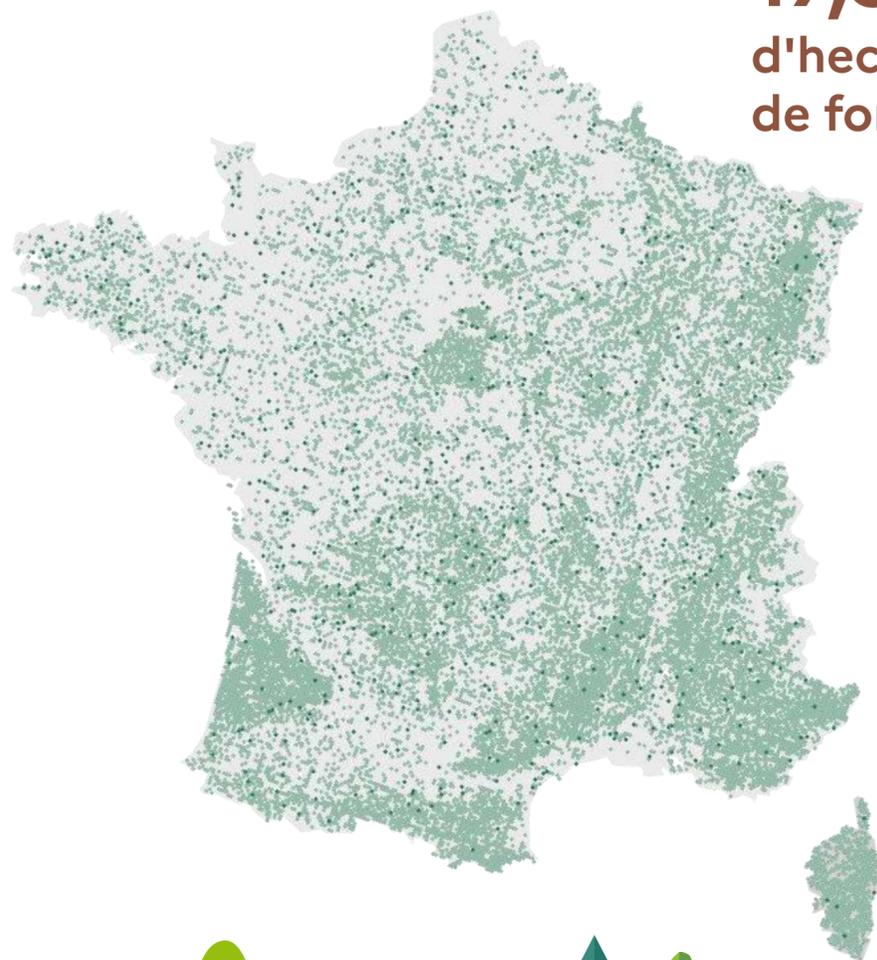
(FAO, 2020, Global forest resources assessment ; FRIEDLINGSTEIN *et al.*, 2023)

Changement net annuel de la superficie de forêt par décennie et par région, 1990-2020

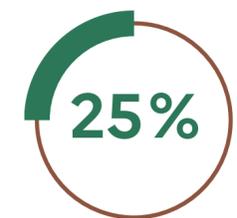
(FAO, 2020, Global forest resources assessment)



17,5 millions
d'hectares
de forêts soit **32 %**
du territoire



de forêts
privées



de forêts
publiques

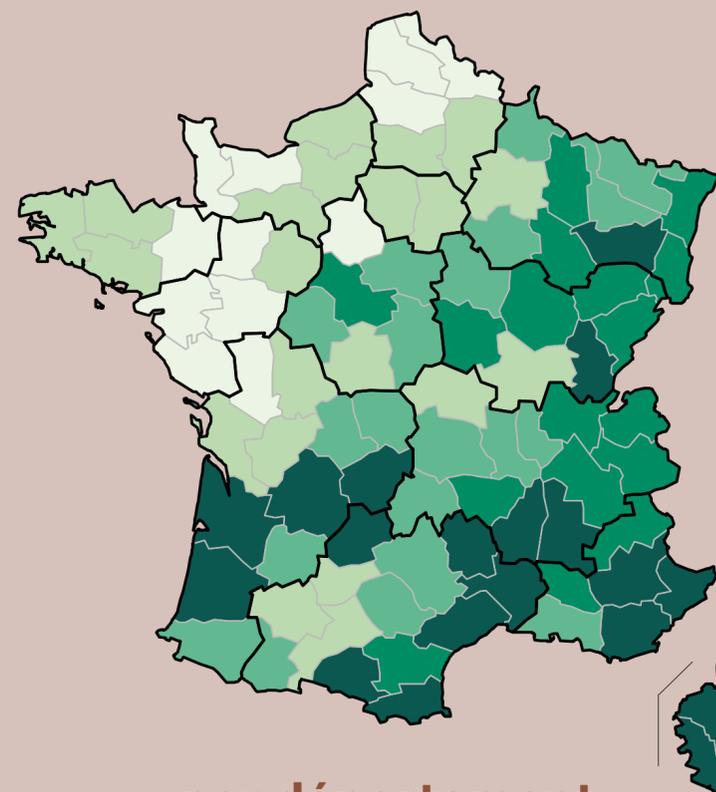


67 %
de feuillus



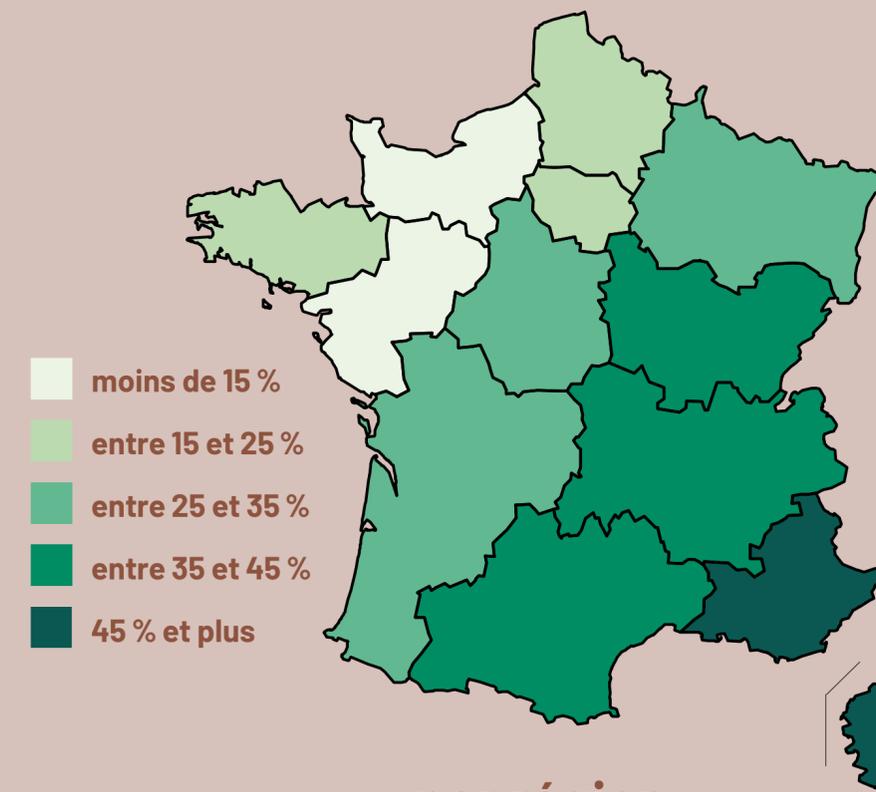
83 %
de peuplements à
2 essences ou moins

Taux de boisement



par département

- 🏆 1 – Corse-du-Sud (74 %)
- 2 – Alpes-Maritimes (66 %)
- 3 – Var (65 %)
- 4 – Haute-Corse (64 %)
- 5 – Alpes-de-Haute-Provence (62 %)
- 6 – Ardèche (62 %)
- ...



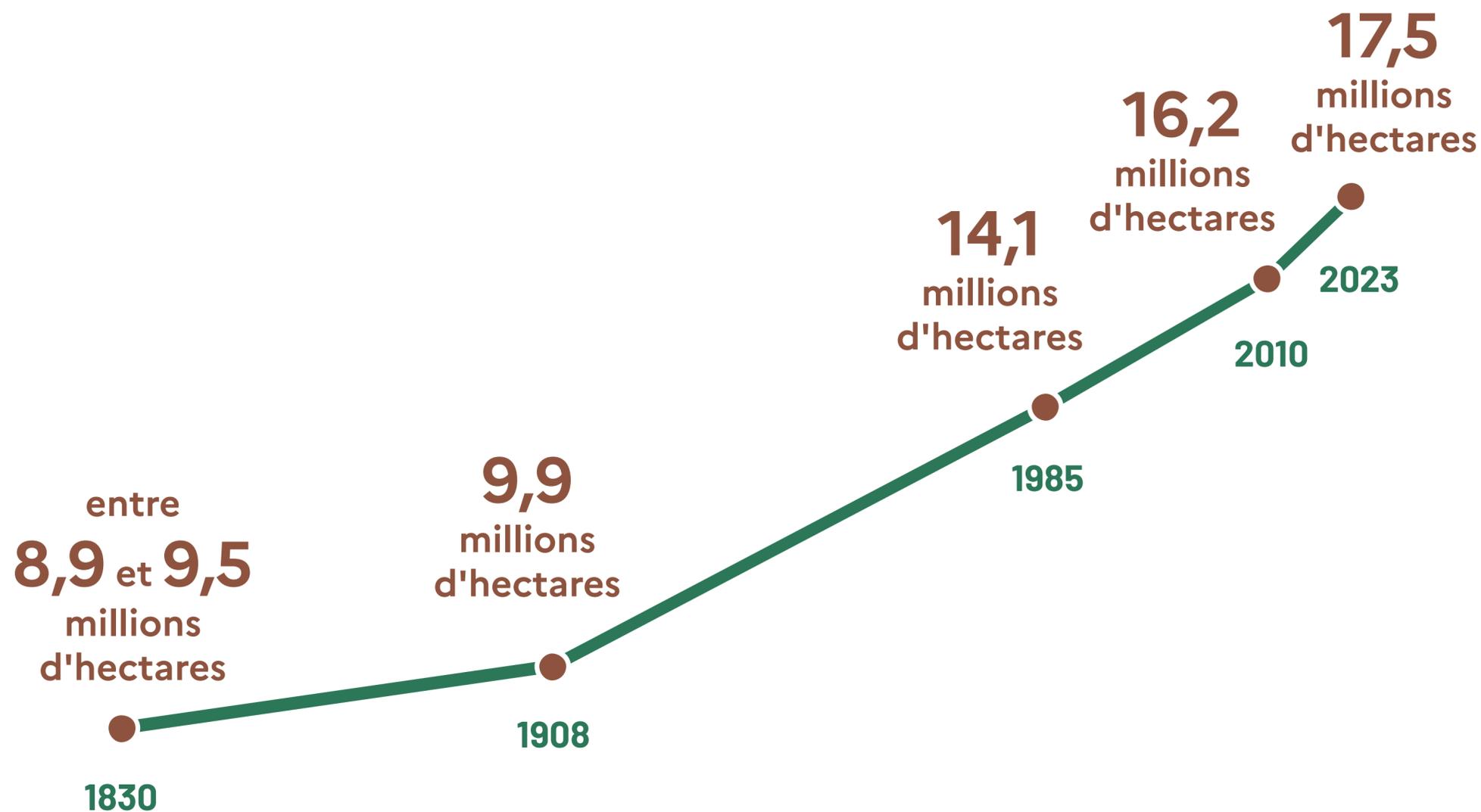
par région

- 🏆 1 – Corse (69 %)
- 2 – Provence-Alpes-Côte d'Azur (52 %)
- 3 – Occitanie (38 %)
- 4 – Auvergne-Rhône-Alpes (37 %)
- 5 – Bourgogne-Franche-Comté (37 %)
- 6 – Nouvelle-Aquitaine (34 %)
- ...

(Inventaire forestier national – IGN – 2019-2023)



La surface forestière française augmente d'année en année



→ Les principales raisons de cette forte progression sont attribuées principalement à la déprise agricole et au boisement des terres agricoles (e.g. pourtour méditerranéen), et dans une moindre mesure aux changements climatiques qui favorisent la croissance et la productivité des arbres (e.g. Bretagne).

Évolution de la surface forestière en France

(Inventaire forestier national - IGN - 2019-2023)



FORÊTS

2. STOCKS ET FORMES DE CARBONE ORGANIQUE

PROGRAMME DE RECHERCHE
CARBONE ET ÉCOSYSTÈMES CONTINENTAUX

www.pepr-faircarbon.fr

Avril 2025

© INRAE / NICOLAS Bertrand



Bilan de C forestier : différents stocks



d'après PAN *et al.*, 2011

Biomasse aérienne

Biomasse foliaire
(mesure de surface foliaire et masse surfacique)



Biomasse bois sur pied
(mesure par inventaire forestier)



Bois mort
(mesure par inventaire)



Litière
(mesure par inventaire)



Biomasse vivante :
43 % du stock de C

Bois mort :
8 % du stock de C

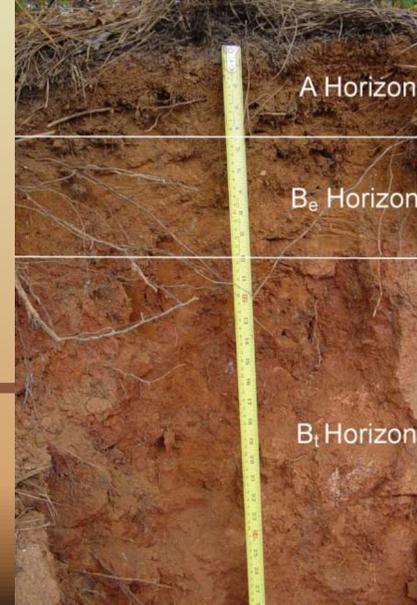
Litière :
5 % du stock de C

Biomasse souterraine

Biomasse racinaire
(mesure par excavation)



Matière Organique du Sol (MOS)
(mesure par dosage et densité)

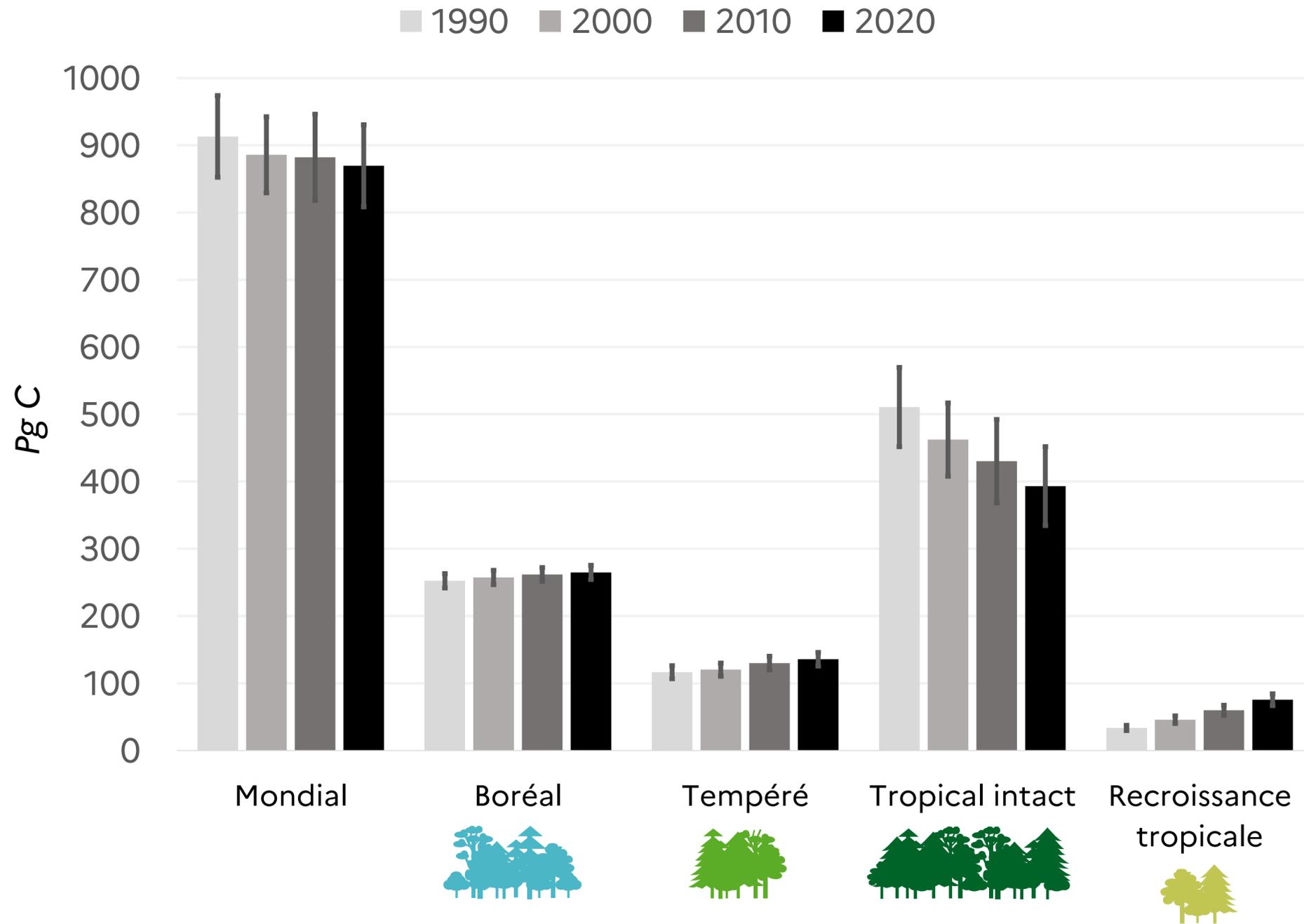


Sol (1 m de profondeur) :
45 % du stock de C

© INRAE / NICOLAS Bertrand, MAITRE Christophe



Évolutions récentes des stocks de C dans les différents biomes forestiers



➔ Le **stock principal de carbone forestier est dans les forêts tropicales (54%)**.

➔ Le stock de C est en diminution dans les forêts tropicales primaires. Il augmente dans les néo-forêts tropicales, dans les forêts tempérées et boréales.

Stock de carbone forestier total par biome

(PAN *et al.*, 2024)



	Dans le monde	En France métropolitaine
Surface des forêts	4,17.10⁹ ha (1/3 de la surface terrestre mondiale)	17,5.10⁶ ha (32 % du territoire métropolitain)
Stock total de C par unité de surface	275 tC.ha⁻¹	83 tC.ha⁻¹
Stock de C dans le sol	787 Gt C (0 - 1 m)	1 405 Mt C en 2010 (0 - 30 cm)
Stock de C dans la biomasse	359 Gt C	1 296 Mt C en 2010
Stock total de C	1 146 Gt C	2,8 Gt C

Source des données

IPCC SRES Land-Use 1998

Inventaire forestier de l'IGN

→ En France métropolitaine, les forêts représentent presque 40 % des stocks de carbone des sols.



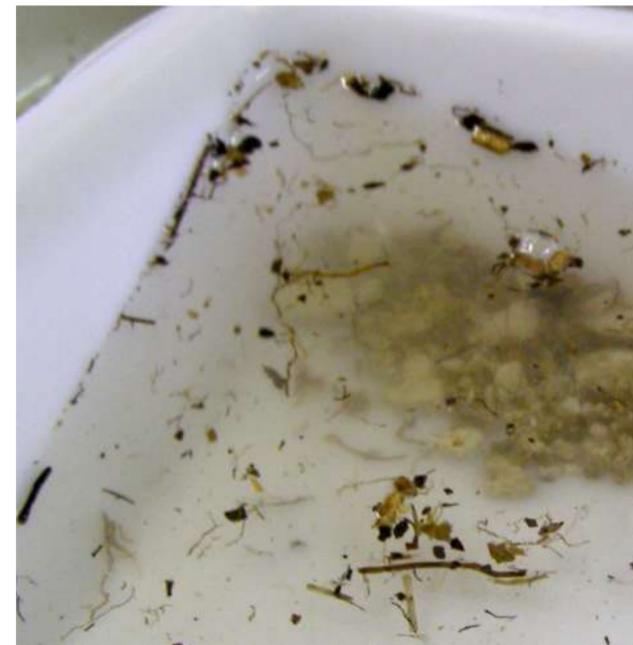
Différentes formes de carbone organique dans les sols

Molécules organiques d'origine végétale ou microbienne associées aux minéraux donnant la couleur sombre.

environ 60 - 95 %



© DURAND Hermine



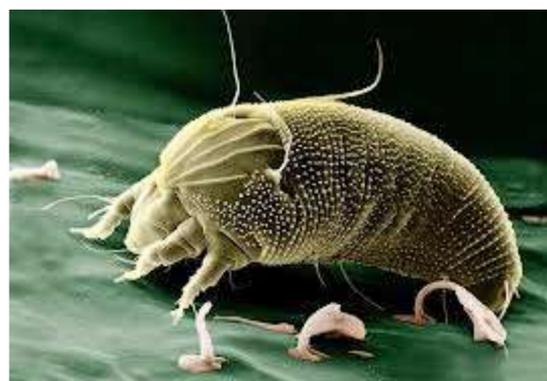
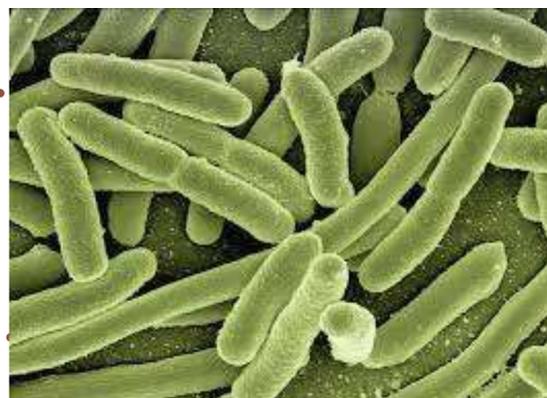
© DURAND Hermine

Débris végétaux en décomposition (flottant dans l'eau du fait de leur densité).

environ 5 - 30 %

Matière organique vivante.

environ 1 - 5 %



Atlas européen de la biodiversité des sols (2013)



© CHASSÉ Matthieu

Matière organique pyrogénique.

environ 5 - 30 %

+

du carbone organique dissous.

< 1 %



Profil de sol de type gley en forêt de Fougères (Ile et Vilaine)

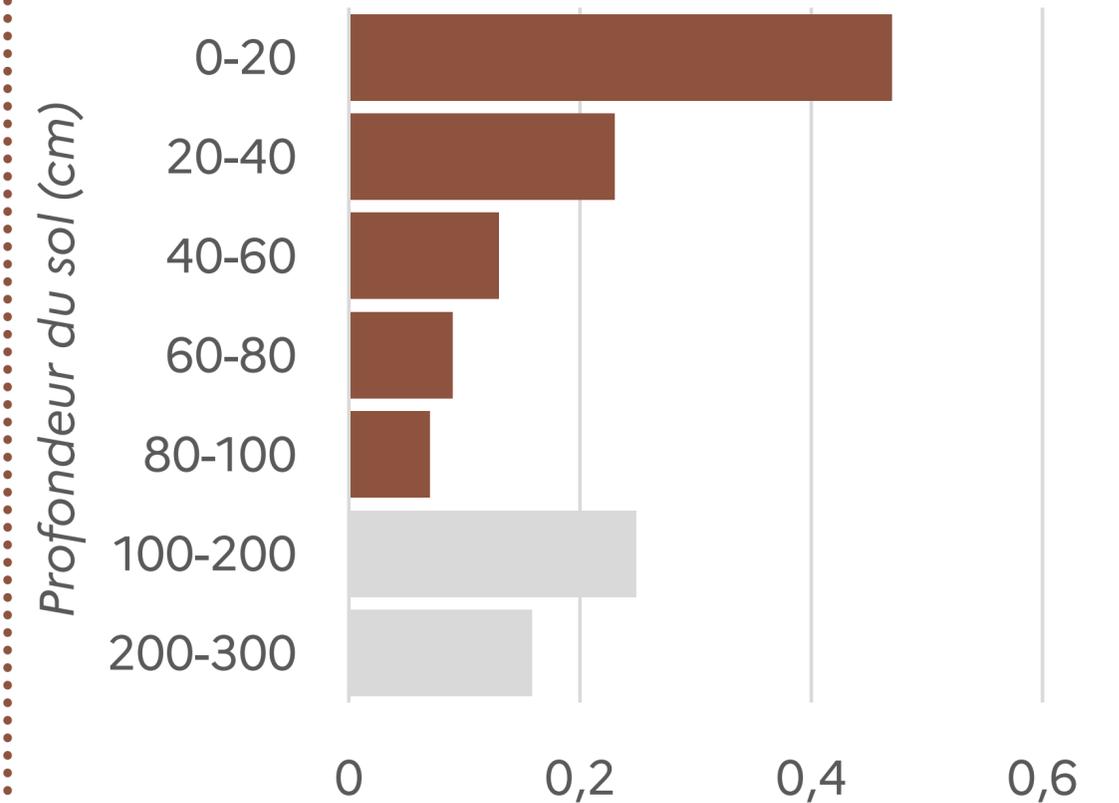


© INRAE / TROLARD-STOLL Fabienne

Davantage de carbone en surface mais il y en a en profondeur !

Environ 60 % du carbone organique dans le premier mètre du sol, dont **50 % dans la couche 0-20 cm.**

Profil de répartition du carbone organique dans les sols forestiers



En marron, stock relatif de carbone dans la couche 0-1 m ; en grisé stock relatif rapporté au stock mesuré entre 0 et 1 m.

(JOBAGY & JACKSON, 2000)



FORÊTS

3. FLUX DU CARBONE ORGANIQUE



PROGRAMME
DE RECHERCHE

CARBONE ET
ÉCOSYSTÈMES
CONTINENTAUX

www.pepr-faircarbon.fr

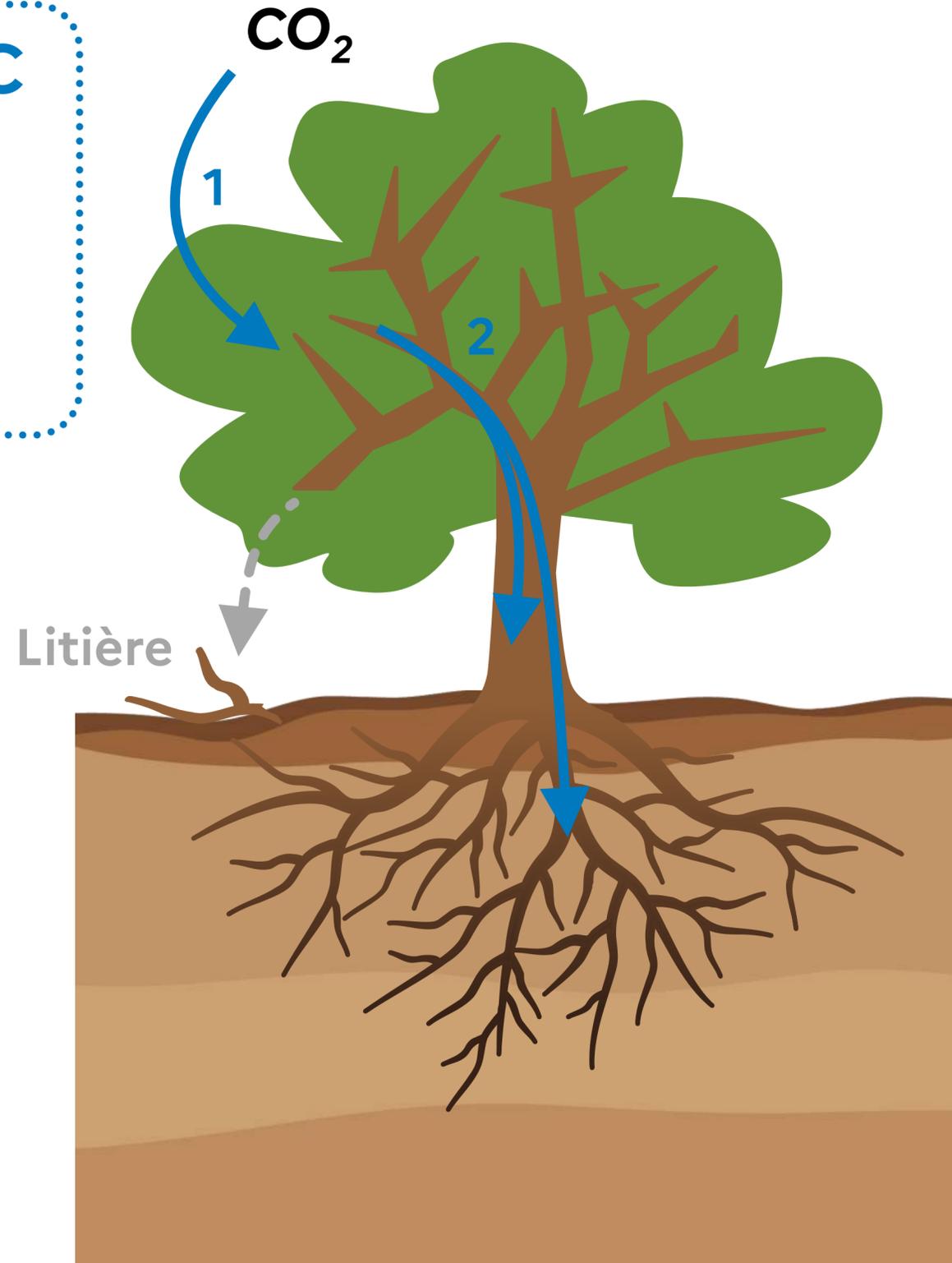
Avril 2025

© INRAE / NICOLAS Bertrand



ENTRÉES DE C (~122 Pg C)

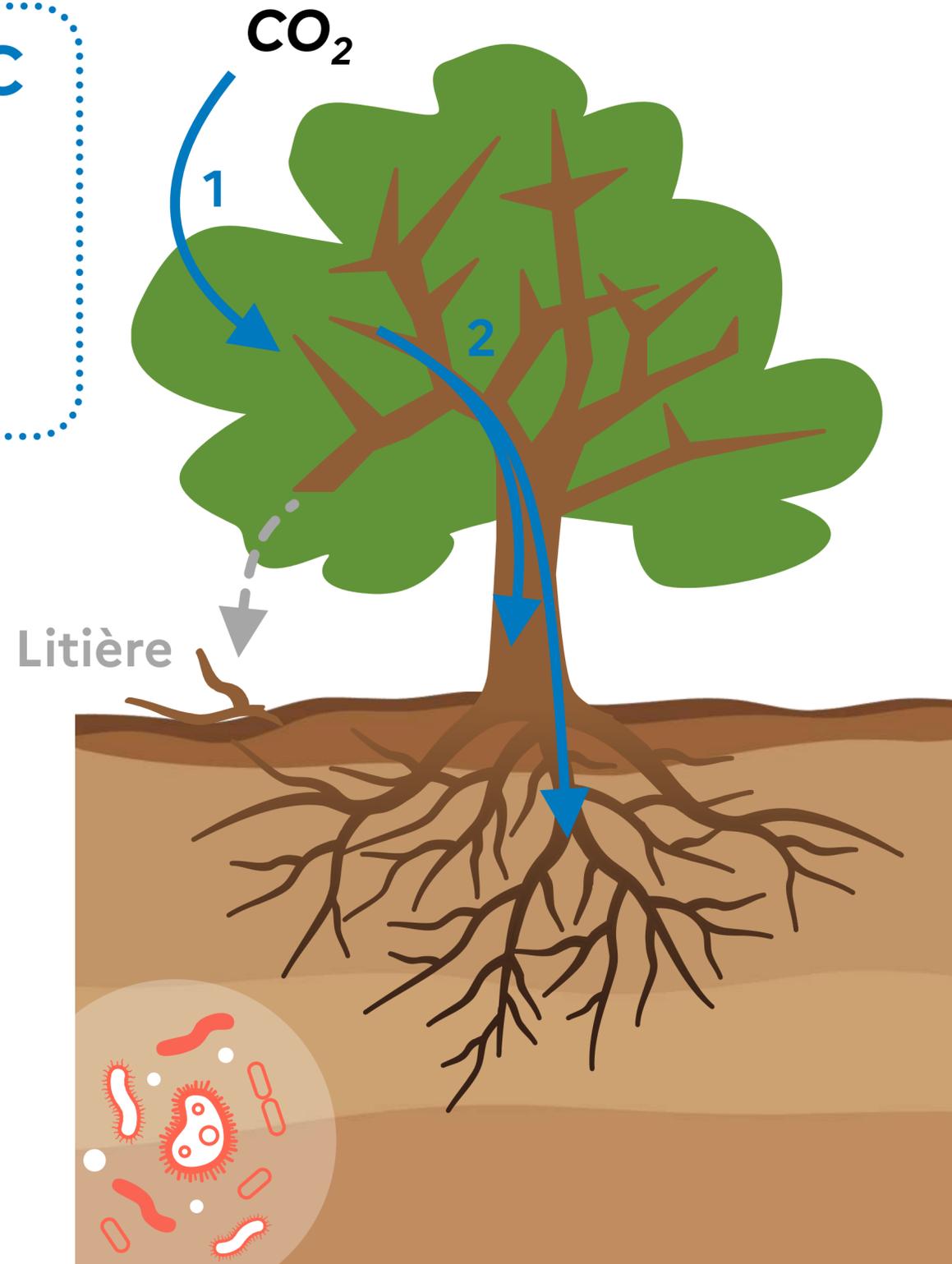
1. Photosynthèse
2. Répartition des photo-assimilats





ENTRÉES DE C (~122 Pg C)

1. Photosynthèse
2. Répartition des photo-assimilats



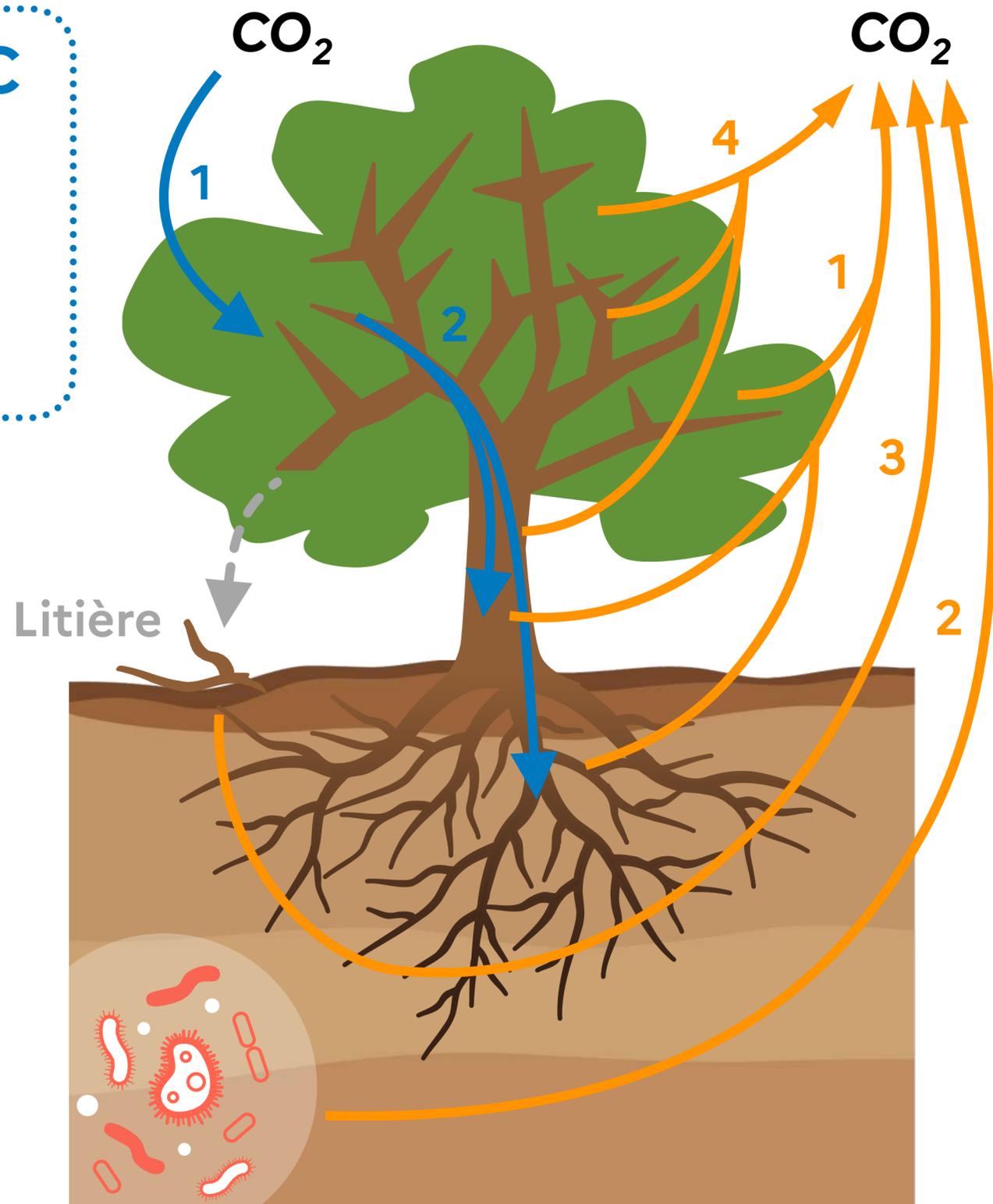
- **Biotransformations**
(synthèse microbienne, dépolymérisation)
- **Transferts**
(bioturbation, convection, etc.)

Les matières organiques des sols sont clivées par les enzymes microbiennes en petites molécules solubles absorbables par les micro-organismes. Le carbone ainsi ingéré est **une source de matière (synthèse microbienne) et d'énergie (respiration hétérotrophe)**.



ENTRÉES DE C (~122 Pg C)

1. Photosynthèse
2. Répartition des photo-assimilats



- **Biotransformations**
(synthèse microbienne, dépolymérisation)
- **Transferts**
(bioturbation, convection, etc.)

SORTIES DE C

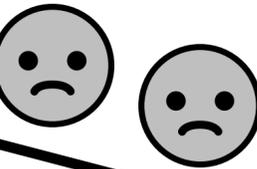
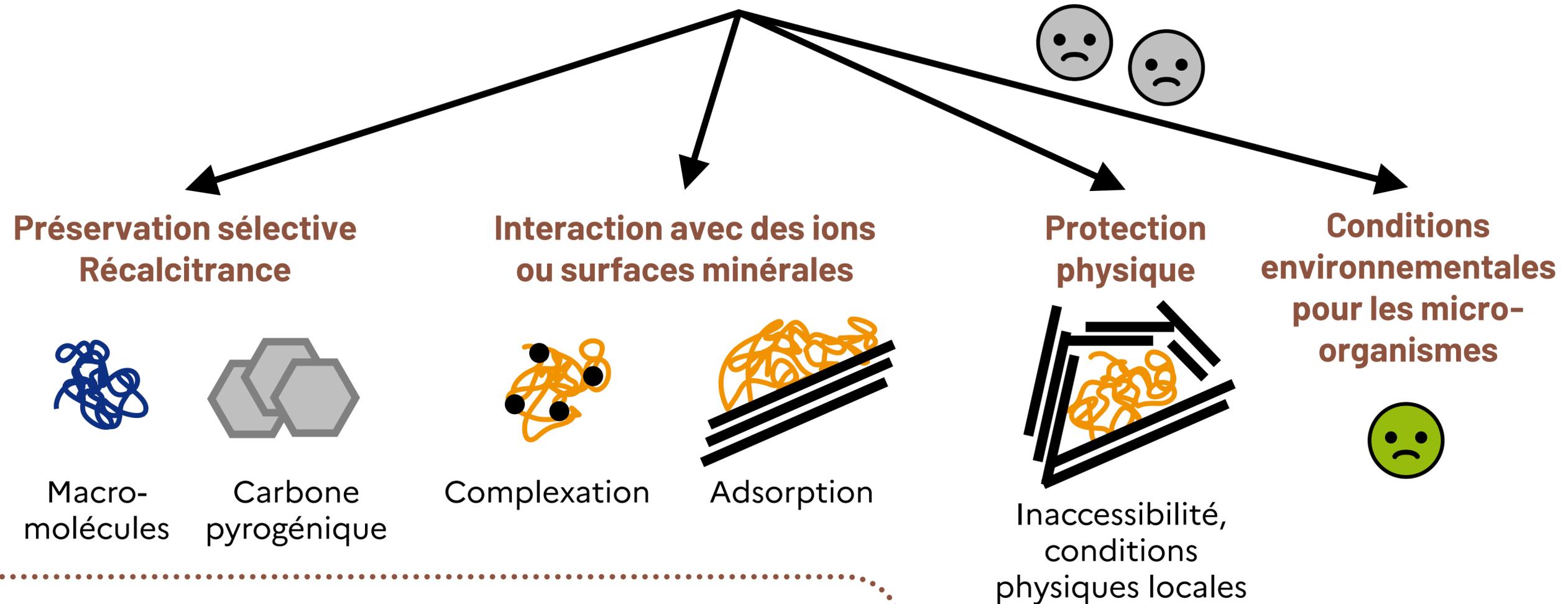
1. Respiration autotrophe, (feuilles, bois, racines) (~60 Pg C)
2. Respiration hétérotrophe (microorganismes et faune) (~60 Pg C)
3. Décomposition
4. Export de biomasse

Les matières organiques des sols sont clivées par les enzymes microbiennes en petites molécules solubles absorbables par les micro-organismes. Le carbone ainsi ingéré est **une source de matière (synthèse microbienne) et d'énergie (respiration hétérotrophe)**.

Les sorties de C des sols se font principalement sous forme de CO_2 issu de la respiration autotrophe des arbres et de la respiration hétérotrophe des microorganismes et de la faune du sol.



Mécanismes de stabilisation des matières organiques dans les sols

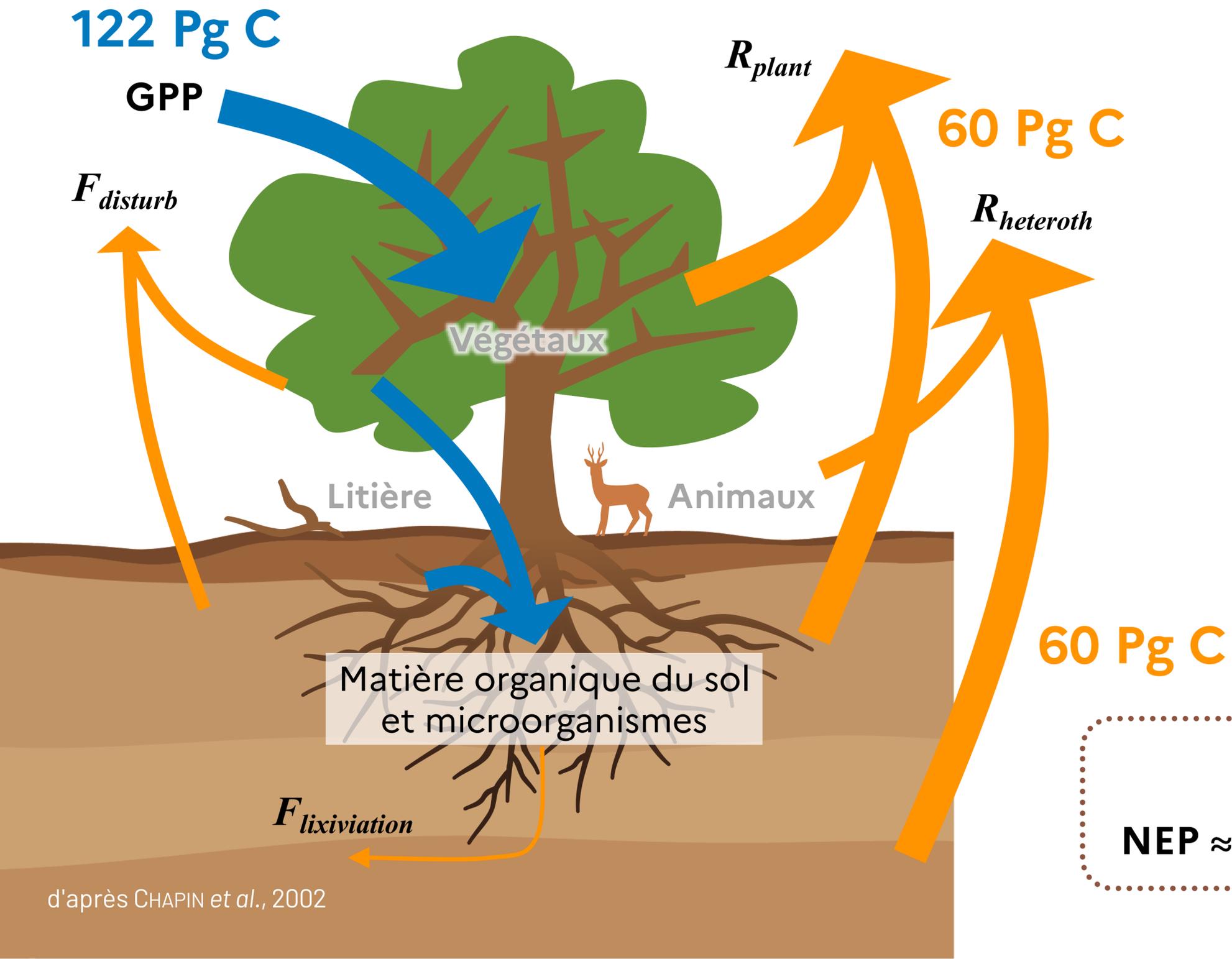


→ La vitesse à laquelle la MO des sols peut être dégradée dépend de sa composition chimique, de son interaction avec la phase minérale, de son accessibilité pour les micro-organismes et des conditions environnementales.

d'après CHENU *et al.*, 2009, CMS series



Schéma général des flux de carbone dans les forêts : schéma synthétique



NPP : Productivité Primaire Nette
GPP : Productivité Primaire Brute
NEP : Productivité Écosystémique Nette
Émissions : Émission de composés organiques volatiles, ou combustion lors des incendies

R_{plant} : Respiration des plantes (racines et biomasse aérienne)

$R_{heteroth}$: Respiration hétérotrophe (microorganismes et animaux)

$F_{disturb}$: Perte de C par récolte anthropique ou autre perturbation

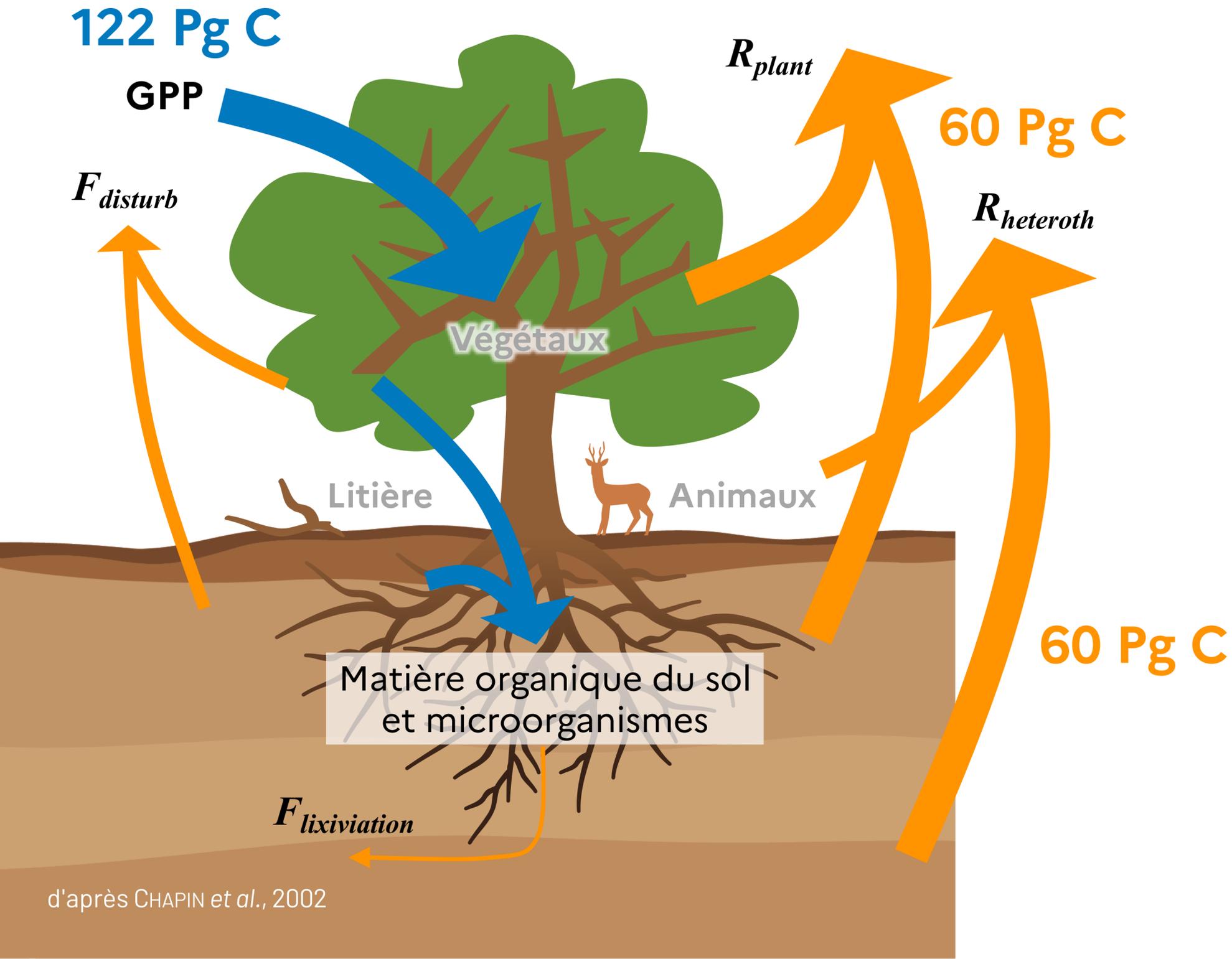
$F_{lixiviation}$: Perte de C par lixiviation (particules dissoutes, flux latéraux de C)

$$\mathbf{NPP = GPP - R_{plant}}$$

$$\mathbf{NEP \approx GPP - (R_{plant} + R_{heteroth} + F_{disturb} + F_{lixiviation})}$$



Schéma général des flux de carbone dans les forêts : schéma synthétique



Le puits (= augmentation du stock, via les flux) de C forestier mondial n'est pas connu avec certitude :

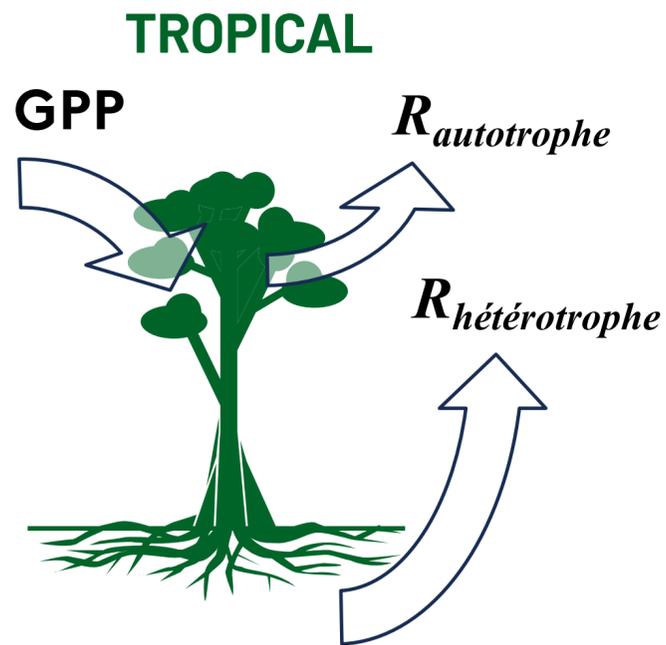
→ PAN *et al.*, 2024
(inventaires, 1990-2019) :
 $1,3 \pm 0,6$ Gt C/an

→ HARRIS *et al.*, 2021
(télédétection + inventaires, 2011-2019) :
 $2,1 \pm 1,3$ Gt C/an

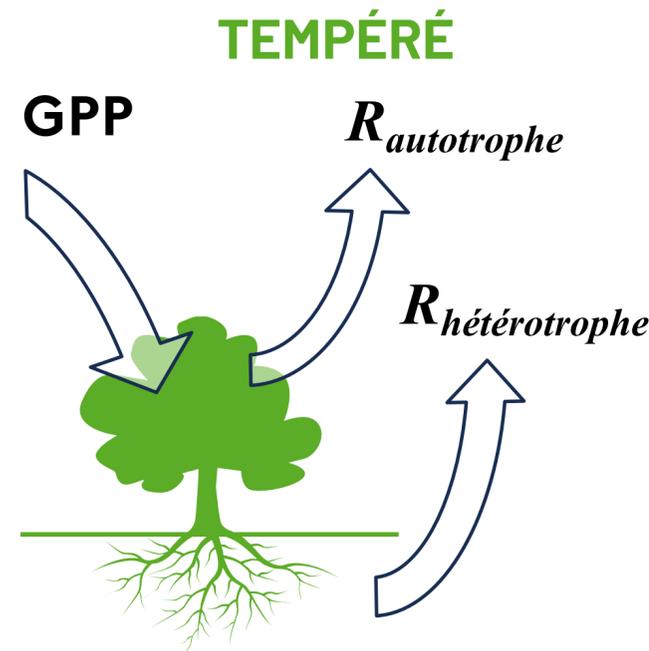
Des flux différents selon les biomes forestiers



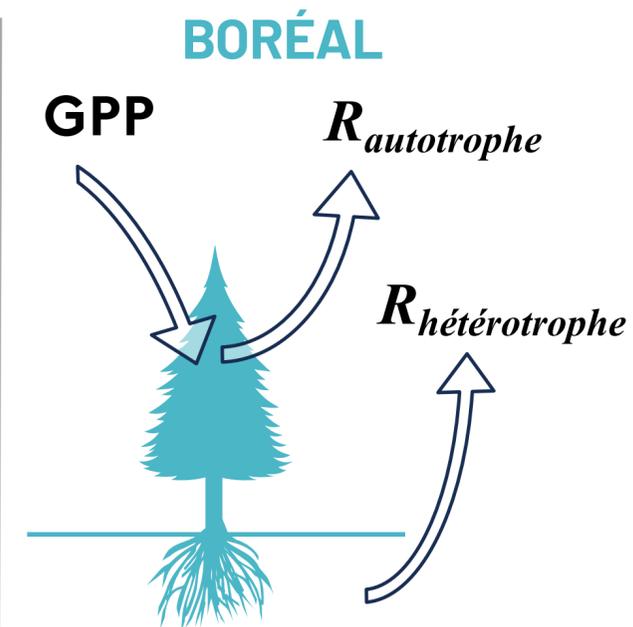
Le **stock** principal de carbone forestier est dans les **forêts tropicales** (54%).



45 % du puits de C forestier
 + 2,53 (croissance) – 2,24 (déforestation) =
+ 0,29 Gt C/an



33 % du puits de C forestier
 + 0,6 Gt C/an



27 % du puits de C forestier
 + 0,44 Gt C/an

Total forêts =
 0,29 + 0,6 + 0,44 =
+ 1,33 Gt C/an

Le **puits net** principal de carbone continental est dans les **forêts tempérées**.
 Actuellement, les forêts tempérées fixent davantage de carbone que les forêts tropicales. Autrement dit, le stock des forêts tempérées augmente plus vite que celui des forêts tropicales (qui n'augmente que parce que les néo-forêts tropicales sont en augmentation ; les forêts primaires tropicales, elles, sont en diminution, en raison de la déforestation). Sans l'effet de la déforestation, les forêts tropicales seraient, de loin, le principal puits de carbone continental (à elles seules, les forêts tropicales non exploitées fixent autant de carbone que l'ensemble des forêts tempérées et boréales).

Rappel : $NEP = GPP - R_{\text{hétérotrophe}} - R_{\text{autotrophe}}$
 $NEP_{\text{tropical}} > NEP_{\text{tempéré}} > NEP_{\text{boréal}}$ (ANDERSON-TEIXEIRA et al., 2021)



FORÊTS

4. DYNAMIQUE DU CARBONE DANS LES FORÊTS ET CHANGEMENTS GLOBAUX



PROGRAMME DE RECHERCHE
CARBONE ET ÉCOSYSTÈMES CONTINENTAUX

www.pepr-faircarbon.fr

Avril 2025

© INRAE / NICOLAS Bertrand



Forêts boréales

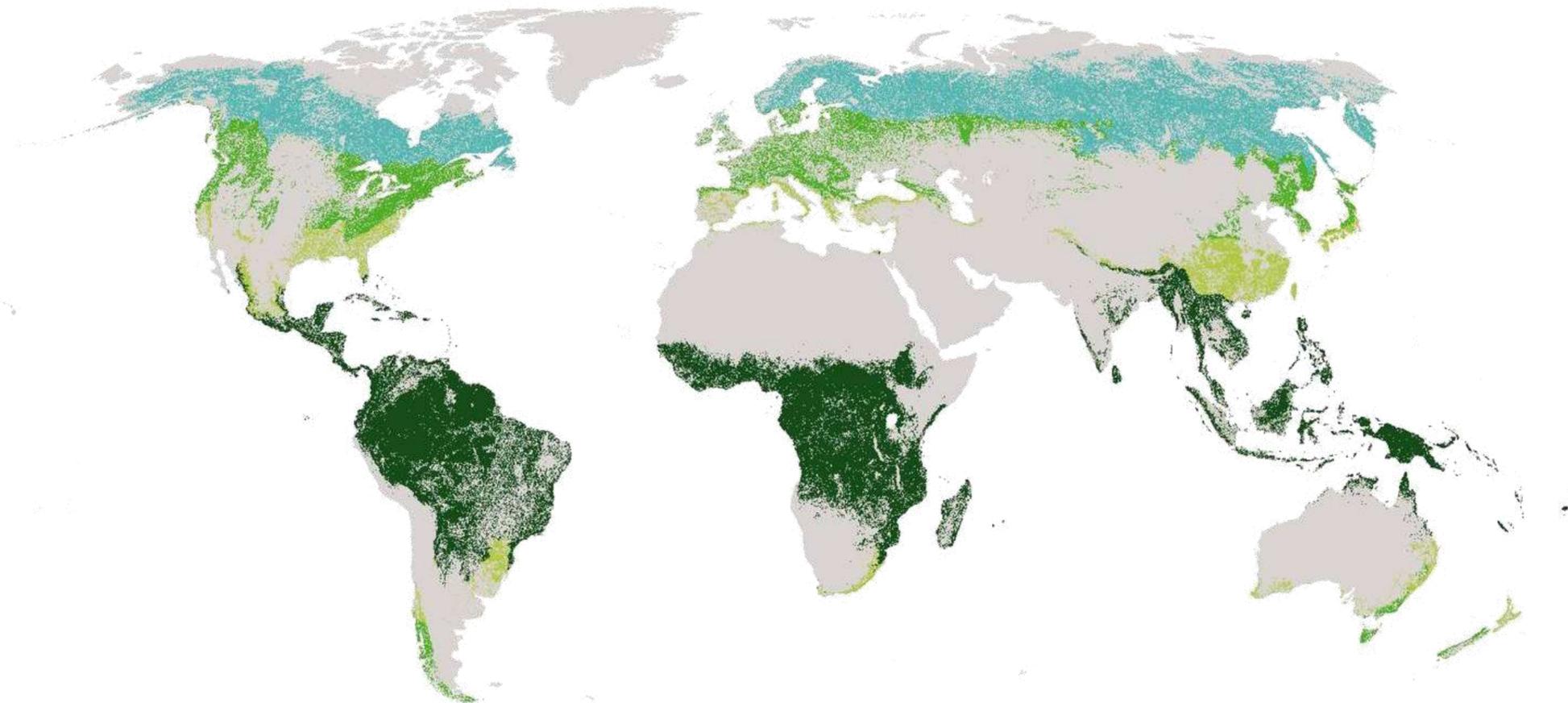
- ~ 2-3 espèces d'arbres par hectare
- Courte période d'activité de la végétation (hivers longs)
- Cycle des nutriments lents
- Faible productivité mais accumulation de MO dans les sols

Forêts tempérées

- ~ 10-15 espèces d'arbres par hectare
- Période d'activité de la végétation de durée intermédiaire (risque de gel hivernal)
- Biomasse et productivité intermédiaires

Forêts tropicales

- ~ 50-250 espèces d'arbres par hectare (biodiversité maximale)
- Végétation continûment active (mais possibilité d'une saison sèche)
- Cycles des nutriments rapides, sols pauvres
- Biomasse et productivité maximales



45 %
tropicales



27 %
boréales



16 %
tempérées





Biomes	Temps moyen de résidence dans le système plante-sol (années)	
	Biomasse	Sol et litière
Forêts boréales 	12	106
Forêts tempérées 	10	10
Forêts tropicales 	16	15

d'après MALHI *et al.*, 1999



Hors perturbation majeure (sécheresse, défoliation, feu, etc.), **les forêts anciennes/matures restent des puits de carbone** (pas de saturation du puits malgré l'âge de la forêt) !!!

- L'hypothèse d'ODUM (1967) prédit l'atteinte d'un état d'équilibre, pour les forêts âgées, entre prélèvements et émissions de carbone. Cela signifierait que les forêts anciennes sont neutres pour le bilan carbone.
- Cette hypothèse est aujourd'hui réfutée : les forêts anciennes peuvent continuer d'accumuler du carbone ! (LUYSSAERT *et al.*, 2008 ; BESNARD *et al.*, 2021).



Risques de perte de carbone de l'écosystème :

- Incendies
- Intensification de l'exploitation des peuplements (éclaircissement à forte intensité et coupe à blanc) pour répondre à la demande du secteur de la bioéconomie (énergie, construction...)
- Expansion agricole, principale cause de déforestation

Les forêts fixent annuellement une part très importante (environ 20 %) des émissions humaines de CO_2 , et ce malgré la déforestation en cours, qui réduit d'année en année la surface des forêts sur Terre. Sans la déforestation en cours, la contribution des forêts à la compensation de nos émissions serait encore plus grande. La déforestation contribue ainsi à l'aggravation du réchauffement climatique de deux manières :

1. En se traduisant par une émission directe de CO_2 (brûlage du bois et décomposition de la matière organique du sol ; combustion ou décomposition à plus ou moins long terme des produits du bois issus de la déforestation)
2. En amoindrissant la surface de forêts à même de prélever du CO_2 de l'atmosphère pour le fixer sous forme de matière organique



Le brûlage dirigé, une méthode utilisée pour limiter la propagation du feu

© INRAE / MAITRE Christophe



Effets antagonistes du changement climatique :

Des forêts qui poussent plus vite

- Effets de fertilisation liés à une concentration de CO_2 atmosphérique accrue et aux dépôts d'azote (effets anthropogéniques indirects). L'augmentation de la photosynthèse reste limitée par la disponibilité en nutriments et en eau ; réponse différente selon les régions climatiques (importance des co-limitations)
- Allongement de la saison de végétation

Des forêts plus vulnérables

- Taux de décomposition de la MO dans le sol accéléré
- Sécheresses accrues et vagues de chaleur
- Prolifération de maladies et d'organismes nuisibles aux forêts
- L'augmentation du stress hydrique peut perturber l'efficacité d'utilisation de l'eau dans les forêts
- Augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée des incendies (allongement également de la saison des incendies)



Arbre mort dû à la sécheresse
et au stress hydrique

© INRAE / NICOLAS Bertrand



FORÊTS

5. LEVIERS D'ACTION POUR STOCKER LE CARBONE DANS LES FORÊTS



PROGRAMME DE RECHERCHE
CARBONE ET ÉCOSYSTÈMES CONTINENTAUX

www.pepr-faircarbon.fr

Avril 2025

© INRAE / NICOLAS Bertrand



« La filière forêt-bois est un pilier de la croissance verte française. Elle permet de compenser environ 20 % des émissions françaises de CO₂ grâce au stockage de carbone en forêt (sols et biomasse aérienne), dans les produits bois et la substitution d'énergies fossiles et de matériaux plus énergivores.

Cette filière est au cœur d'enjeux majeurs qui concernent l'ensemble de la société et joue un rôle essentiel dans les transitions climatiques, écologiques, et énergétiques. »

(Programme National de la Forêt et du Bois 2016 - 2026)

MAIS

Les forêts françaises sont en **perte de vitesse concernant le stockage du carbone** : le flux de stockage a été divisé par 2 en 10 ans (données CITEPA), notamment du fait de la hausse de mortalité.





Pratiques permettant de stocker du carbone dans la biomasse forestière :

- Reforestation et afforestation
- Agroforesterie
- Gestion durable des forêts (exploitation sélective, réduction de la déforestation)
- Maintien des forêts primaires

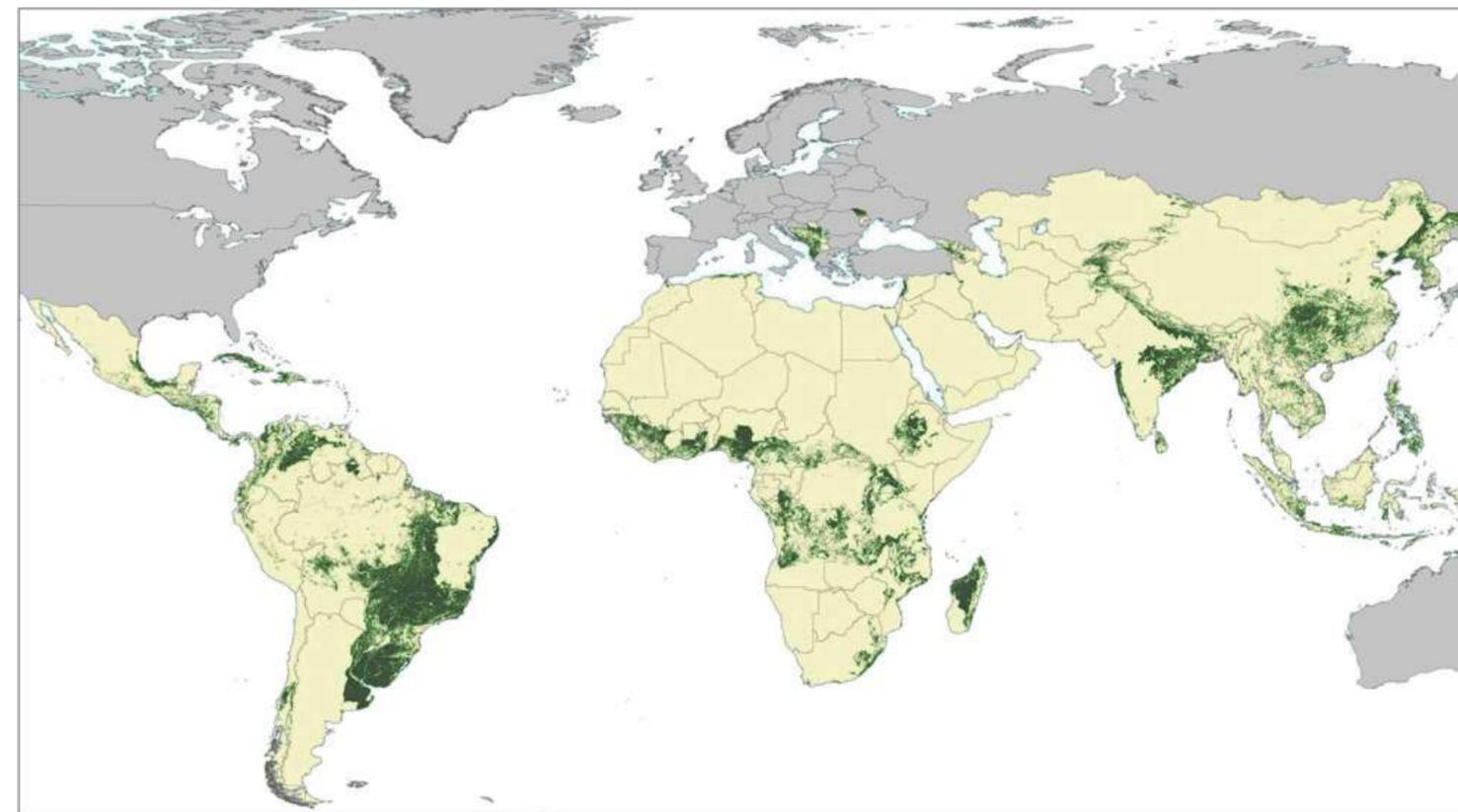
Pratiques permettant de stocker du carbone dans les sols forestiers :

- Préservation et gestion de la matière organique du sol (paillage, compostage, introduction de résidus organiques)
- Utilisation d'espèces forestières (essences) adaptées
- Réduction des perturbations du sol (compactage, labour)
- Restauration des sols dégradés

(Rapport étude 4p1000 et GIEC AR6 WGIII Chapitre 7)

À l'échelle globale, taux maximal de séquestration moyenne de carbone :
1,1 – 1,6 Gt/an pour les biomasses aérienne et souterraine.

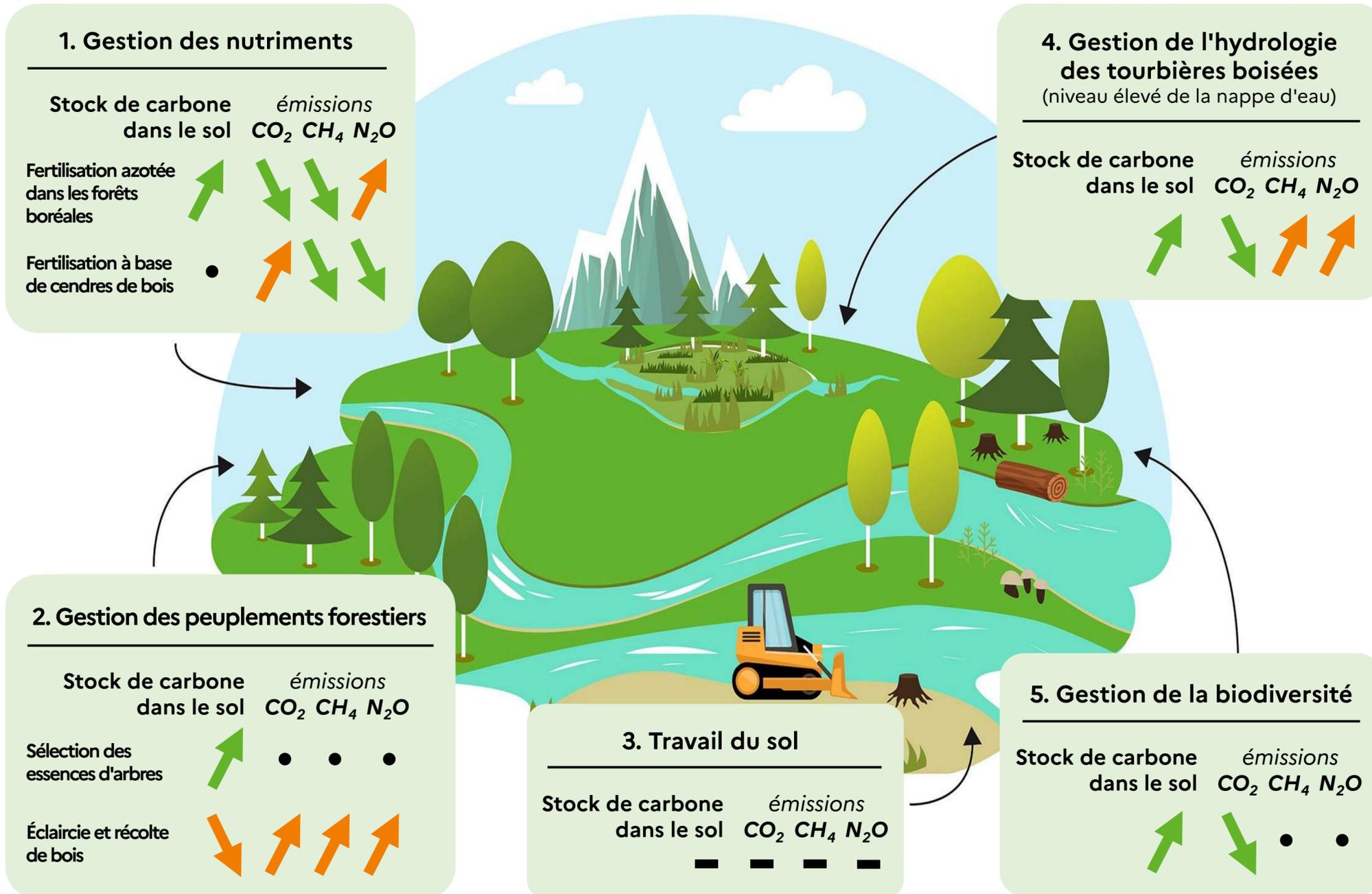
(IPCC SR-LULUCF 2000, BROWN *et al.*, 1996)



Carte des terres propices à Mécanisme de Développement Propre - Afforestation Reforestation (mécanisme économique de la finance du carbone qui fut élaboré dans le cadre du protocole de Kyoto) - **en vert foncé** - d'après l'analyse d'adéquation menée par ZOMER *et al.* (2008).



Les sols forestiers peuvent contribuer à l'atténuation du changement climatique grâce à une gestion ciblée permettant une augmentation des stocks de carbone dans le sol

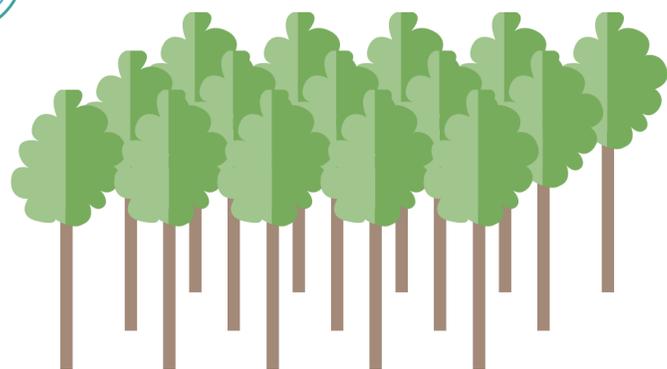


Les pratiques de gestion affectent le stock de carbone du sol et les émissions de CO₂, CH₄ et N₂O dans les forêts tempérées et boréales.

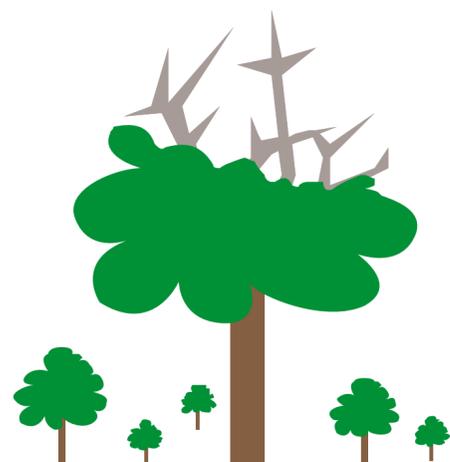
Les **flèches vertes** indiquent les impacts positifs pour l'atténuation du changement climatique et les **flèches orange** les impacts négatifs pour l'atténuation du changement climatique.

Augmentation Diminution
 Pas d'effet net Pas de données

(MÄKIPÄÄ *et al.*, 2023)



Les plantations entraînent en général des diminutions de biodiversité, aux dépens des espèces autochtones notamment...



... Mais il n'est pas toujours possible ni souhaitable de privilégier la dynamique de renouvellement spontané, notamment si on vise un changement d'essence pour réduire le risque de perturbation future.



Quelles essences répondront le mieux aux contraintes climatiques futures et aux attentes sociales ?



Aspects controversés des différentes modalités de coupes de régénération en forêts, notamment concernant les coupes rases (augmentation du risque d'érosion des sols, tassement, perturbation de la fertilité chimique des sols, diminution des communautés fongiques, élimination de nombreux individus sains lors des coupes rases de parcelles contenant 20 % de tiges en mauvais état sanitaire...).

(Expertise collective CRREF, 2023)



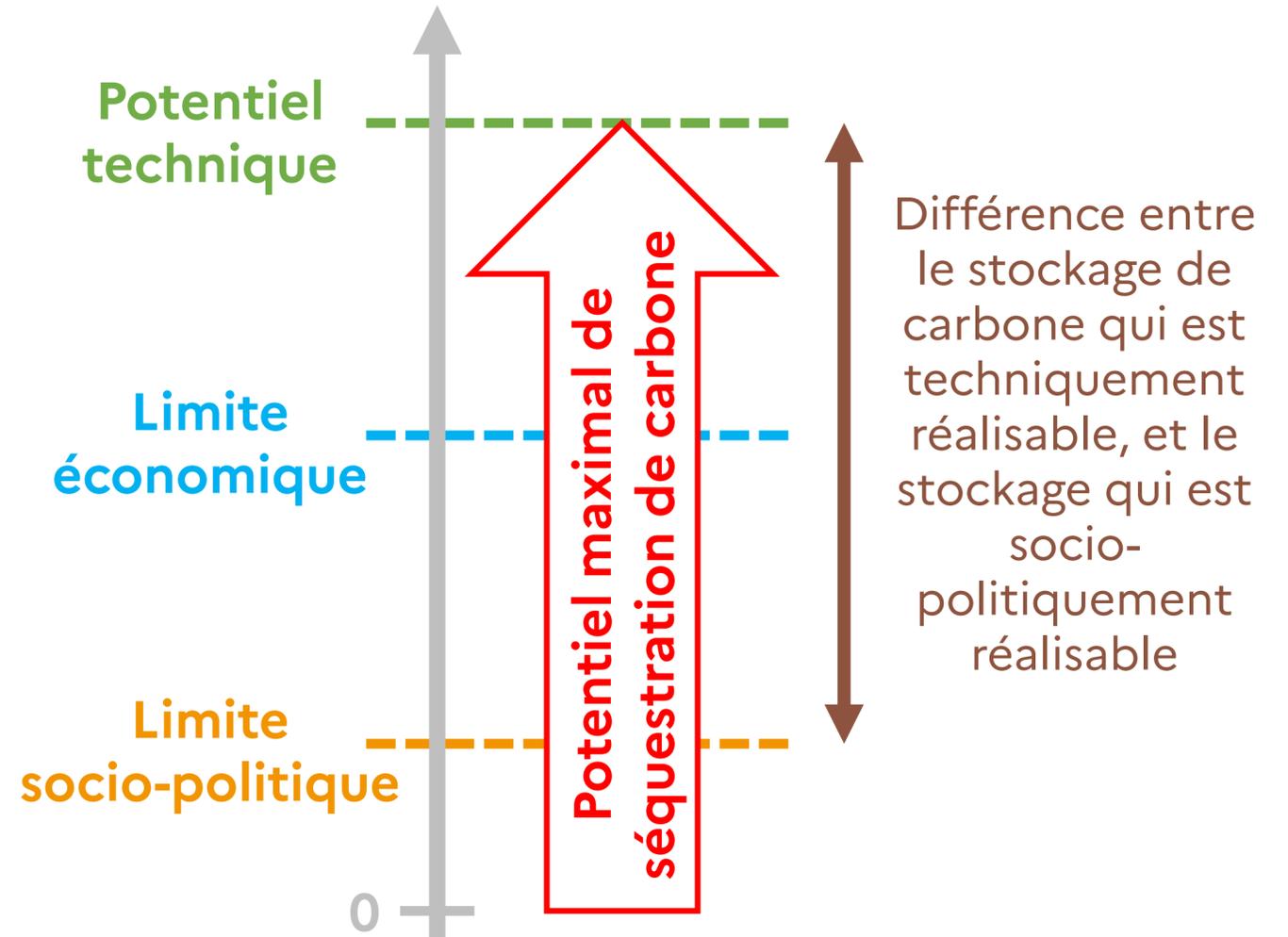
Le stockage de carbone dans les forêts n'est pas une simple question d'ordre biophysique !



Potentiel technique de stockage de carbone : niveau de stockage additionnel atteignable (tenant compte des limites biophysiques) en mettant en œuvre toutes les actions techniquement réalisables sur les forêts d'un territoire.

Limites économiques : la mise en place de pratiques stockantes entraîne généralement un coût additionnel. S'il est prohibitif, ou qu'aucun accompagnement à la mise en place de pratiques stockantes n'est prévu, le potentiel économique de stockage peut être très éloigné du potentiel technique.

Limites sociales : même avec un accompagnement économique adéquate, la mise en place de pratiques stockantes peuvent se heurter à des réticences.



(Inspiré de AMUNDSON & BIARDEAU PNAS 2018)

→ **Un équilibre à trouver entre enjeux énergétiques** (exploitation pour le bois énergie ; énergie utilisée pour récolter les arbres) **et durabilité** (exportation des nutriments du sol ; diminution du stockage de C, de la fertilité du sol et de la biodiversité du sol).



FORÊTS

6. CONCLUSIONS

PROGRAMME DE RECHERCHE
CARBONE ET ÉCOSYSTÈMES CONTINENTAUX

www.pepr-faircarbon.fr

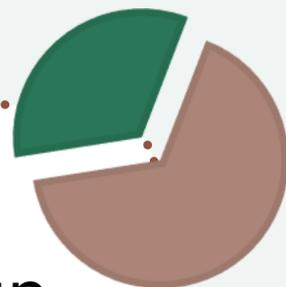
Avril 2025

© INRAE / NICOLAS Bertrand



Les forêts

représentent un tiers des surfaces terrestres mondiales.



En France métropolitaine, les forêts représentent environ **un tiers du territoire** et presque **40 % des stocks de carbone des sols**.

La surface des forêts est **en régression**, principalement du fait de la déforestation en zone tropicale.

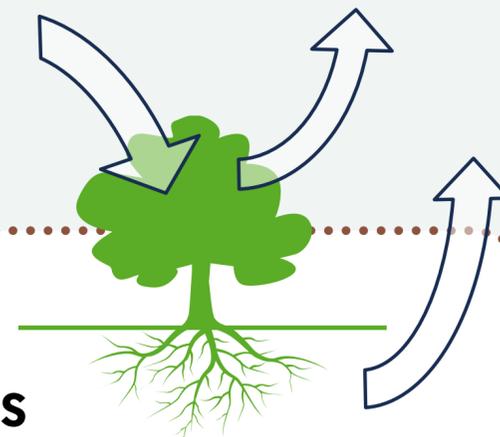


Dans l'écosystème des forêts, le carbone est stocké à **50 % environ dans le sol** et à **50 % environ dans la biomasse**.

La teneur en carbone dans les sols forestiers diminue avec la profondeur.



L'entrée de carbone dans l'écosystème forestier se fait par le processus de photosynthèse, les principales sorties de carbone sont la respiration autotrophe (plante), la respiration hétérotrophe (microorganismes et faune), et l'exportation de biomasse.





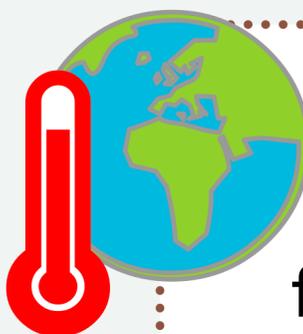
Points essentiels à retenir

Pour préserver les stocks de carbone existants dans les forêts, il est essentiel d'éviter la déforestation.

CO₂

Les leviers d'action pour stocker plus de C dans les sols forestiers sont limités. **La priorité est de maintenir les stocks existants.**

Fertilité chimique et carbone du sol sont intimement liées :
récolte intensive
=> diminution du C du sol
=> perte de fertilité
=> diminution de la croissance.
Donc, prendre soin du C du sol en même temps que la fertilité chimique, physique et biologique.



Le changement climatique a des effets antagonistes sur les forêts : les forêts poussent plus vite mais sont plus vulnérables.

Présentation de l'écosystème : définitions et chiffres-clés

- 📄 <https://www.fao.org/4/ad665e/ad665e03.htm>
- 📖 FAO. 2020. *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report*. Rome, 166 p. <https://www.fao.org/interactive/forest-resources-assessment/2020/en/>
- 📖 Institut Géographique National (IGN). (2024). Inventaire forestier national - Mémento. 72 p. https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/memento_2024.pdf

Stocks et formes de carbone organique

- 📄 PAN Y. et al. (2011). A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science* 333: 988-993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- 📄 HARRIS N.L., GIBBS D.A., BACCINI A. et al. (2021). Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change* 11: 234-240. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>
- 📖 INRAE Étude 4 pour 1000, Résumé en français. 11 p. https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/etude-4-pour-1000-resume-en-francais-pdf-1_0.pdf
- 📄 JOBBÁGY E.G. & JACKSON R.B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* 10: 423-436. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2)
- 📖 IPCC (2000). *Summary for Policymakers. Land Use, Land-Use Change, and Forestry*. 24 p. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srl-en-1.pdf>
- 📖 Institut Géographique National (IGN). (2020). *État et évolution des forêts françaises métropolitaines. Indicateurs de gestion durables 2020*. 307 p. <https://foret.ign.fr/api/upload/IGD-2020-c255.pdf>
- 📄 PAN Y. et al. (2024). The enduring world forest carbon sink. *Nature* 631: 563-569. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07602-x>

Flux du carbone

- 📄 CRAINE J.M., FROEHLE J., TILMAN D.G., WEDIN D.A. & CHAPIN, III, F.S. (2001). The relationships among root and leaf traits of 76 grassland species and relative abundance along fertility and disturbance gradients. *Oikos* 93(2): 274-285. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2001.930210.x>
- 📄 CHENU C., VIRTO I., PLANTE A. & ELSASS F. (2009). Clay-Size Organo-Mineral Complexes in Temperate Soils: Relative Contributions of Sorptive and Physical Protection. *CMS Workshop Lectures* 16: 120-135. <https://doi.org/10.1346/CMS-WLS-16>
- 📄 ANDERSON-TEIXEIRA K.J., HERRMANN V., BANBURY MORGAN R., BOND-LAMBERTY B., COOK-PATTON S.C., FERSON A.E., MULLER-LANDAU H.C. & WANG M.M.H. (2021). Carbon cycling in mature and regrowth forests globally. *Environmental Research Letters* 16, 21 p. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abed01>

Dynamique du carbone dans les forêts et changements globaux

- 📄 MALHI Y., BALDOCCHI D.D. & JARVIS P.G. (1999). The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell & Environment* 22: 715-740. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00453.x>
- 📄 LUYSSAERT S., SCHULZE E.D., BÖRNER A. et al. (2008). Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455: 213-215. <https://doi.org/10.1038/nature07276>
- 📄 BESNARD S., KOIRALA S., SANTORO M., WEBER U., NELSON J., GÜTTER J., HERAULT B., KASSI J., N'GUESSAN A., NEIGH C., POULTER B., ZHANG T. & CARVALHAIS N. (2021). Mapping global forest age from forest inventories, biomass and climate data. *Earth System Science Data* 13: 4881-4896. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4881-2021>
- 📄 NABUURS G-J., MRABET R., ABU HATAB A., BUSTAMANTE M., CLARK H., HAVLÍK P., HOUSE J., MBOW C., NINAN K.N., POPP A., ROE S., SOHNGEN B. & TOWPRAYOON S. (2022). Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU). In : IPCC. Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 747-860. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter07.pdf



Leviers d'action pour stocker le carbone dans les forêts

- PNF 2016-2026. <https://agriculture.gouv.fr/le-programme-national-de-la-foret-et-du-bois-2016-2026>
- 📄 Citepa, 2024. Rapport Secten – Emissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques 1990-2023. 560 p. https://www.citepa.org/wp-content/uploads/2024/12/Citepa_Secten-2024.pdf
- 📄 PELLERIN S. & BAMIÈRE L. (pilotes scientifiques), LAUNAY C., MARTIN R., SCHIAVO M., ANGERS D., AUGUSTO L., BALESDENT J., BASILE-DOELSCH I., BELLASSEN V., CARDINAEL R., CÉCILLON L., CESCHIA E., CHENU C., CONSTANTIN J., DARROUSSIN J., DELACOTE P., DELAME N., GASTAL F., GILBERT D., GRAUX A.-I., GUENET B., HOUOT S., KLUMPP K., LETORT E., LITRICO I., MARTIN M., MENASSERI S., MÉZIÈRE D., MORVAN T., MOSNIER C., ROGER-ESTRADE J., SAINT-ANDRÉ L., SIERRA J., THÉRON O., VIAUD V., GRATEAU R., LE PERCHEC S., RÉCHAUCHÈRE O. (2020). Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Rapport scientifique de l'étude, INRA (France), 540 p. <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/Rapport%20Etude%204p1000.pdf>
- 📄 ZOMER R.J., TRABUCCO A., BOSSIO D.A. & VERCHOT L. (2008). Climate Change mitigation: A spatial analysis of global land suitability for clean development mechanism afforestation and reforestation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 126: 67-80. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.01.014>
- 📄 BROWN S., SATHAYE J., CANNELL M. & KAUPPI P. E. (1996). Mitigation of carbon emissions to the atmosphere by forest management. *The Commonwealth Forestry Review* 75(1): 80-91. <https://www.jstor.org/stable/42607279>
- 📖 IPCC (2000). *Summary for Policymakers. Land Use, Land-Use Change, and Forestry*. 24 p. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srl-en-1.pdf>

- 📄 LANDMANN G., DELAY M., MARQUET G. (Coord.), BERGÈS L., COLLET C., DEUFFIC P., GOSSELIN M., MARAGE D., OGÉE J., OSE K., PERRIER C. (pilotes), AGRO C., AKROUME E., AUBERT M., AUGUSTO L., BAUBET O., BECQUEY J., BELOUARD T., BOULANGER V., BOURDIN A., BOUTTE B., BOUWEN K., BRAULT S., BRUNET Y., BUREAU F., CASTRO A., CHAUMET M., CONCHE J., DARBOUX F., DEPEIGE L., DESGROUX A., DOKHELAR T., DOMEQ J.-C., DUMAS Y., DUPREZ M., FRAPPART F., GARCIA S., GARDINER B., GIRARD S., GOSSELIN F., HUSSON C., JACOMET E., JACTEL H., JOYEAU C., LACOMBE E., LAURENT L., LEGOUT A., LELASSEUR L., LOUSTEAU D., MEREDIEU C., MOREEWS L., ORAZIO C., PEYRON J.-L., PILARD-LANDEAU B., PITAUD J., PLANELLS M., PLAT N., PONETTE Q., POUSSE N., PRÉVOSTO B., PUISEUX J., PUYAL M., RANGER J., RICHOU E., RIGOLOT E., RIOU-NIVERT P., SAÏD S., SAINTONGE F.-X., SERRA DIAZ J. -M., STEMMELLEN A., TOUTCHKOV M., VAN HALDER I., VINCENOT L., WURPILLOT S. (experts). 2023. Expertise collective CRREF « Coupes Rases et RENouvellement des peuplements Forestiers en contexte de changement climatique », Synthèse de l'expertise, Paris : GIP ECOFOR, RMT AFORCE, 128 p. http://www.gip-ecofor.org/wp-content/uploads/2023/10/CRREF_rapport-de-synthese_WEB2.pdf
- 📄 AMUNDSON R. & BIARDEAU L. (2018). Soil carbon sequestration is an elusive climate mitigation tool. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 115(46): 11652-11656. <https://doi.org/10.1073/pnas.1815901115>
- 📄 MÄKIPÄÄ R., ABRAMOFF R., ADAMCZYK B., BALDY V., BIRYOL C., BOSELA M., CASALS C., CURIEL YUSTE J., DONDINI M., FILIPEK S., GARCIA-PAUSAS J., GROS R., GÖMÖRYOVÁ E., HASHIMOTO S., HASSEGAWA M., IMMONEN P., LAIHO R., LI H., LI Q., LUYSSAERT S., MENIVAL C., MORI T., NAUDTS K., SANTONJA M., SMOLANDER A., TORIYAMA J., TUPEK B., UBEDA X., VERKERK P.J. & LEHTONEN A. (2023). How does management affect soil C sequestration and greenhouse gas fluxes in boreal and temperate forests? – A review. *Forest Ecology and Management* 529, 120637. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120637>