



TOURBIÈRES

HAUT ET BAS MARAIS DE MONTAGNE ET DE PLAINE

par Daniel GILBERT, Lise PINAULT, Laure GANDOIS & Adrien JACOTOT



PROGRAMME
DE RECHERCHE
CARBONE ET
ÉCOSYSTÈMES
CONTINENTAUX

www.pepr-faircarbon.fr

Novembre 2024

Cette image a été générée avec l'aide de l'IA (OpenAI)

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

2. STOCKS ET FORMES DE CARBONE ORGANIQUE

3. DYNAMIQUE DU CARBONE ORGANIQUE

4. LEVIERS D'ACTION POUR LIMITER LES ÉMISSIONS DE CARBONE

5. 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 : H_2O , CO_2 , N_2O , CH_4 .

Acrotelm : partie supérieure de la tourbe comprenant la partie vivante de la végétation qui se situe au dessus du niveau le plus bas de la nappe d'eau.

Catotelm : partie de la tourbe qui se situe au dessous de l'acrotelm et qui est donc toujours sous le niveau de la nappe d'eau.

Densité apparente : masse volumique de la tourbe. Elle se calcule en évaluant la masse sèche d'un volume de tourbe non tassé (solide + espace interstitiel + eau).

Taux de carbone : proportion de carbone contenue dans la tourbe sèche.



Sphaignes et Drosera

© GILBERT Daniel



TOURBIÈRES

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



PROGRAMME
DE RECHERCHE
CARBONE ET
ÉCOSYSTÈMES
CONTINENTAUX

www.pepr-faircarbon.fr

Novembre 2024

Cette image a été générée avec l'aide de l'IA (OpenAI)



Tourbières

Zones humides pour laquelle la production primaire annuelle est supérieure à la décomposition microbienne. Il en résulte une accumulation régulière de matière organique.

Tourbière active

Le processus d'accumulation se poursuit (puits de carbone).

Tourbière perturbée

La zone humide a été drainée, cultivée ou exploitée pour la production de tourbe. Le bilan de carbone de l'écosystème est négatif, les émissions sont supérieures à la captation (source de carbone).



**Tourbière de Terre de feu
(Argentine)**

© GILBERT Daniel



**Tourbière du Cotentin
(France)**

© GILBERT Daniel



**Sphaignes, Ariège
(France)**

© GILBERT Daniel



Tourbe

Accumulation de matière organique issue de la biomasse produite *in situ*.

Teneur en matière organique

La tourbe contient au moins 30 % de matière organique (TANNENBERGER *et al.*, 2017). Cette teneur est devenu la norme, même s'il s'agit d'une valeur arbitraire, beaucoup d'autres définitions peuvent être retrouvées.

Épaisseur

Une tourbière a habituellement accumulé au moins 30 à 40 cm de tourbe. Là encore, c'est une valeur arbitraire, une définition basée uniquement sur la présence d'une végétation formant de la tourbe est aussi utilisée (CUBIZOLLE, 2019).



Carottage à Frasne (France, 25)

© GILBERT Daniel



**Carottier russe
(Marais de lavour, France, 01)**

© GILBERT Daniel

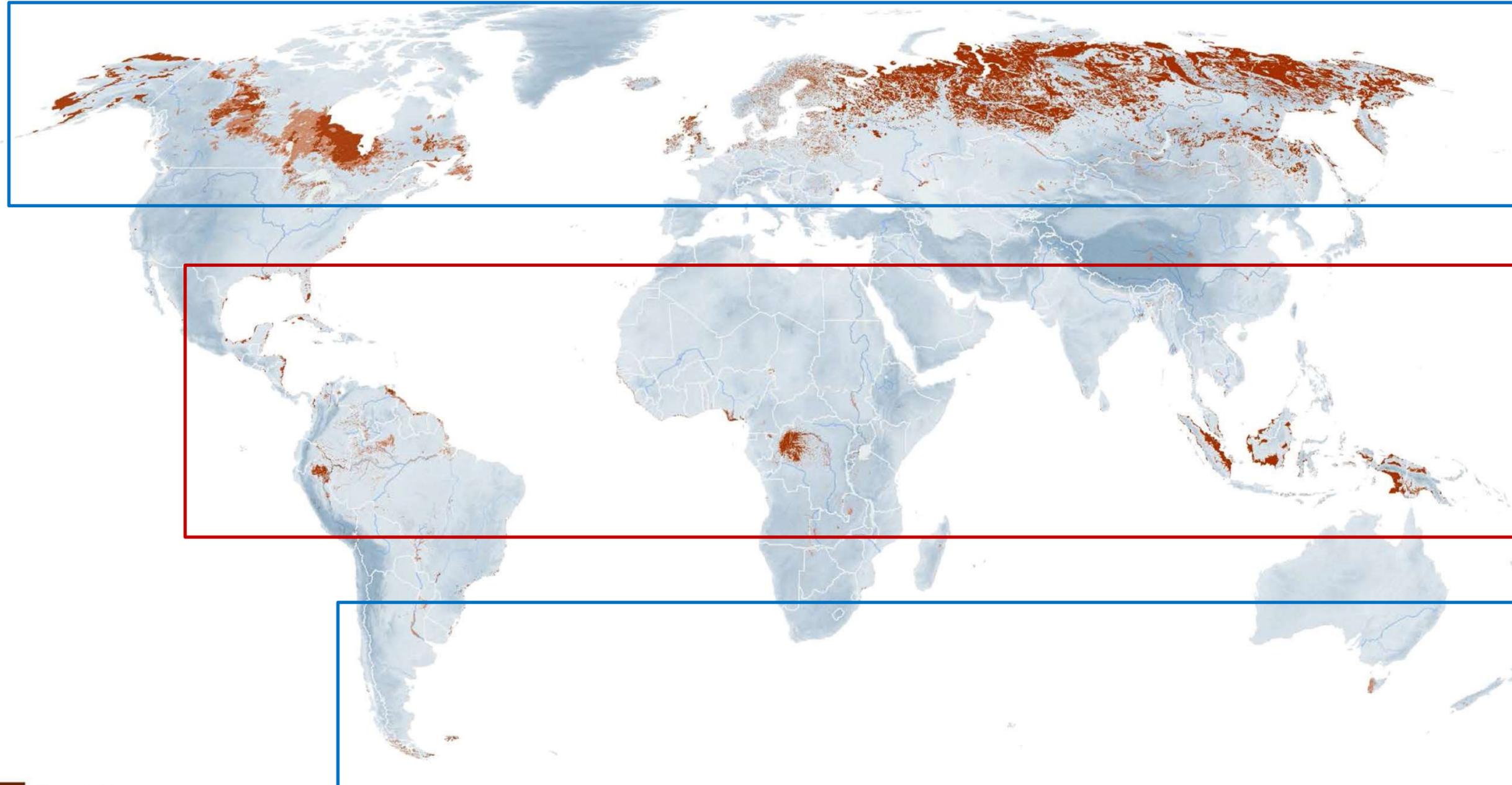


**Carottage Cotentin
(France, 50)**

© GILBERT Daniel



Répartition des tourbières dans le monde



Boréales
et tempérées

Tropicales

13 %

87 %

de la surface totale

Tempérées

- Tourbières
- Tourbe dans la mosaïque de sol

Surface mondiale (occupation des sols)

4 262 000 km²

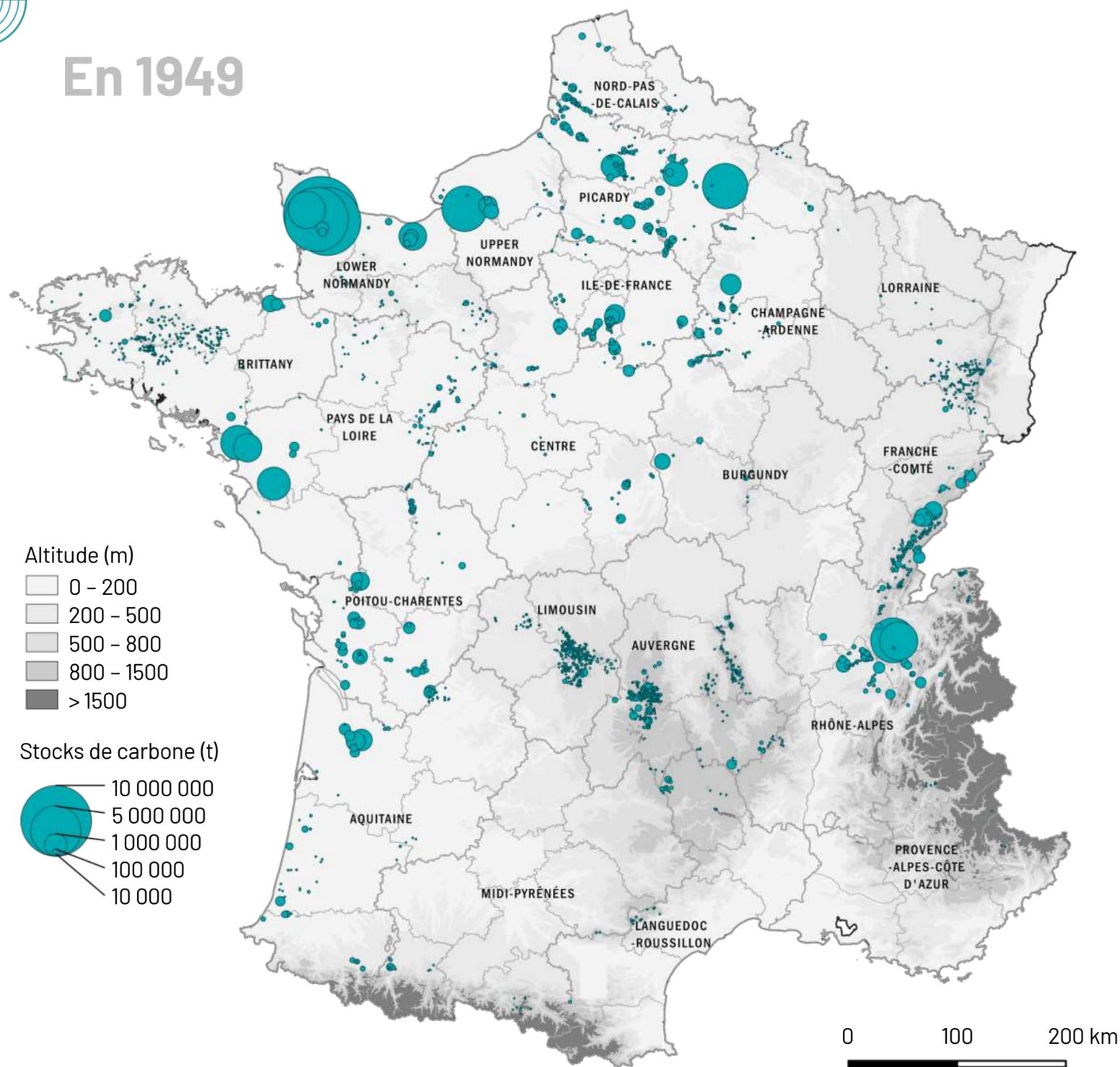
(Global Peatland Assessment, 2022 ; LEIFIELD & MENICHETTI, 2018 ; CUBIZOLLE, 2019)



Les tourbières en France



En 1949

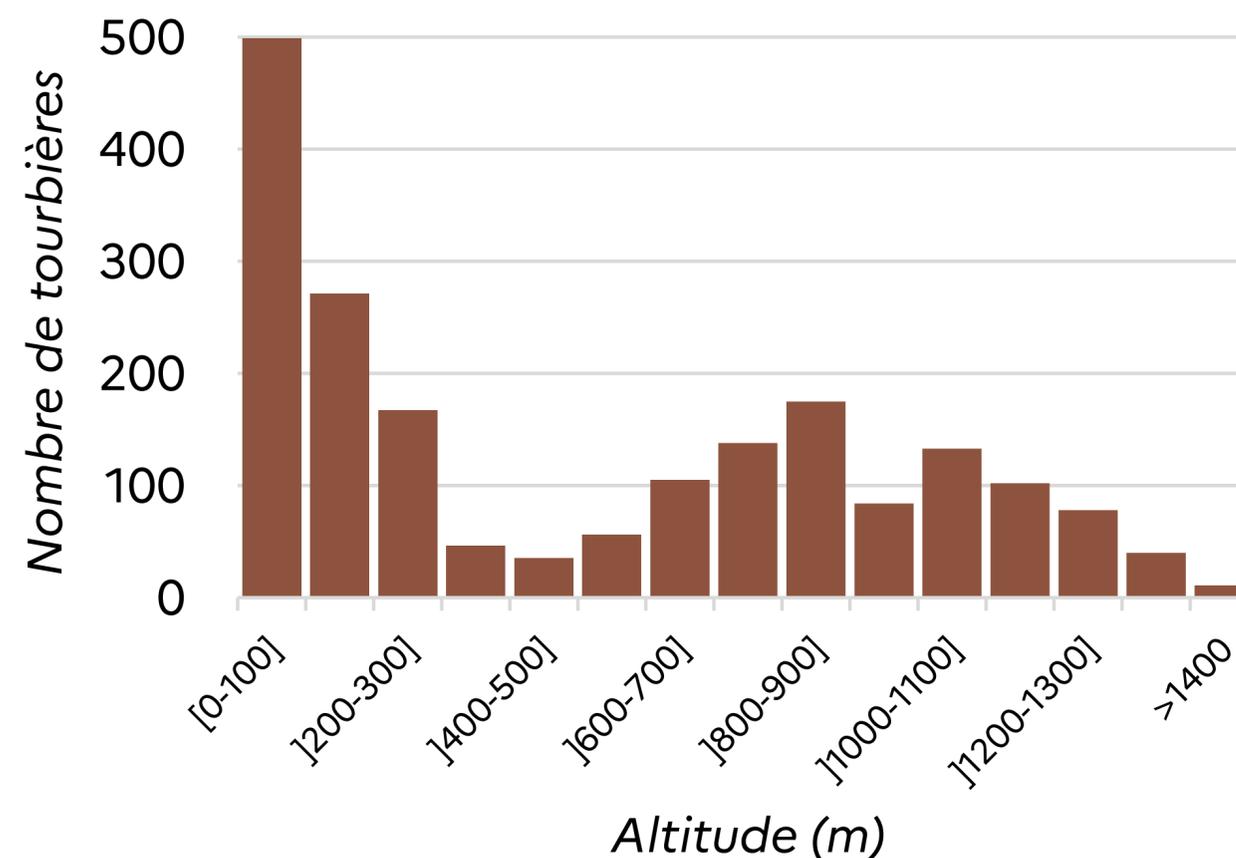


Surface totale : 100 000 à 120 000 ha

Tourbières de plaine : environ **80 %**

Tourbières de montagne : environ **20 %**

Distribution des tourbières le long d'un gradient altitudinal (données 1949)



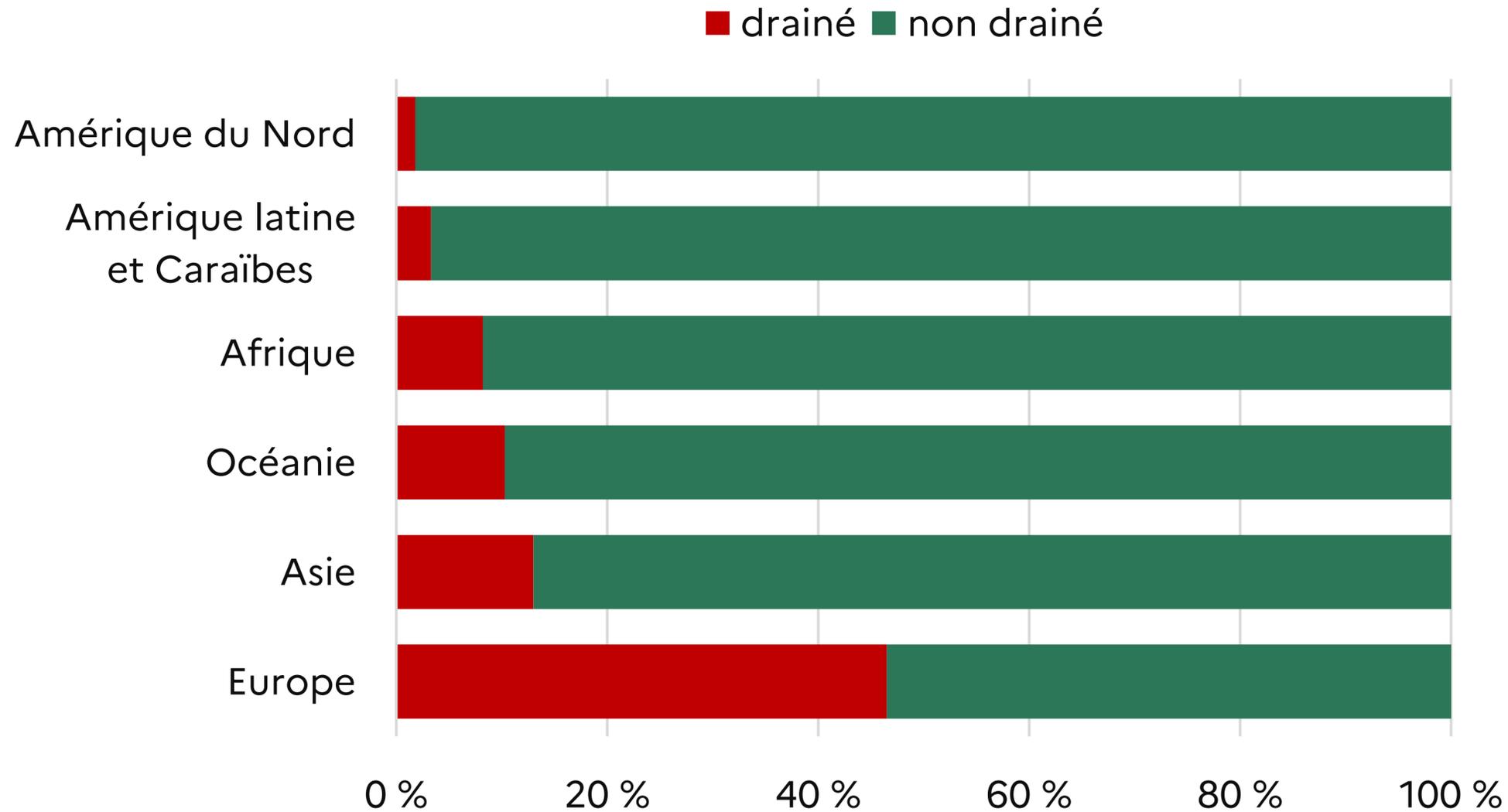
(PINAULT *et al.*, 2023)



Un inventaire a été réalisé par le ministère des mines en 1949 (PINAULT *et al.*, 2023). Numérisé en 2018, il donne un aperçu partiel de la distribution des tourbières en France. Un inventaire actualisé est en cours de réalisation.



Les tourbières sont affectées par les activités humaines



Proportion de tourbières drainées et non drainées dans les différentes régions du monde

(Global Peatland Assessment, 2022)

➔ **11,7 %** des tourbières mondiales sont dégradées, **mais 46 % en Europe.**

➔ **4 %** sont cultivées, **25 %** en prairie, **65 %** en forêt.

➔ L'essentiel des tourbières d'Asie du Sud-Est a été drainé pour la production d'huile de palme.



Conservation de la biodiversité

Faune/flore et microorganismes spécifiques des tourbières

Régulation de l'eau

- Régulent les débits d'étiage et limitent les effets des sécheresses et des inondations
- Service primordial dans le contexte de l'intensification des changements climatiques

Services

Stockage du carbone

- Stockage à long terme du carbone sous forme de tourbe
- La restauration des tourbières atténue les changements climatiques





TOURBIÈRES

2. STOCKS ET FORMES DE CARBONE ORGANIQUE



FRANCE 2030

PROGRAMME DE RECHERCHE

CARBONE ET ÉCOSYSTÈMES CONTINENTAUX

www.pepr-faircarbon.fr

Novembre 2024

Cette image a été générée avec l'aide de l'IA (OpenAI)



Dans le monde

En France

(estimations L. PINAULT & D. GILBERT)

Surface totale	4 262 000 km² <small>(ZINCK & HUBER, 2011)</small>	Environ 1 200 km² Soit 120 000 ha
Stock de carbone total	600 Gt C <small>(LOISEL <i>et al.</i>, 2021)</small>	0,165 Gt C
Profondeur moyenne	0,5 à 11 m <small>(PAGE <i>et al.</i>, 2011)</small>	1,80 m
Densité apparente (masse volumique)		188 g.l⁻¹
Taux de carbone		43 %
Stock de carbone par unité de surface		780 t C.ha⁻¹.m⁻¹



Comparaison avec les autres écosystèmes

Écosystème	Étendue géographique mondiale (1 000 km ²)	Densité de carbone typique (t C.ha ⁻¹) ^a	Teneur mondiale estimée en carbone (Gt C) ^a	Taux de perte récent (superficie par an en %) ^c
Mangroves	145	502	7,3	0,13%
Herbiers marins	450	111	5,0	0,95%
Marais	210	265	5,6	0,25%
Forêts boréales	10 700	264	283	0,18%
Forêts feuillues tempérées	4 960	268	133	0,35%
Forêts de conifères tempérées	2 410	272	66	0,28%
Forêts tropicales sèches	842	166	14	0,58%
Forêts tropicales humides	11 700	252	295	0,45%
Tourbières boréales	3 609 ^b	500	181	0,00%
Tourbières tempérées	185 ^b	500	9,3	0,00%
Tourbières tropicales	587 ^b	504	30	0,60%
Prairies tempérées	5 080	77	39	0,14%
Prairies tropicales	7 000	43	30	0,14%
Prairies montagnardes	2 600	104	27	0,14%

a La densité typique du carbone est la somme des valeurs typiques du carbone organique aérien, souterrain et du sol jusqu'à des profondeurs de 30 cm (sols minéraux des hautes terres) ou 1 m (tourbières gorgées d'eau et systèmes côtiers).

b L'étendue géographique des tourbières capturées ci-dessus chevauche d'autres écosystèmes : 56 % de la superficie des tourbières chevauche des forêts et 21 % des prairies, et 16 % se trouvent sous des terres cultivées ou des zones d'utilisation mixte des terres.

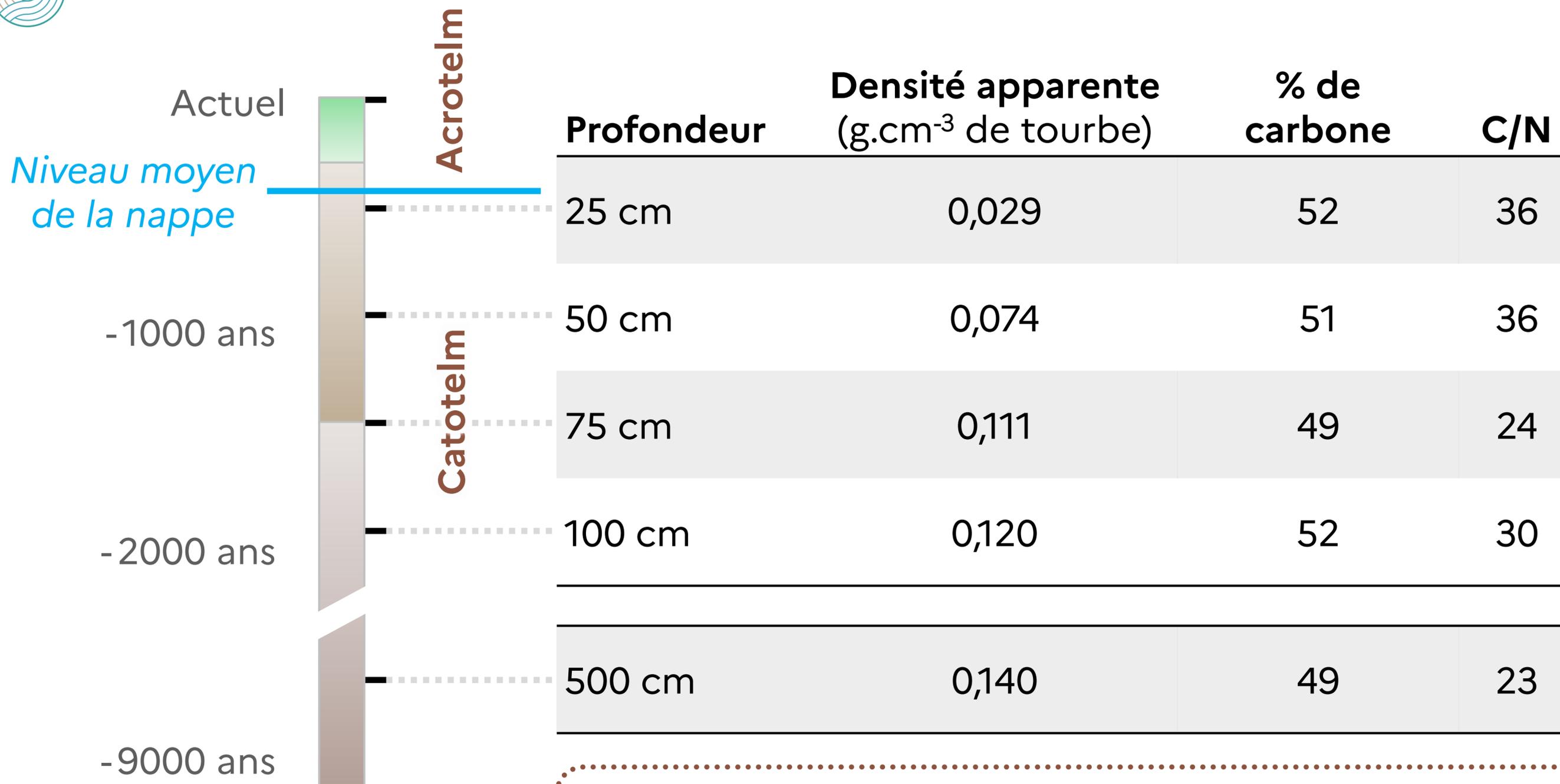
c Les taux de perte de forêts et de mangroves sont basés sur une période 2000-2012 ; les taux de perte dans d'autres écosystèmes ne sont pas suivis d'aussi près et sont basés sur des périodes différentes.

(GOLDSTEIN *et al.*, 2020)

Les tourbières et les mangroves constituent les plus grands stocks de carbone par hectare.



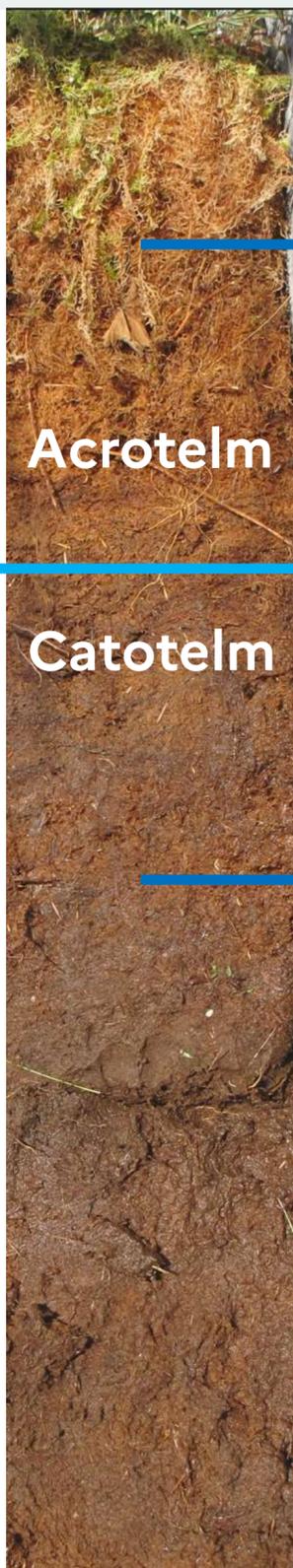
Description d'une carotte de tourbe : exemple de Frasné (France, 25)



➔ Il existe une très grande variabilité en termes de qualité de la tourbe et de profondeur (jusqu'à plus de 10 m) !



Description d'une carotte de tourbe



En surface

La végétation se développe en surface.

Dans les tourbières boréales, les sphaignes sont les principaux végétaux formant la tourbe.



Sous la végétation

Sous le niveau de la nappe, la litière formée de matière morte s'accumule.

Ici, la tourbe blonde est notamment issue des restes de sphaignes. La tourbe est fibreuse.



En profondeur

En profondeur, la tourbe est plus sombre.

La tourbe évolue en une matière beaucoup plus plastique.



Mais aussi ...

La tourbe contient de nombreux restes de végétaux, des enveloppes de microorganismes et parfois des morceaux d'arbres.



TOURBIÈRES

3. DYNAMIQUE DU CARBONE ORGANIQUE

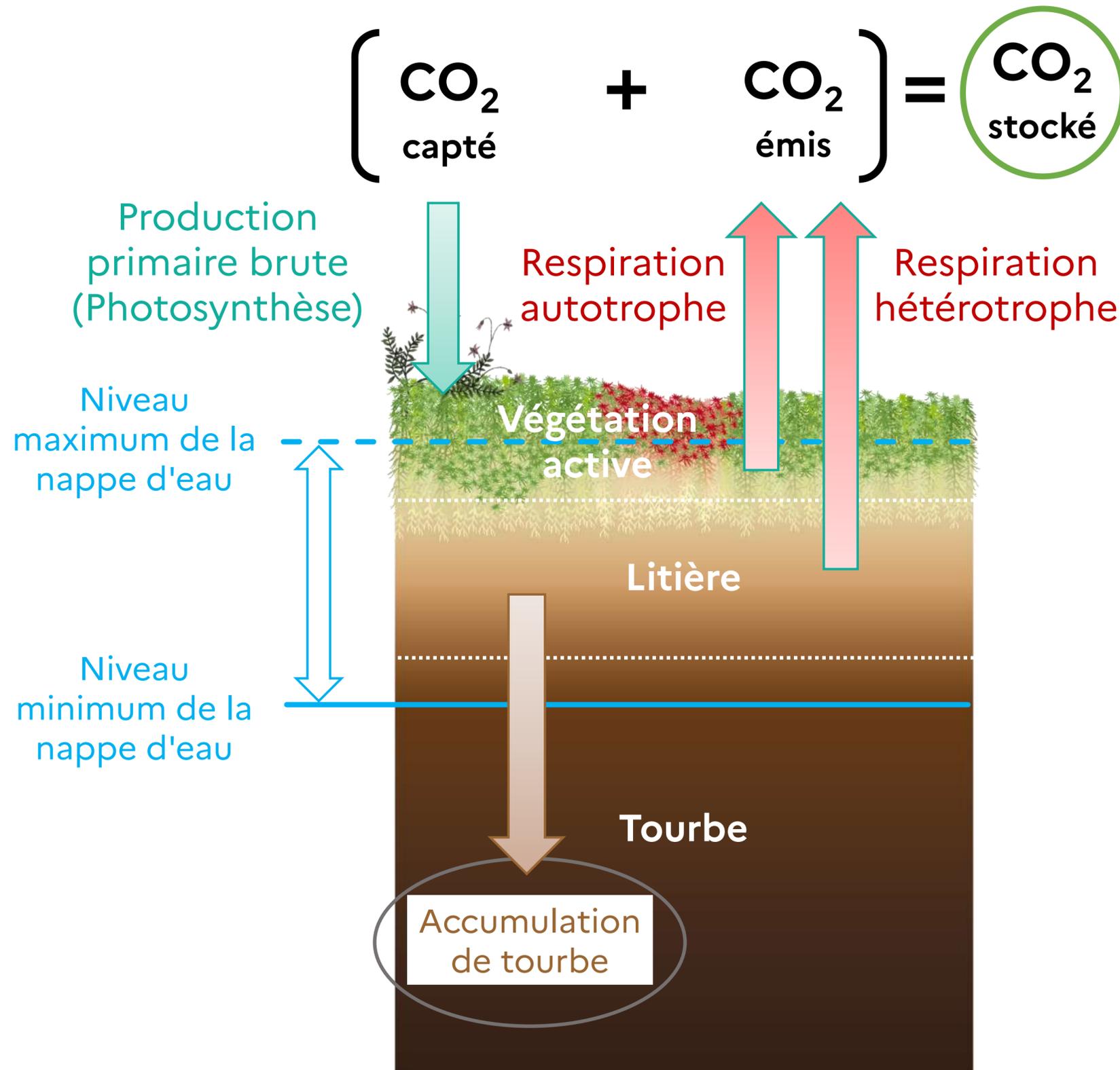


PROGRAMME
DE RECHERCHE
CARBONE ET
ÉCOSYSTÈMES
CONTINENTAUX

www.pepr-faircarbon.fr

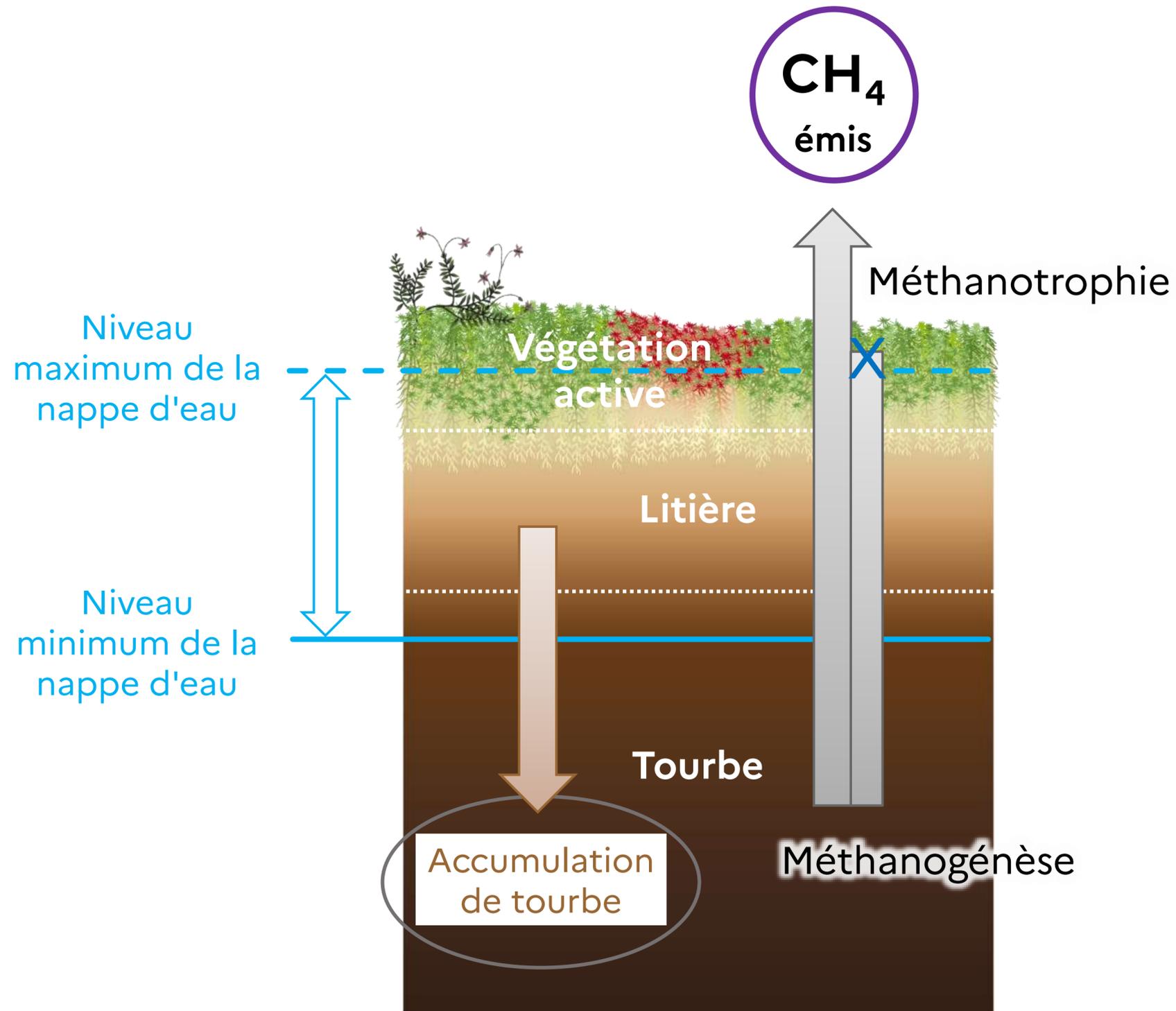
Novembre 2024

Cette image a été générée avec l'aide de l'IA (OpenAI)



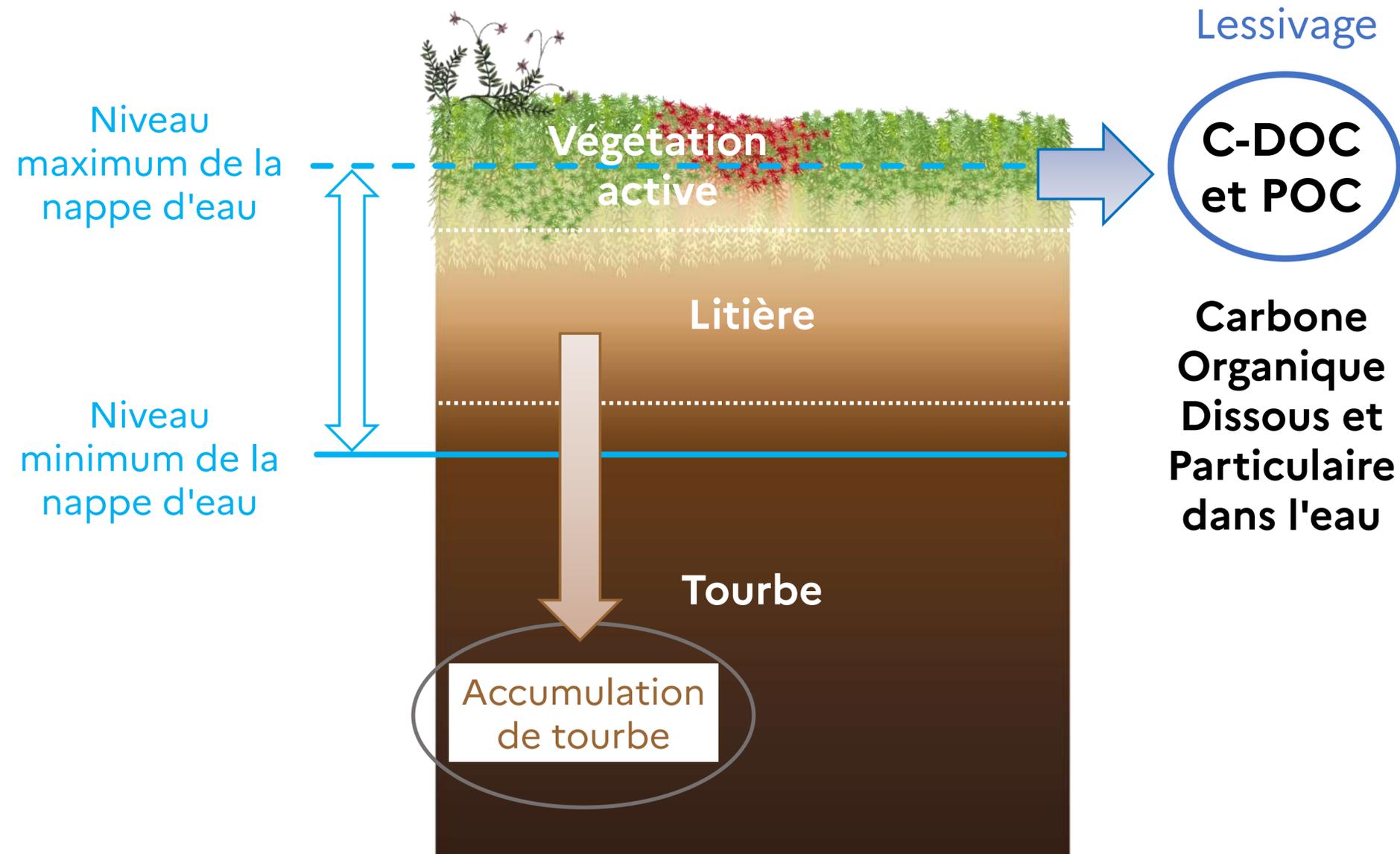
BILAN POUR LE CO₂

- En surface, les végétaux fixent le CO₂ atmosphérique par photosynthèse
- Les végétaux respirent et rejettent une partie du CO₂ assimilé (respiration autotrophe)
- Les végétaux morts sont dégradés par les microorganismes décomposeurs qui libèrent du carbone (respiration hétérotrophe)
- Dans les tourbières, le bilan Photosynthèse – Respiration totale n'est pas égal à zéro. Environ 10% de la production primaire s'accumule chaque année sous forme de tourbe



BILAN POUR LE CH₄

- Sous le niveau de la nappe, le milieu est en anaérobiose
- Certaines bactéries produisent du CH₄ par respiration anaérobie (méthanogénèse)
- Le méthane diffuse dans la tourbe, notamment le long des racines des plantes vasculaires et s'échappe dans l'air
- Mais une partie du CH₄ est décomposée dans la partie supérieure de la tourbière par des bactéries aérobies avant qu'il ne parvienne à la surface (méthanothrophie)



BILAN POUR LE DOC ET LE POC

- Lorsque l'eau s'écoule à la surface ou en profondeur dans la tourbière, elle entraîne de la matière organique
- Soit sous forme de Carbone Organique Dissous (DOC), soit sous forme de Carbone Organique Particulaire (POC)
- A terme, le DOC et le POC finissent dans les cours d'eau où ils peuvent être décomposés en produisant du CO_2

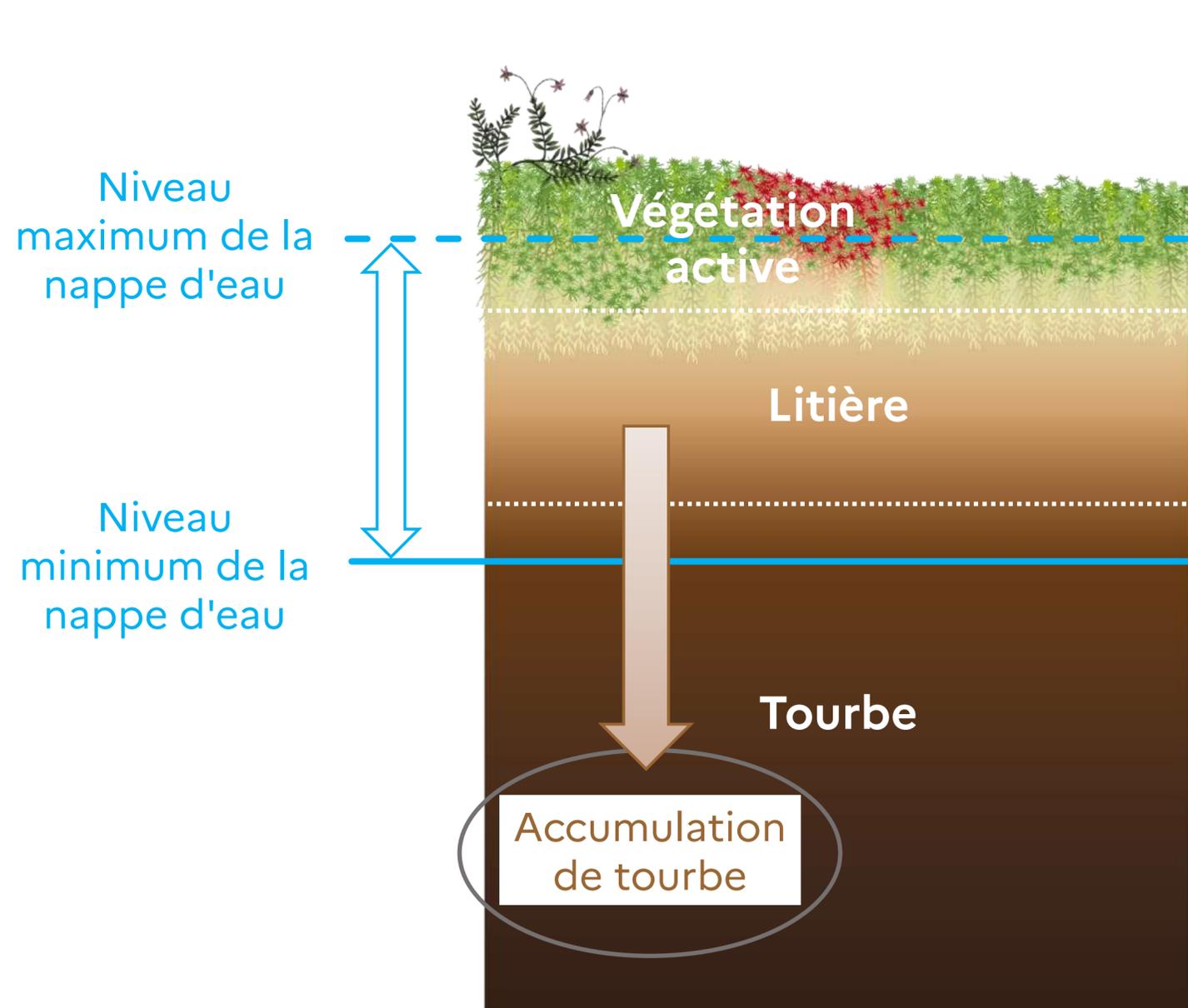


Schéma général de la dynamique du carbone dans les tourbières

- Bilan total -

Le bilan carbone doit être calculé de la façon suivante :

$$\text{CO}_2 \text{ stocké} + \text{CH}_4 \text{ émis} + \text{C-DOC} = \text{Bilan carbone net}$$



↳ **Accumulation de tourbe**

↳ Lorsqu'il est observé sur le temps long (> 100 ans), le bilan carbone net correspond au taux d'accumulation de la tourbe.

↳ La tourbe s'accumule généralement de un à quelques millimètres par an (environ 1 mètre par millénaire).



Schéma général de la dynamique du carbone dans les tourbières

- Synthèse -

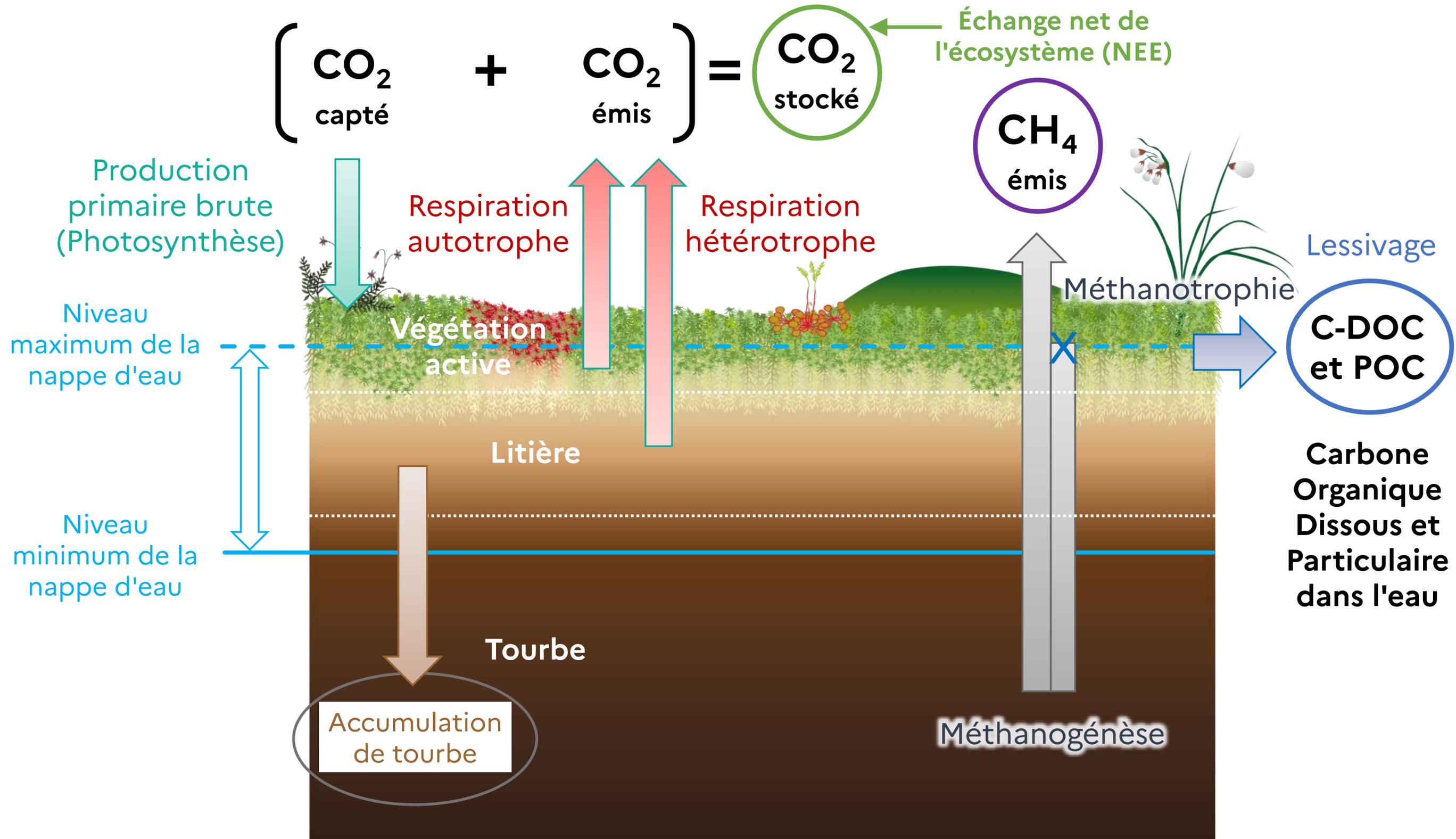
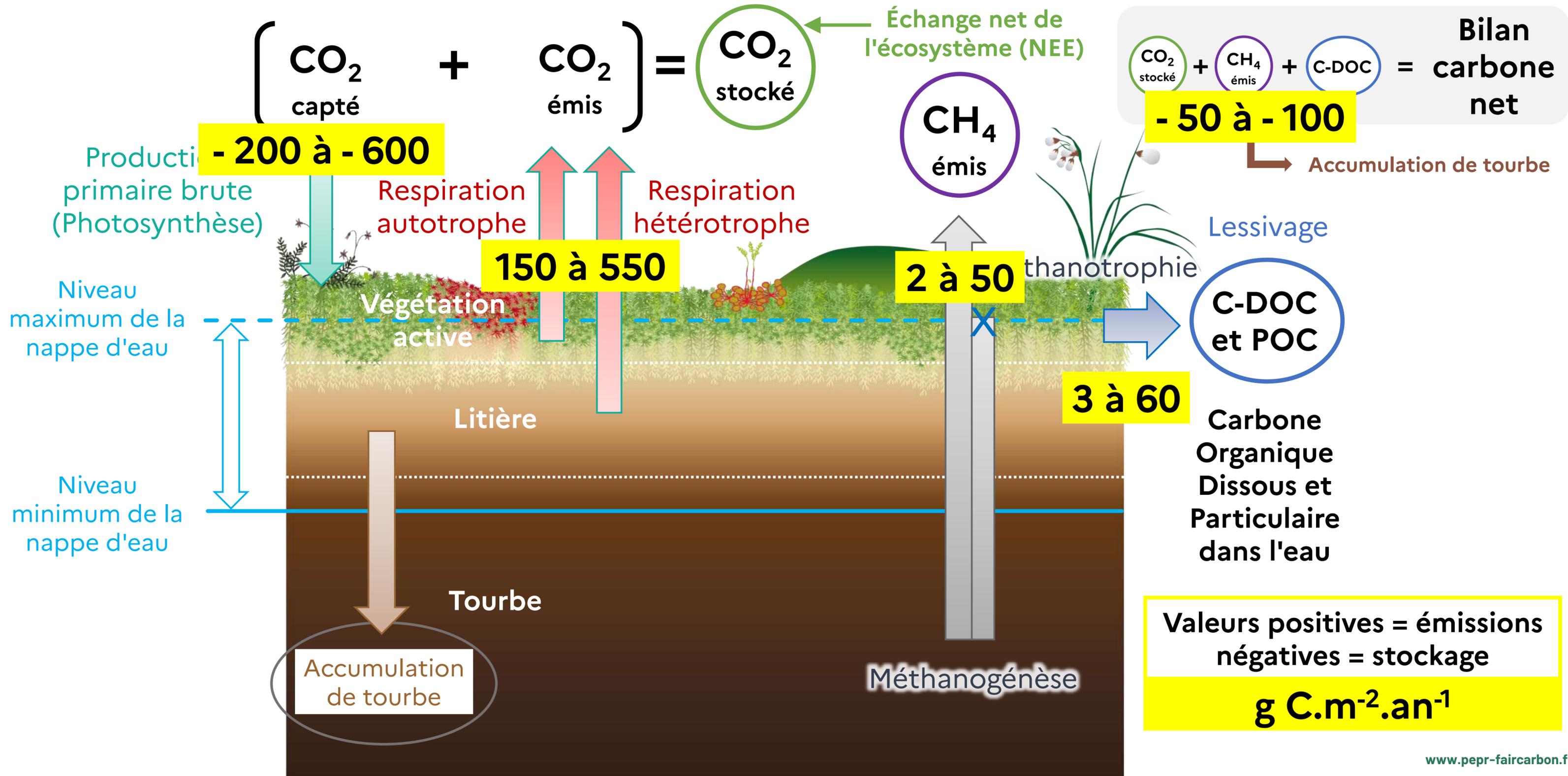




Schéma général de la dynamique du carbone dans les tourbières

- Synthèse -





TOURBIÈRES

4. LEVIERS D'ACTION POUR LIMITER LES ÉMISSIONS DE CARBONE



FRANCE 2030
PROGRAMME DE RECHERCHE
CARBONE ET ÉCOSYSTÈMES CONTINENTAUX

www.pepr-faircarbon.fr

Novembre 2024

Cette image a été générée avec l'aide de l'IA (OpenAI)



Les tourbières continuent d'accumuler de la matière organique à l'échelle mondiale.

La protection des tourbières non perturbées est importante pour maintenir leur fonction de puits de carbone.

Il est envisageable de favoriser l'apparition de nouvelles tourbières, mais l'effet sur le bilan carbone de la planète serait négligeable.

Le **bilan net de carbone** des tourbières mondiales équivaut à une séquestration de carbone d'environ **0,14 Gt.an⁻¹**.

- soit environ 1 % des émissions issues de la combustion des énergies fossiles mondiales ;
- entre 3 et 10 % de la fonction puits de carbone des écosystèmes terrestres naturels (LOISEL *et al.*, 2021).

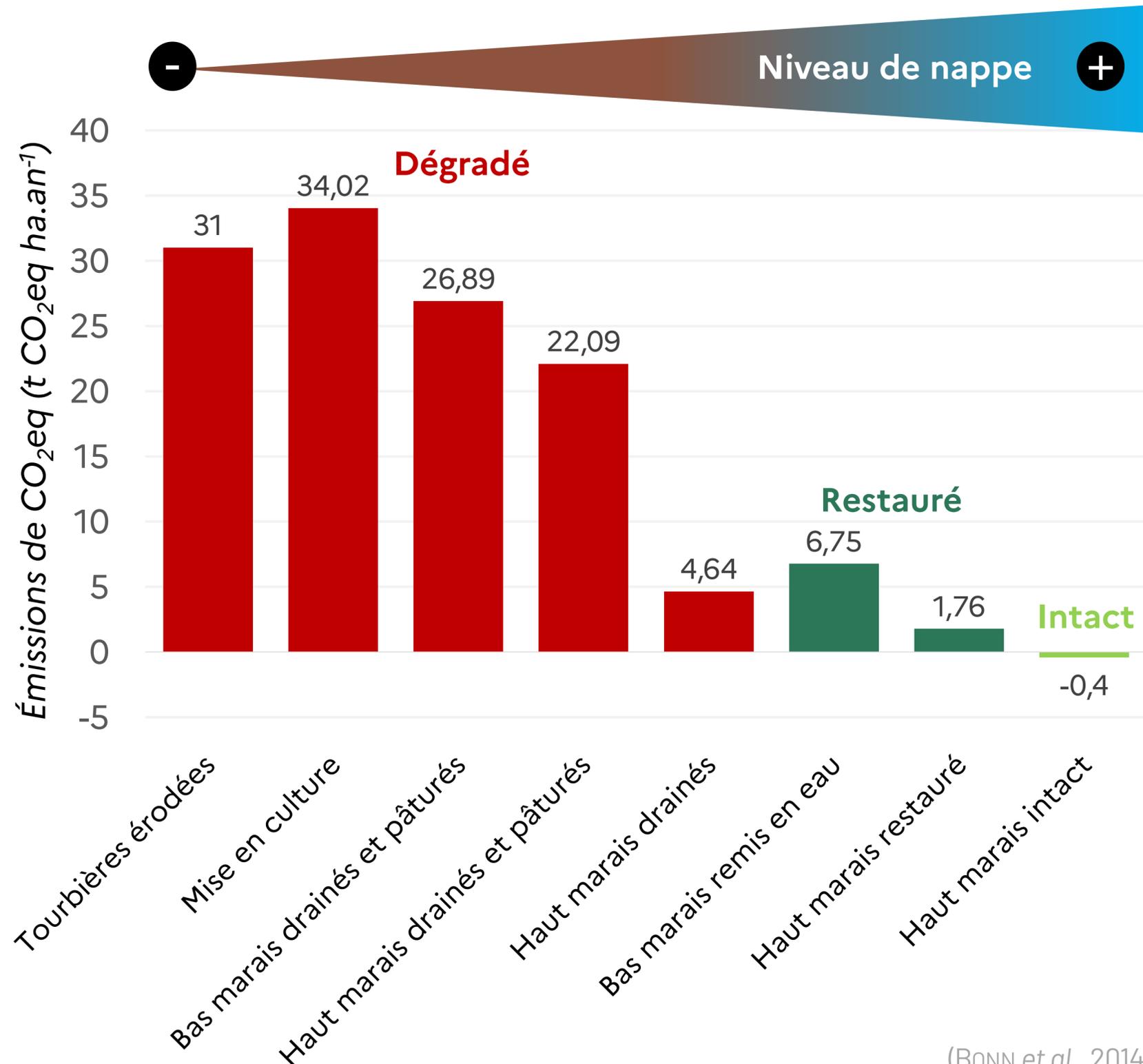


Tourbière de Terre de feu (Argentine)

© GILBERT Daniel



Les tourbières dégradés émettent de très grandes quantités de carbone



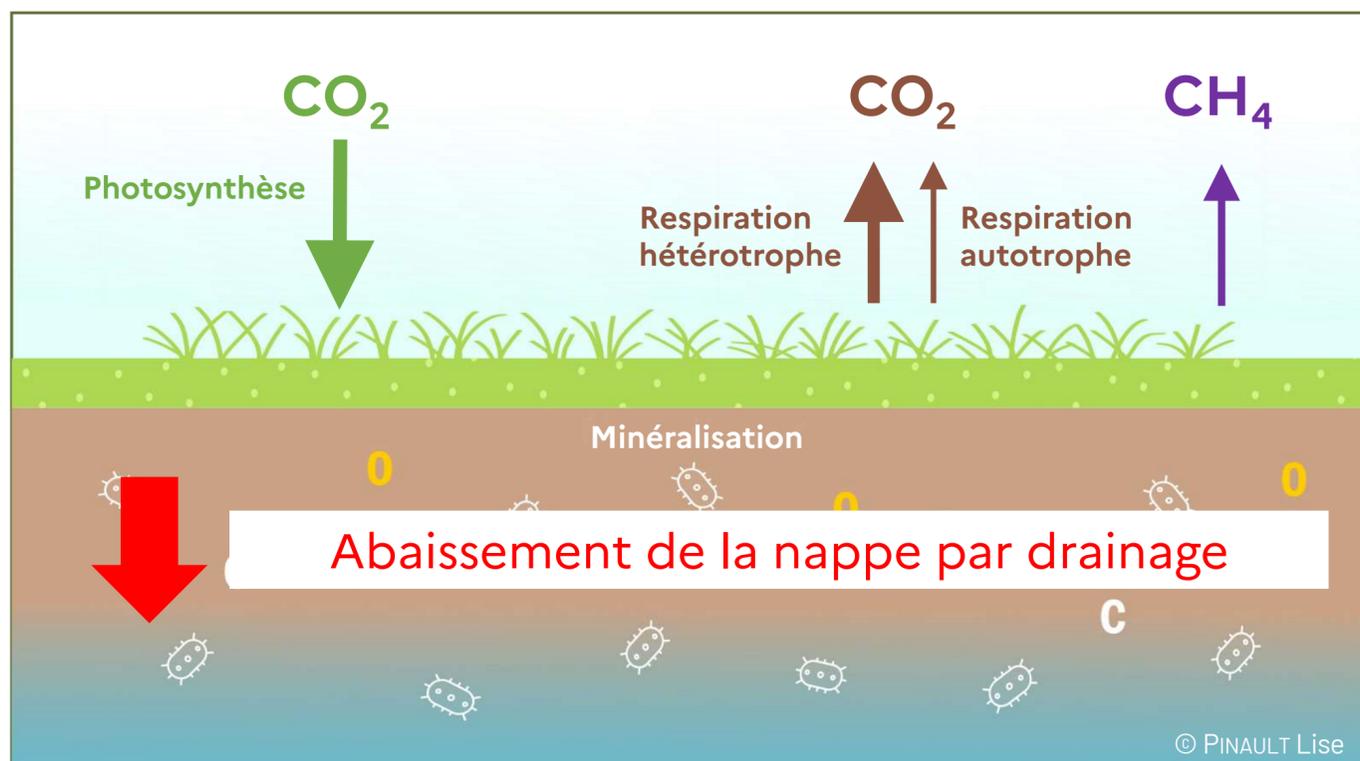
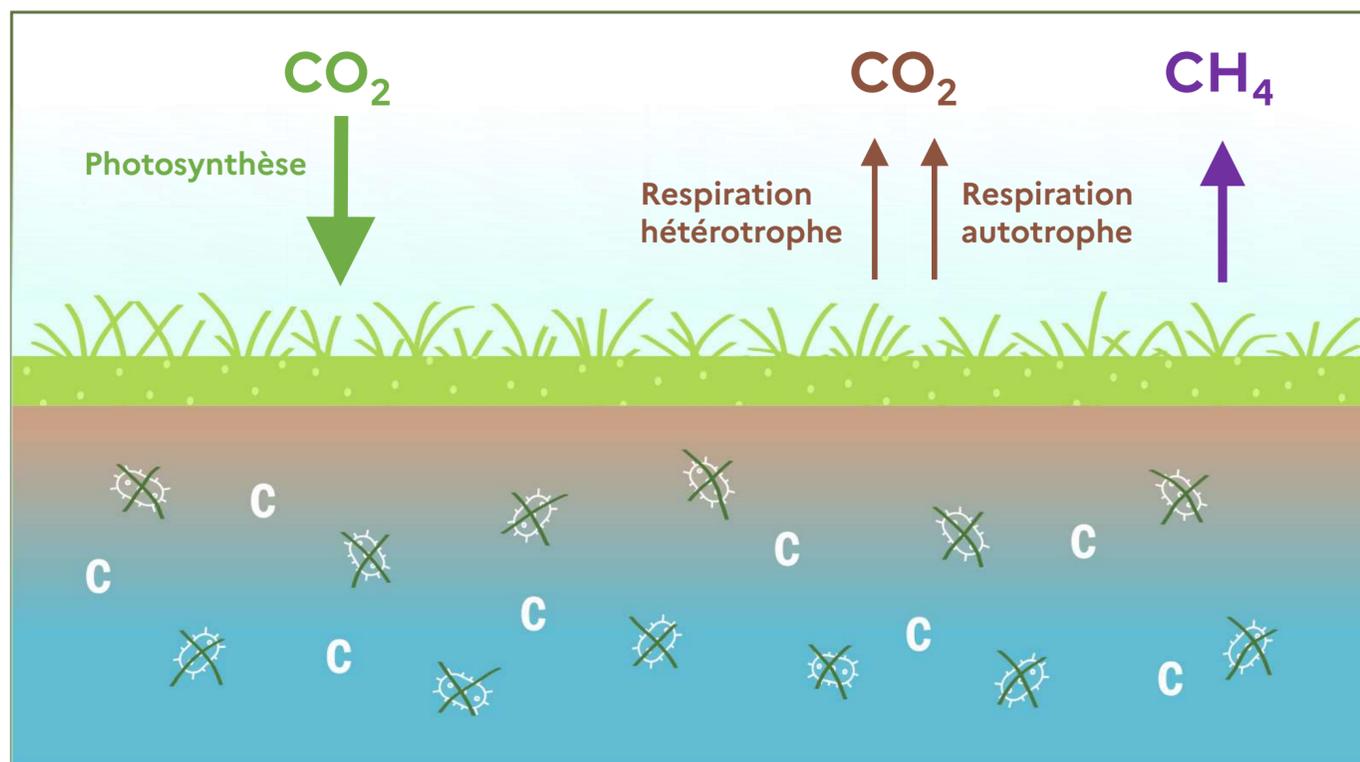
Dans les tourbières drainées, la respiration augmente fortement conduisant à d'importantes émissions de CO₂.

Ces émissions concernent principalement les tourbières exploitées pour la tourbe et les tourbières à usage agricole (prairie/culture) et forestiers.

→ L'enjeu principal est donc de restaurer les tourbières drainées.



Quels sont les effets de la dégradation des tourbières ?

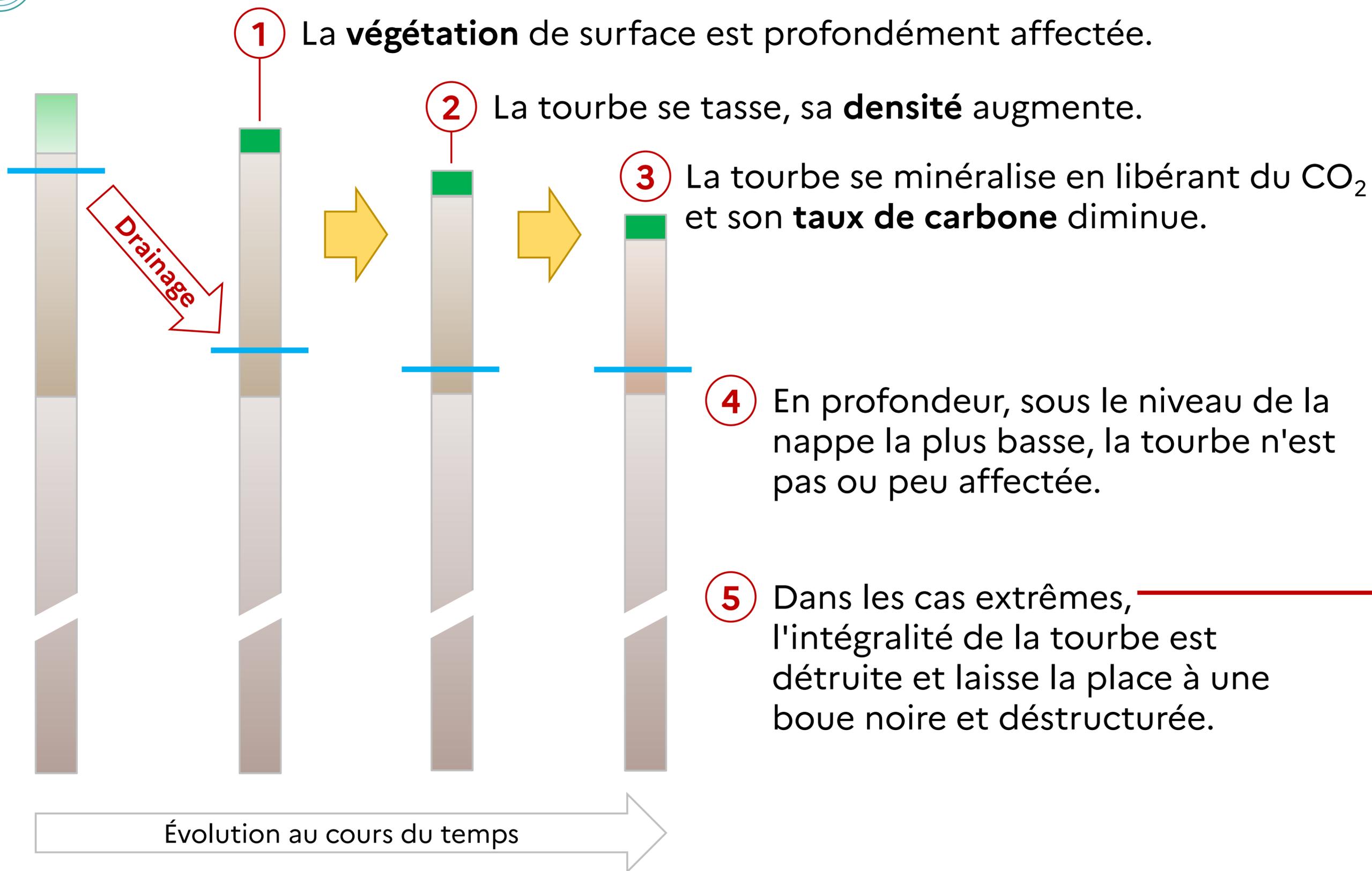


Le drainage est toujours une condition préalable à la modification de fonctionnement d'une tourbière.

Dans la partie de la tourbe qui n'est plus immergée dans l'eau, **l'activité microbienne s'intensifie**, la matière organique est décomposée plus rapidement.

➔ Le drainage entraîne une augmentation très forte de la respiration hétérotrophe et donc **des émissions de CO₂**.

D'autres perturbations peuvent s'ajouter : pâturage, labour, apports d'éléments minéraux, fertilisations qui accentuent les émissions.



Tourbe très dégradée dans le marais Poitevin

© GILBERT Daniel



À l'échelle mondiale, les émissions de GES issues des tourbières dégradées sont estimées à environ **2 Gt de CO₂, soit 5 % des émissions anthropiques totales de gaz à effet de serre.**

C'est plus que l'ensemble des émissions liées au trafic aérien mondial.

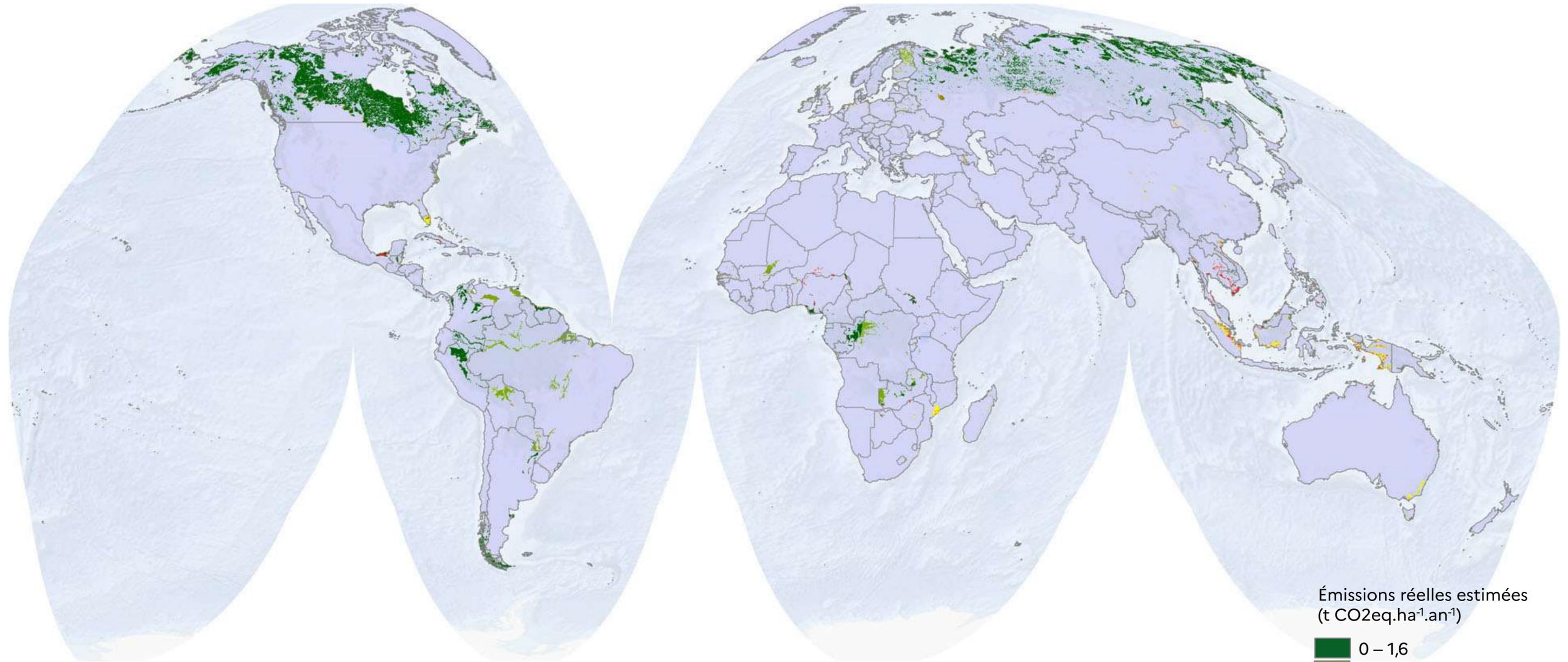
En France, ces émissions sont probablement **de l'ordre de 1 millions de tonnes de CO₂ par an**, si l'on considère que la plupart des tourbières sont plus ou moins affectées par le drainage et en faisant l'hypothèse d'une émission moyenne de 10 t CO₂ par hectare (100 000 hectares x 10 t).

(LEIFIELD & MENICHETTI, 2018 ; PINAULT & GILBERT, en cours)



**Tourbe dégradée dans le Cotentin
(France, 50)**

© GILBERT Daniel



Émissions réelles estimées
(t CO₂eq.ha⁻¹.an⁻¹)

- 0 – 1,6
- 1,7 – 7,8
- 7,8 – 21,9
- 21,9 – 40,2
- 40,2 – 58,2

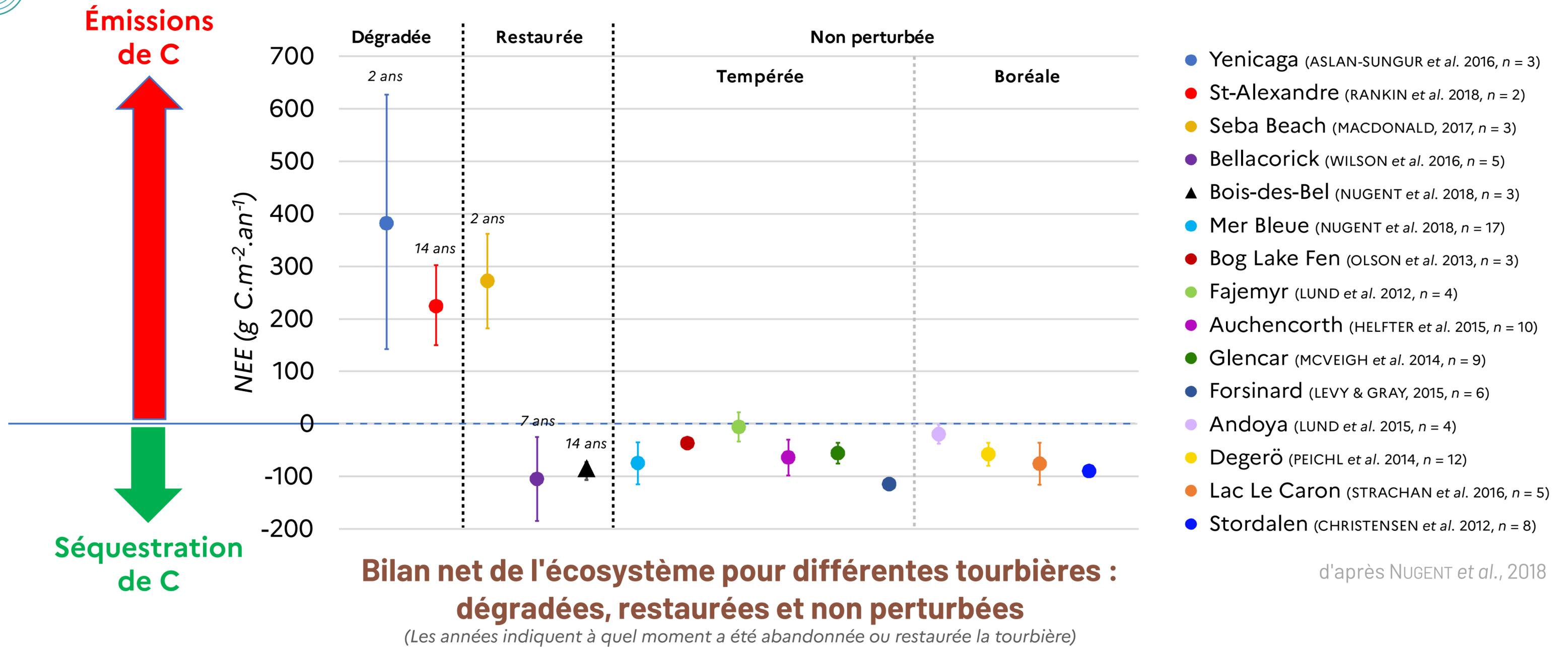
Esri, DeLorme, GEBCO, NOAA
NGDC et autres contributeurs

(LEIFIELD & MENICHETTI, 2018)

→ Émissions potentielles annuelles : les tourbières tropicales émettent plus de GES que les tourbières boréales car elles sont plus dégradées et parce que la décomposition microbienne reste élevée tout au long de l'année.



Restaurer, un moyen efficace pour stopper les émissions de carbone



➔ Quelques années après leur restauration, les tourbières peuvent redevenir des **puits de carbone**.



Comment restaurer les tourbières ?



La restauration des tourbières est un processus complexe.
Chaque tourbière est un cas particulier.

Certains gestionnaires de l'environnement sont spécialisés dans la restauration et peuvent faire appel à des entreprises disposant d'équipements adaptés au travail en zone humide.

La restauration commence toujours par une **étude préalable détaillée** du fonctionnement de la tourbière (notamment la topologie et de l'hydrologie).

Les travaux peuvent nécessiter des actions spécifiques de **génie écologique** :

- Défrichage ;
- Suppression de la couche de tourbe dégradée ;
- Comblement de drains ;
- Mise en place de cloisons étanches en bois ou en acier ;
- Reméandrements de cours d'eau ;
- Implantation de végétation.



Pose d'une cloison métallique
Tourbière de Frasne (France, 25)

© GILBERT Daniel



Création d'un talus de tourbe
Tourbière de Frasne (France, 25)

© GILBERT Daniel



Exemple du contexte britannique

(MOXEY & MORAN, 2014)

COÛTS TECHNIQUES

£ 200/ha to £ 10 000/ha
Soit 234 à **11 715 €**/ha

COÛTS DE SUIVI

£ 25/ha to £ 400/ha
Soit 29 à **469 €**/ha

Les **coûts de restauration** des tourbières se décomposent :

- en coûts administratifs (constitution du dossier),
- en coûts techniques (restauration proprement dite),
- en coûts d'opportunité (indemnisation des agriculteurs par exemple),
- en coûts de suivi (vérification de l'efficacité des travaux),
- et parfois en coûts d'acquisition (achat de la terre).

Ces coûts sont généralement pris en charge dans le cadre de programmes financés par l'Europe, les collectivités ou des structures privées (fondations). Ils sont très variables selon les tourbières.

De nouveaux outils sont en cours de construction pour faciliter le financement de la restauration des tourbières par des acteurs privés dans le cadre de la compensation volontaire des émissions de gaz à effet de serre (Label Bas Carbone Tourbières).



Quelle quantité de carbone serait-il possible de ne pas émettre dans les prochaines décennies pour les tourbières de France Métropolitaine ?



En considérant que l'assiette maximale est de l'ordre de grandeur de 1 millions de tonnes de CO₂ par an émis par les tourbières de France métropolitaine, il est envisageable d'agir prioritairement dans les milieux où **l'action sera la plus efficace** (c'est-à-dire dans les milieux les plus dégradés émettant de grandes quantités de CO₂).

Il n'existe pas encore de données détaillant précisément les actions à mettre en œuvre (« priorisation des actions »), mais si 30 % des tourbières à usage agricole étaient restaurées, cela représenterait un gain sans aucun doute **très supérieur à 100 000 tonnes de CO₂ par an.**

Il est très important de noter que restaurer une tourbière permet d'éviter **CHAQUE ANNÉE** que des gaz à effet de serre soient émis. Restaurer 30 % des tourbières agricoles, soit seulement 20 000 hectares, pourrait empêcher d'émettre plus de 3 millions de tonnes de CO₂ pour les 30 prochaines années.

De plus, restaurer les tourbières permet de **stocker efficacement de l'eau** d'excellente qualité et de **préserver la biodiversité.**



Tourbe extraite de la tourbière de Baupte dans le Cotentin (France, 50)

© GILBERT Daniel



TOURBIÈRES

5. CONCLUSIONS



PROGRAMME
DE RECHERCHE
CARBONE ET
ÉCOSYSTÈMES
CONTINENTAUX

www.pepr-faircarbon.fr

Novembre 2024

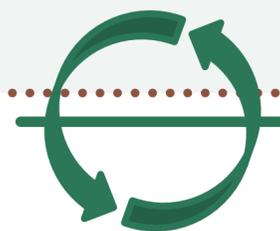
Cette image a été générée avec l'aide de l'IA (OpenAI)



Les tourbières sont les écosystèmes qui concentrent **le plus de carbone** par hectare.



En accumulant régulièrement du carbone atmosphérique sous forme de tourbe, **les tourbières contribuent à très long terme à refroidir le climat.**



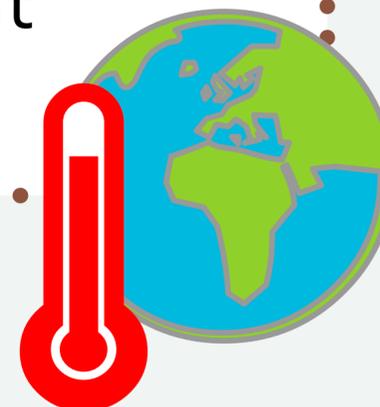
Elles couvrent 3 % des terres émergées mais représentent **1/3 du carbone des sols.**



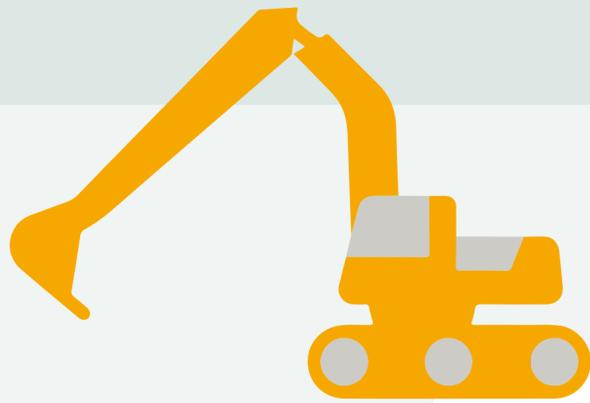
Il s'agit pour l'essentiel de carbone fossile qui s'est accumulé aux cours des derniers millénaires.



Lorsqu'elles sont **drainées, les tourbières émettent des quantités très importantes de CO₂** dans l'air et contribuent au réchauffement climatique.

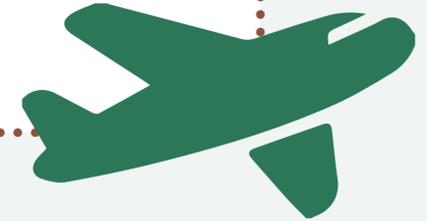


Points essentiels à retenir



Restaurer les tourbières pour limiter ou stopper les émissions de CO₂ est très efficace et souvent peu coûteux.

Les émissions des tourbières mondiales sont plus élevées que les émissions liées au trafic aérien.

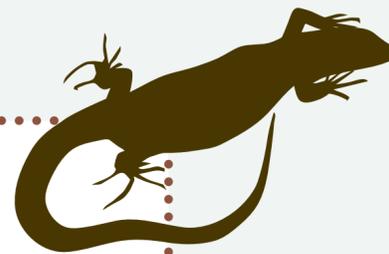


Restaurer les tourbières permet aussi d'améliorer le stockage de l'eau.



Il y a urgence : avec le changement climatique, les émissions de gaz à effet de serre issues des tourbières vont s'accélérer.

Restaurer les tourbières contribue à la biodiversité.



-  BONN A., REED M.S., EVANS C.D., JOOSTEN H., BAIN C., FARMER J. *et al.* (2014). Investing in nature: Developing ecosystem service markets for peatland restoration. *Ecosystem Services* 9: 54-65. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.06.011>
-  CUBIZOLLE H. (2019). Les tourbières et la tourbe. Tec and Doc. Lavoisier, Paris, France, 419 p. + planches.
-  JOOSTEN H. & CLARKE D. (2002). *Wise use of mires and peatlands - Background and principles including a framework for decision-making*. International Mire Conservation Group and International Peat Society, 304 p. https://www.imcg.net/modules/download_gallery/dlc.php?id=04091835
-  LEIFELD J. & MENICHETTI L. (2018). The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. *Nature Communications* 9, 1-7. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03406-6>
-  LOISEL J. *et al.* (2021). Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink. *Nature Climate Change* 11: 70-77. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00944-0>
-  PAGE S.E., RIELEY J.O. & BANKS C.J. (2011). Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool. *Global Change Biology* 17(2): 798-818. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02279.x>
-  PARISH F., SIRIN A., CHARMAN D., JOOSTEN H., MINAYEVA T. & SILVIUS M. & STRINGER L. (2008). *Assessment on peatlands, biodiversity and climate change: Main Report*. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen, 179 p. <https://globalclimateactionpartnership.org/resource/assessment-on-peatlands-biodiversity-and-climate-change/>
-  PINAULT L., PILLOIX M., BERNARD G., JOLY D., GOGO S., MARTIN E. & GILBERT D. (2023). The 1949 Atlas of French peat deposits, a starting point for a national inventory of peatlands. *Soil Use and Management* 39: 1040-1056. <https://doi.org/10.1111/sum.12919>
-  TANNEBERGER F., TEGETMEYER C., BUSSE S., BARTHELMES A. *et al.* (2017). The peatland map of Europe. *Mires and Peat* 19, 1-17. <http://mires-and-peat.net/pages/volumes/map19/map1922.php>
-  United Nations Environment Programme. (2022). *Global Peatlands Assessment: The State of the World's Peatlands*. Global Peatlands Initiative. United Nations Environment Programme, Nairobi, 418 p. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/41222>
-  ZINCK J.A. & HUBER O. (2011). *Peatlands of the Western Guayana Highlands, Venezuela. Properties and Paleogeographic Significance of Peats*. Ecological Studies 217, Springer Berlin, Heidelberg, 295 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20138-7>