

Webinaire « Carbone et zones humides »

Restitution de l'étude générale et prospective

Lundi 15 décembre 2025

Lucas DEGOS, Chef de projet carbone et agroécologie au Forum des Marais Atlantiques

Bastien CHARRIER, chargé de mission au Forum des Marais Atlantiques

Programme du webinaire



- Introduction – *20 min*
- Éléments de connaissances sur le carbone et les gaz à effet de serre en zones humides – *60 min*
- Enquête sur les perceptions, les besoins et les attentes autour du carbone en zones humides – *40 min*
- Perspectives pour une meilleure prise en compte des zones humides de la fonction climatique des zones humides dans les politiques publiques – *30 min*

Introduction

- ADEME – *Sylvain Rullier, ingénieur sol, agriculture et climat*



- WWF France – *Raphaël Vendé, chargé de projet zones humides*



Introduction



Le Forum des Marais Atlantiques (bientôt Forum des Milieux Humides)



Syndicat mixte ouvert créé à la fin des années 90



Pôle-relais
Zones Humides

Animation du Pôle-relais zones humides de l'Atlantique, de la Manche et de la Mer du Nord depuis 2000

4 axes d'actions majeurs :

- **Accroissement et diffusion des connaissances** sur les zones humides
- Appui méthodologique et technique aux porteurs de projets
- Animation de réseaux d'acteurs des milieux humides
- Expérimentation via des **projets de recherche** et développement

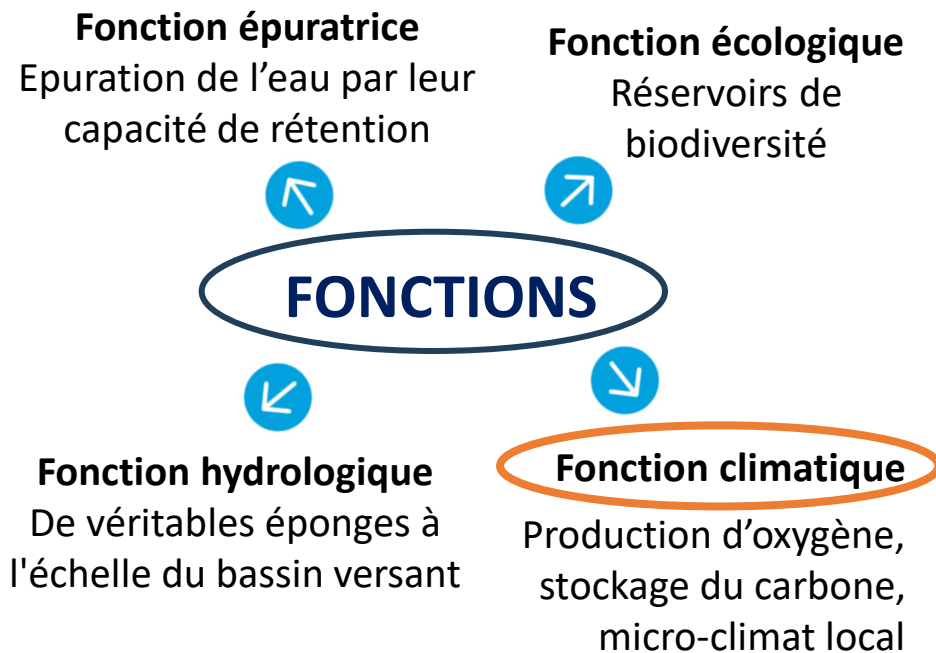


1 siège, 2 antennes, 1 bureau

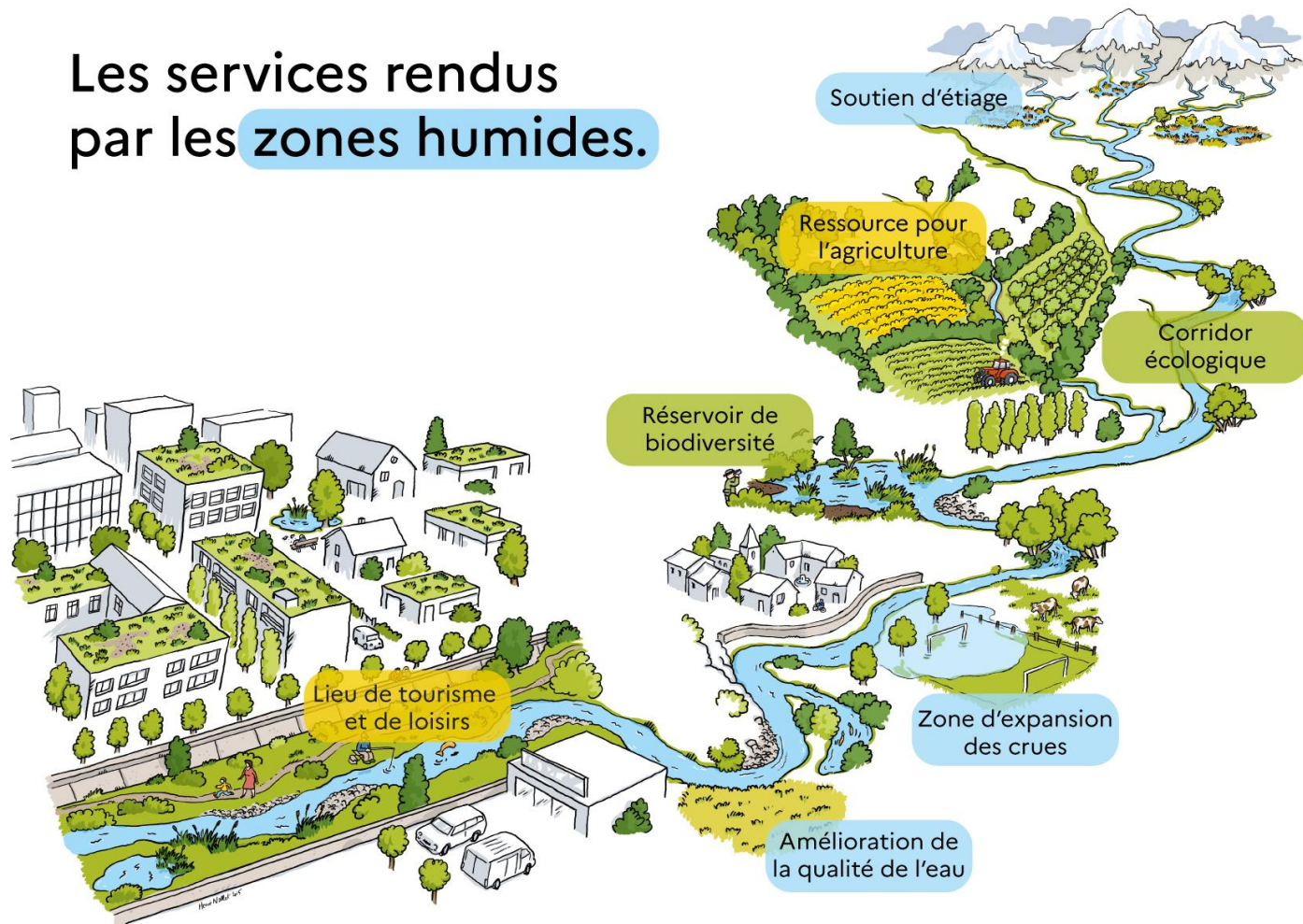
- Siège à Rochefort
- Antenne à Brest
- Antenne à Saint-Omer
- Bureau à Angers

Introduction

Fonctions et services rendus



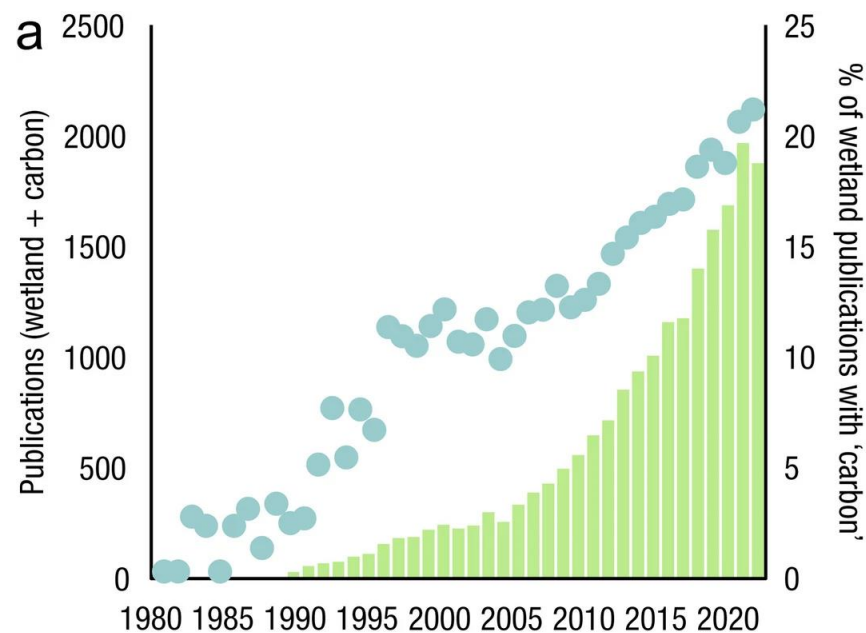
Les services rendus par les zones humides.



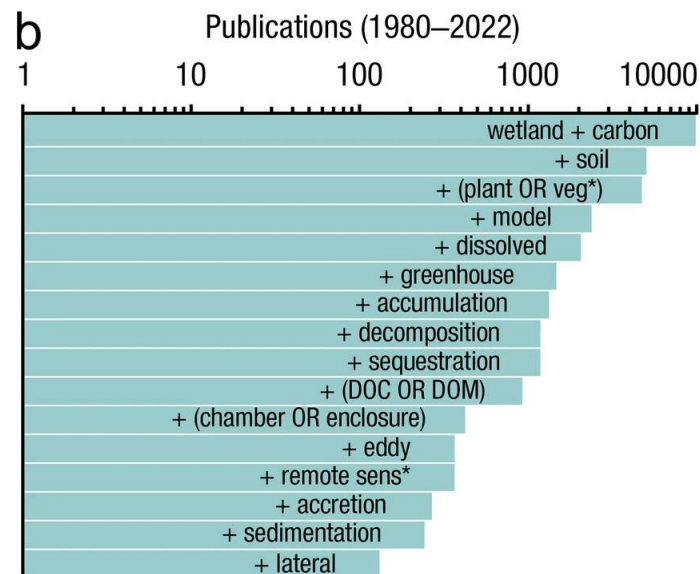
Introduction

Contexte

- Vers un intérêt croissant des zones humides pour leur intérêt climatique dans le cadre des politiques publiques (PAC, EPA, LIFE « Climat », Comptabilité carbone, 4^{ème} PNMH, ANR – PEPR FairCarbon)



Bansal et al., 2023



Carbon pools and sequestration potential of
wetlands in the European Union



Authors:

Dania Abdul Malak, Ana I. Marín, Marco Trombetti, Sonsoles San Román (Universidad de Málaga - UMA)

ETC/ULS consortium partners: Environment Agency Austria, ALTEERRA Research Institute, Department of Remote Sensing, Universidad de Málaga (UMA), Lechner Non-profit Ltd (space4environment, GSAT), The International Council for Local Environmental Initiatives (ICLI), Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), Ecologic

European Environment Agency
European Topic Centre on Urban,
Land and Soil Systems



Introduction



Contexte

- Recommandation d'effectuer des revues de littérature et le renforcement de données sur le sujet (EFESE, 2019)
- Y compris en tourbières et au sein de zones humides littorales (carbone bleu), le cycle du carbone et les relations GES et zones humides sont mal connus
- Sollicitation des collectivités territoriales et de gestionnaires sur le sujet notamment pour mieux valoriser les zones humides localement et orienter la gestion
- Implication du FMA dans des projets de recherche-action en lien avec le sujet (Tetrae MAVI, Buffer+) et dans de nombreux projets en lien avec la préservation, la gestion et la restauration des zones humides
- Réseau Partenarial de Données sur les Zones Humides administré par le Pôle SIG du FMA – intégration des inventaires zones humides en France et mise à disposition de données liées aux zones humides

Objectifs de l'étude

- Rassembler et synthétiser la connaissance existante autour du carbone et des GES en zones humides (littérature grise, littérature scientifique, française et anglo-saxonne) - Axe 1
- Identifier les manques de connaissances et les incertitudes en vue de l'élaboration de programmes de recherche appliquée futurs – Axe 3
- Transférer la connaissance existante et la rendre accessible auprès de divers acteurs du territoire (collectivités, gestionnaires) - Axe 1 et 2
- Identifier les besoins, cerner les attentes et les perceptions des acteurs des territoires – Axe 2
- Préfigurer le développement d'outils opérationnels ou contribuer à l'amélioration d'outils existants visant à mieux prendre en compte les zones humides pour leur rôle d'atténuation du changement climatique – Axe 2 et 3



1^{ère} étude générale à finalité opérationnelle et prospective sur 1 an à partir de janvier 2025

Introduction

OBJECTIFS	ACTIONS DU PROJET	Période de réalisation
Axe 1 : Synthétiser les connaissances existantes relatives aux relations entre GES et zones humides		
Rassembler et synthétiser la connaissance existante autour du carbone et des GES en zones humides (littérature grise, littérature scientifique, française et anglo-saxonne)	1.1 Etat de l'art des connaissances sur GES selon les différentes typologies de zones humides rencontrées en métropole	1 ^{er} trimestre – 2 ^{ème} trimestre
	1.2 Alimentation bibliographique de centres de ressources (dont celui du FMA)	En continu
Axe 2 : Améliorer le transfert et l'appropriation de connaissances sur GES et zones humides auprès des acteurs des territoires		
Identifier les besoins, cerner les attentes et les perceptions des acteurs des territoires	2.1 Mieux comprendre les attentes, les connaissances et les perceptions des acteurs des territoires sur cette thématique via des entretiens ciblés et préfigurer une dynamique collective à l'échelle interrégionale	1 ^{er} trimestre – 2 ^{ème} trimestre
Transférer la connaissance existante et la rendre accessible auprès de divers acteurs du territoire (collectivités, gestionnaires) Préfigurer le développement ou contribuer à l'amélioration d'outils visant à mieux prendre en compte les zones humides pour leur rôle climatique	2.2.1 Produire des documents de synthèse à destination des acteurs de terrains (techniciens, conseillers agricoles) et des décideurs 2.2.2 Ebauche de réflexions pour mieux intégrer les zones humides dans les politiques publiques climatiques et les valoriser via des approches SIG	2 ^{ème} trimestre – 3 ^{ème} trimestre – 4 ^{ème} trimestre
Transférer la connaissance existante et la rendre accessible auprès de divers acteurs du territoire	2.3. Valoriser les services rendus par les zones humides pour l'atténuation des changements climatiques, à travers une journée thématique et un webinaire	3 ^{ème} trimestre – 4 ^{ème} trimestre
Axe 3 : Identifier les lacunes de connaissances et prédéfinir un programme d'actions pluriannuel		
Identifier les manques de connaissances et les incertitudes en vue de l'élaboration de programmes de recherche appliquée	3.1. Identifier des lacunes de connaissances concernant les zones humides et les GES	2 ^{ème} trimestre – 3 ^{ème} trimestre – 4 ^{ème} trimestre
	3.2. Identifier des équipes de recherche et territoires souhaitant s'investir sur la problématique	3 ^{ème} trimestre – 4 ^{ème} trimestre
Préfigurer le développement d'outils opérationnels visant à mieux prendre en compte les zones humides pour leur rôle d'atténuation du changement climatique	3.3 Rédiger un préprojet incluant le développement d'outils opérationnels et identifier les modalités de financement possibles	3 ^{ème} trimestre – 4 ^{ème} trimestre

Introduction



Principaux livrables prévus

- Synthèse bibliographique sur le carbone et les gaz à effet de serre en zones humides
- Document de vulgarisation sur les mesures des stocks de carbone et des flux de GES en zones humides et résumé de la synthèse bibliographique
- Rapport sur les résultats et les enseignements tirés de l'enquête
- Note pour une meilleure intégration de la fonction climatique des zones humides dans les politiques publiques

Questions identifiées pour guider le bilan des connaissances

- ⇒ Quelles sont les relations existantes entre stock de carbone, stockage/séquestration de carbone, émission GES (CO_2 CH_4 N_2O) et zones humides?
- ⇒ Quels rôles de divers **facteurs d'influence** sur le stockage/séquestration de carbone, émission GES en zones humides ?
- ⇒ Comment évolue les GES et le cycle du carbone en zone humide en fonction de l'**état de conservation** du milieu considéré et des causes de **dégradation** des zones humides sur les stocks de carbone et les émissions de GES ?
- ⇒ Quelles valeurs moyennes de stock, de captation/séquestration de carbone et d'émissions GES (CO_2 CH_4 N_2O) peut-on attribuer par type de zone humide ?
- ⇒ Comment évolue les émissions de GES et le cycle du carbone en zone humide en fonction de la **gestion** et la **restauration** des zones humides ?

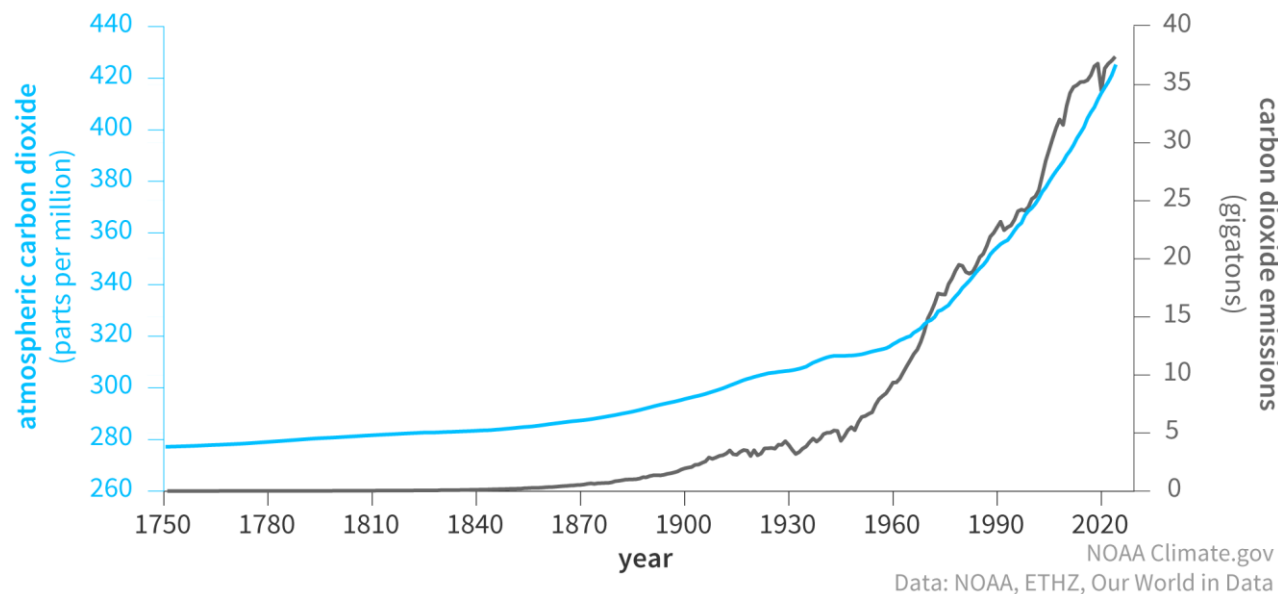
Synthèse bibliographique

Zones humides et climat

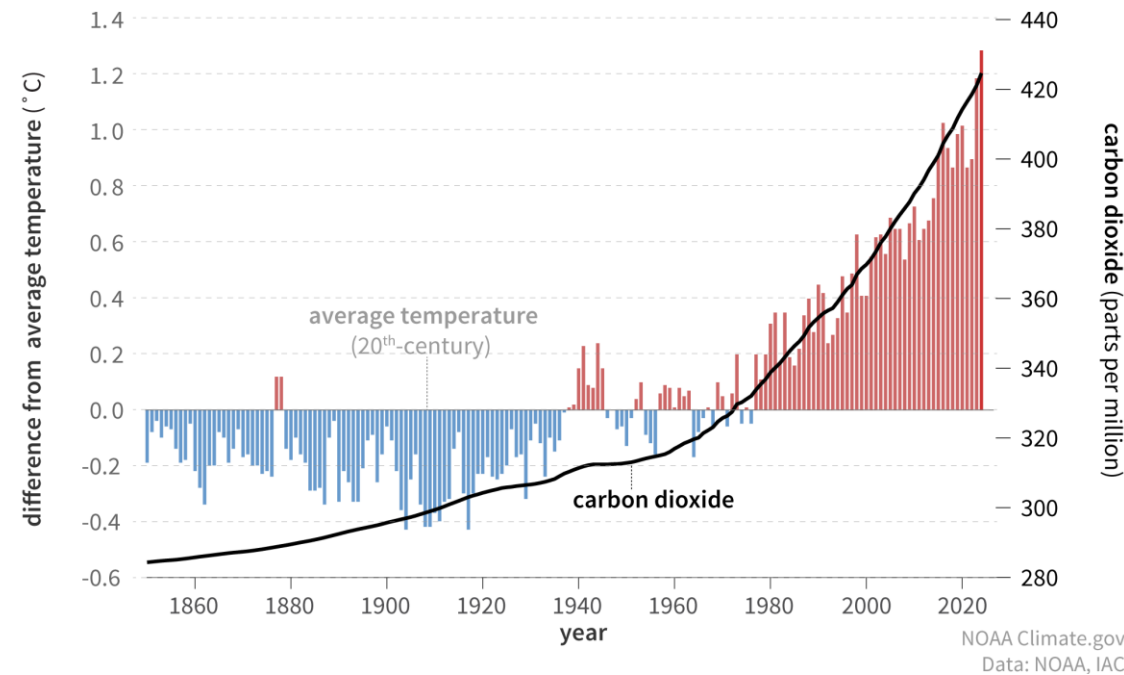
Le changement climatique

- L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 et N_2O) dans l'atmosphère à cause des activités humaines conduit au réchauffement climatique actuel et à venir

Global carbon dioxide emissions and atmospheric carbon dioxide (1751-2024)



Increases in atmospheric carbon dioxide and global temperature (1850-2024)



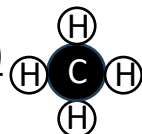
Zones humides et climat

Le dioxyde de carbone ou gaz carbonique



- Faible concentration dans l'atmosphère (0,0428%) mais responsable de 2/3 de l'augmentation de l'effet de serre et augmentation de la concentration atmosphérique de CO₂ de 42% entre 1850 et 2020
- Faible forçage radiatif mais durée de vie longue à très longue – pouvoir d'accumulation dans l'atmosphère à long terme

Le méthane (anciennement appelé « gaz des marais »)



- Très faible concentration dans l'atmosphère (0,0001935%) mais responsable de 20% environ de l'augmentation de l'effet de serre et augmentation de la concentration atmosphérique de CH₄ de 163% entre 1750 et 2020
- Forçage radiatif élevé mais durée de vie courte

Le protoxyde d'azote (aussi appelé « gaz hilarant »)



- Très faible concentration dans l'atmosphère (0,0000339%) mais responsable de 9% environ de l'augmentation de l'effet de serre et augmentation de la concentration atmosphérique de N₂O de 24% entre 1750 et 2020
- Forçage radiatif très élevé et durée de vie longue

Synthèse bibliographique

Zones humides et climat

GES et potentiel de réchauffement

Type de GES	Potentiel de réchauffement globale à 100 ans	Potentiel de réchauffement global à 20 ans	Durée de séjour dans l'atmosphère (en années)	Concentration dans l'atmosphère (ppm)
Dioxyde de carbone (CO ₂)	1	1	Plusieurs siècles	428
Méthane (CH ₄) non-fossile - biogénique	27	80	12	1,935
Protoxyde d'azote - Oxyde nitreux (N ₂ O)	273	273	110	0,339

Zones humides et climat

Notions clés liées au cycle du carbone

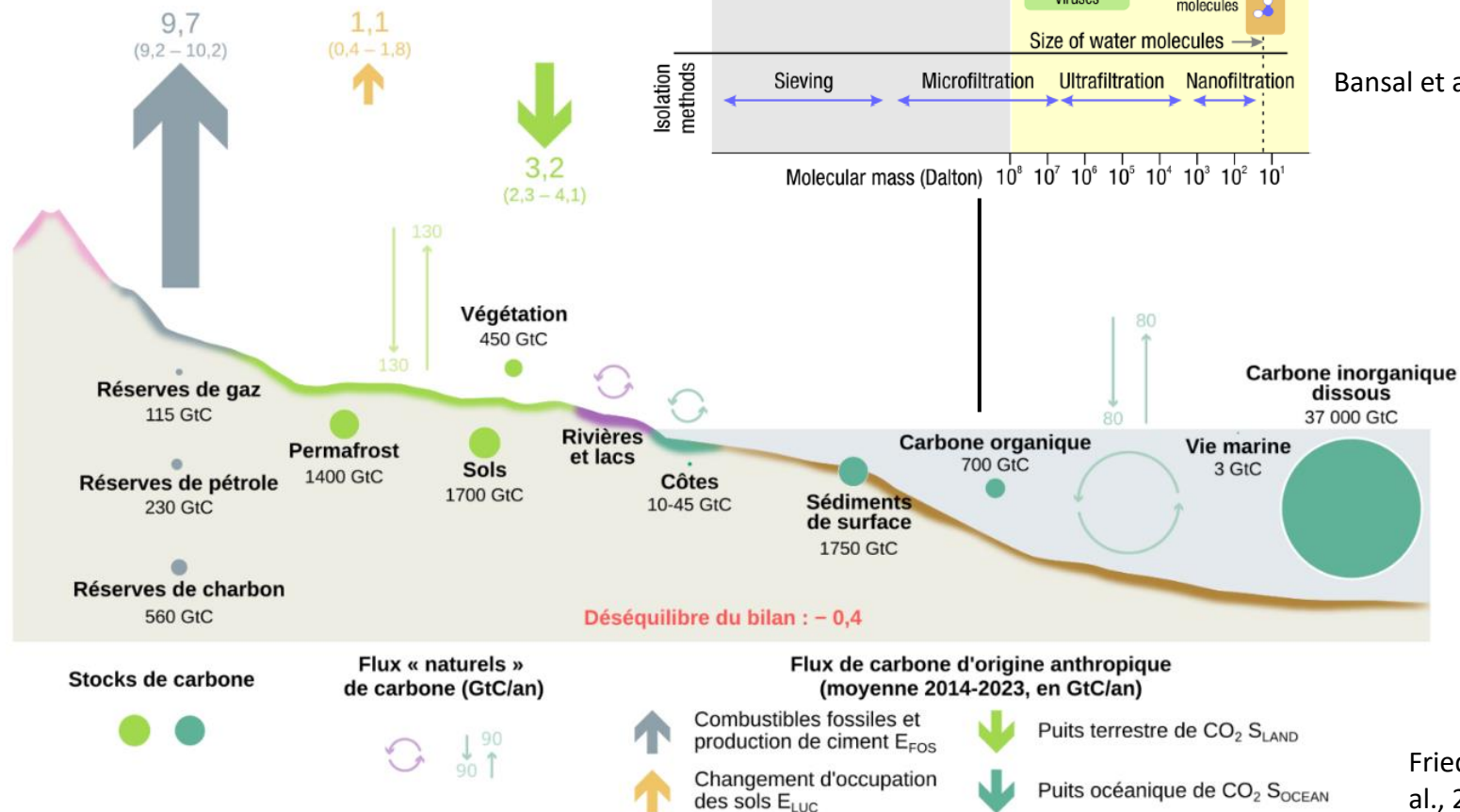
- **Réservoir de carbone** : **Compartiment** au sein duquel le carbone se trouve pour un temps donné
- **Stock de carbone** : **Quantité totale de carbone** présente dans un **réservoir** donné à un instant T
- **Flux de carbone/GES** : **Transferts** de carbone ou de GES d'un réservoir à un autre
- **Stockage de carbone** : Dynamique d'**augmentation du stock de carbone** pour un même réservoir au cours du temps, le déstockage correspond à la dynamique inverse.
- **Captation de carbone** : **Retrait de CO₂ de l'atmosphère** vers un réservoir à **court terme**, elle peut correspondre à différentes notions
- **Séquestration de carbone** : **Retrait net de CO₂ de l'atmosphère** vers un réservoir sur le **long terme**
- **Puits de carbone** : Ecosystèmes (puits naturels) ou systèmes (puits technologiques) présentant **un bilan positif pour l'atténuation du changement climatique** à plus ou moins long terme.

Synthèse bibliographique

Zones humides et climat

Cycle du carbone

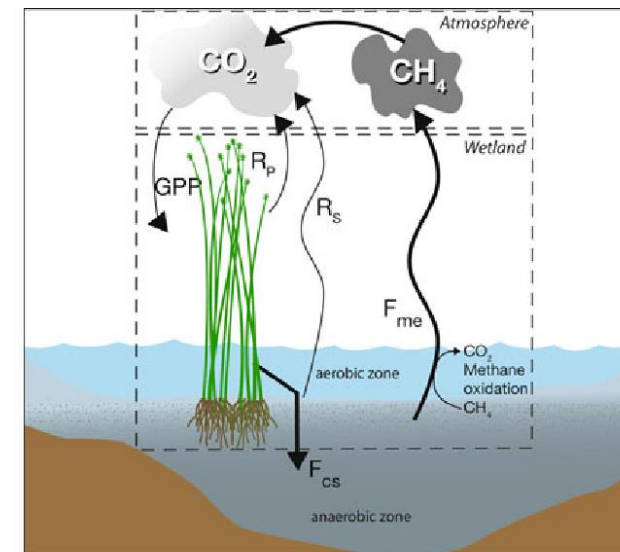
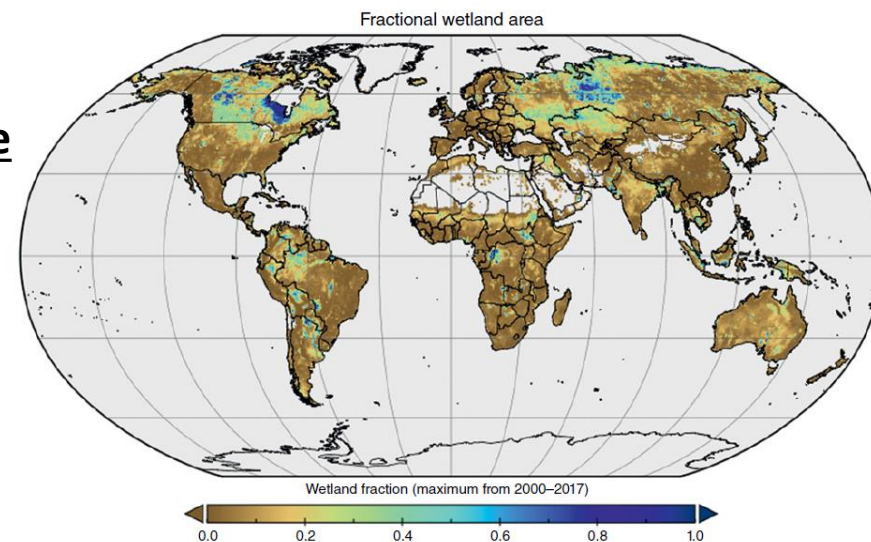
- Les zones humides des milieux d'interface entre lithosphère, hydrosphère, biosphère et atmosphère
- Différentes formes du carbone au cours du cycle : organique, inorganique, matière organique, dissoute, particulaire, gazeuse



Zones humides et climat

Les zones humides, des « hotspots » du cycle du carbone et de l'azote

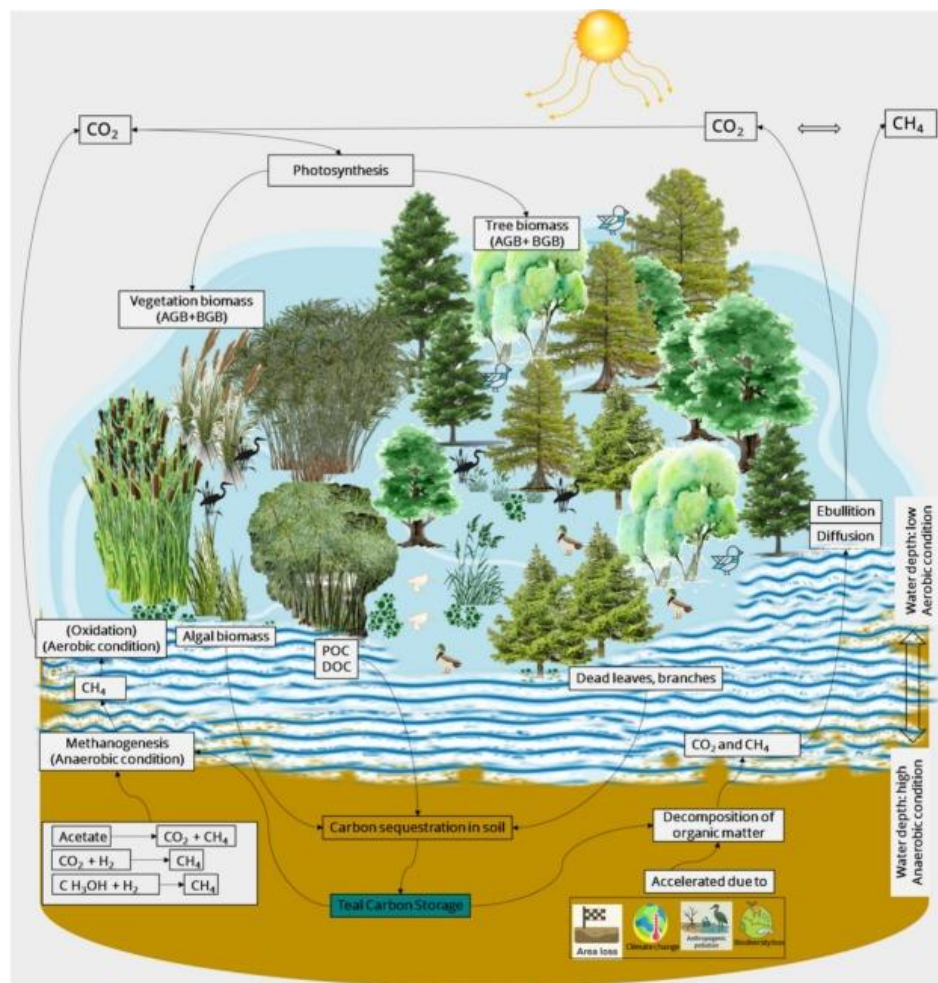
- La majorité des gains de carbone terrestres entre 1992 et 2019 dans les sols et les sédiments anaérobies en particulier les zones humides et les milieux aquatiques
- Les **zones humides** stockaient environ **25-33% du carbone organique des sols mondiaux** alors qu'elles représentent entre **2 et 8% des surfaces continentales**
- A surface égale, il s'agirait des **types d'écosystèmes aux stocks de carbone les plus importants** et parmi les **plus forts taux de séquestration de carbone**
- La production de méthane en zones humides correspondrait à environ **25% des émissions totales de CH₄** vers l'atmosphère
- Les zones humides jouent un **rôle déterminant dans le cycle de l'azote** au niveau mondial via l'assimilation azotée et la dénitrification, pouvant occasionner **l'émission de N₂O** dans certaines conditions
- Les zones humides en bon état seraient globalement des puits nets de GES



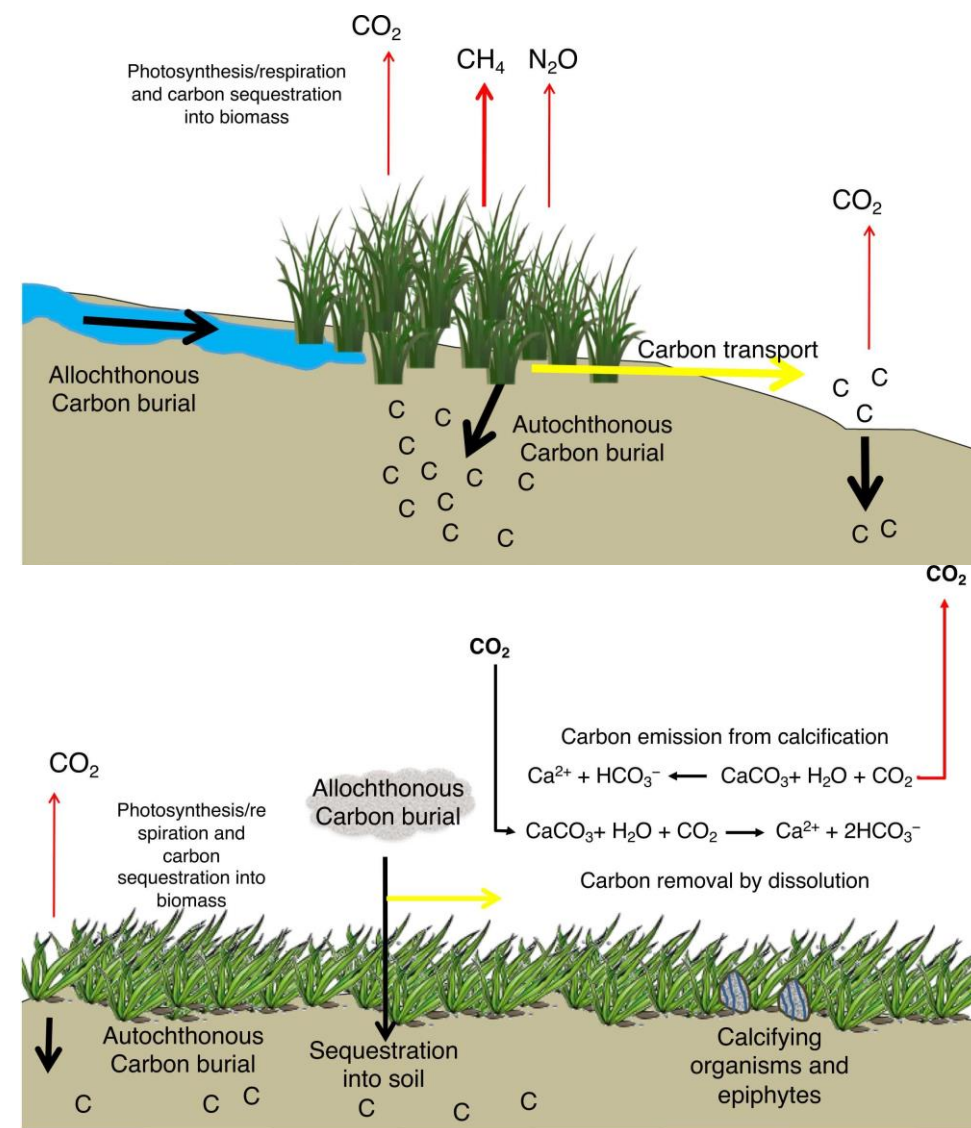
Synthèse bibliographique

Zones humides et climat

Les « couleurs » du carbone en zones humides



Kumar et al, 2025

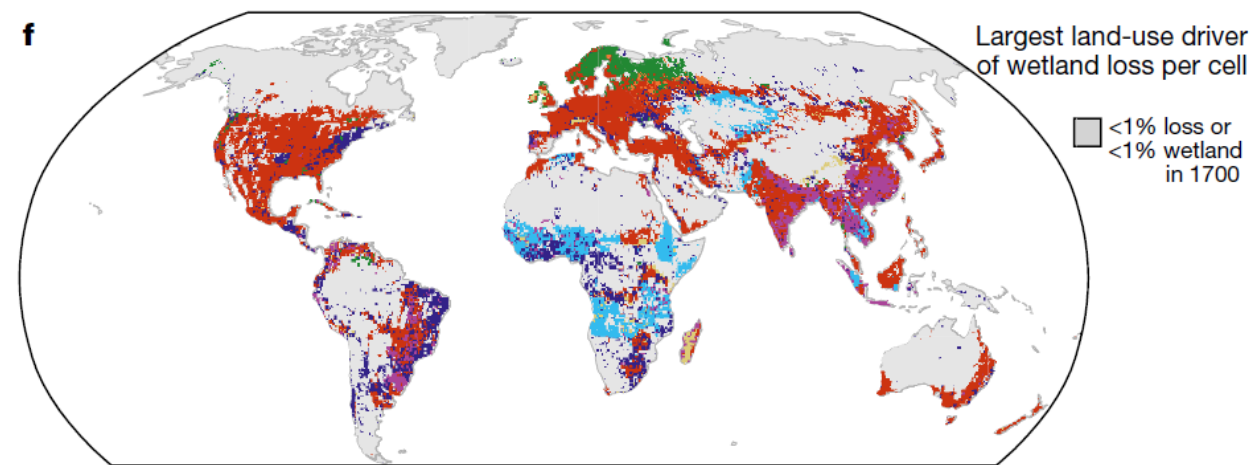
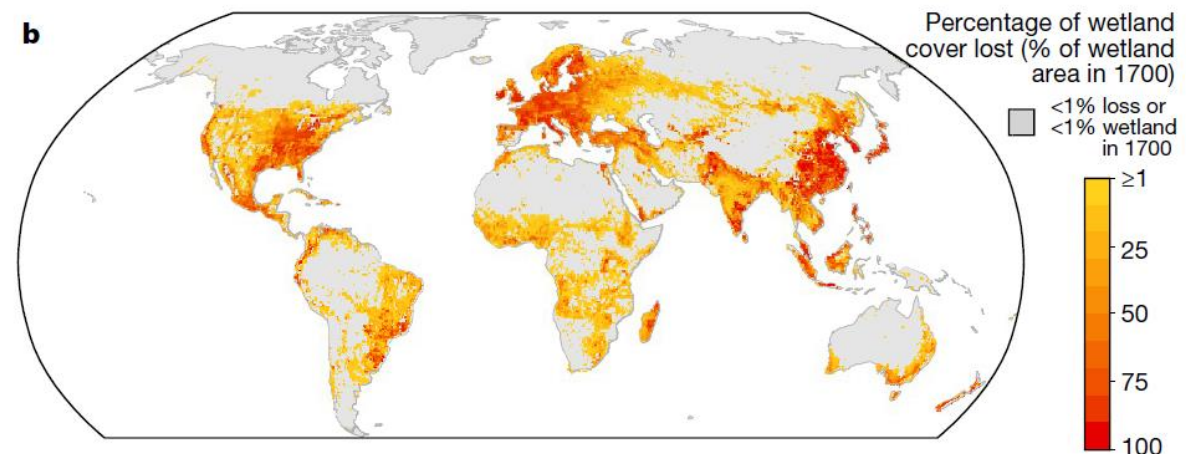
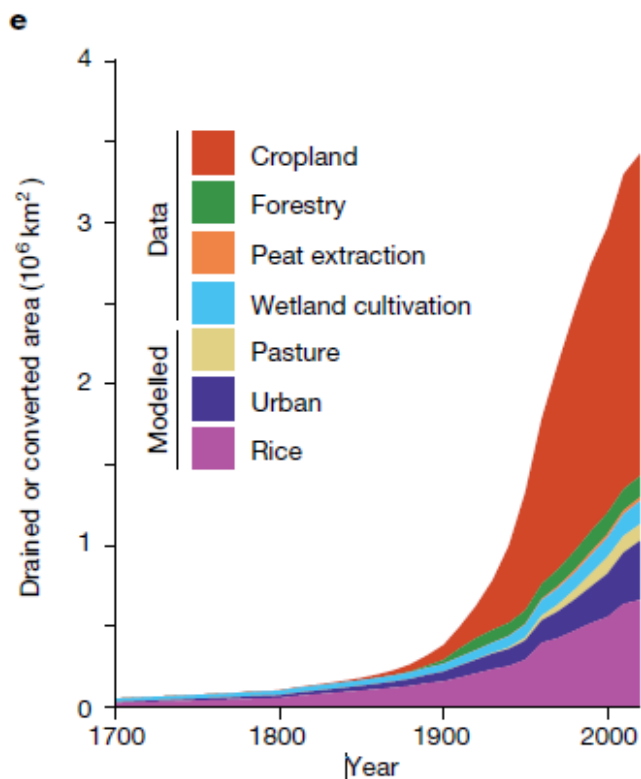


Howard et al, 2023

Zones humides et climat

Dégradation des zones humides

- 21% de pertes au niveau mondial depuis 1700 avec de fortes disparités régionales, en majorité liée à la mise en cultures

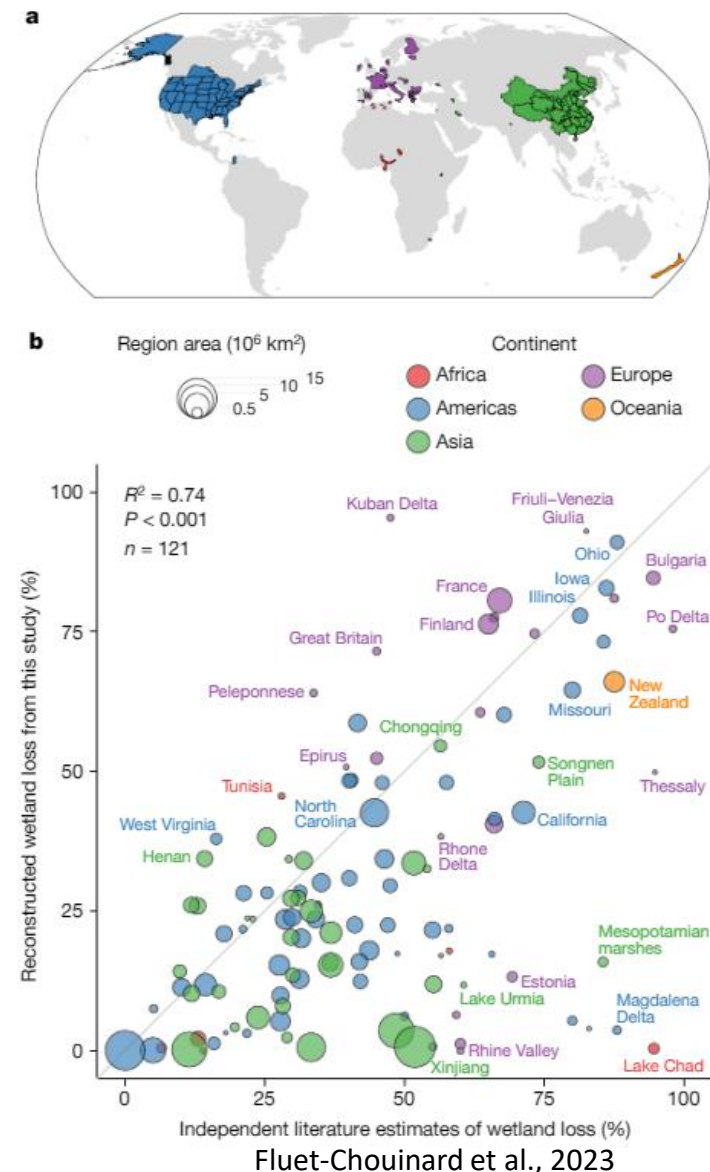


Synthèse bibliographique

Zones humides et climat

Dégradation des zones humides

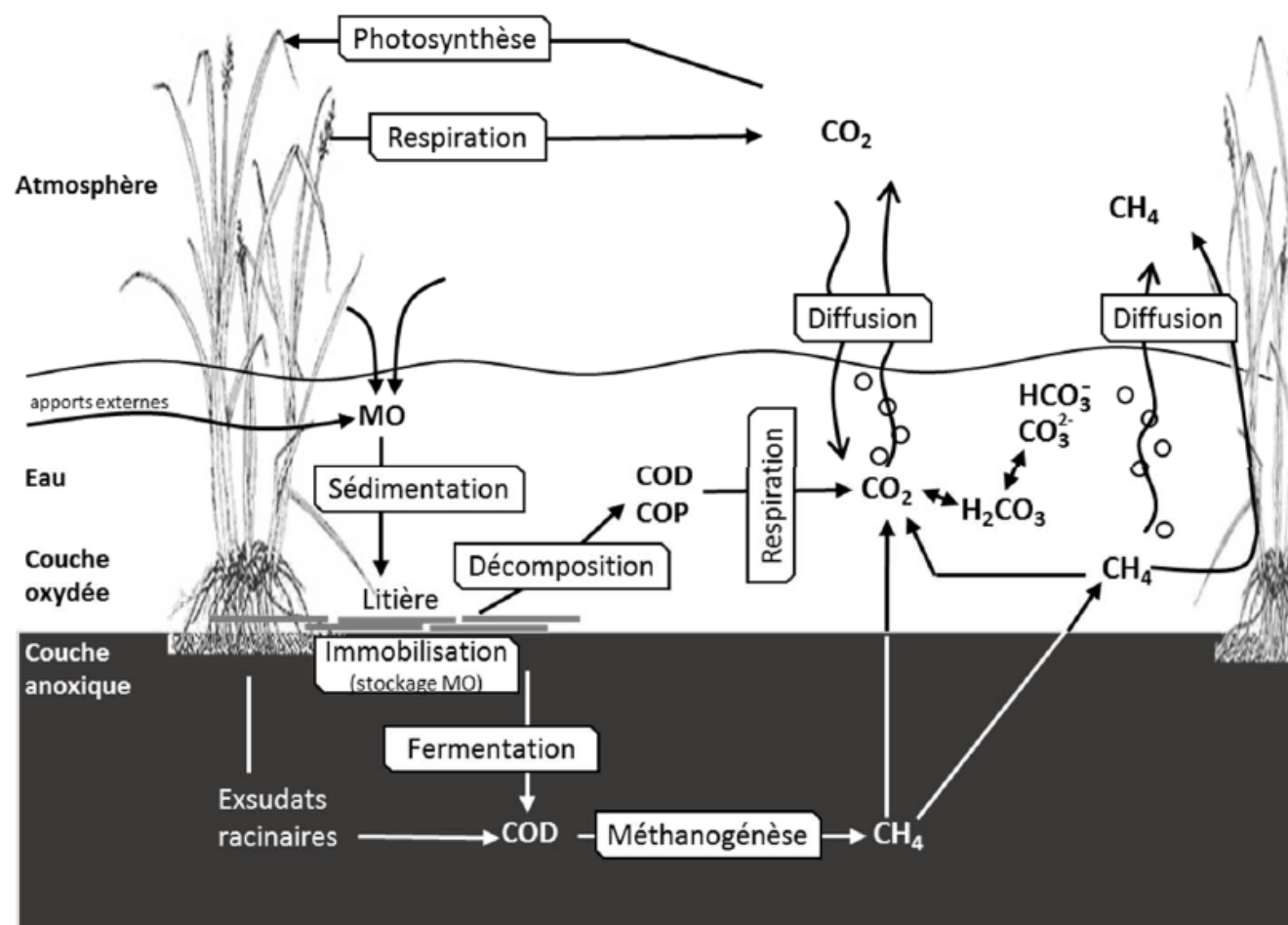
- Plus de 50% en Europe et environ **80% des zones humides perdues en France** depuis 1700
- En France, il est estimé par ailleurs une diminution de **67%** au cours du 20^{ème} siècle
Cette estimation table sur 2.5 millions d'hectares perdus notamment à partir des années 60
- Il resterait environ **2 300 000 ha** de zones humides inventoriées en France à l'heure actuelle (sur 2/3 environ de la surface métropolitaine prospecté) dont une majorité de prairies et de forêts humides
- Les émissions de tourbières dégradées représenteraient l'**équivalent du trafic aérien mondial**, soit entre 5-10 % des émissions mondiales de CO₂
- Les zones humides dégradées sont susceptibles d'émettre davantage de **CH₄ et de N₂O** que les zones humides en bon état



Synthèse bibliographique

Principaux processus impliqués

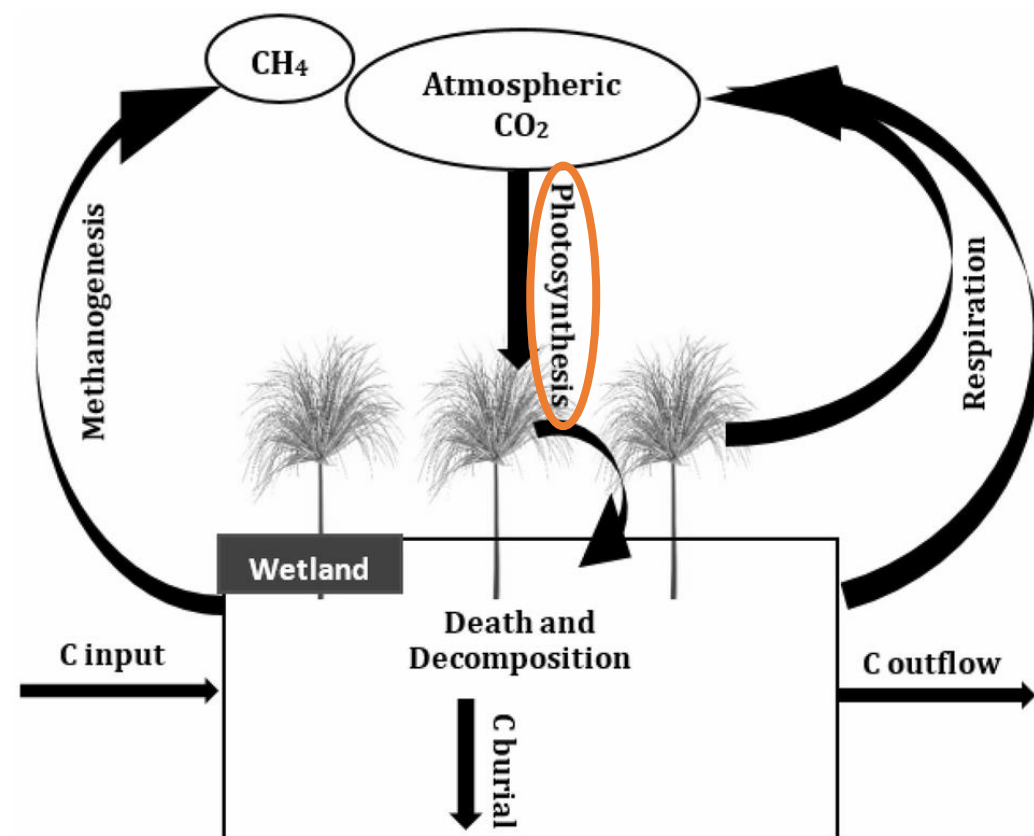
- Photosynthèse
- Respiration aérobie
- Accumulation et enfouissement du carbone
- Transferts latéraux de carbone
- Méthanogénèse et méthanotrophie
- Dénitrification



Principaux processus impliqués - cycle du carbone

Photosynthèse : $12 \text{ H}_2\text{O} + 6 \text{ CO}_2 + \text{énergie lumineuse} \Rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O}$

- La **photosynthèse** est la principale porte d'entrée du carbone atmosphérique dans les écosystèmes (par les plantes vasculaires, le phytoplancton, les micro-algues)
- La **forte productivité** de certaines zones humides par la captation de carbone dans la biomasse des plantes hygrophiles fait des zones humides des milieux à fort potentiel carbone

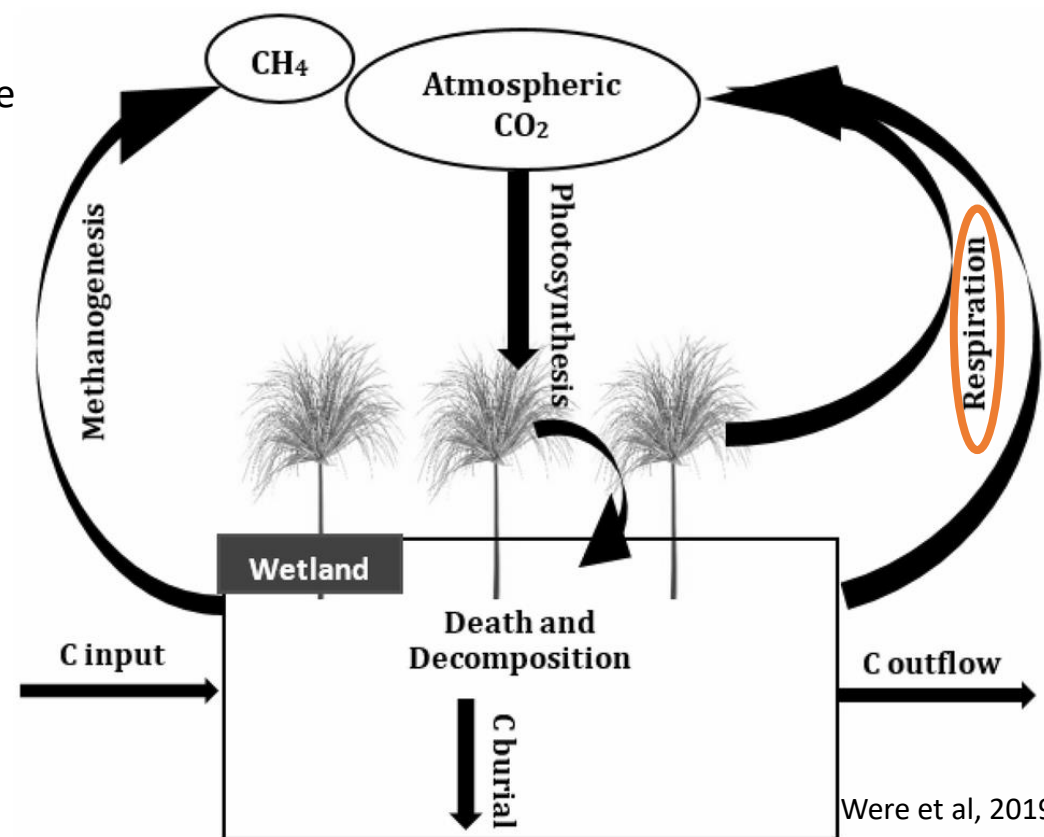


Were et al, 2019

Principaux processus impliqués - cycle du carbone

Respiration aérobie : $C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 \Rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O + \text{énergie}$

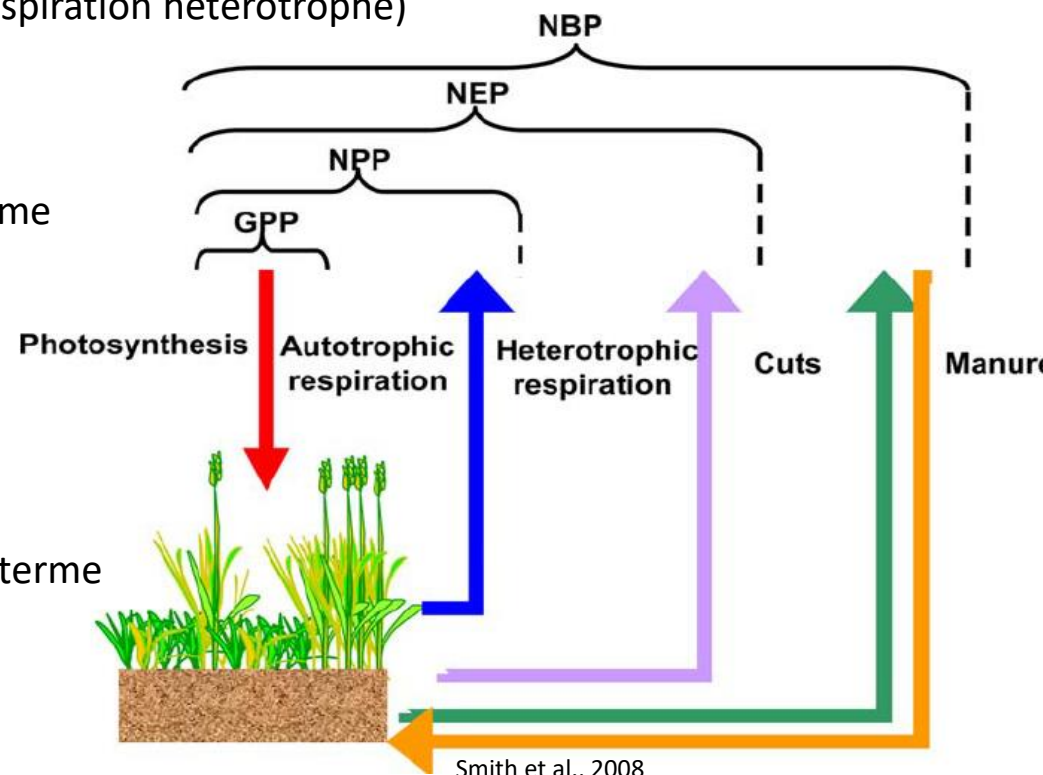
- La respiration est le processus principal de décomposition de la matière organique. Une **grande partie** de la matière organique produite retourne à l'atmosphère à court terme par ce processus.
- Les zones humides se caractérisent par un **engorgement plus ou moins prolongé du sol en eau**. La concentration et la diffusion de l'oxygène dans l'eau est plus faible et plus lente que dans l'air
- Les micro-organismes aérobies qui participent à la décomposition de la matière organique et les enzymes comme la phénol-oxydase ont besoin d'oxygène pour se développer et fonctionner.



Principaux processus impliqués - cycle du carbone

Photosynthèse et respiration :

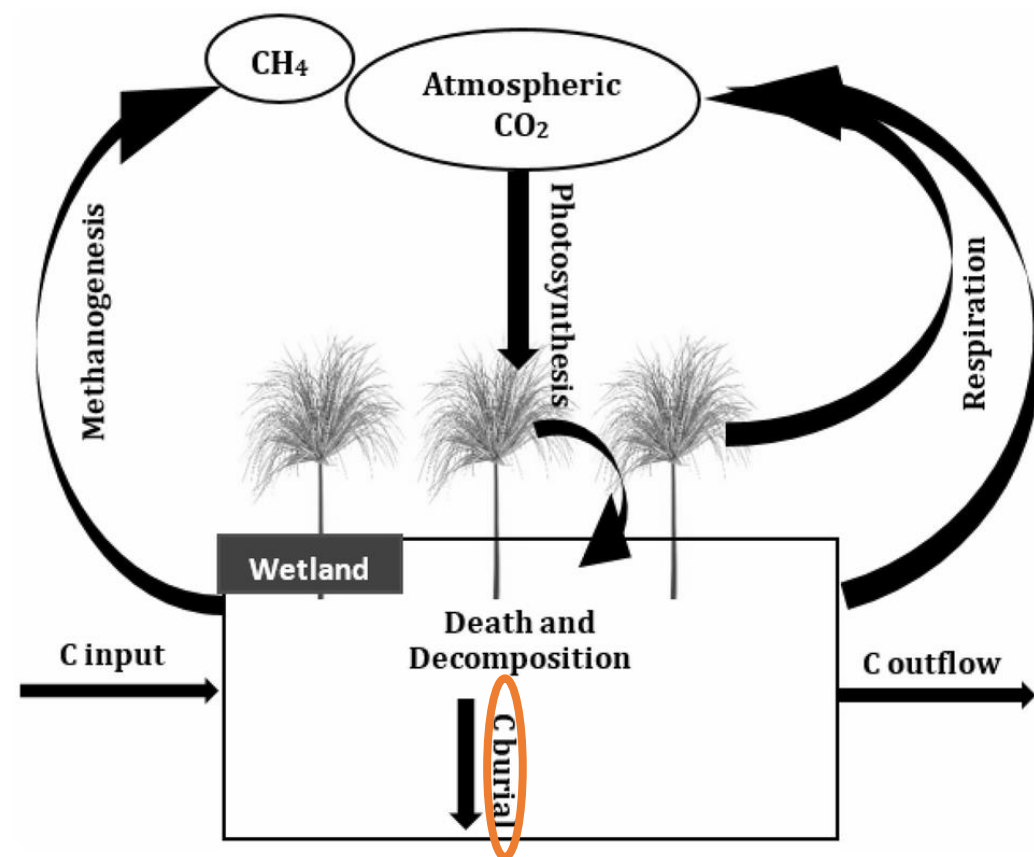
- GPP = Gross Primary Production – production primaire brute
- RECO = Respiration de l'écosystème = R_a (Respiration autotrophe) + R_h (Respiration hétérotrophe)
- NPP = Net Primary Production – production primaire nette
- NEP = Net Ecosystem Production – production primaire nette de l'écosystème
- NEE = Net Ecosystem Exchange = RECO (Respiration de l'écosystème) – GPP
= - NPP
- NBP = Net Biome Production – production nette du biome
- Si $GPP > RECO$ ($NEP > 0$ ou $NEE < 0$); alors la zone humide est puits net à court terme de CO_2 sur la période de temps considéré



Principaux processus impliqués - cycle du carbone

Accumulation et enfouissement du carbone dans le sol/sédiments :

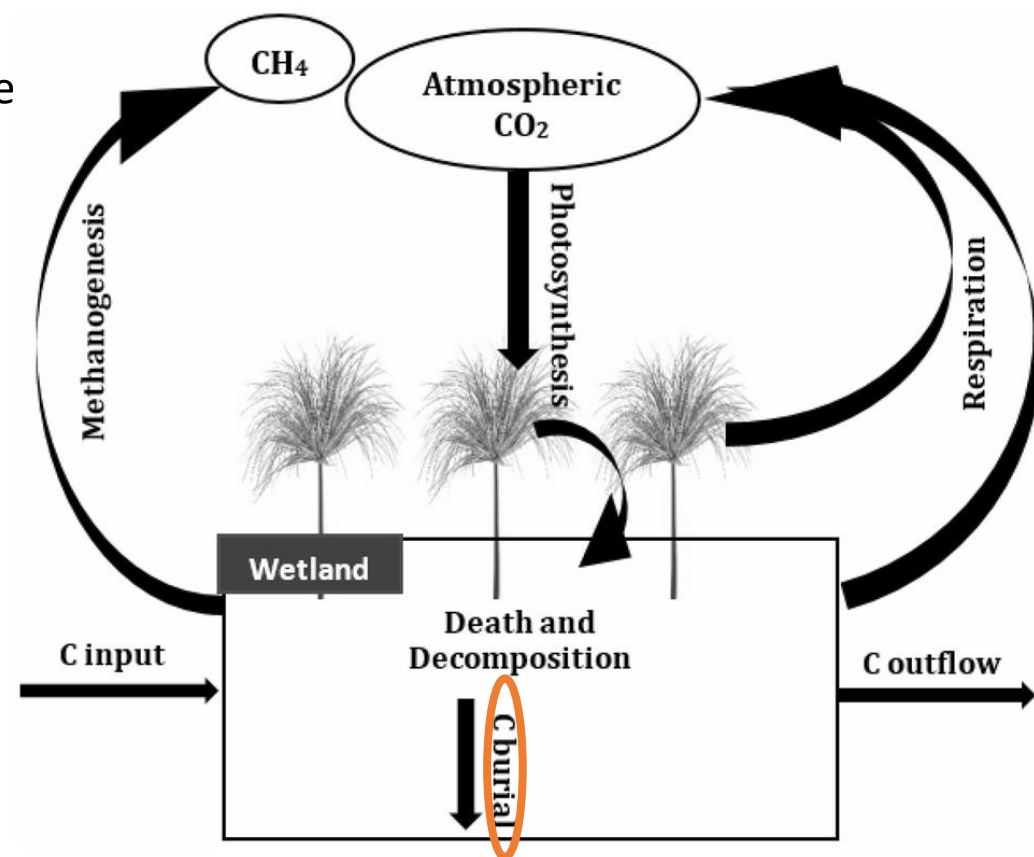
- L'humification, la tourbification et la sédimentation correspondent à un retrait net du CO_2 de l'atmosphère à long terme
- L'humification correspond à la formation d'humus, constitué de molécules difficilement dégradables par les micro-organismes du sol (humines, fraction fulvique, fraction humique)
- La turfigénèse ou tourbification survient dans certaines zones humides avec un engorgement permanent en eau, en particulier avec un niveau de nappe proche de la surface tout le long de l'année



Principaux processus impliqués - cycle du carbone

Accumulation et enfouissement du carbone dans le sol/sédiments :

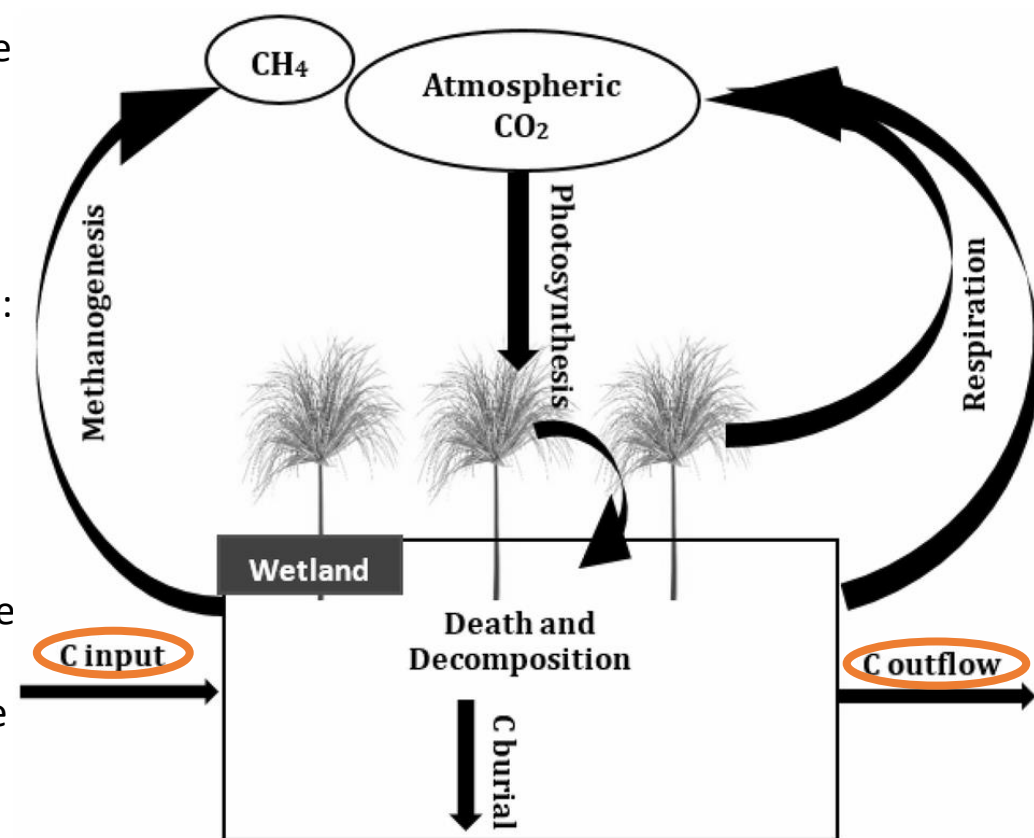
- La vitesse d'accumulation de carbone organique dans une tourbière peut varier entre 0,5 à 1mm par an. Certaines tourbières présentent plusieurs mètres de tourbe, résultat d'une accumulation à très long terme
- La sédimentation est un processus déterminant d'accumulation du carbone dans les milieux aquatiques et les zones humides recevant des apports de carbone externe comme les zones humides côtières ou alluviales



Principaux processus impliqués - cycle du carbone

Flux latéraux de carbone :

- Entrées de carbone par transport latéral aussi appelé carbone allochtone, peut s'ajouter au carbone présent in situ aussi appelé carbone autochtone
- Le carbone sous forme particulaire peut être susceptible de sédimenter dans certains milieux aquatiques et zones humides alluviales ou côtières
- A l'inverse, des exports de carbone accentués selon certaines conditions : fossés de drainage, pluies intenses sur sols sensibles à l'érosion, crues
- 15% de la matière organique transportée par les cours d'eau vers les océans proviendrait des zones humides
- Ces exports, qui concernent le carbone sous forme dissoute ou particulaire organiques ou inorganiques, constituent des pertes ou gains nets de carbone et doivent être comptabilisés dans le bilan global de l'écosystème



Principaux processus impliqués - cycle du carbone

Méthanogénèse :

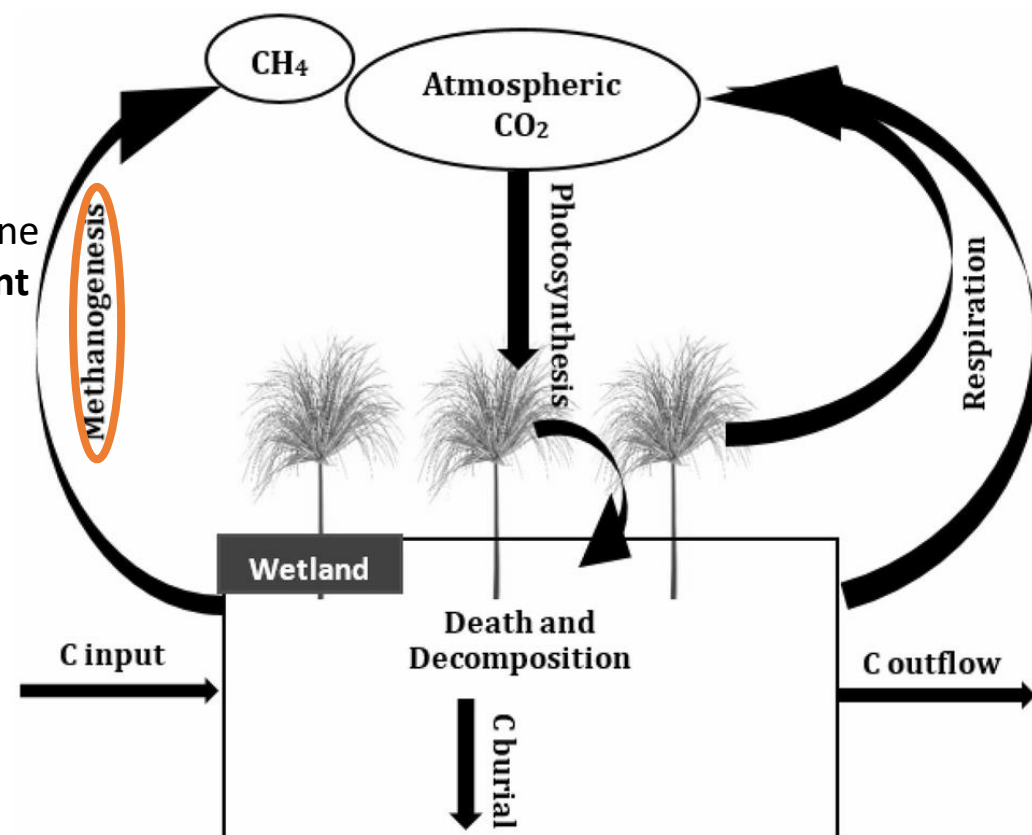
- La méthanogénèse en zones humides est réalisée par 3 voies distinguées selon leur substrat initial :

la voie hydrogénotrophe : $\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \Rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{énergie}$

la voie acétotrophe : $\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ \Rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{énergie}$

et la voie méthylotrophe : $4\text{CH}_3\text{OH} + \Rightarrow 3\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{énergie}$

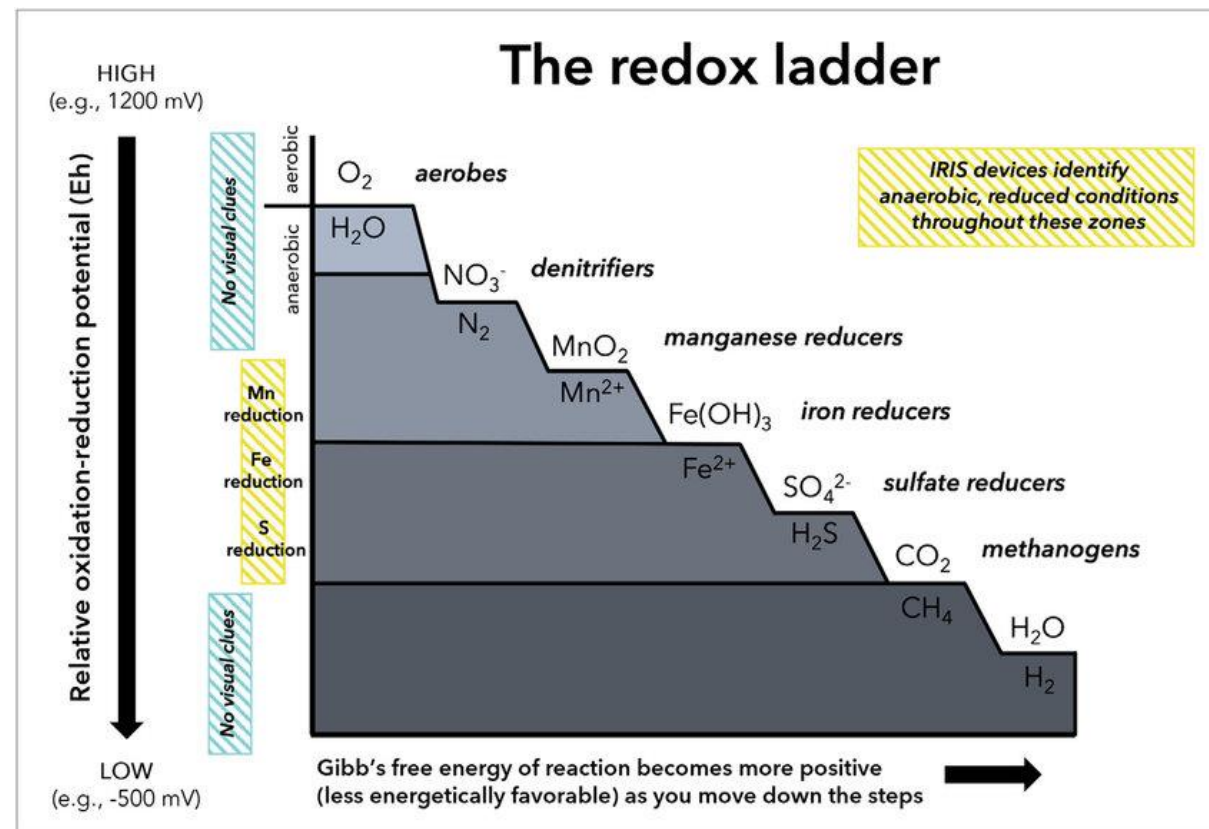
- Entre 2001 et 2020, la grande majorité des émissions mondiales de méthane par les zones humides sont concentrées sur **certaines périodes notamment estivales et sont le fait des zones humides tropicales (85%)**
- La saturation en eau du sol joue un rôle déterminant dans le **processus de méthanogénèse** en lien avec des réactions chimiques se mettant en place selon la **présence ou l'absence d'oxygène**
- En conditions anaérobies, la méthanogénèse consiste à la formation de méthane à partir de composés carbonés (CO_2 , produits de fermentation, etc...) par l'**activité d'archéobactéries (*Methanoregula*, *Methanotrix*)**



Principaux processus impliqués - cycle du carbone

Méthanogénèse

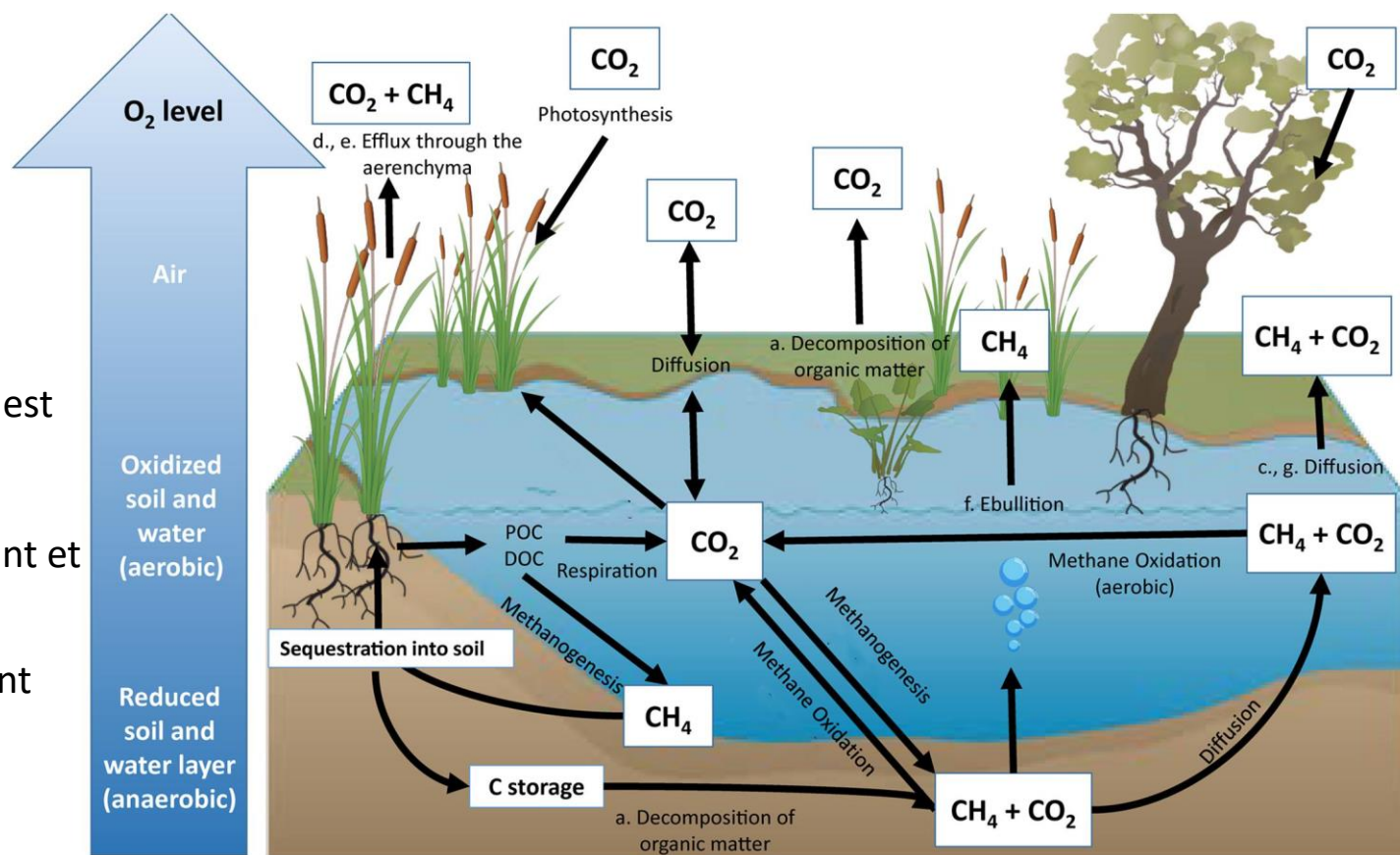
- Un processus à « rendement énergétique » faible, un des derniers à se mettre en place le long de l'échelle d'oxydo-reduction
- Respiration aérobie, dénitrification, réductions métalliques (Fe), sulfato-réduction se mettent en place avant si les accepteurs d'électrons correspondants sont présents



Principaux processus impliqués - cycle du carbone

Méthanogénèse :

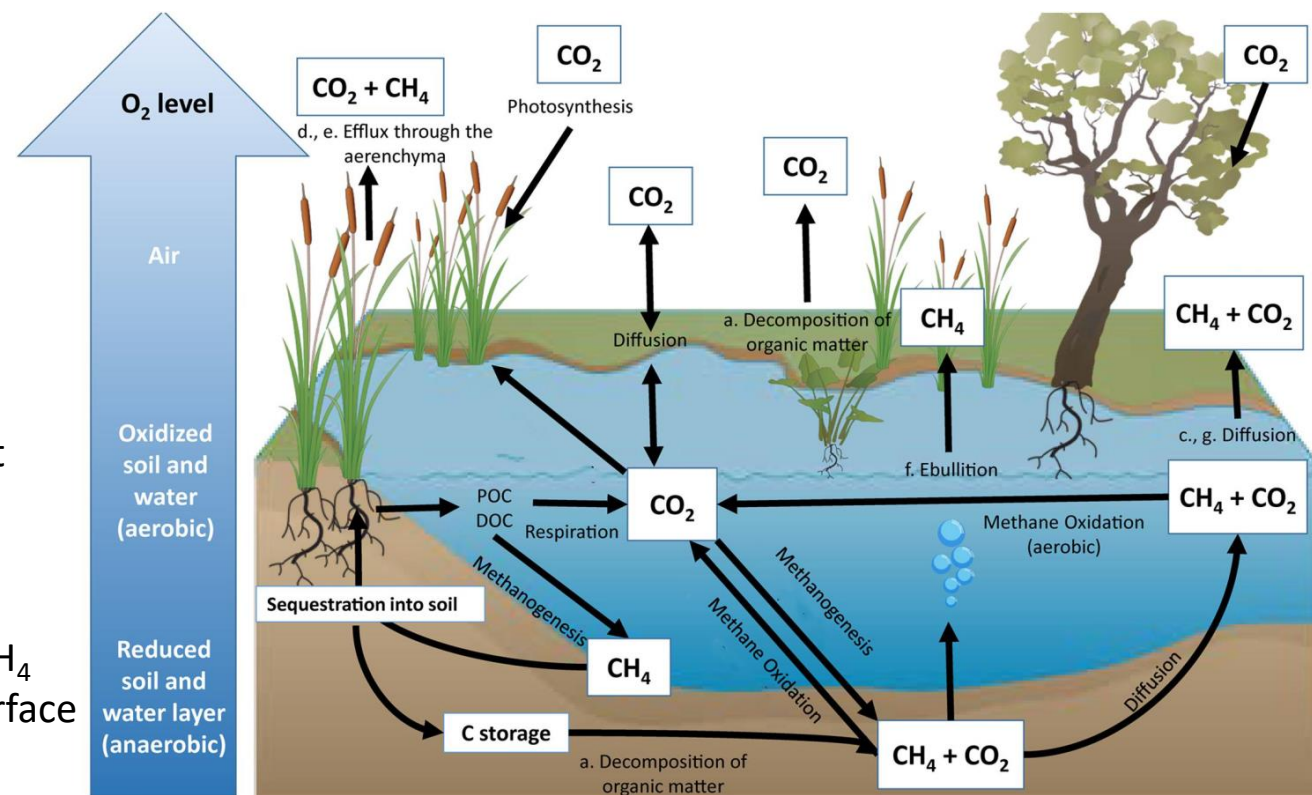
- Différents **modes de transport** du méthane vers l'atmosphère existent : **par diffusion, par ébullition et transport par les plantes**
- Le transport de CH_4 par les aérénchymes des plantes est un mécanisme prépondérant en zones humides
- Le transport de CH_4 par diffusion est un processus lent et représente des quantités émises moins élevées
- Le transport CH_4 par ébullition peut être prépondérant dans certains milieux humides constamment en eau



Principaux processus impliqués - cycle du carbone

Méthanotrophie aérobie : $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 \Rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$ ou formaldéhydes et autres composés carbonés + hydrogène + énergie

- La **méthanotrophie aérobie** consiste en la **consommation de CH_4** par des bactéries en présence d'oxygène
- L'oxydation aérobie du **CH_4** empêcherait entre 40 et 70% du **CH_4** produit d'atteindre l'atmosphère
- Elle génère la **production de composés carbonés** (formaldéhyde notamment) dont une partie est assimilée et une autre partie conduit à l'**émission de CO_2**
- Dans certaines tourbières, une **symbiose entre bactéries méthanotrophes et sphaignes** permettent l'oxydation du **CH_4** in situ y compris lorsque la nappe se trouve proche de la surface

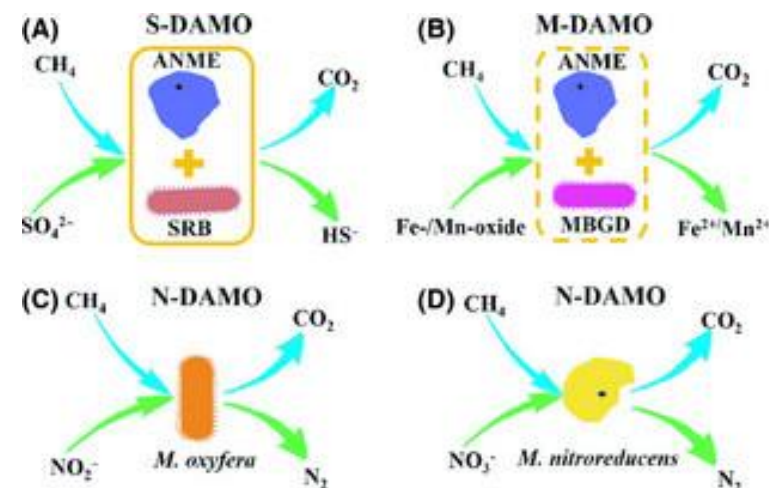
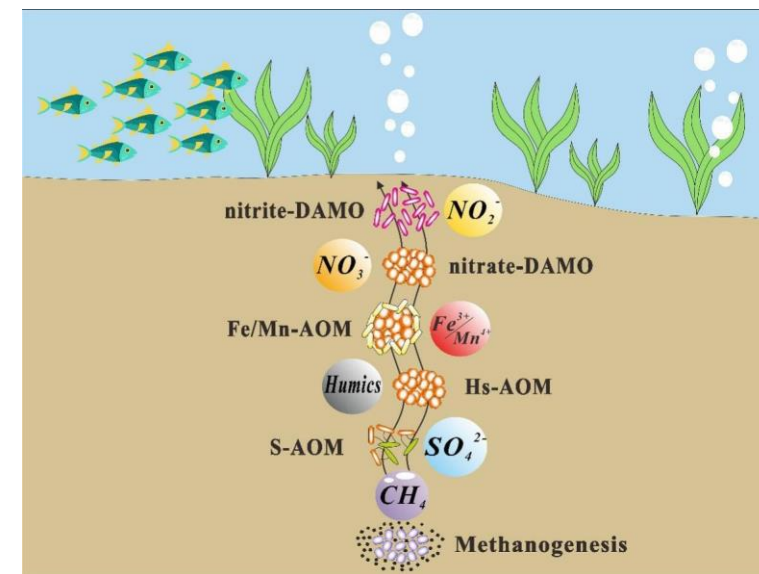


Principaux processus impliqués - cycle du carbone

Méthanotrophie anaérobie

- L'oxydation du méthane peut aussi avoir lieu en l'absence d'oxygène de différentes manières notamment par des archées
- Ce peut être le cas notamment de sulfates, des nitrites, des nitrates, des oxydes de fer et de manganèse, des substances humiques
- L'oxydation anaérobie du méthane est plutôt lié à la sulfato-réduction dans les milieux saumâtres et salés et à la dénitrification ou à l'humification en milieux continentaux

Torres-Alvarado, 2005; Chen et al., 2022; Chang et al., 2023; Cui et al., 2014 et Zhao et al., 2024

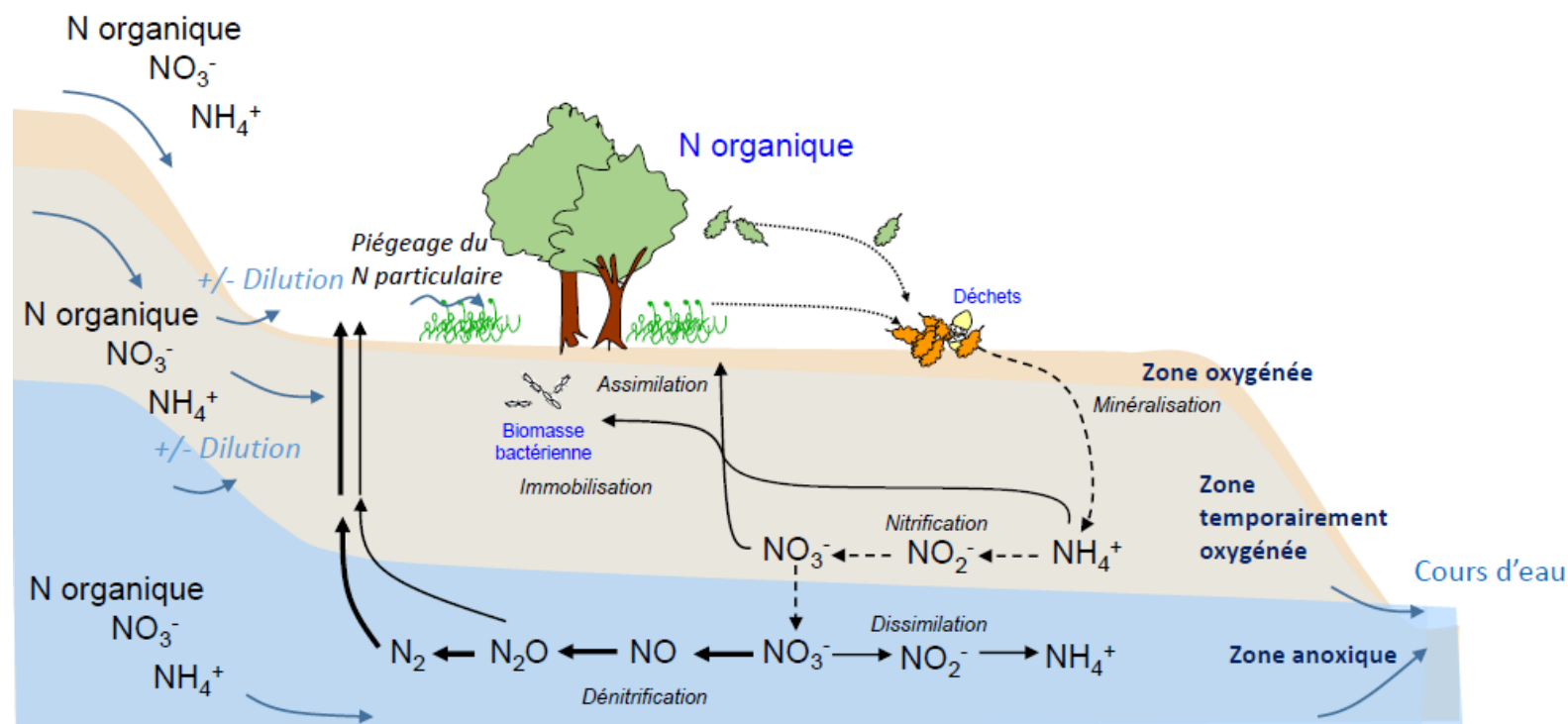


Cui et al., 2014 et Zhao et al., 2024

Principaux processus impliqués - cycle de l'azote

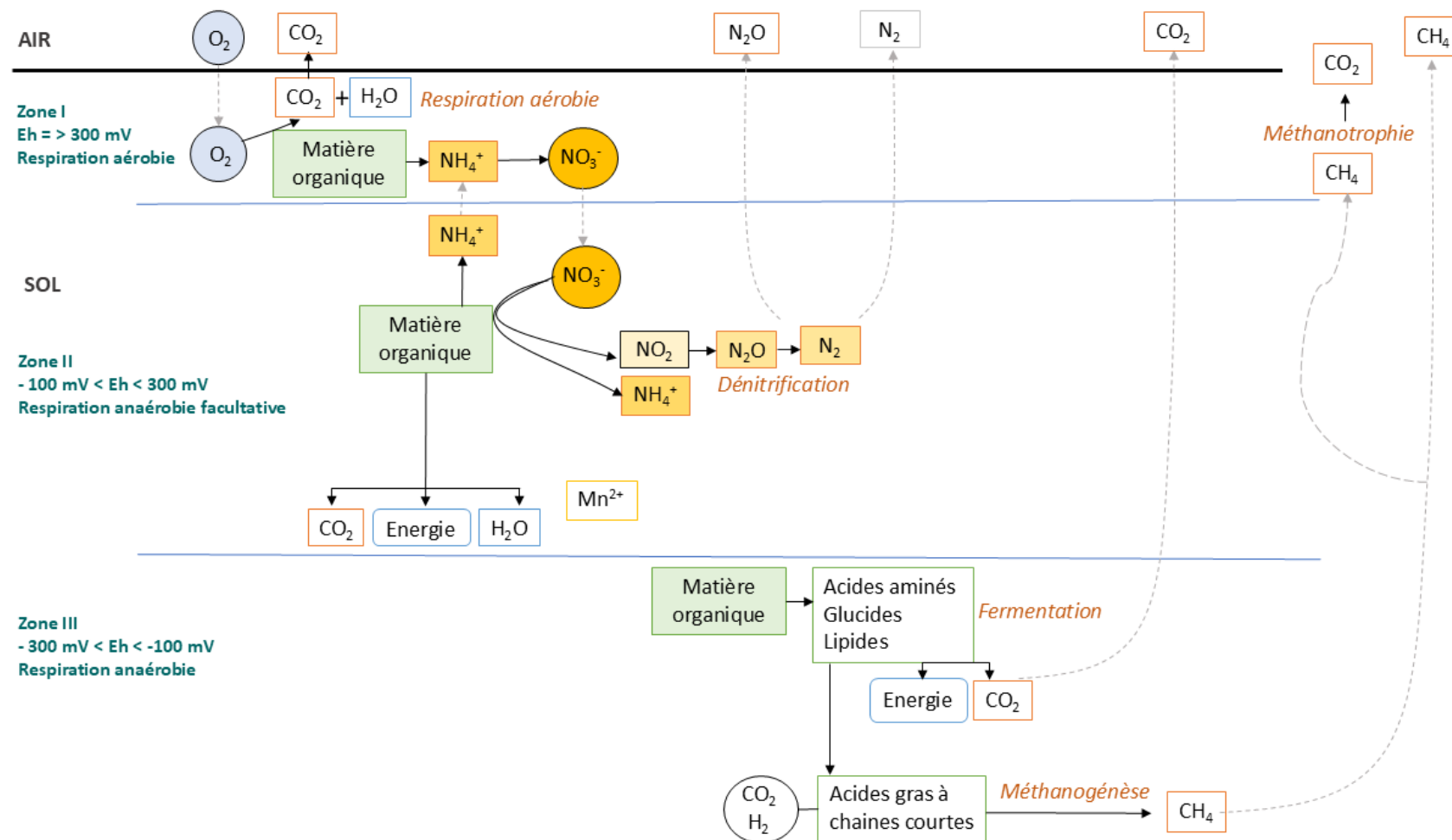
Dénitrification

- Les zones humides jouent un rôle déterminant dans le cycle de l'azote au niveau mondial
- La **dénitrification** est le **principal processus de sortie de l'azote des réservoirs biosphère-sols-hydrosphère vers l'atmosphère**
- Elle est réalisée par certaines **bactéries anaérobies facultatives**.
- Elle a lieu en conditions anaérobies et génère la production de N_2 gazeux mais peut générer l'**émission de N_2O**



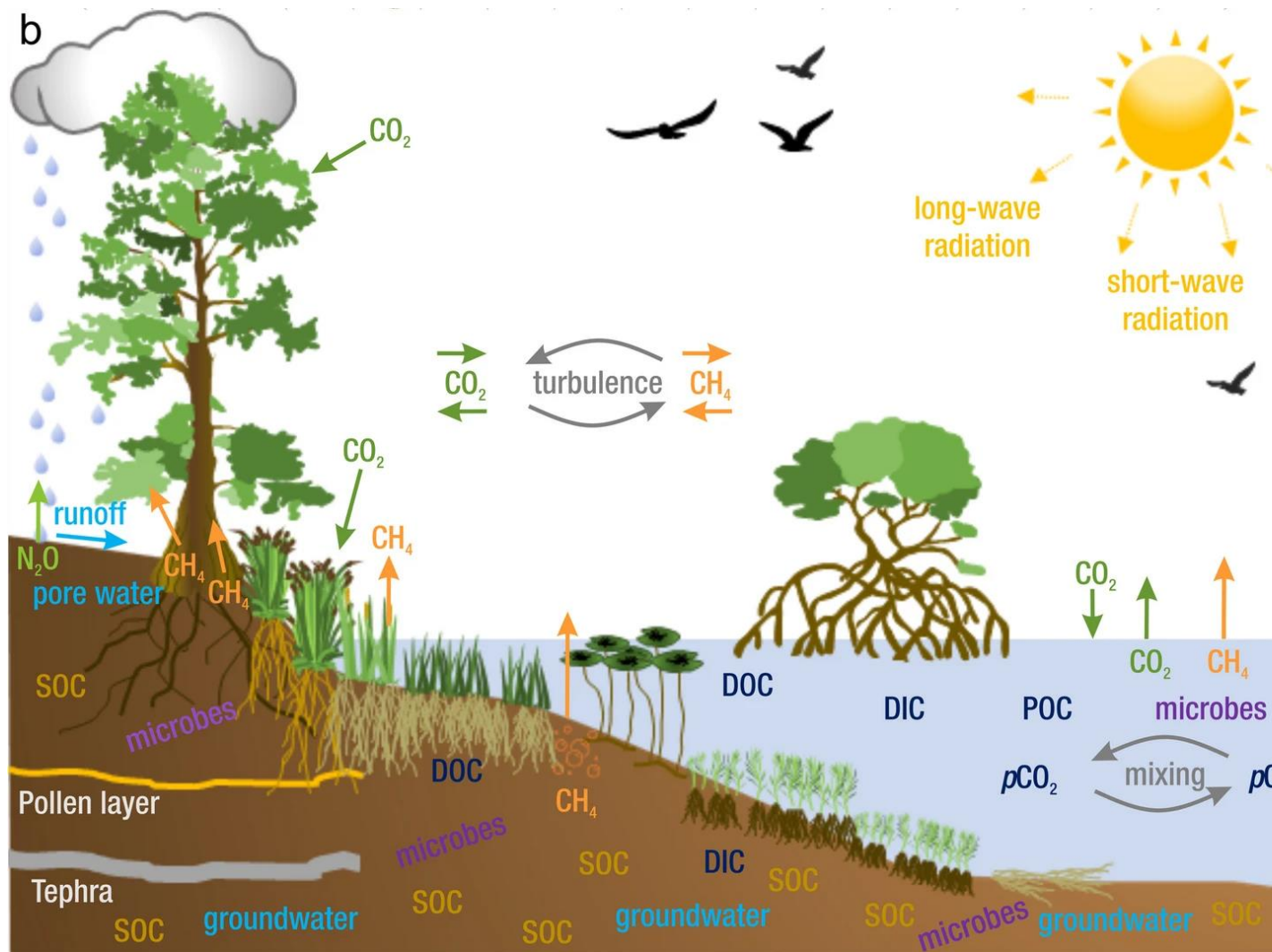
Principaux processus impliqués - cycle de l'azote

Dénitrification

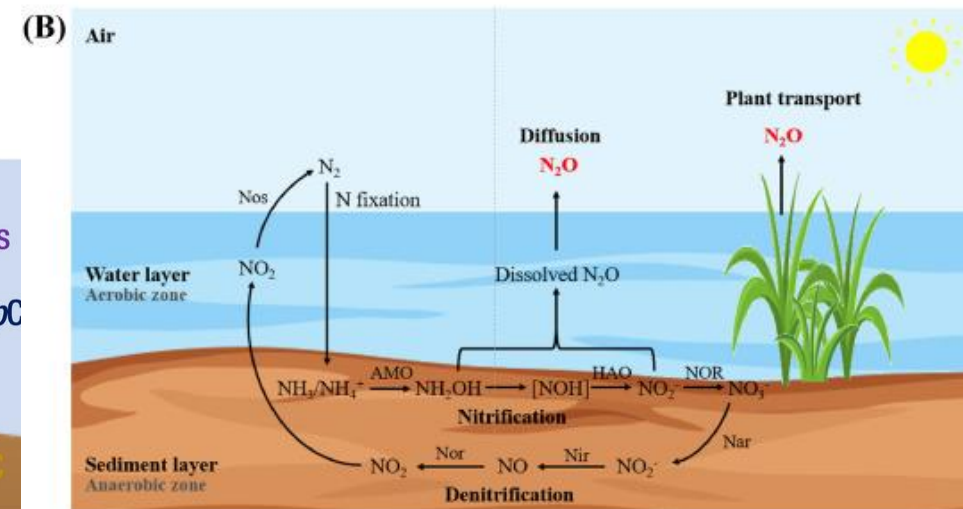
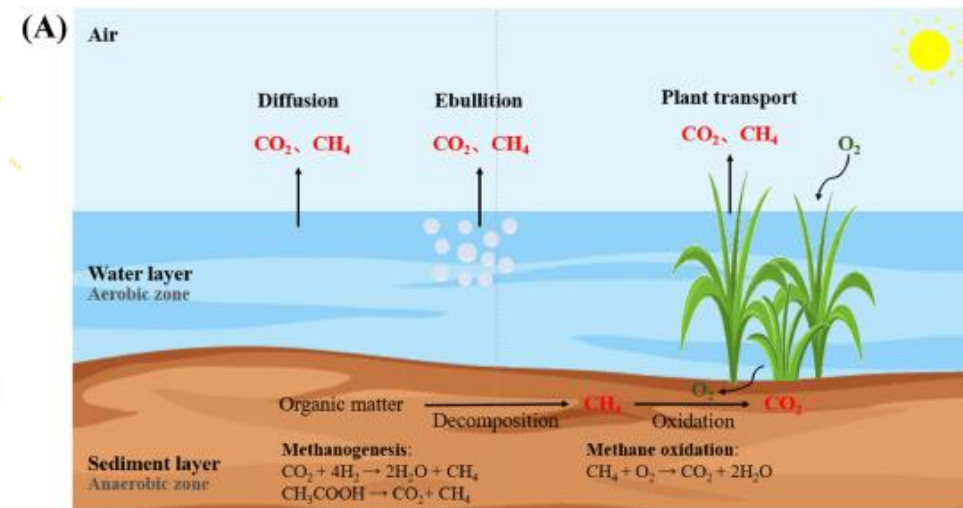


Synthèse bibliographique

Principaux processus impliqués - cycle du carbone et de l'azote



Bansal et al., 2023



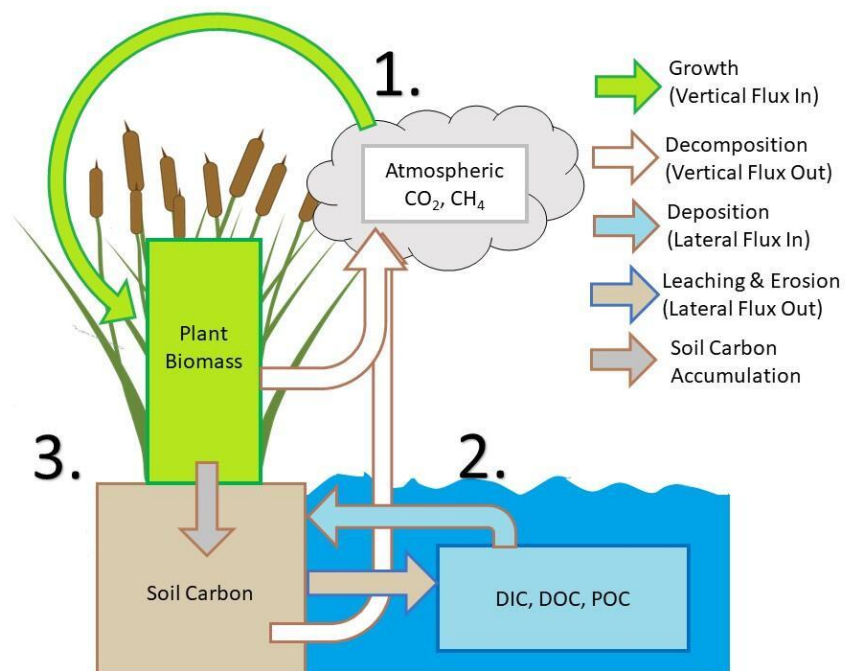
Cao et al., 2024

Principaux processus impliqués - cycle du carbone et de l'azote

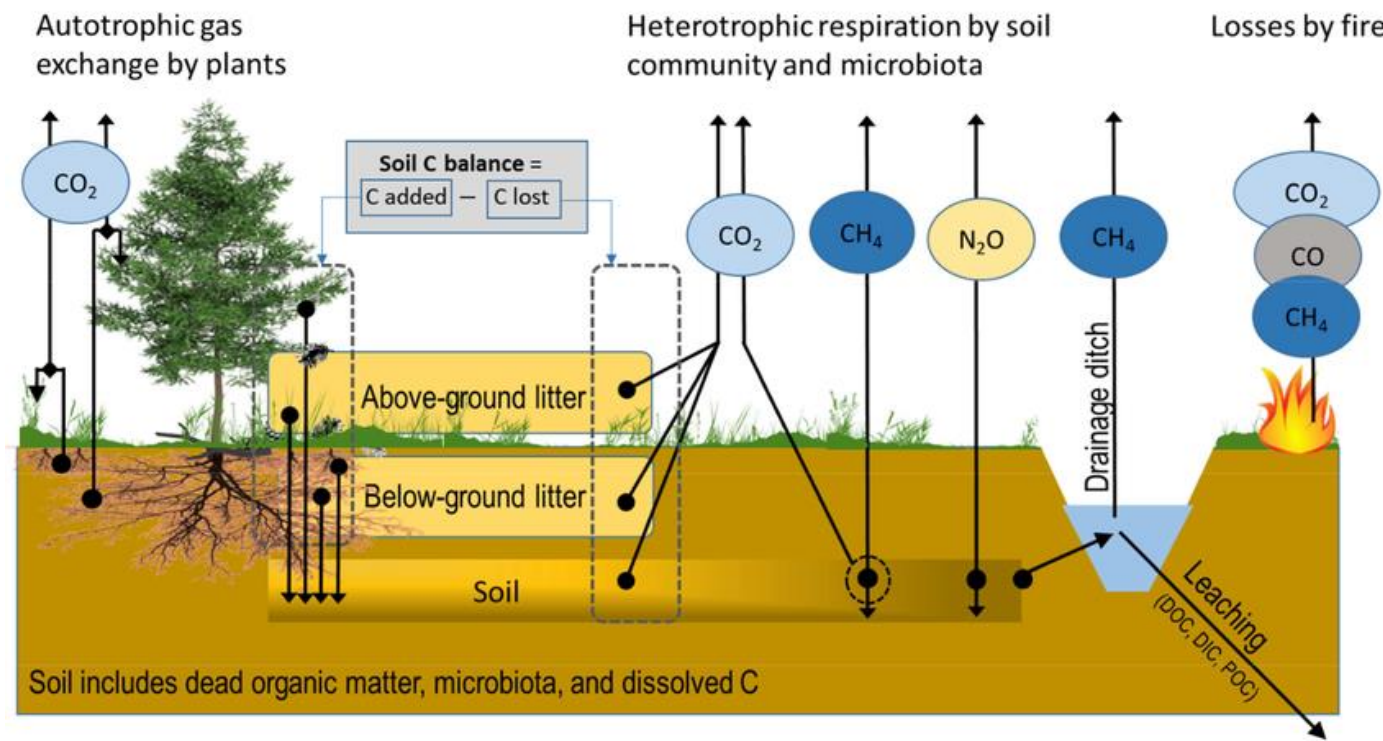
« Net Ecosystem Carbon Balance » en $\text{gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$

« Net Radiative/GHG Balance » en $\text{CO}_2\text{eq.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$

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



US Geological Survey, 2023



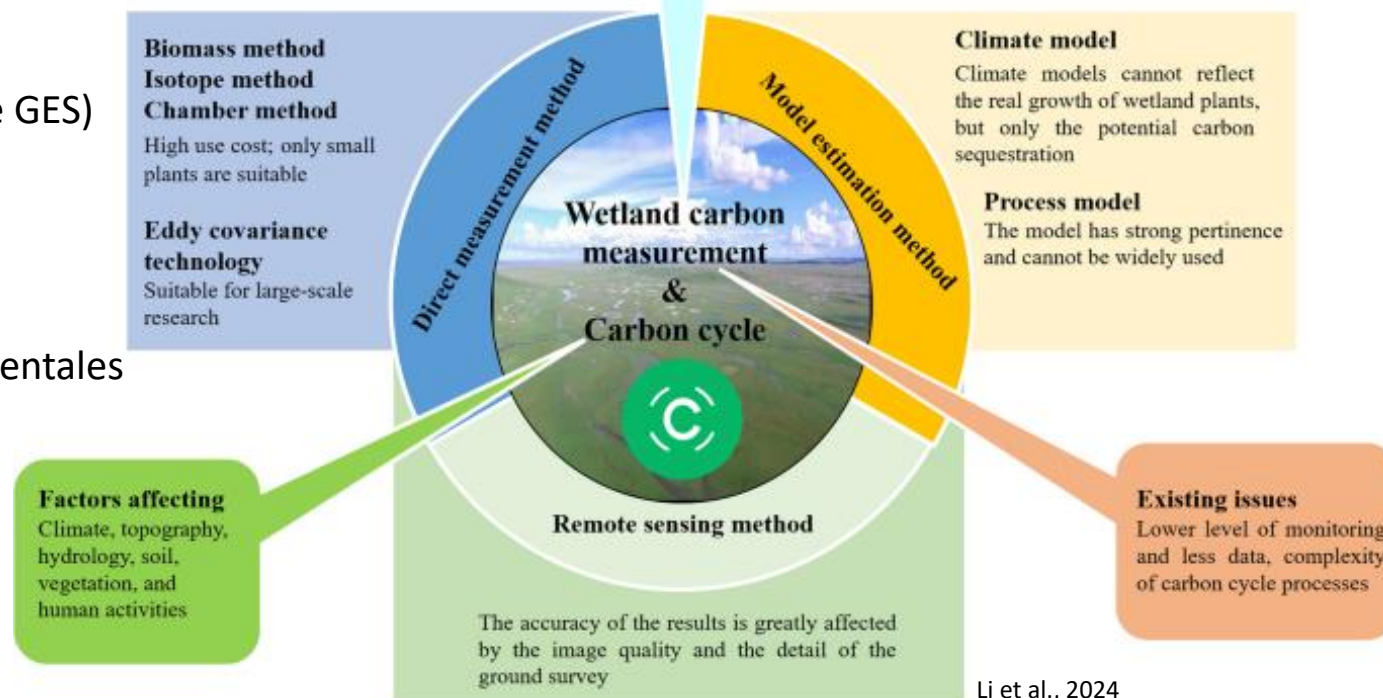
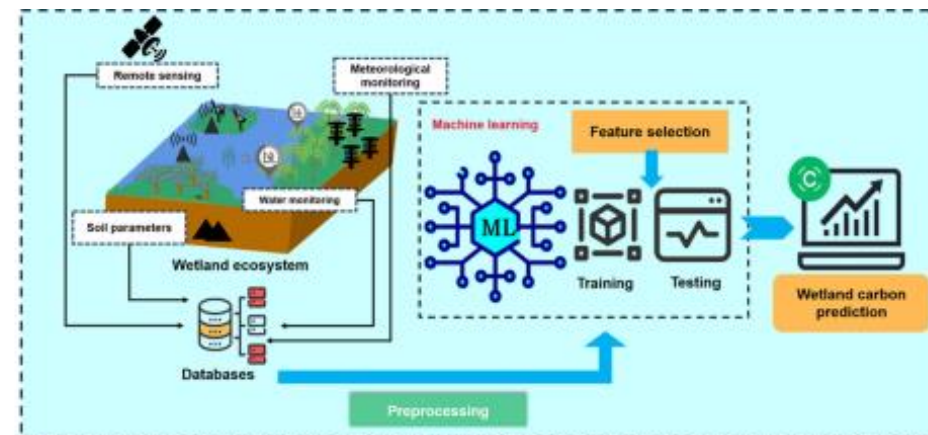
Jauhiainen et al., 2020

Des questions ?

Synthèse bibliographique

Mesurer les stocks de carbone et les flux de GES en zones humides

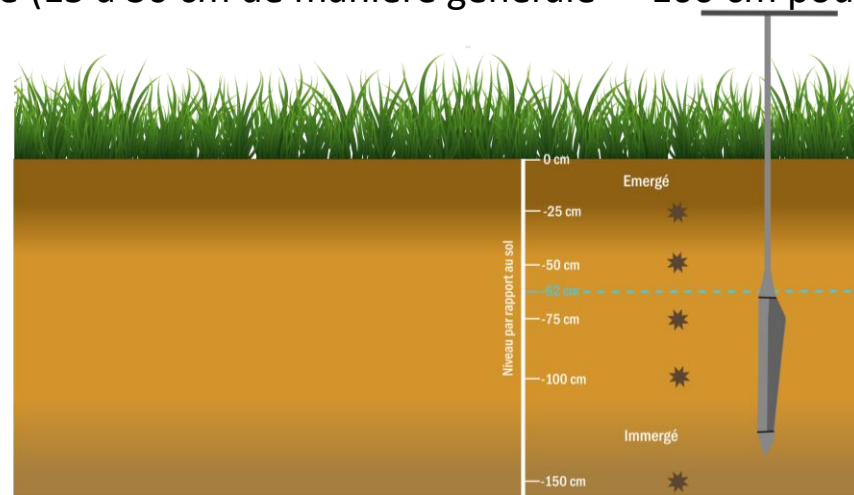
- Approche multidisciplinaire : pédologique, physique des gaz, chimie de l'eau, chimie organique et inorganique, limnologie, hydrogéologie, écologie, etc...
- Méthodes directes et indirectes pour les stocks (biomasse, sol) et les flux (séquestration, flux de GES)
- Modélisation (climatiques, processus, etc...), télédétection
- Nécessité de mesurer des variables environnementales en parallèle (climat, hydrologie, pédologique, luminosité, écologie, biogéochimie, etc...)



Mesurer les stocks de carbone et les flux de GES en zones humides

Comment mesurer les stocks de carbone dans les sols/sédiments?

- Carottage par différents types de carottiers ou tarières à gouge
- Plan d'échantillonnage à adapter selon les objectifs de l'étude, le type de la zone humide, les variables environnementales, le budget
- Epaisseur de prélèvement variable selon le type de zones humides et les standards de référence (15 à 30 cm de manière générale - >100 cm pour les tourbières)



Nahlik et Fennessy, 2016;
Bartholomé et al., 2017

Pinault et al., 2025



Bansal et al., 2023

Mesurer les stocks de carbone et les flux de GES en zones humides

Comment mesurer les stocks de carbone dans le sol ou les sédiments ?

- Méthodes d'analyses : perte au feu et/ou analyseur élémentaire
- La mesure de la densité apparente est indispensable pour estimer le stock de carbone
- Carbone organique sol = **% Corg X S X Da X Ep**

Avec % Corg = teneur en carbone organique

S = Surface en cm^{-2} (diamètre de la carotte)

Da = Densité apparente en g.cm^{-3} = Masse sèche/Volume tot

Ep = Epaisseur en cm



Four à moufles



Analyseur élémentaire CHN



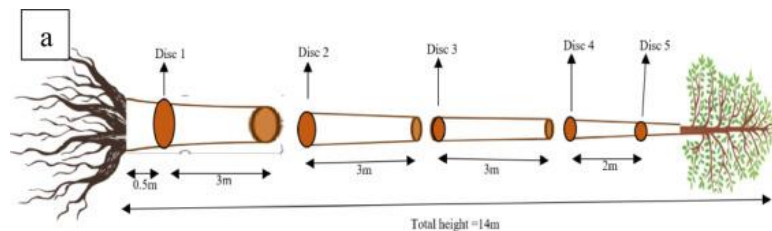
Etuve

Gogo, S. et Pinault, L. 2025

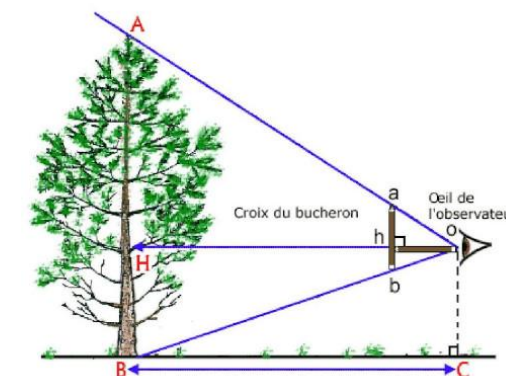
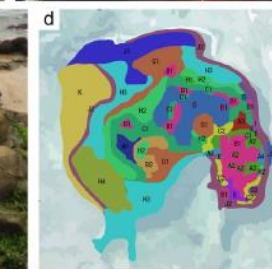
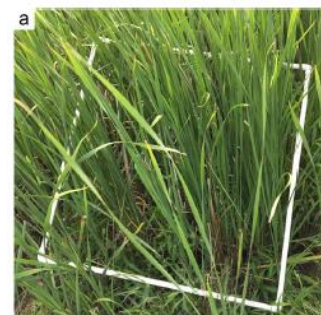
Mesurer les stocks de carbone et les flux de GES en zones humides

Comment mesurer les stocks de carbone dans la biomasse ?

- Méthodes de récolte et méthodes d'allométrie



Huynh et al., 2021



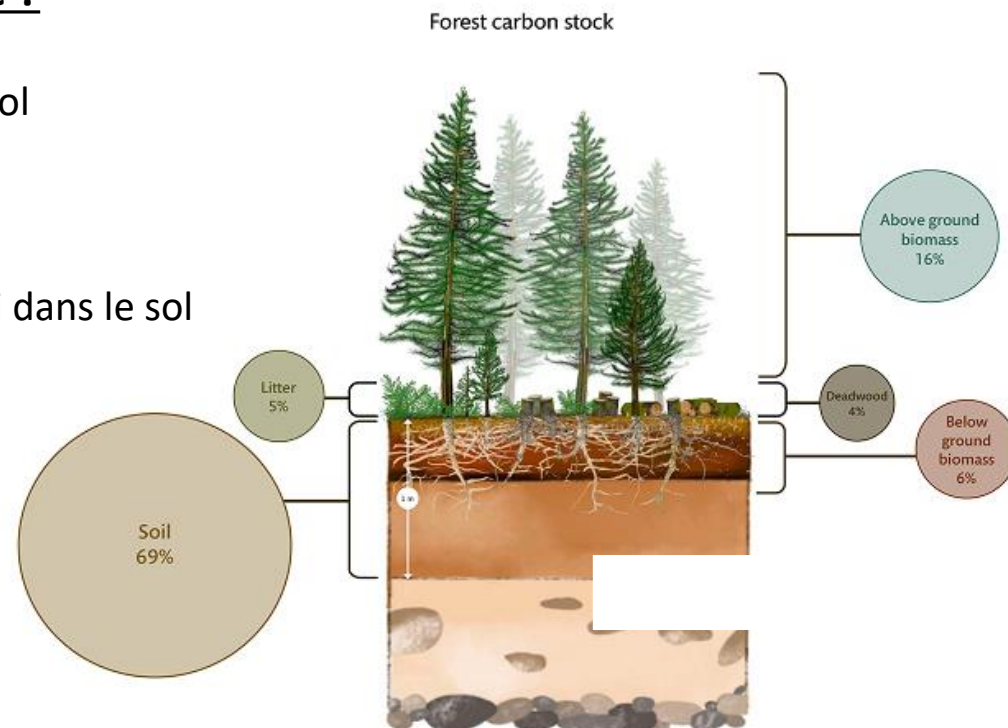
Bansal et al., 2023 – Arboplus, 2025

Mesurer les stocks de carbone et les flux de GES en zones humides

Comment mesurer les stocks de carbone dans la biomasse ?

- Méthodes d'analyses similaires aux stocks de carbone dans le sol
- Biomasse aérienne, souterraine, morte (bois mort, litière)
- Stock de carbone dans la biomasse moins « durable » que celui dans le sol
- Stock carbone biomasse = **% Corg X Bsèche = S X Da X H**

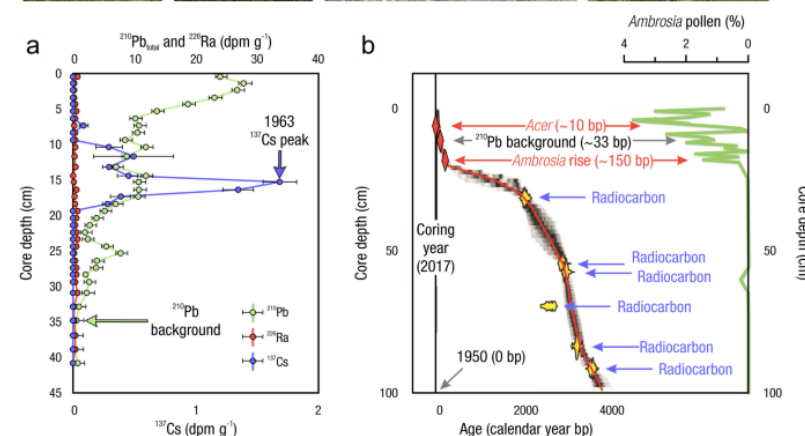
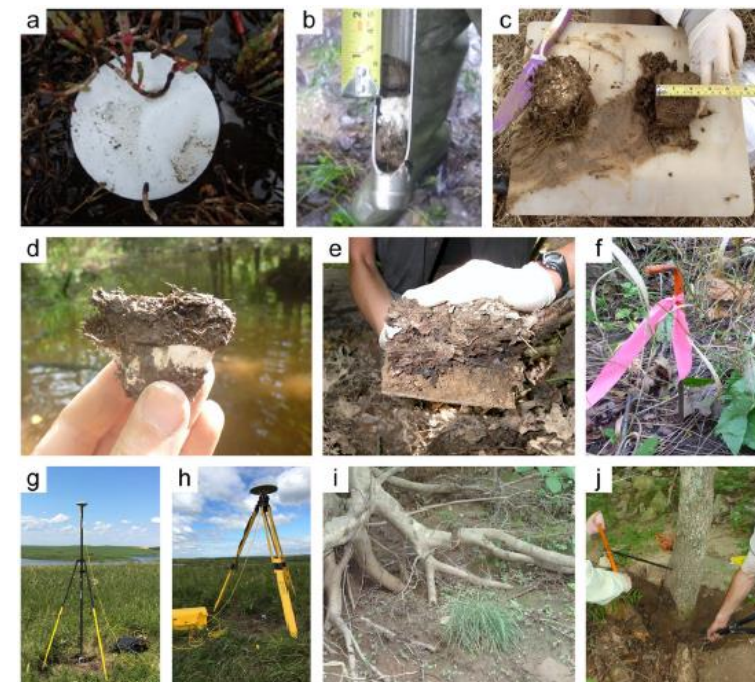
Avec % Corg = teneur en carbone organique
et Bsèche = Biomasse sèche = S * Da * H
H = Hauteur en cm



Mesurer les stocks de carbone et les flux de GES en zones humides

Comment mesurer la séquestration de carbone dans le sol et les sédiments ?

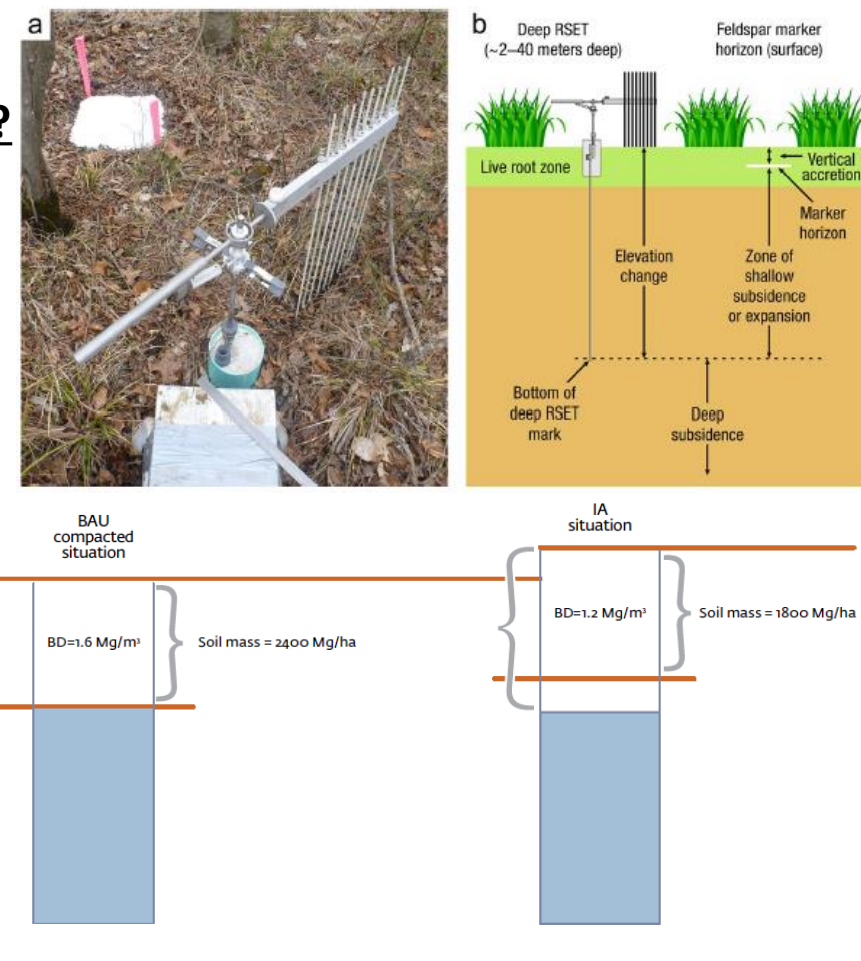
- Mesures de la vitesse de sédimentation par différents dispositifs (marqueurs, horizons artificiels, table avec broches, dendrogeomorphologie)
- Mesures du taux d'accumulation de carbone par datation radiométrique (^{137}Cs , ^{210}Pb et ^{14}C)
- Mesures successives de stocks dans le temps (Δ stock)
- Possibilités de connaître l'origine du carbone en utilisant des ratios isotopiques du carbone ($\delta^{13}\text{C} = ^{12}\text{C} / ^{13}\text{C}$)



Mesurer les stocks de carbone et les flux de GES en zones humides

Comment mesurer la séquestration de carbone dans le sol et les sédiments ?

- Mesures évolutives du stock de carbone dans le temps et mesure de la teneur en carbone par les mêmes méthodes d'analyse que pour le stock
- Séquestration de carbone en $\text{gC.m}^{-2}.\text{an}^{-1} = \% \text{Corg} \times \text{Da} \times V$
 Da = Densité apparente en g.cm^{-3}
 V = vitesse de sédimentation ou taux d'accrétion du sol en mm ou cm.a
- $\Delta \text{Stock carbone} = \Delta \% \text{Corg} * \Delta \text{Dasol} * \Delta E * S$
+ autres méthodes (Equivalent Soil Mass)



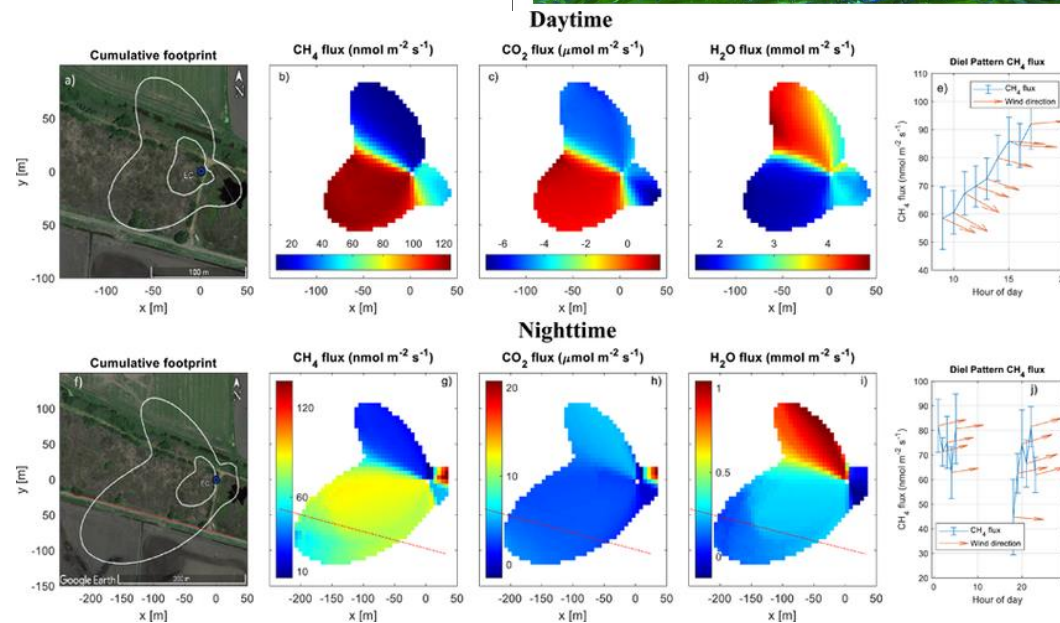
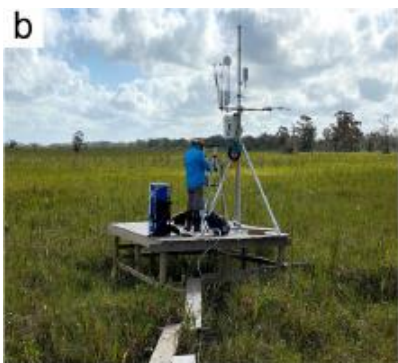
Bansal et al., 2023

Synthèse bibliographique

Mesurer les stocks de carbone et les flux de GES en zones humides

Comment mesurer les flux de GES?

- Tours à Eddy-covariance à l'interface avec l'atmosphère (anémomètre 3D, sondes, analyseurs GES)
- Mesures hautes fréquences et longue durée - empreinte spatiale étendue

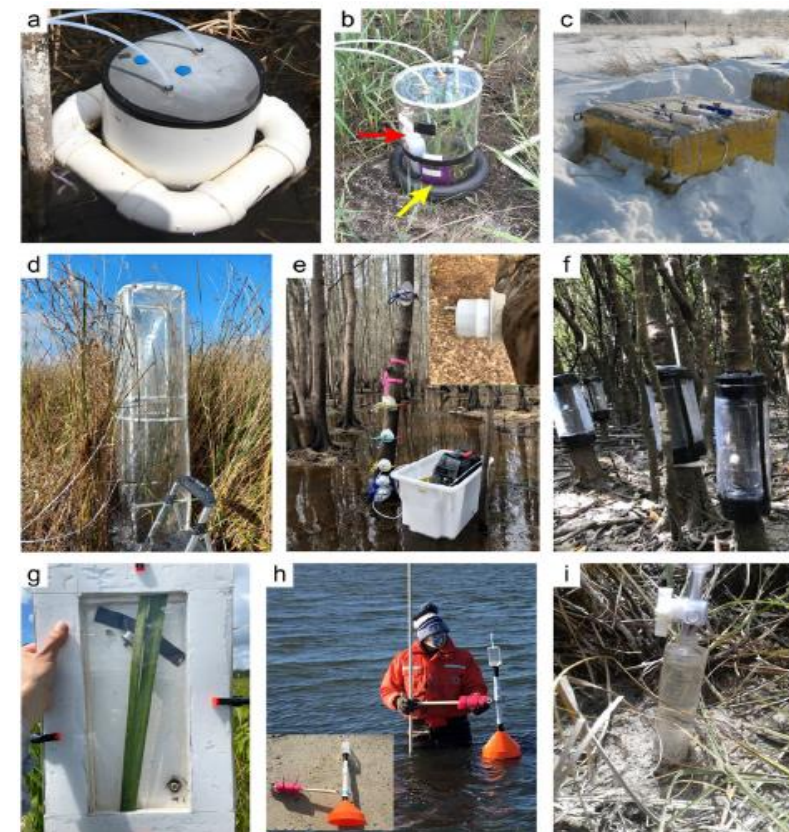
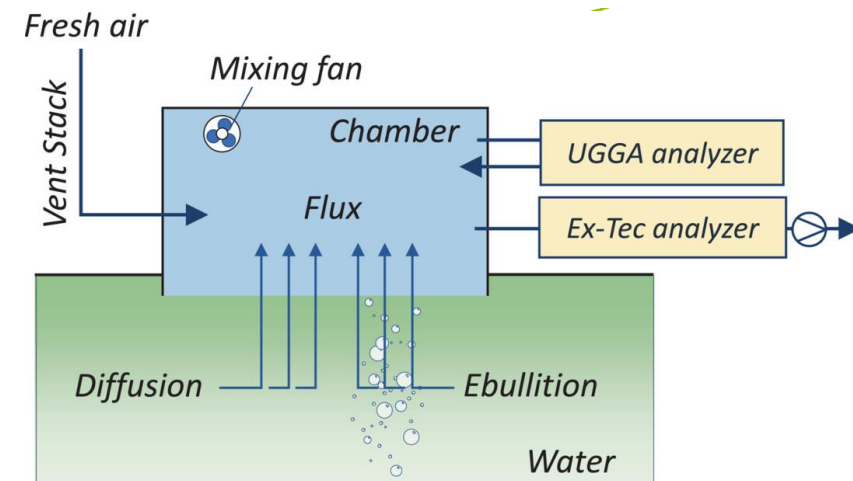
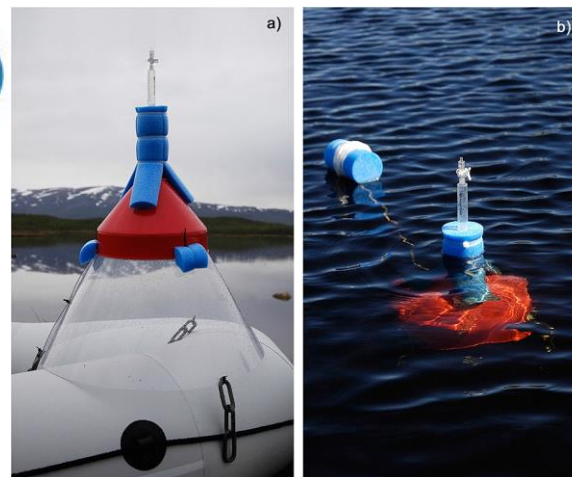
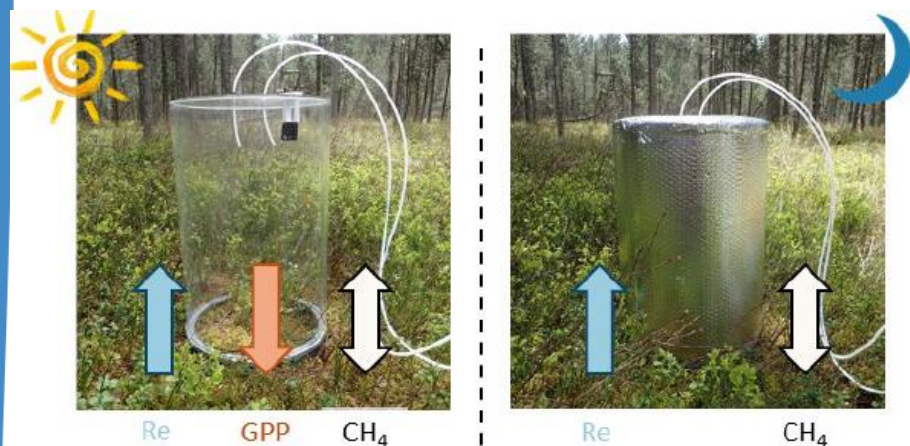


Synthèse bibliographique

Mesurer les stocks de carbone et les flux de GES en zones humides

Comment mesurer les flux de GES?

- Chambres d'accumulation adaptables pour différents usages (végétation haute, arbre, flottante, benthique, etc...)
- Chambres manuelles, automatisées, couplées à des analyseurs haute fréquence, dispositifs portatifs, « 24h chamber »
- Mesures à petite échelle – nécessite une modélisation pour extrapoler à l'ha par an



Synthèse bibliographique

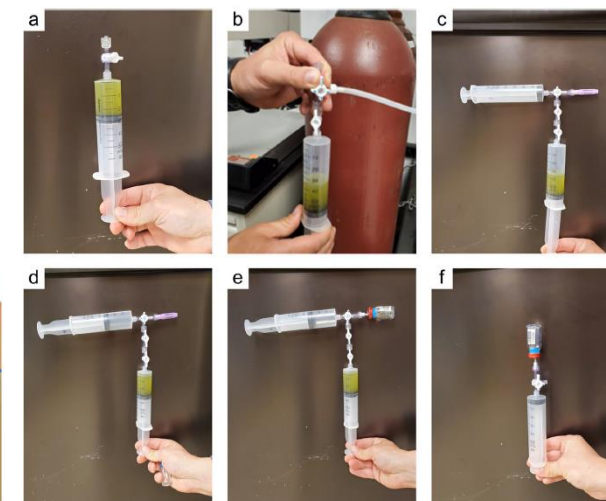
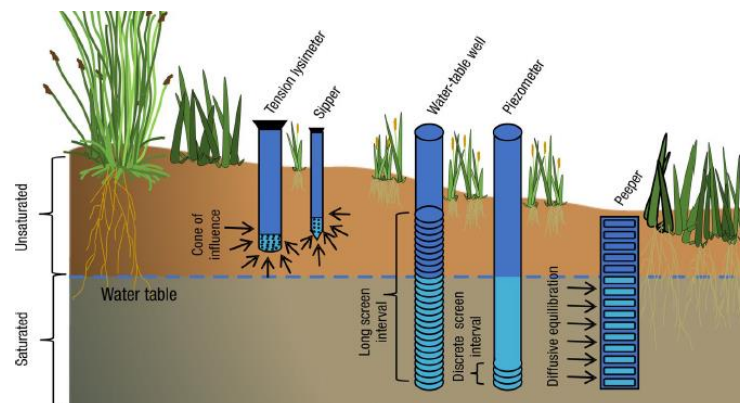
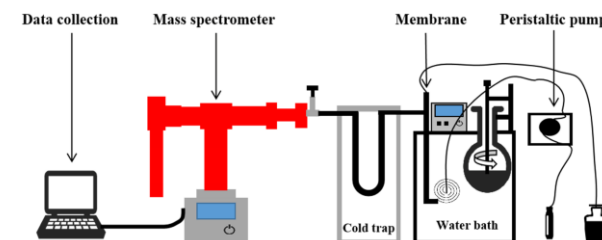
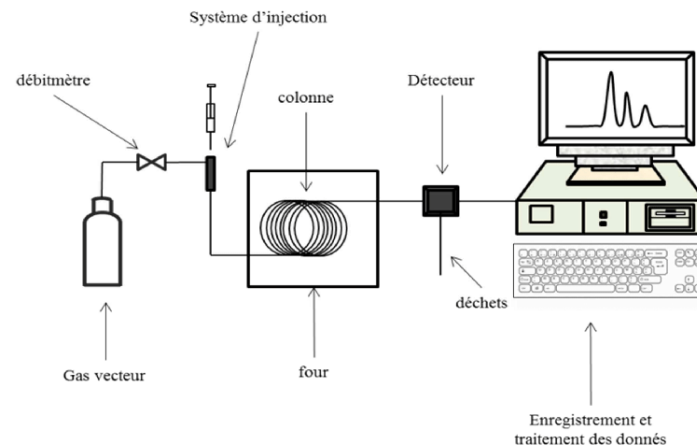
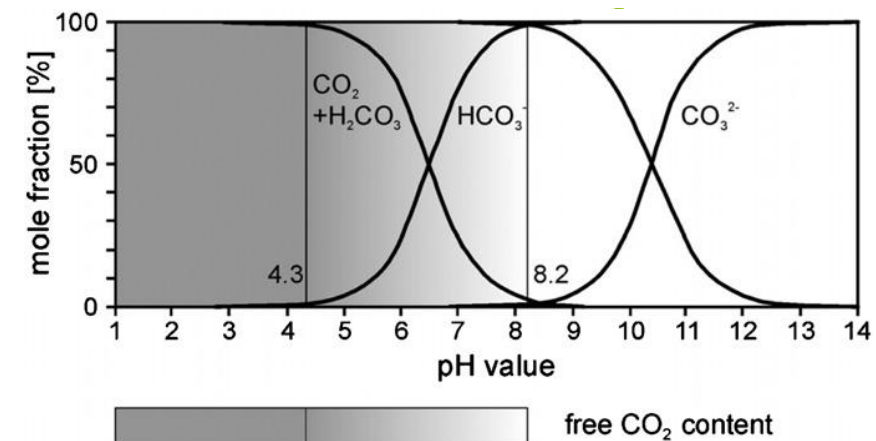
Mesurer les stocks de carbone et les flux de GES en zones humides

Comment mesurer les flux de GES?

- Sondes à $p\text{CO}_2$, $p\text{CH}_4$ et autres capteurs
- Prélèvements d'eau et analyses en laboratoire



Nke instrumentation, Perdrau, A., communication personnelle



Bansal et al., 2023, Zhao et al., 2021 et Zosel et al. 2011

Synthèse bibliographique

Facteurs d'influences sur les processus

Facteurs physico-chimiques

- Salinité
- Teneur en oxygène
- Potentiel Redox
- Potentiel hydrogène
- Pression partielle
- Disponibilité en accepteurs d'électrons
- Luminosité

Facteurs pédologiques

- Concentration en carbone organique
- Qualité de la matière organique
- Teneur en argile
- Ratio C:N
- Capacité d'échange cationique

Causes d'altérations

- Drainage
- Destruction et perte d'habitat
- Prélèvement en eau
- Création de plans d'eau
- Eutrophisation

Facteurs biotiques

- Type de végétation
- Teneur en lignine
- Stade trophique
- Types de communautés microbiennes
- Bioturbation
- Déséquilibre niveau trophique

Facteurs climatiques

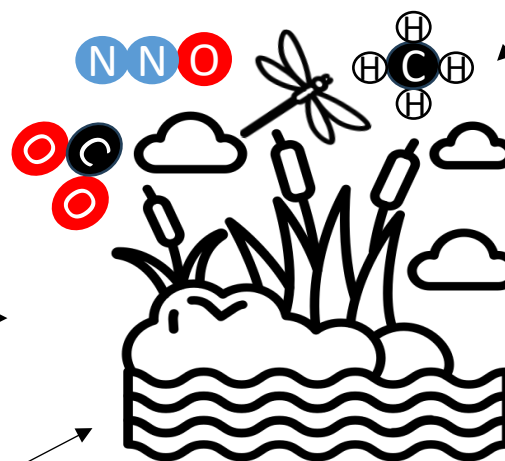
- Température de l'air
- Température du sol
- Précipitations
- Tempêtes
- Vent

Facteurs hydrologiques

- Niveau de la nappe
- Niveau de l'eau
- Saturation des pores en eau
- Régime tidal
- Durée d'inondation
- Débit
- Décharge de l'eau souterraine

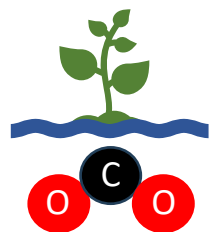
Changements climatiques

- Elévation température
- Canicule
- Pluies intenses – inondations
- Sécheresse prolongée
- Variabilité des régimes de précipitation
- Variabilité accrue des températures
- Elévation de la concentration en dioxyde de carbone atmosphérique
- Elévation du niveau marin
- Fréquence et intensité des événements extrêmes



Synthèse bibliographique

Facteurs d'influence sur les GES en zones humides



Température

Pluviométrie

Elévation
température

Sécheresse
prolongée

Salinité

Luminosité

Niveau de la
nappe

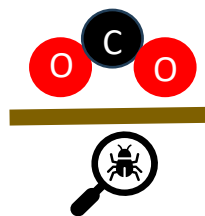
Quantité et
qualité en matière
organique

Stade
trophique

Type de
végétation

Destruction

Eutrophisation



Température

Elévation
température

Sécheresse
prolongée

Teneur en
oxygène
dissous

Potentiel
Hydrogène

Niveau de la
nappe

Ratio C:N

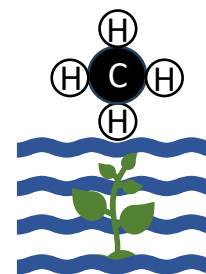
Quantité et
qualité en matière
organique

Stade
trophique

Types
communautés
microbiennes

Drainage

Eutrophisation



Température

Pluviométrie

Elévation
température

Pluies
intenses et
inondations

Potentiel
Redox

Salinité

Niveau de la
nappe

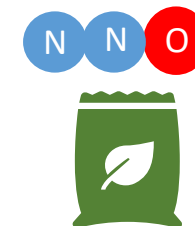
Quantité et
qualité en matière
organique

Type
communautés
microbiennes

Végétation à
aérenchymes

Drainage

Eutrophisation



Température

Elévation
température

Variabilité
régime
précipitations

Saturation des
pores du sol
en eau

Potentiel
Redox

Teneur en
oxygène
dissous

Potentiel
Hydrogène

Quantité et
qualité en matière
organique

Ratio C:N

Type
communautés
microbiennes

Drainage

Eutrophisation

Synthèse bibliographique

Facteurs d'influence sur les GES en zones humides

Facteurs abiotiques environnementaux

Paramètres	Captation CO ₂ (production primaire brute)	Émissions CO ₂ (respiration aérobie)	Emissions CH ₄	Emissions N ₂ O
Température	10-34°C (air) Cornic, 2025	5-55°C (sol) Kätterer et al., 1998; Richardson et al., 2012 et Sierra et al., 2015	20-42°C (sol) Morant et al 2020 Martinez- Eixarch et al., 2023	25-60°C (sol) Curie, 2006
Potentiel Redox	> +350-400 mV Husson, 2013	> +400-500 mV Boonman et al., 2024	Entre -100 mV – -300 mV Hou et al, 2000 Bridgham et al., 2013	Entre 100 et 400 mV Reddy et D'Angelo, 1994
Salinité	[NaCl] faible Wieski et al., 2011	[NaCl] faible Neubauer, 2013	<18 g/L Poffenberger et al., 2011	[NaCl] faible Rosentreter et al., 2021
Potentiel Hydrogène	Variable Xia et al., 2025 Gorham, 1991	> 5.5-6 Grybos et al., 2009 Duchaufour et al., 2024	Entre 5 et 9 Kostyurbenko et al, 2019	<4-5 Hefting et al., 2013

Synthèse bibliographique

Facteurs d'influence sur les GES en zones humides

Facteurs d'influence liés aux changements climatiques

Paramètres	Captation CO ₂ (production primaire brute)	Émissions CO ₂ (respiration aérobie)	Emissions CH ₄	Emissions N ₂ O
Elévation du niveau marin	Diminution Kirwan et al, 2012 Zhu et al, 2022	Diminution à augmentation Mcleod et al, 2011 Morant et al, 2020	Diminution Vizza et al, 2017 Grillas et al., 2023 Hartman et al, 2024	Augmentation à diminution Rosentreter et al, 2021 Doroski et al, 2019
Elévation de la température	Augmentation Bacon et al, 2017	Augmentation forte Hagerty et al, 2014	Augmentation forte Yvon-Durocher et al, 2017	Augmentation Bahram et al, 2022
Sécheresse prolongée	Diminution forte Han et al, 2023 Li et al, 2024	Augmentation forte Stirling et al, 2020	Diminution forte Stirling et al, 2020	Augmentation à diminution Stirling et al, 2020 Kasak et al, 2022
Variabilité accrue du régime de précipitation	Diminution à augmentation Fay et al, 2016 Shuwen et al., 2004	Augmentation à diminution Gao et al, 2018 Salimi et al, 2021	Diminution à augmentation T angen et Bansal, 2019 Cui et al, 2024 Kalhori et al, 2024	Augmentation forte Barrat et al, 2020

Synthèse bibliographique

Facteurs d'influence sur les GES en zones humides

Facteurs d'influence liés à des altérations anthropiques

Paramètres	Captation CO ₂ (production primaire brute)	Émissions CO ₂ (respiration aérobie)	Emissions CH ₄	Emissions N ₂ O
Destruction (aménagement)	Diminution forte Reza-Pezeshki, 2016 Zhang et al, 2020	Augmentation forte Zhang et al, 2020	Augmentation Rosentreter et al, 2021	Augmentation Rosentreter et al, 2021
Drainage	Diminution Cloern et al, 2024	Augmentation forte Kayranli et al., 2010 Gunther et al., 2020	Diminution Augustin et al., 1998 Cui et al, 2024	Augmentation Augustin et al., 1998 Bahram et al., 2022
Eutrophisation	Augmentation Zhang et al., 2022 Langley et Megonigal, 2010	Augmentation forte Liu et Greaver, 2009 Turner et al., 2009	Augmentation Tanner et al., 1997 Boon et al, 1997	Augmentation forte Davidson et al, 2000 Kuzakov et al, 2010

Synthèse bibliographique

Influence du type de zones humides sur la fonction climatique

Supplément « Wetlands »

- Différentes utilisations des terres indiquées
- Distinction entre « inland » (continental) et « costal » (côtier ou littoral)
- Distinction entre « mineral soil » et « organic soil » (tourbières)
- Distinction entre « wet » (en bon état) et « drained »
- Prise en compte de la zone climatique : Tempéré, Boréal, Tropical

Figure 1.2

Soil based subcategories addressed in the *Wetlands Supplement*

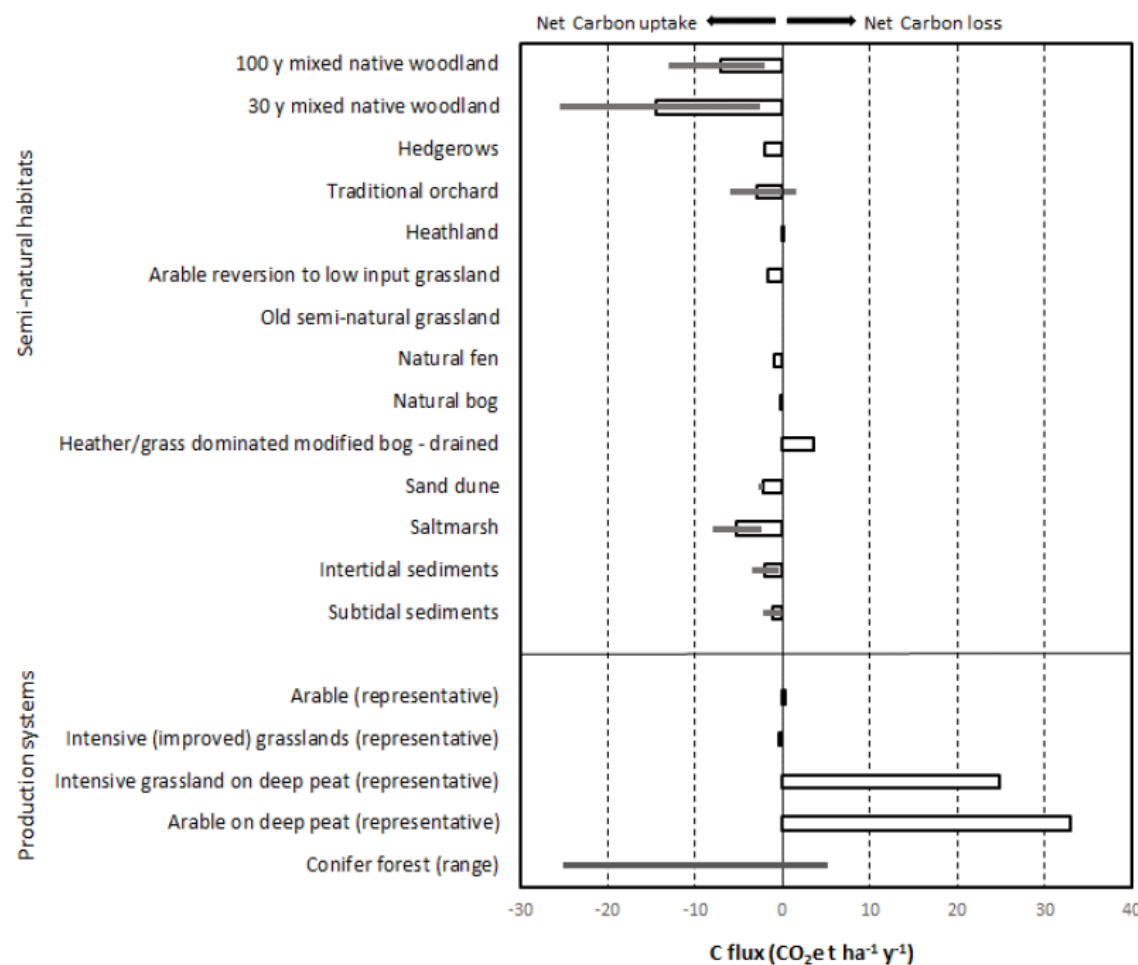
	Forest Land		Crop-land		Grass-land		Wet-lands		Settle-ments		Other Land	
	inland	coastal	inland	coastal	inland	coastal	inland	coastal	inland	coastal	inland	coastal
mineral soil	mineral drained	mineral drained	mineral drained	mineral drained	mineral drained	mineral drained	mineral drained	mineral drained	mineral drained	mineral drained	mineral drained	mineral drained
	mineral wet	mineral wet	mineral wet	mineral wet	mineral wet	mineral wet	mineral wet	mineral wet	mineral wet	mineral wet	mineral wet	mineral wet
organic soil	organic drained	organic drained	organic drained	organic drained	organic drained	organic drained	organic drained	organic drained	organic drained	organic drained	organic drained	organic drained
	organic wet	organic wet	organic wet	organic wet	organic wet	organic wet	organic wet	organic wet	organic wet	organic wet	organic wet	organic wet

Notes on Figure 1.2: Guidance for all the soils shown in this figure is included in the *Wetlands Supplement*. Guidance for 'mineral dry' soils except for those drained for long-term cultivation and drained coastal wetlands (see Note 5) is provided in the *2006 IPCC Guidelines*.

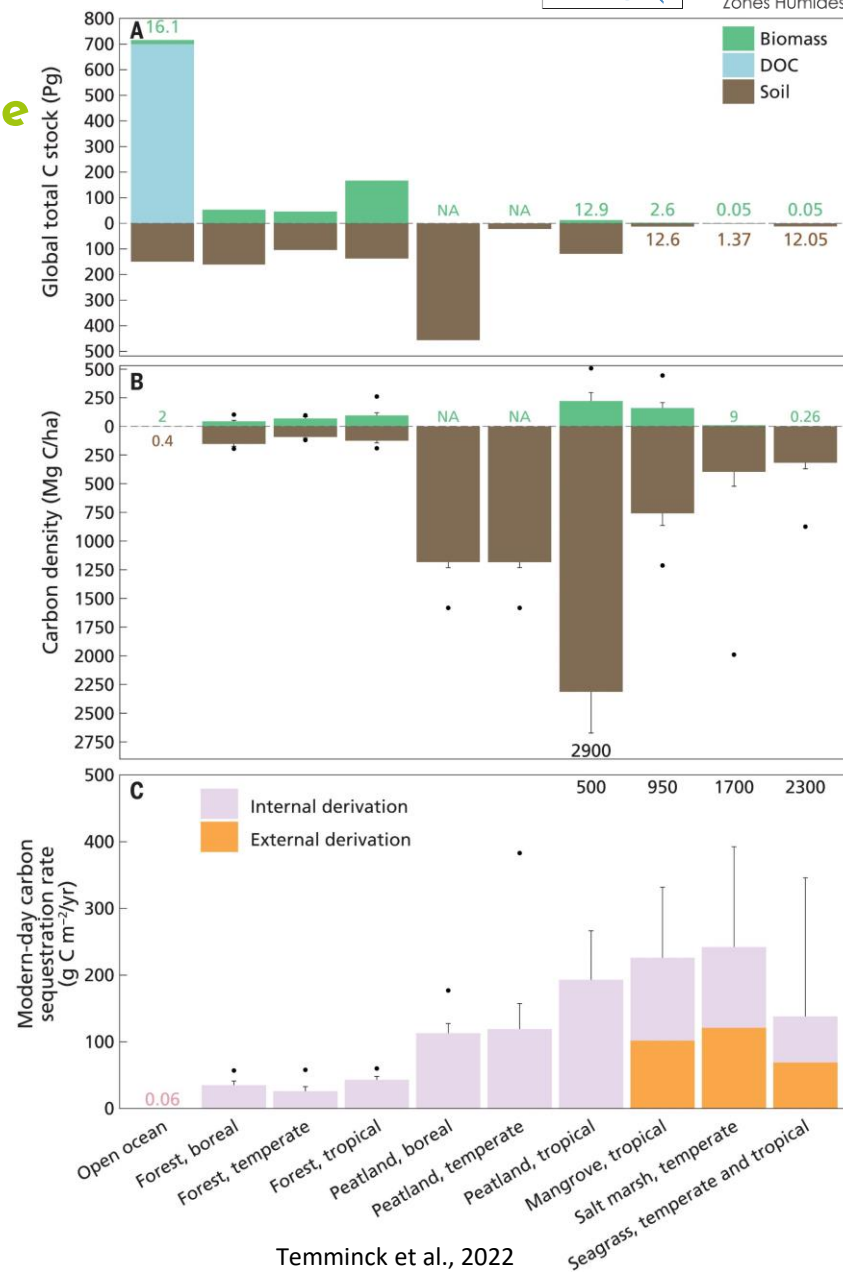
Synthèse bibliographique

Influence du type de zones humides sur la fonction climatique

Tableau comparatif par type de milieux



Gregg et al., 2021

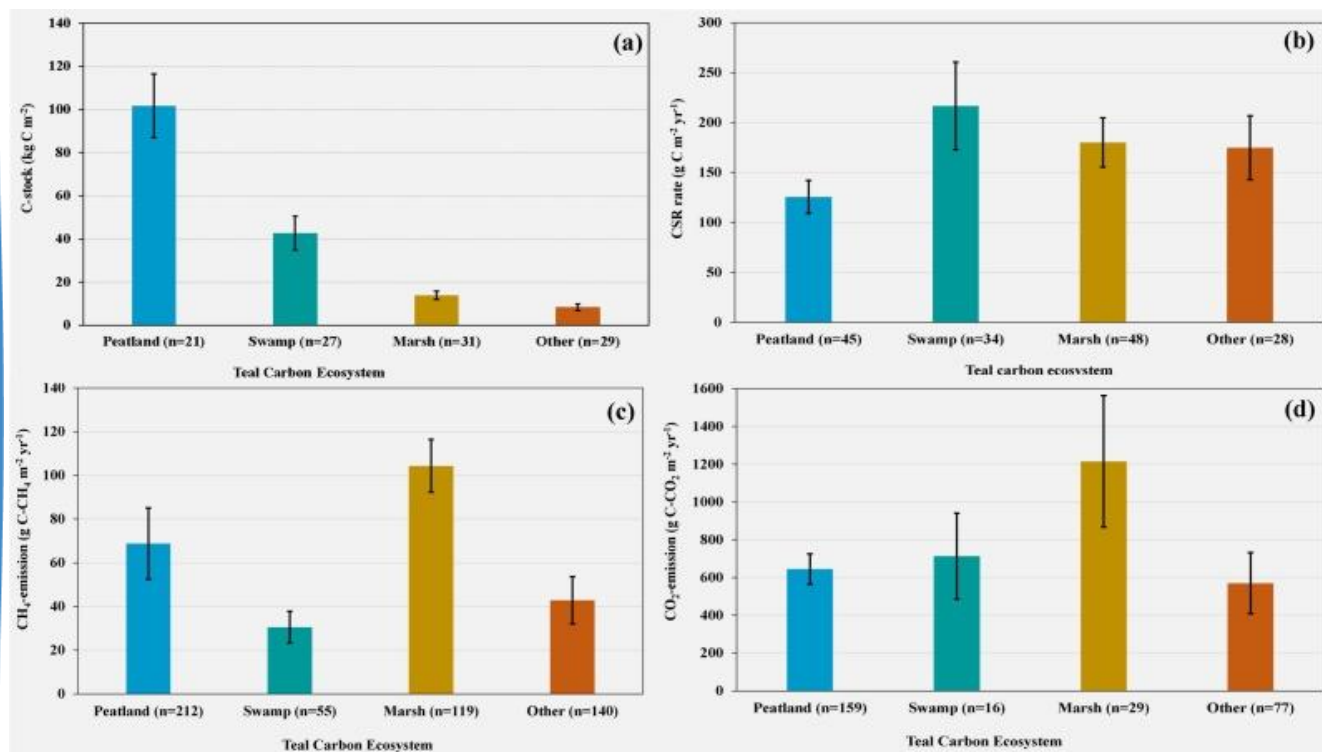


Temminck et al., 2022

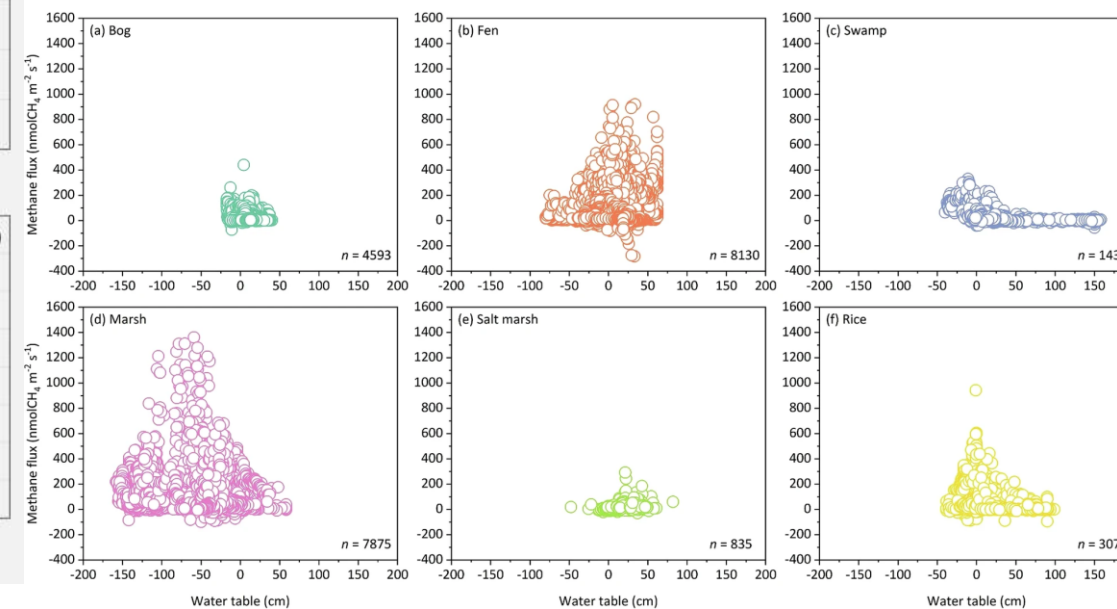
Synthèse bibliographique

Influence du type de zones humides sur la fonction climatique

Tableau comparatif par type de zones humides



Kumar et al., 2025



Cui et al., 2024

Synthèse bibliographique

Influence du type de zones humides sur la fonction climatique

Tableau comparatif par type de zones humides

Type de zone humide	Taux de séquestration du carbone (sol/sédiment)	Taux d'émission de méthane	Capacité à agir comme un puits de GES net	Stock de carbone
Vasière intertidale	Faible à modéré	Faible	Faible à Modérée	Modéré à élevé
Pré salé	Elevé	Faible	Elevée	Elevé
Mangrove	Elevé	Faible à élevé	Modérée à élevée	Elevé
Herbier marin	Modéré à élevée	Faible	Elevée	Modéré à élevé
Marais doux sous influence tidale	Modéré à élevée	Elevé	Faible à modérée	Modéré
Forêt estuarienne	Elevé	Faible	Elevée	Modéré
Tourbière tropicale	Faible	Modéré à élevé	Modérée	Très élevé
Tourbière tempérée et boréale	Faible	Modéré à élevé	Modérée	Très élevé
Zone humide intérieure d'eau douce sur sol minéral	Faible à élevé	Elevé	Faible à modérée	Faible à modéré
Zone humide d'eau douce boisées sur sol minéral	Elevé	Modéré à élevé	Modérée	Elevé à très élevé

Influence du type de zones humides sur la fonction climatique

Typologie retenue de zones humides retenir au regard de l'objectif spécifique de la synthèse

- Proposition de se baser sur la **typologie EUNIS** des habitats humides, en accord avec la définition des zones humides française précisée par l'arrêté de 2008, en ayant recours au **supplément Wetlands** du GIEC en complément
- **Valeurs de référence** (stock, taux de séquestration, production primaire brute, échange net de l'écosystème, émission de CH₄, émission de N₂O) à associer par type d'habitat dans la mesure du possible en précisant les incertitudes

Valeurs de référence

- **Tiers 1** – Supplément Wetlands du GIEC de 2014 et de projets de recherche internationaux dans des climats similaires
- **Tiers 2** – Valeurs issues d'études françaises adaptées au territoire d'étude et de projets de recherche européens dans des climats similaires
- **Tiers 3** – Valeurs issues d'études à grande échelle en France ou de réseaux de suivis locaux s'inscrivant sur le long terme

Influence du type de zones humides sur la fonction climatique

22 Habitats humides EUNIS (végétation spontanée) et niveau typologique associé

- Herbiers intertidaux (**A2.6**) – zones humides littorales/sols minéraux (GIEC)
- Slikke (**A2.3**) – sols minéraux - zones humides littorales/sols minéraux (GIEC)
- Schorre (**A2.5** sauf A2.53) – zones humides littorales/sols minéraux (GIEC)
- Marais saumâtre (**A2.53**) – zones humides littorales/sols minéraux (GIEC)
- Mares permanentes méso à eutrophes (C1.2 et **C1.3**) - zones humides littorales/sols minéraux (GIEC)
- Mares temporaires (**C1.6**) – zones humides continentales/sols minéraux (GIEC)
- Hélophytes (roselières et apparentés) (**C3.2** et C3.3) - zones humides continentales/sols minéraux (GIEC)
- Berges inondées périodiquement à végétation pionnière (**C3.5**) - zones humides continentales/sols minéraux (GIEC)
- Tourbières acides à sphaignes à tendance oligotrophe (bog) (**D1.1**, D2.2) - zones humides continentales/sols organiques (GIEC)
- Tourbières alcalines à herbacées et bryophytes (fen) (**D4.1**) – zones humides continentales/sols organiques (GIEC)
- Tourbières à grands hélophytes et apparentés (rich fen) (**D5.1** et **D5.2**) – zones humides continentales/sols organiques (GIEC)
- Forêts marécageuses tourbeuses (**G1.5** et **G3.E**) – zones humides continentales/sols organiques (GIEC)
- Marais doux prairiaux (**E2.12**, **E.62** et E3.4) – zones humides littorales et continentales/sols minéraux (GIEC)
- Prairies humides méso à eutrophes (**E3.4**) – zones humides continentales/sols minéraux (GIEC)
- Prairies humides oligotrophes (**E3.5**) - zones humides continentales/sols minéraux (GIEC)
- Mégaphorbiaies (**E5.4**) – zones humides continentales/sols minéraux (GIEC)
- Landes humides (**F4.1**) – zones humides continentales/sols minéraux (GIEC)
- Fourrés ripicoles et marécageux (F9.1 et **F9.2**) – zones humides continentales/sols minéraux (GIEC)
- Saulaies riveraines (**G1.11**) - zones humides continentales/sols minéraux (GIEC)
- Aulnaies-frênaies riveraines (**G1.21**) - zones humides continentales/sols minéraux (GIEC)
- Chenaies-frênaies riveraines de grands fleuves (**G1.22**) - zones humides continentales/sols minéraux (GIEC)
- Forêts marécageuses (**G1.4**) - zones humides continentales/sols minéraux (GIEC)

Tableaux de
valeurs de
référence
« carbone »
par habitat
humide à venir

Gestion et restauration des zones humides

Changements d'usage et altérations

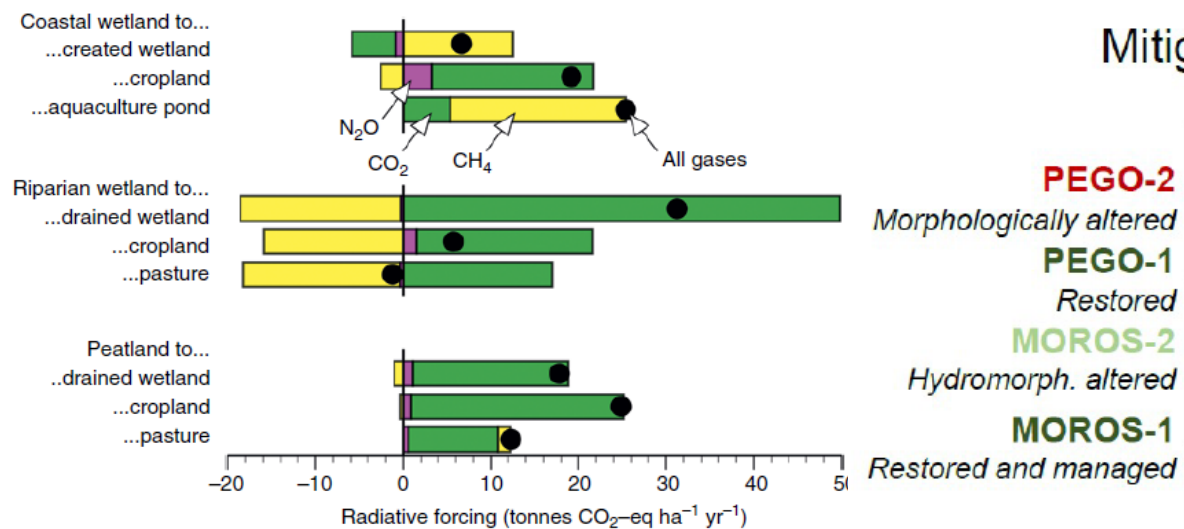
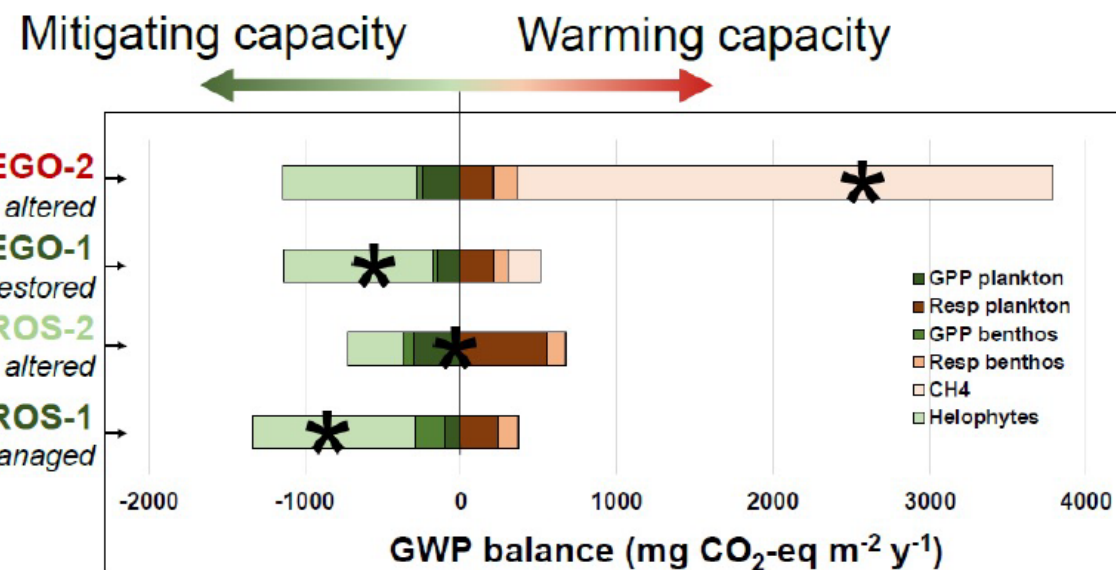


Figure 3.5 Contributions of CO₂, CH₄, and N₂O to radiative forcing due to land use/land cover cl bar segments show the radiative forcing from each individual gas. Black circles show the overall radiative forcing from all three gases combined. Source: Data from Tan et al. (2020).

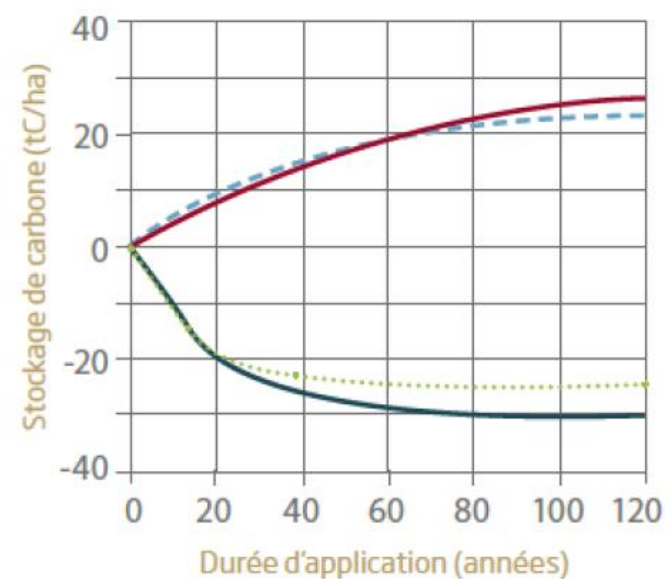
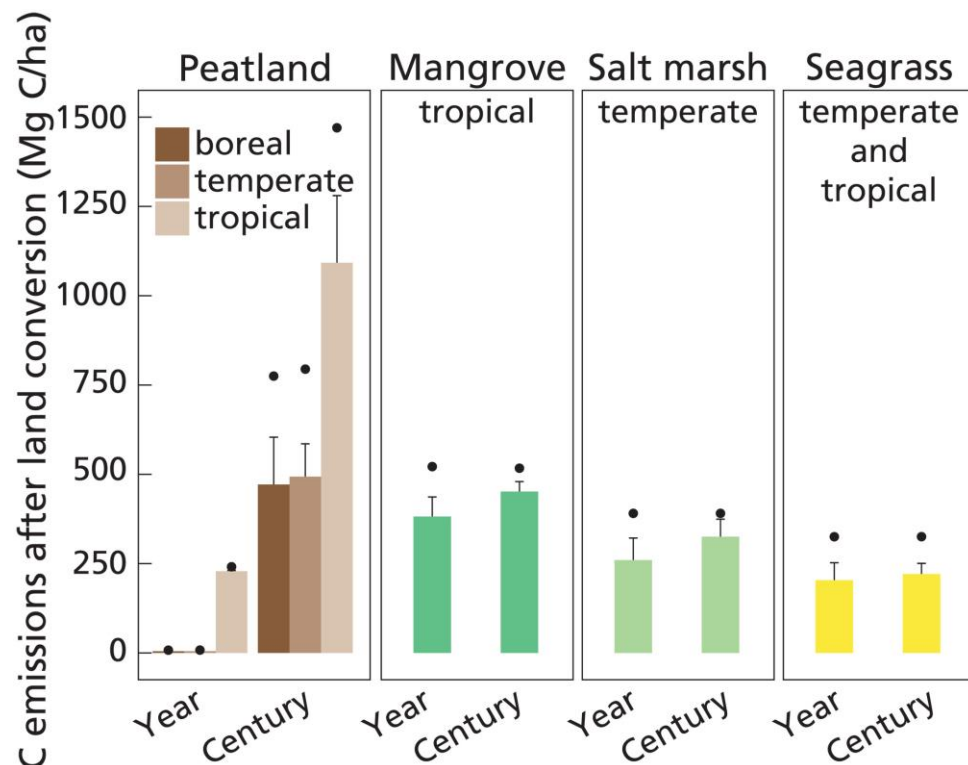
Krauss et al., 2021



Morant et al., 2020

Gestion et restauration des zones humides

Changements d'usage et altérations



Pendant les vingt premières années suivant un changement d'affectation des sols, le déstockage est deux fois plus rapide que le stockage. Au bout de plusieurs décennies voire plus d'un siècle, un stockage peut compenser un déstockage.

source : d'après Arrouays et al. 2002

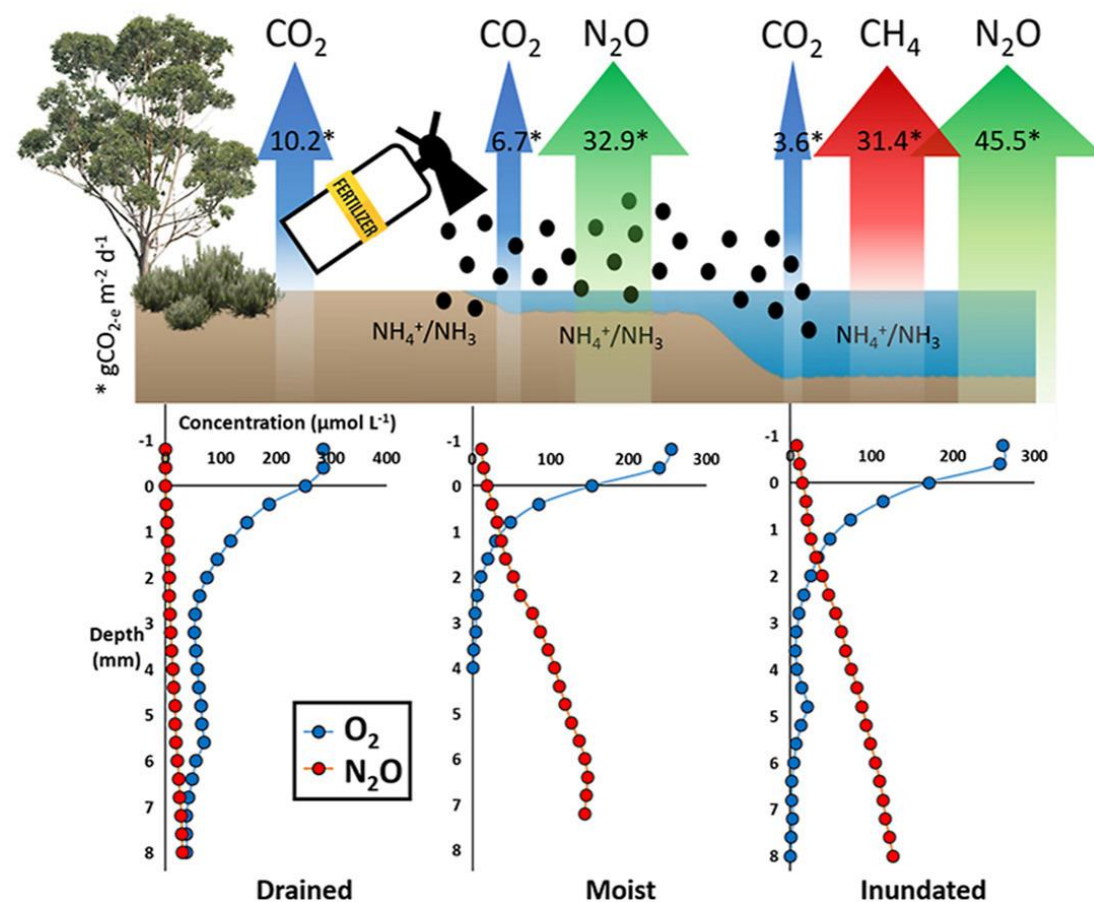
Figure 2 - Etude du taux de carbone selon les changements d'affectation des sols (source : ADEME d'après Arrouays et al. 2002)

Gestion et restauration des zones humides

Agriculture

- L'érosion du sol liée aux pratiques agricoles (labour), le drainage et l'eutrophisation sont trois causes majeures de la dégradation des stocks de carbone présents dans les zones humides continentales
- L'ajout de biochar, le chaulage, le gypsage, l'enfouissement des résidus de culture, les couverts d'interculture la limitation de l'usage de pesticides pourraient atténuer l'émission de certains GES de zones humides agricoles cultivés

McCarty et Ritchie, 2002 et Salm et al., 2009, Euliss et al., 2006, Shi et al., 2014 et Beetz et al., 2013; Ma et al., 2025 et FAO, 2021

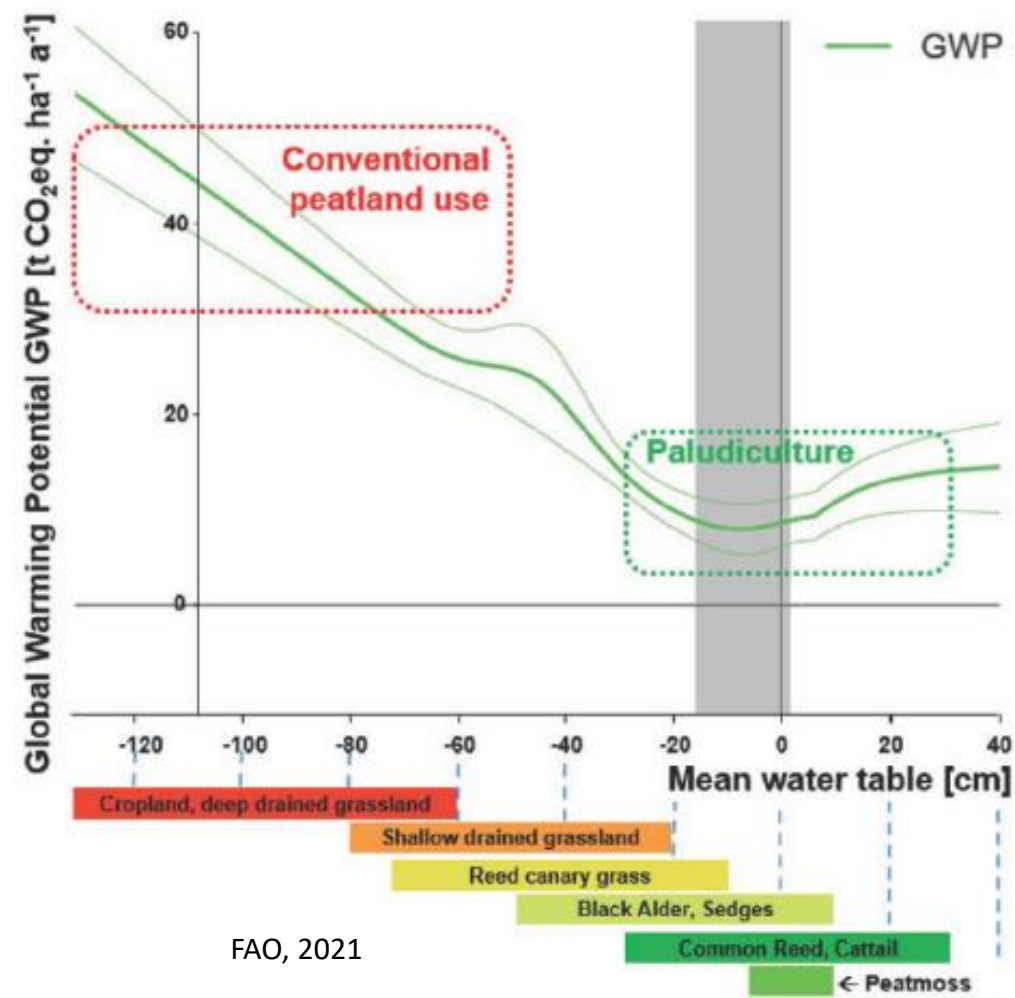


Bonetti et al., 2022

Gestion et restauration des zones humides

Agriculture

- Pas de consensus sur les effets du pâturage sur le stock de carbone et les GES en zones humides
- L'intensité de pâturage est déterminant pour traduire un effet positif ou négatif sur le stock de carbone. Le pâturage stockerait davantage de carbone dans les sols agricoles que la fauche
- La paludiculture est préconisée afin d'associer activité agricole et enjeu climatique en tourbières
- La récolte tardive d'hélophytes induit des émissions de CH_4 réduites et une productivité végétale et une captation de carbone accrue par rapport à une récolte précoce



Gestion et restauration des zones humides

Sylviculture

- Le drainage en vue de l'exploitation forestière dégrade le stock de carbone des sols et la poursuite de l'exploitation forestière sans restaurer le fonctionnement hydrologique n'est pas efficiente pour le climat
- L'exploitation d'une peupleraie en Italie pendant 40 ans diminue le stock de carbone du sol de près de 25% jusqu'à 45 cm de profondeur en comparaison à une forêt alluviale adjacente
- Les interventions inhérentes à la gestion forestière (éclaircie, récolte) impactent également le stock du carbone et les GES
- Une libre évolution de milieux ouverts ou forestiers aurait un impact positif sur le stockage de carbone

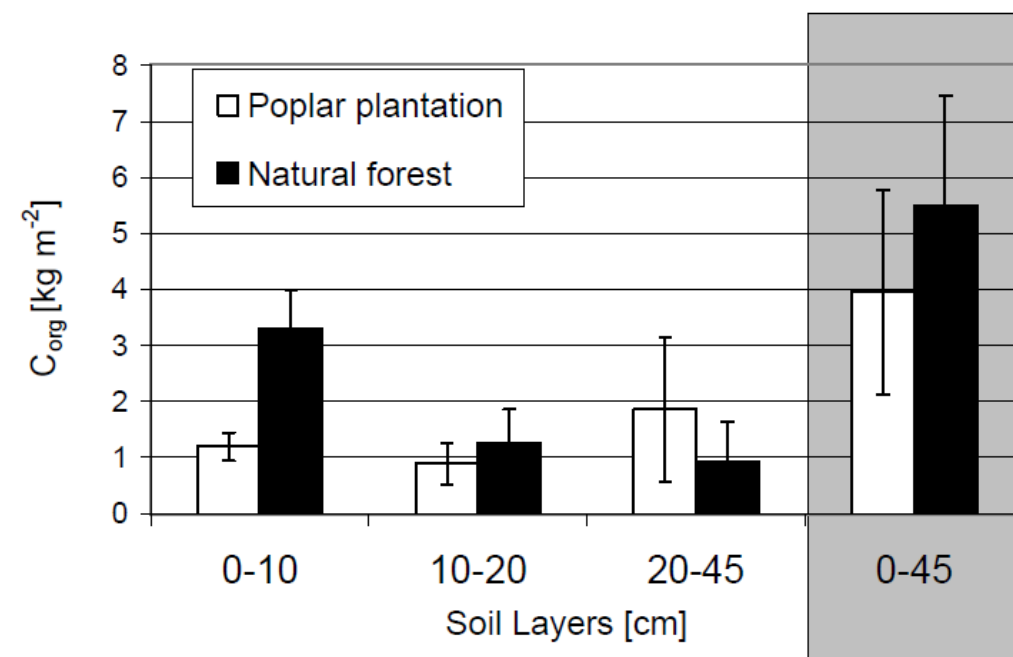


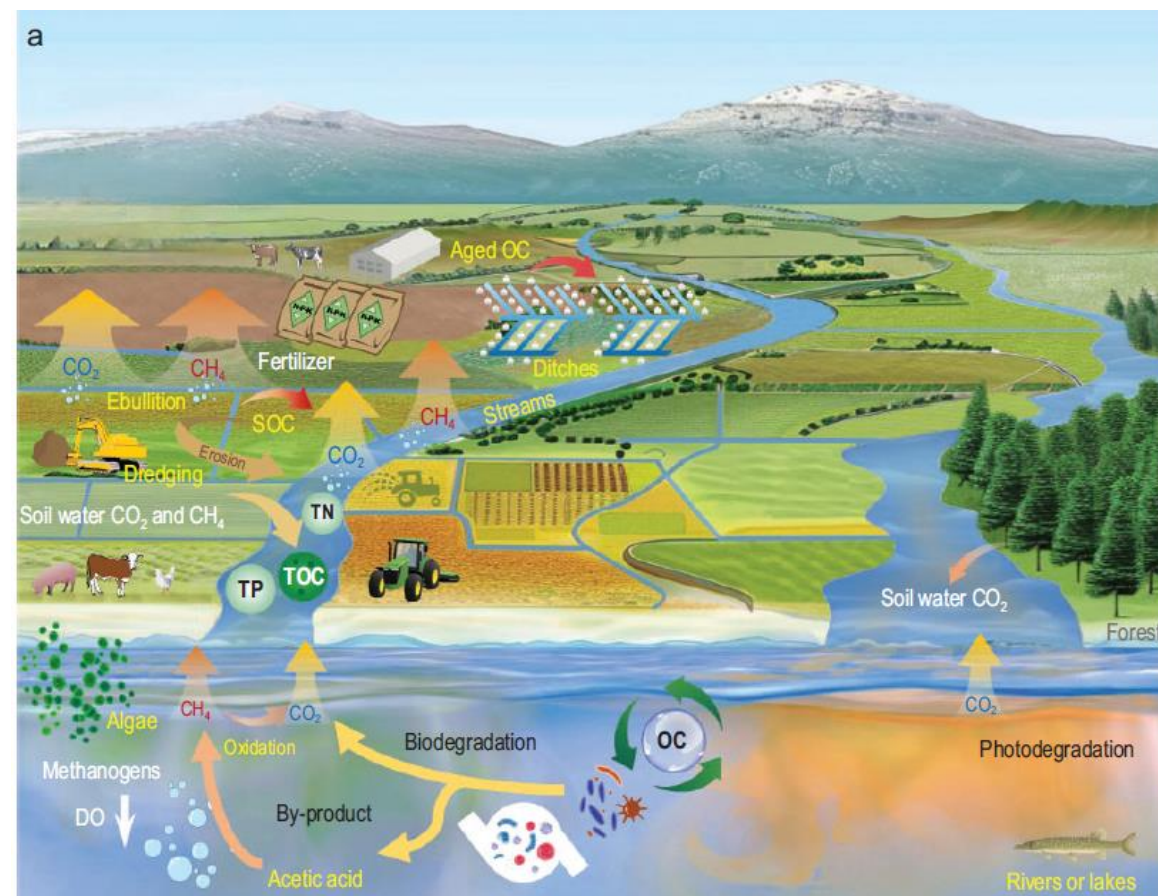
Fig. 6. Content of soil organic carbon in three different soil layers and in the soil profile down to 45 cm at the NF and the PP site.

Ferré et al., 2005

Gestion et restauration des zones humides

Gestion de l'eau

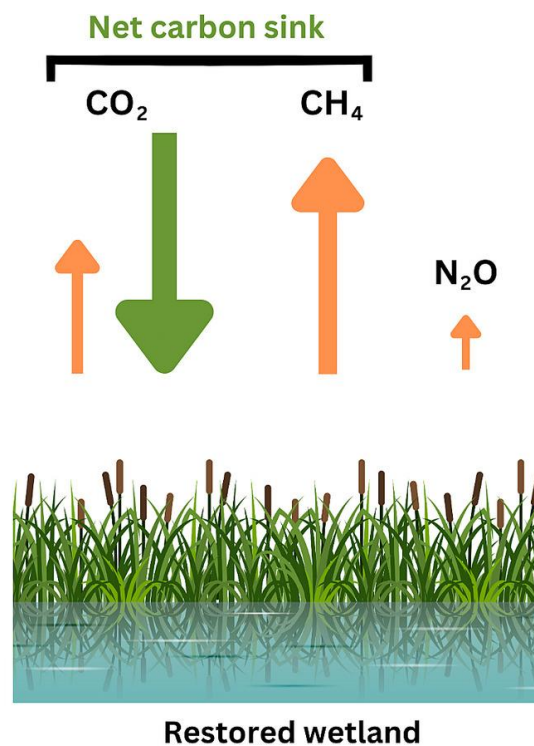
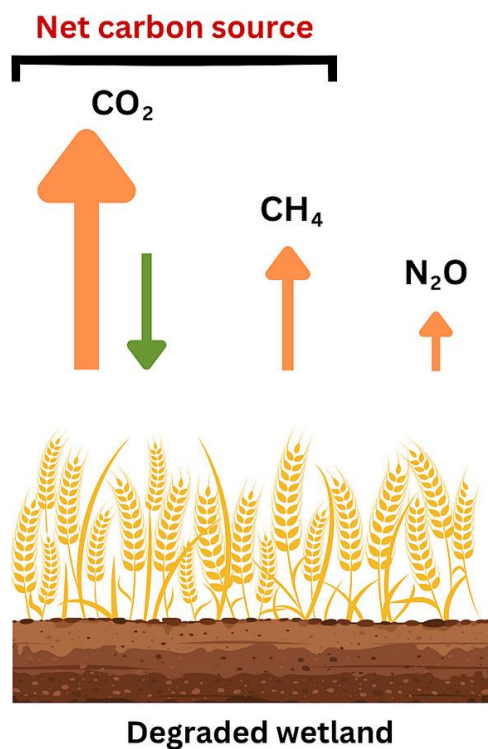
- La réalimentation estivale en eau douce de marais stimulerait les émissions de méthane notamment ceux avec les plus forts taux de productivité. Les périodes de fortes températures notamment l'été sont les plus critiques
- Les émissions de méthane apparaissent négligeables à salinité élevée >18-20g/L même si elles peuvent persister au-delà
- La hauteur d'eau du compartiment aquatique de la zone humide gérée est à prendre compte particulièrement
- Les fossés seront globalement sources de GES en particulier de CH_4 (28,6 $\text{tCO}_2\text{eq.ha}^{-1}\text{.an}^{-1}$ dans une ferme laitière aux Pays Bas)



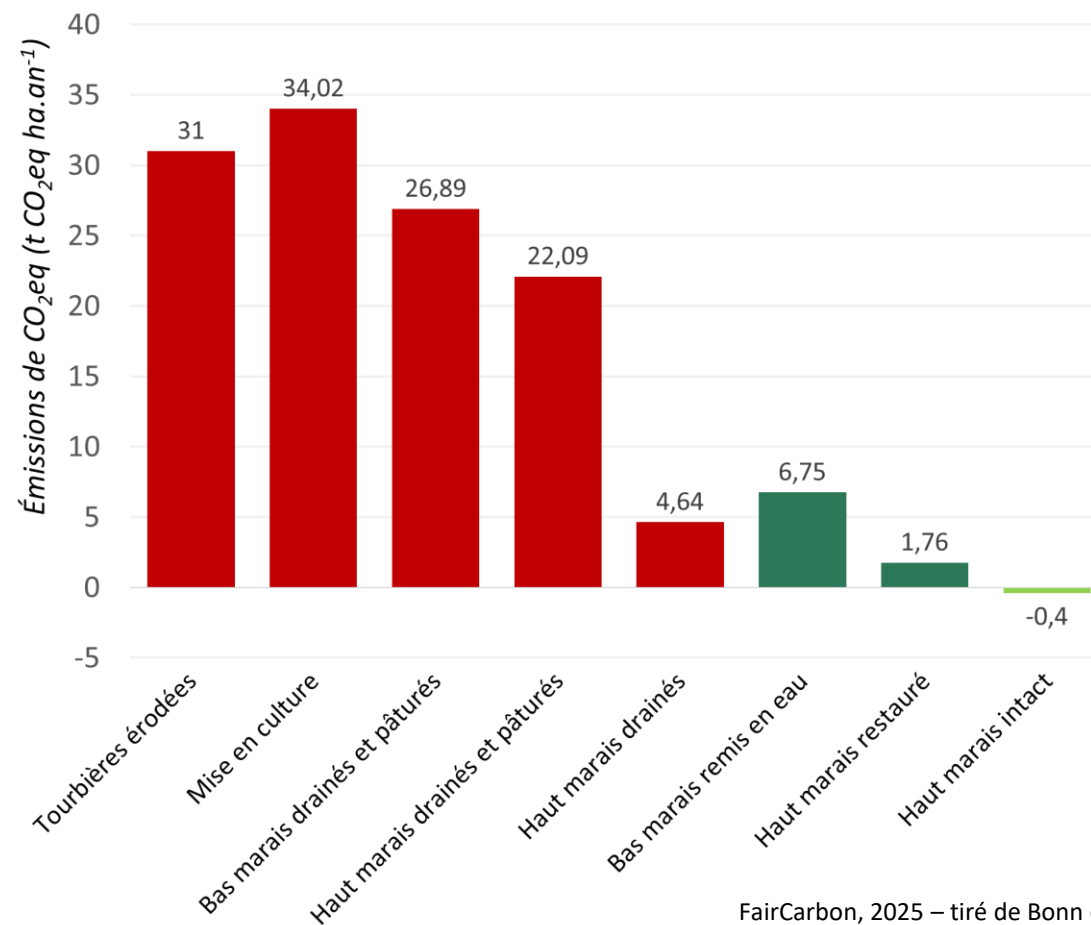
Synthèse bibliographique

Gestion et restauration des zones humides

Restauration



Schuster et al., 2024



FairCarbon, 2025 – tiré de Bonn et al., 2014

Synthèse bibliographique

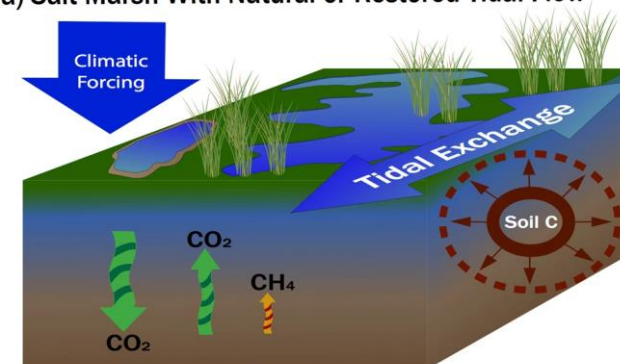
Gestion et restauration des zones humides

Restauration

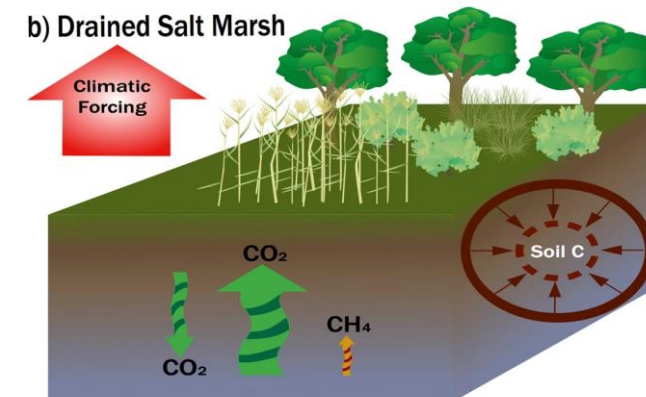
- La restauration de la fonction hydrologique des zones humides dégradées permet de limiter les émissions de dioxyde de carbone par décomposition de la matière organique et peut accroître la séquestration de carbone
- La restauration hydraulique de zones humides continentales implique souvent l'émission de méthane. Ces émissions de méthane peuvent perdurer entre plusieurs mois jusqu'à quelques décennies après restauration
- La restauration de zones humides conduirait à une augmentation moyenne de 544.4% de CH_4 , une réduction de 62% de N_2O et une réduction de CO_2 de l'ordre de 138.8% avec des **variations importantes** selon le type de zones humides.

Wu et al., 2025; He et al., 2024; Crook et al., 2018, Villa et Mitsch, 2014, Bacon et al., 2017

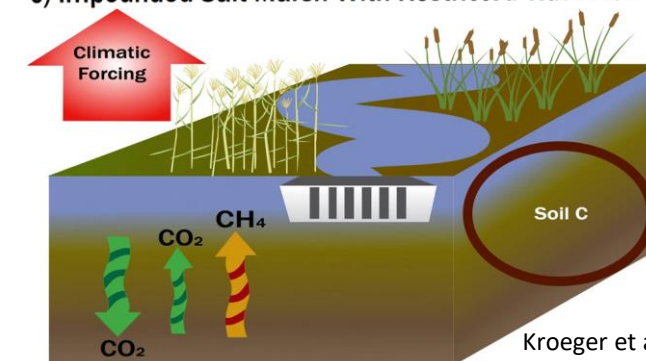
a) Salt Marsh With Natural or Restored Tidal Flow



b) Drained Salt Marsh



c) Impounded Salt Marsh With Restricted Tidal Flow

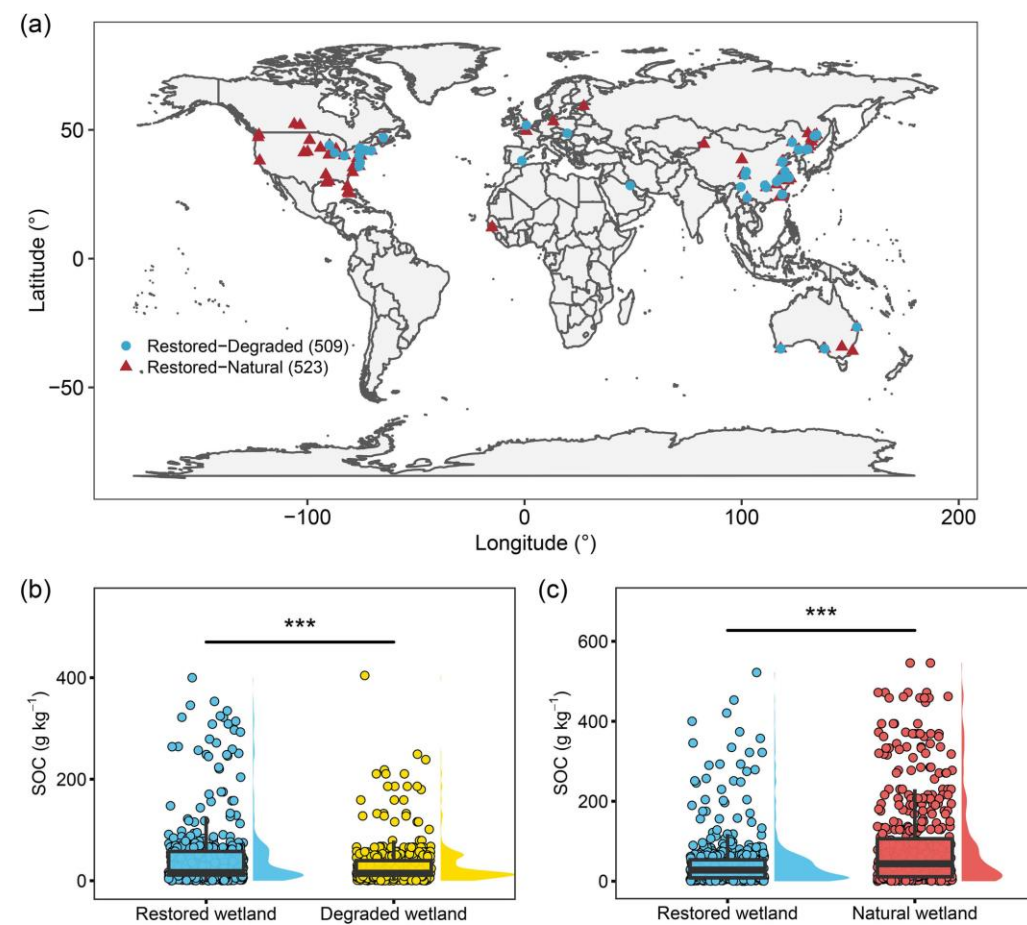


Kroeger et al., 2017

Gestion et restauration des zones humides

Restauration

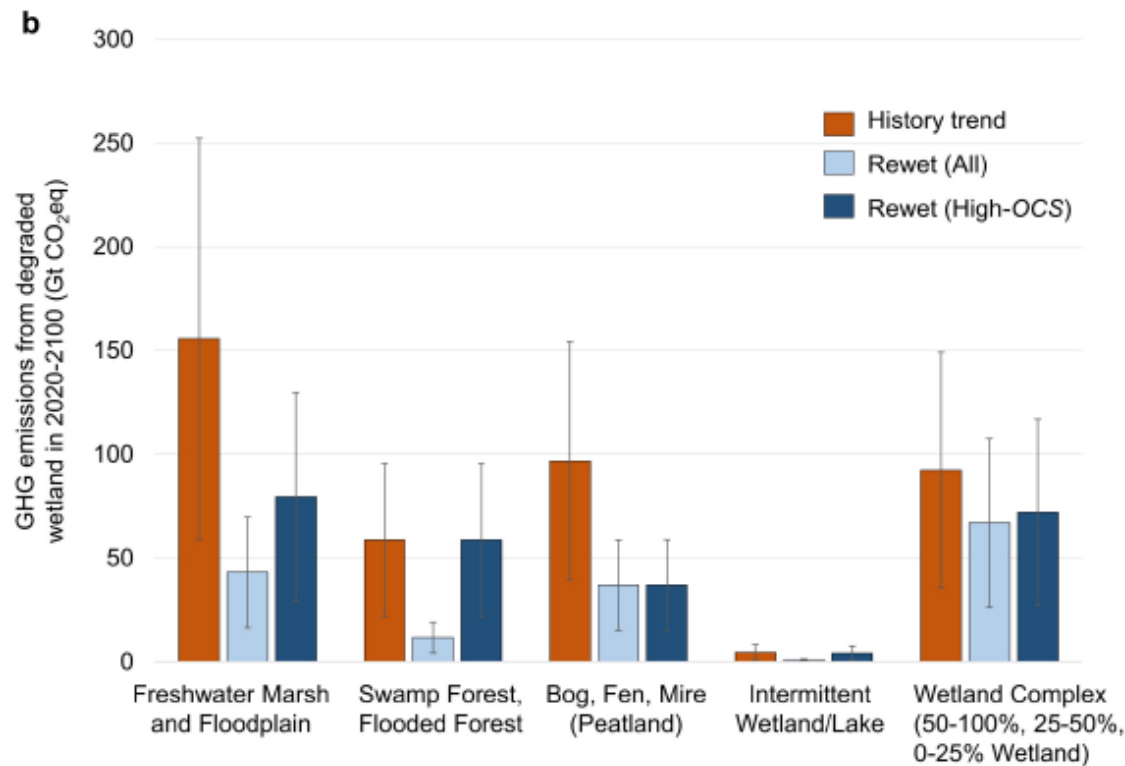
- Au total, la restauration de zones humides conduirait à une réduction entre 43 et 90% du potentiel réchauffant global par rapport à des types équivalents de zones humides drainées
- La restauration de zones humides ne permet souvent pas d'atteindre des taux de séquestration et des taux carbone organique dans les sols aussi élevés que dans des zones humides intactes.
- Pour tout de suivi « carbone » de restauration de zones humides, un suivi rigoureux « avant » et « après » travaux de restauration devrait être prévu sur une durée longue (entre 10 et 20 ans à minima)



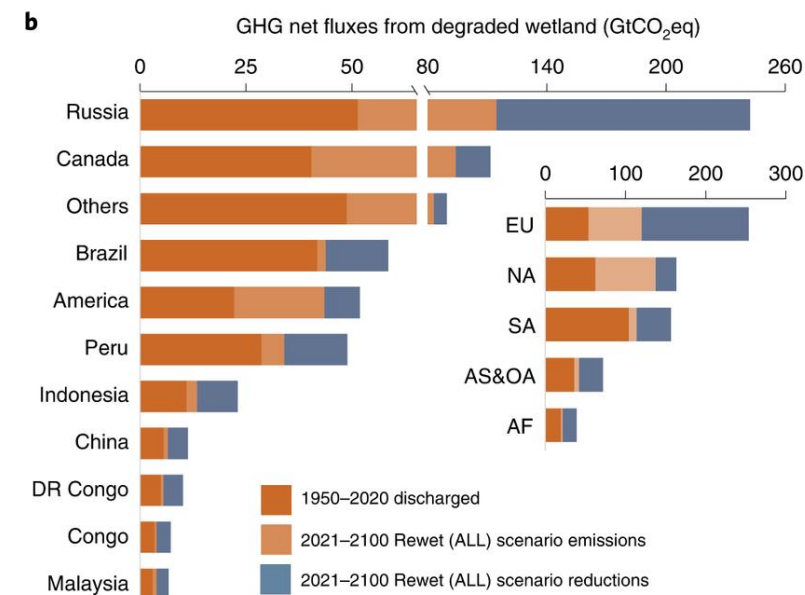
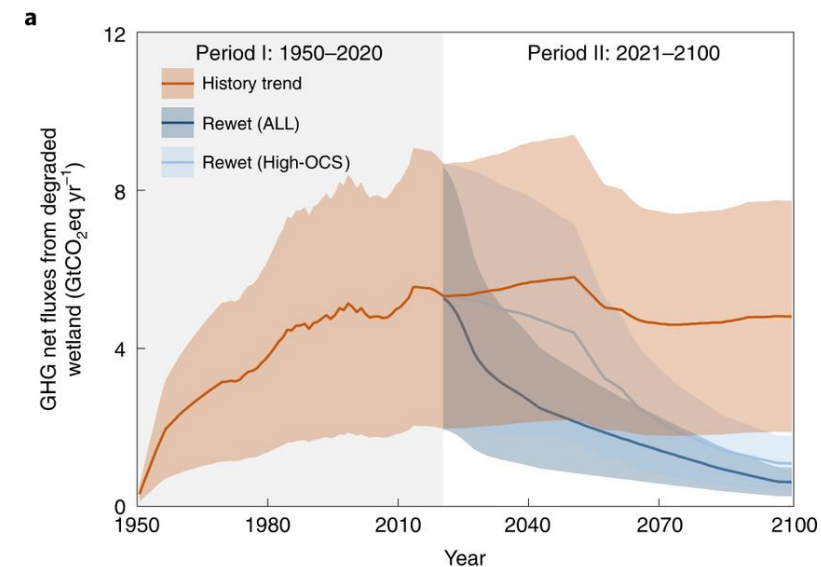
Synthèse bibliographique

Gestion et restauration des zones humides

Restauration



Zou et al., 2022



Des questions ?

Méthodologie d'enquête

Démarche questionnaire

29 Avril- 16 Juin (1 mois et demi)

1^{ère} Envoi – 1500

Gestionnaires/Techniciens triés

dans les contacts FMA

2^{ème} Envoi – Même liste

Demande de diffusion auprès des

partenaires d'entretiens

= 175 répondants

Démarche entretien

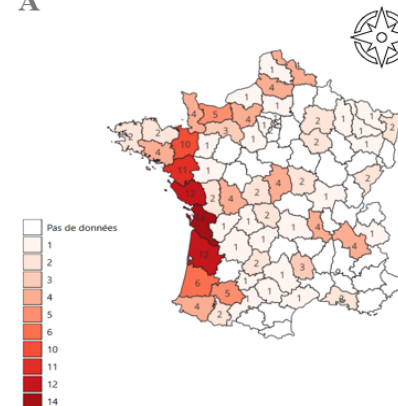
Début Avril – Début Juillet

(3mois)

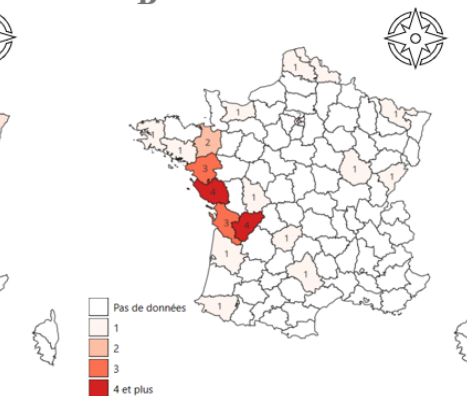
Volonté d'avoir des acteurs
publics de tous types mais aussi
des acteurs privées (en vain).

= 32 échanges semi-directifs
d'une heure en moyenne

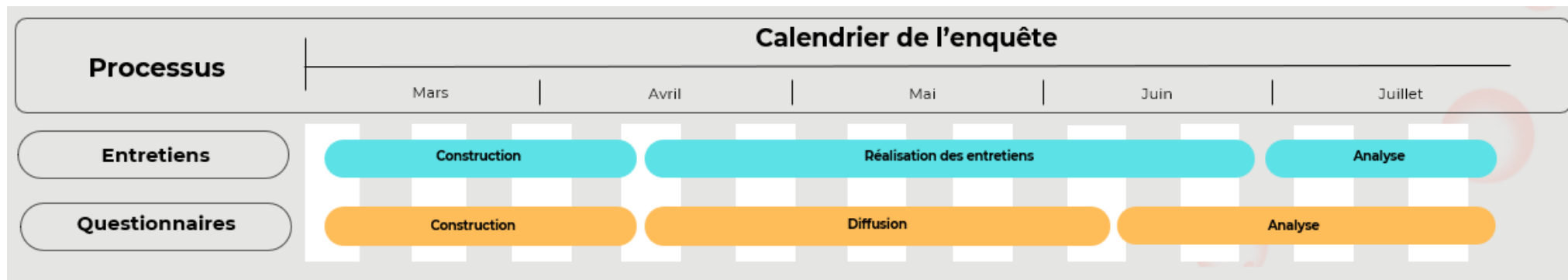
A



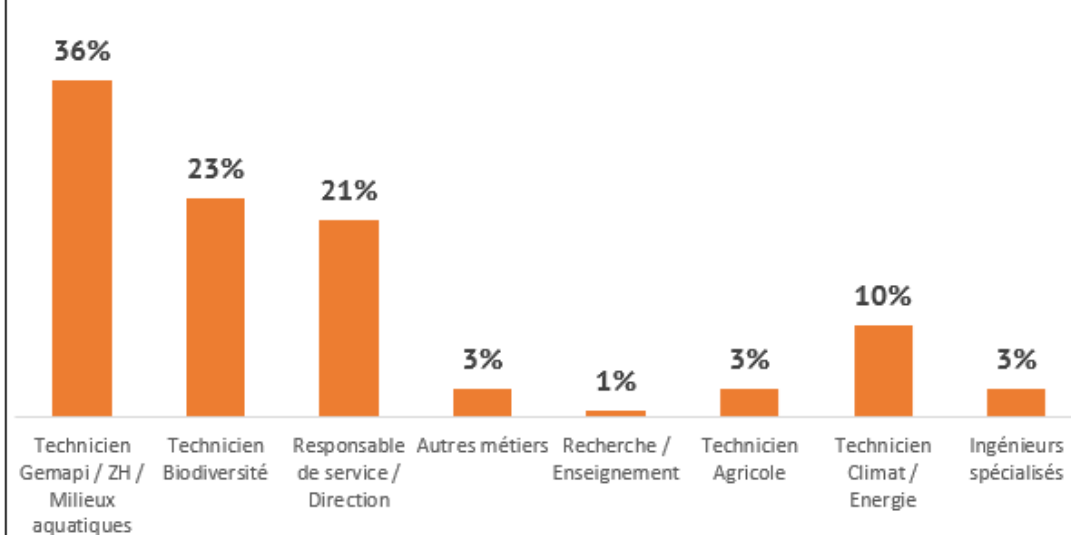
B



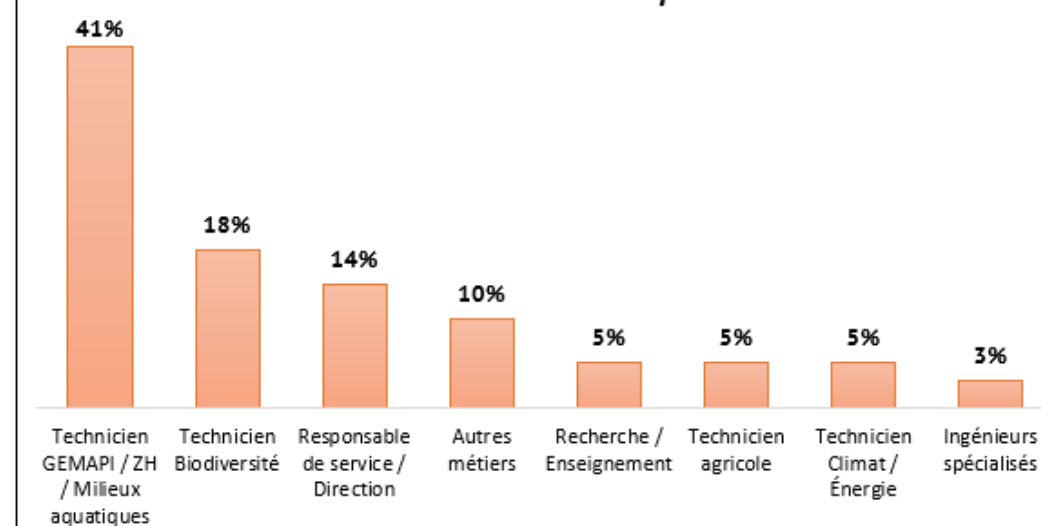
Répartition spatiale des répondants au questionnaire (A) et aux entretiens (B)



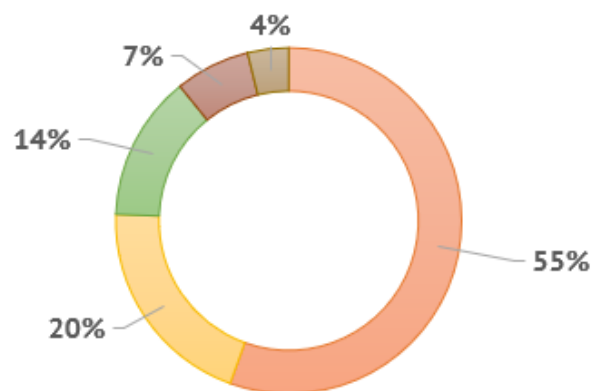
Parts en % des métiers de la liste d'envoi



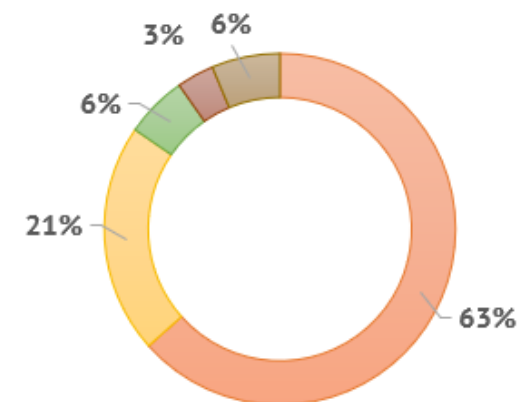
Parts en % des métiers de l'échantillon de répondant



Répartition des types de structure en % de la liste d'envoi



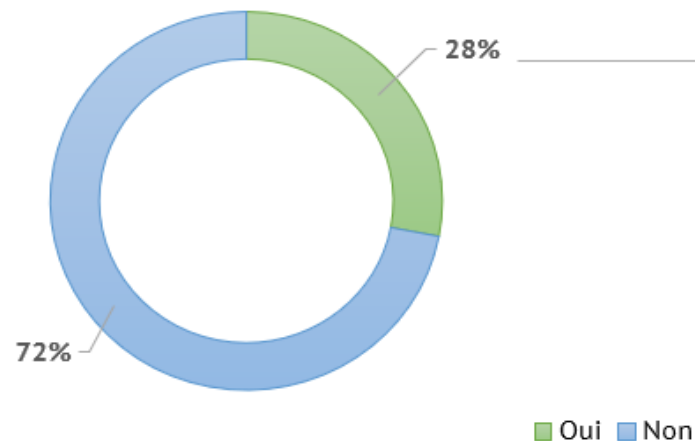
Répartition des structures en % du corpus de répondant à l'enquête



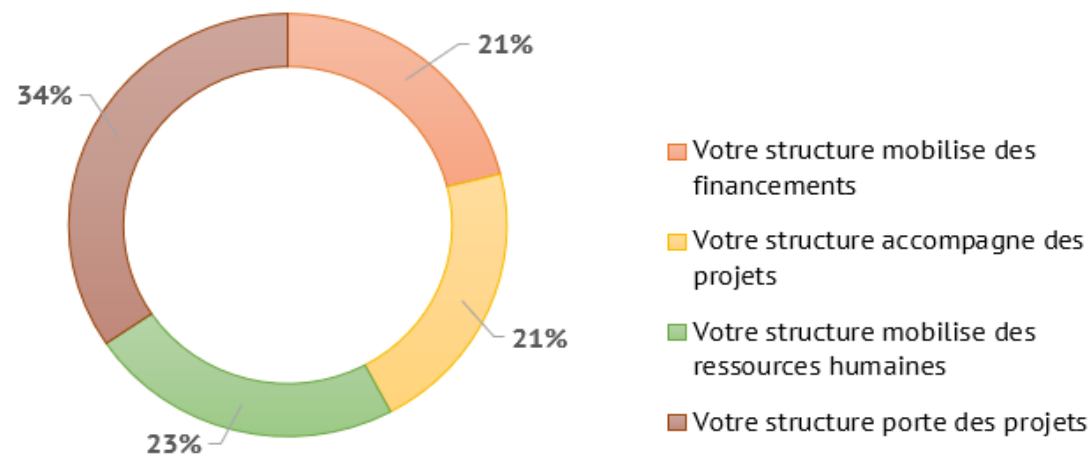
Collectivité territoriale Autre Etablissement Public Organisation Environnementale Organisation Agricole Autres

Est-ce que votre structure travaille sur la relation Carbone et ZH ? Si oui, comment ?

Part de Oui et de Non en %



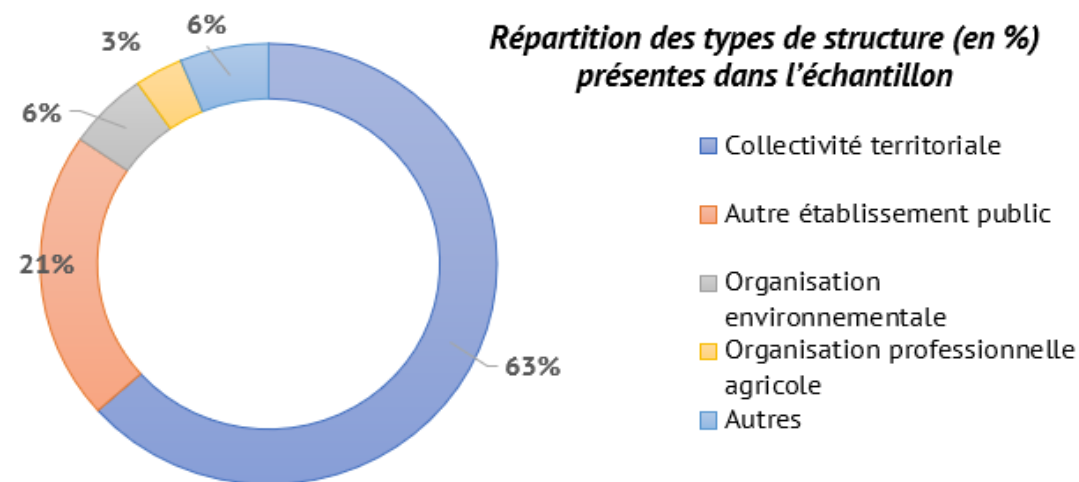
La répartition des manières et outils mobilisés si la réponse est positive



Clés de lecture :

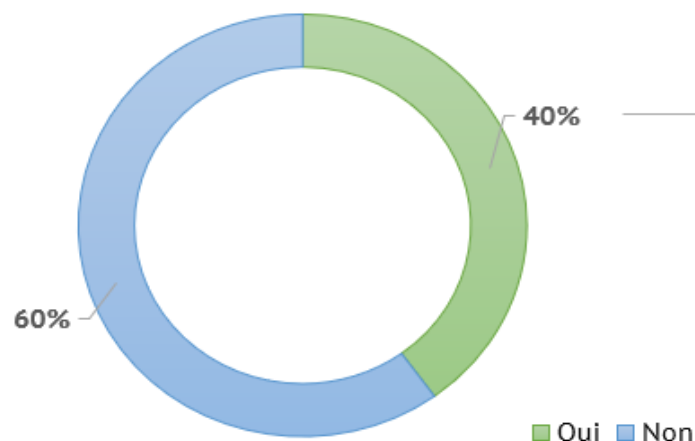
- ✓ Seules 28 % des structures déclarent travailler sur le lien carbone-ZH.
- ✓ Cela représente que 29 collectivités sur 111
- ✓ Les organisations environnementales sont les plus engagées proportionnellement avec 60 % d'implication.
- ✓ Les structures agricoles qui ont répondu mobilisent toutes des financements sur cette questions

Répartition des types de structure (en %) présentes dans l'échantillon

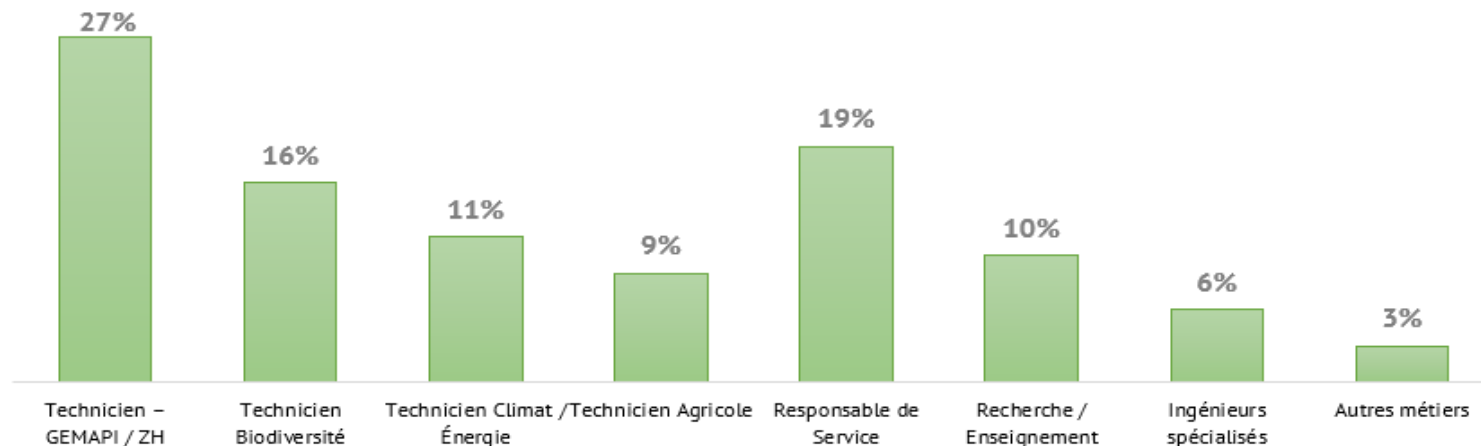


Et vous à titre personnel - travaillez vous sur cette thématique ? Comment ?

Part de Oui et de Non en %



Part en % des métiers affirmant travailler avec la thématique GES / Zones humides

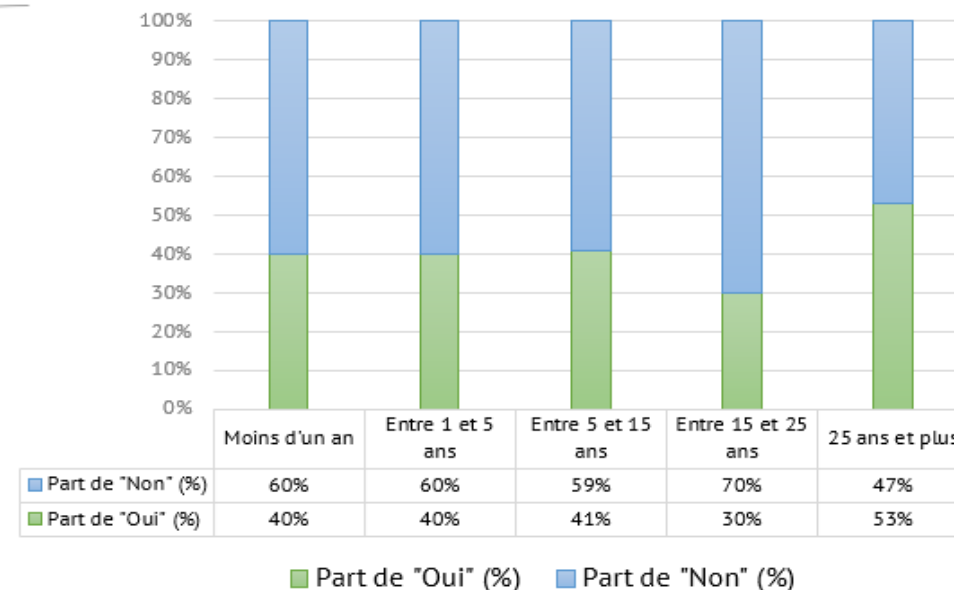


Chiffres clés :

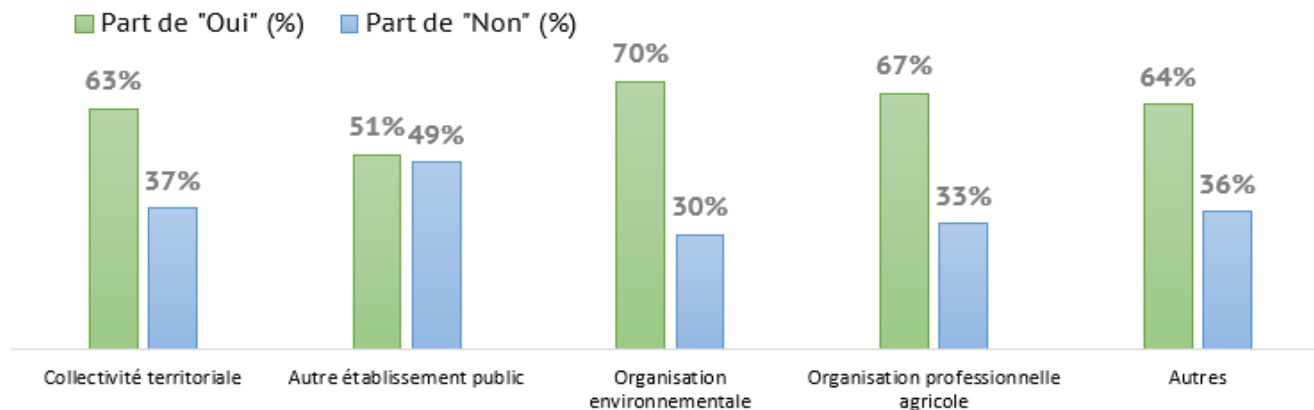
- ✓ 27 % des répondants travaillant sur le carbone sont des techniciens ZH/GEMAPI, 18 % des responsables de service.
- ✓ Moins de 12 % sont des techniciens climat-énergie, pourtant supposés en première ligne.
- ✓ 72 % des structures investies portent le sujet via des projets concrets, 62 % mobilisent des ressources humaines dédiées, 57 % bénéficient de financements.

Tendances :

- ✓ Le lien Carbone-ZH est souvent porté par des profils terrains, en lien direct avec les milieux.
- ✓ Il est traité par opportunité de projet plus que par stratégie structurée ou transverse.
- ✓ Peu de structures l'intègrent dans des outils de planification de type PCAET ou PLUi.



Quels sont les questionnements sur votre territoire et de quelles natures sont-ils ?

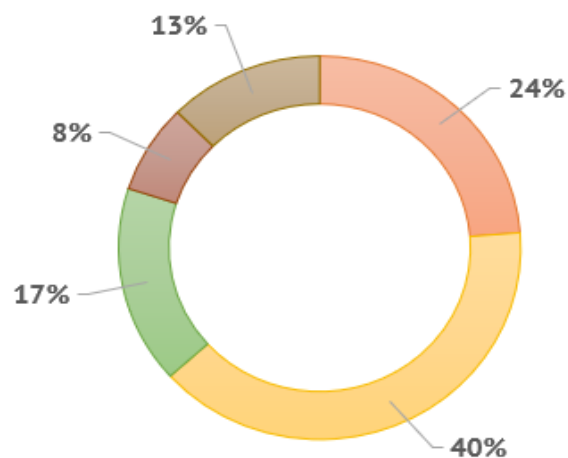


Part en % des structures qui sont plus susceptible se questionner sur cette thématique

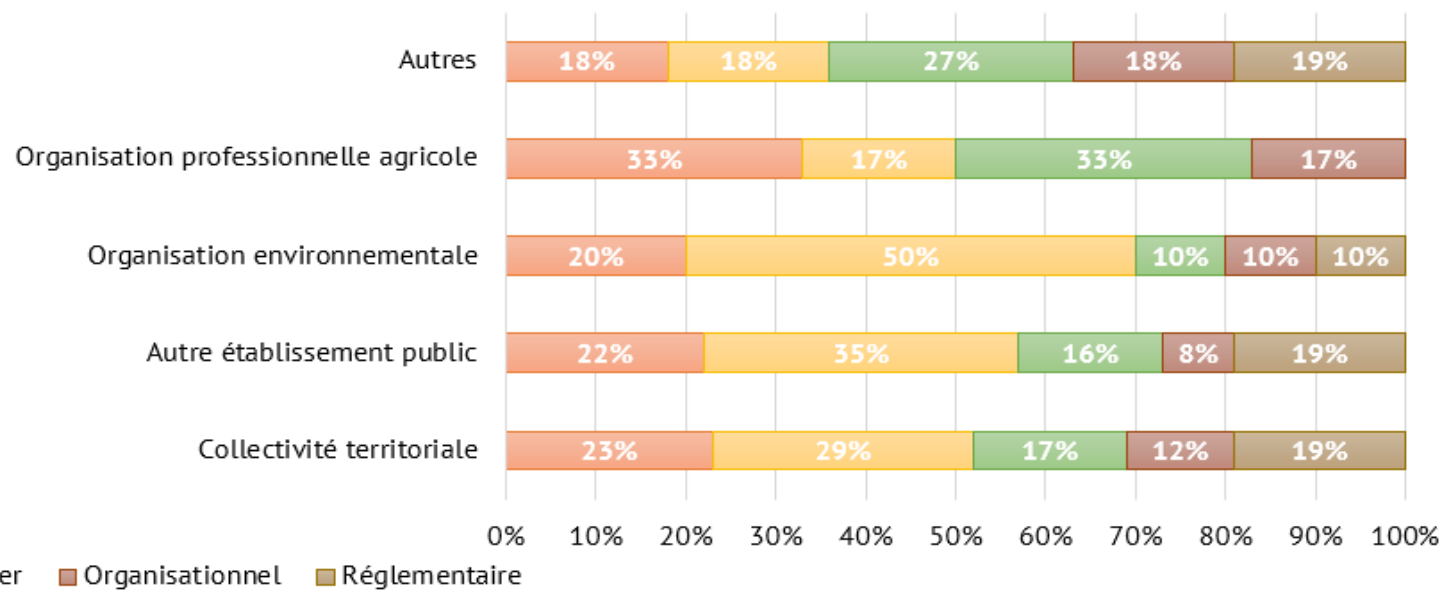
Clés de lecture :

- ✓ Les freins sont principalement opérationnels (pratiques, données, outils).
- ✓ Un manque de coordination inter-filière et de lisibilité des responsabilités freine l'action.
- ✓ Le carbone est encore mal pris en compte dans les grilles réglementaires existantes (séquence ERC, compensation, MAEC...).

Parts (%) des types de conflits recensé dans l'échantillon



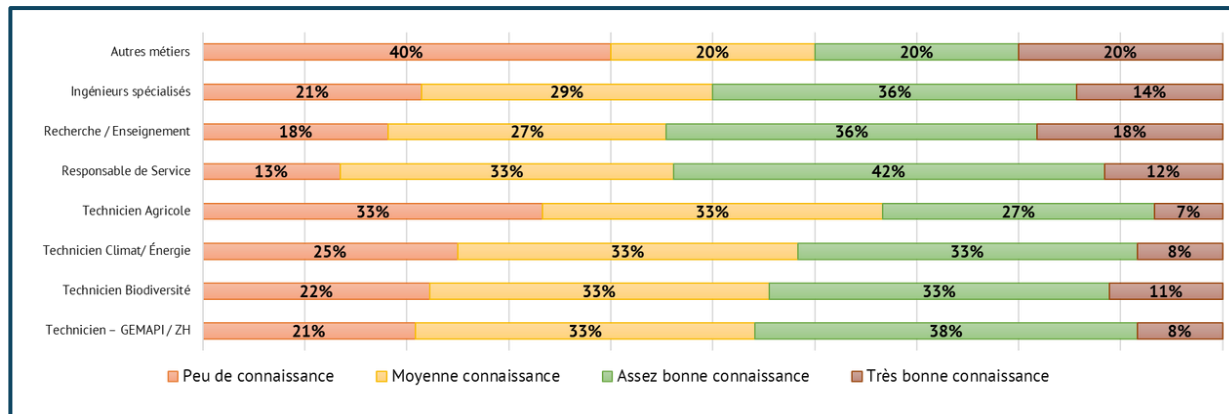
Parts (%) des types de conflits recensés dans l'échantillon par types de structure



■ Politique ■ Technique ■ Financier ■ Organisationnel ■ Réglementaire

La perception des processus biophysique

Répartition du niveau de connaissance auto-estimé des répondants l'enquête :



- Les techniciens zones humides et biodiversité / GEMAPI sont les plus nombreux à se dire très ou assez compétents.
- Les ingénieurs spécialisés ainsi que les professionnels de l'enseignement / recherche montrent eux aussi une bonne auto-évaluation.
- Les techniciens agricoles et techniciens énergie / climat se situent globalement à des niveaux plus bas.

Gaz à effet de serre	Réalité scientifique	Perception des acteurs
CO₂ (Dioxyde de carbone)	<ul style="list-style-type: none"> • Principal gaz anthropique • Stocké massivement dans les sols humides • Émis lors de la dégradation ou l'assèchement des zones humides 	<ul style="list-style-type: none"> • Bien identifié comme gaz majeur • Les sols humides sont majoritairement perçus à la fois comme source et comme puits
CH₄ (Méthane)	<ul style="list-style-type: none"> • PRG ≈ 28x supérieur au CO₂ sur 100 ans (GIEC) • Émis naturellement par les milieux humides en conditions anaérobies • Forte variabilité selon type de zone humide et saison 	<ul style="list-style-type: none"> • Rarement cité spontanément • Confusion fréquente : perçu comme "polluant" ou lié à l'élevage uniquement • Peu associé aux zones humides
N₂O (Protoxyde d'azote)	<ul style="list-style-type: none"> • PRG ≈ 265x supérieur au CO₂ • Émis par les sols humides fertilisés • Peut aussi être émis par des sols secs riches en azote • Fortement lié aux pratiques agricoles 	<ul style="list-style-type: none"> • Très rarement cité • Sujet émergent dans les débats, mais peu maîtrisé • Souvent confondu avec les engrais ou les nitrates

Le marché du carbone

Le marché carbone est un système qui donne une valeur financière aux émissions de CO₂. Ceux qui polluent doivent payer, et ceux qui réduisent ou captent du carbone peuvent vendre des crédits carbones à ceux qui veulent compenser leurs émissions.

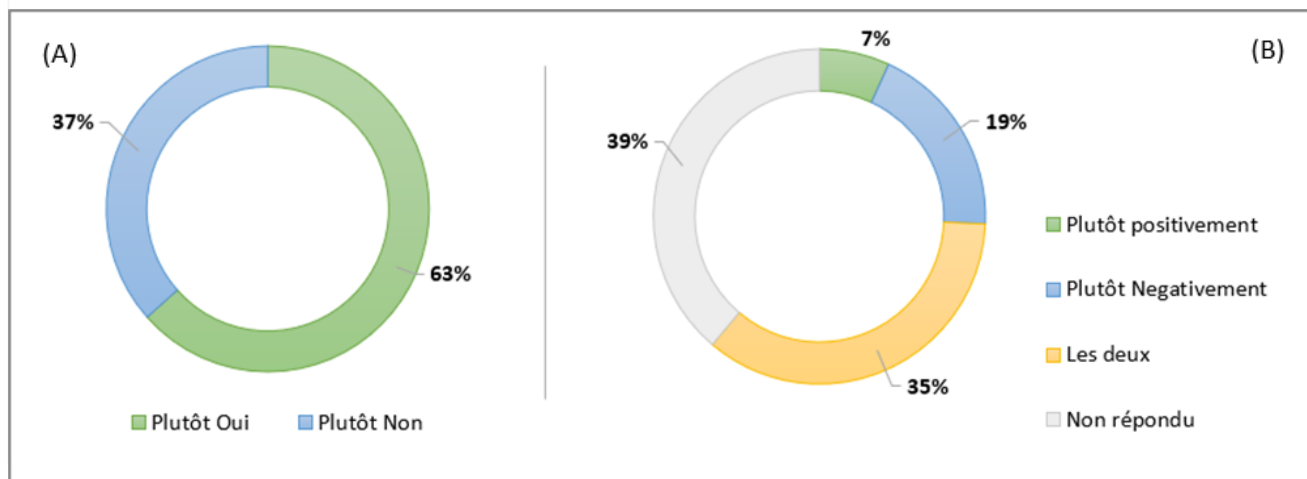
- **Le marché obligatoire** : Imposé par la loi, avec des quotas d'émissions à respecter.

Ex : Une entreprise aérienne européenne doit acheter des quotas d'émissions pour chaque vol intra-européen.

- **Le marché volontaire** : Engagement libre d'acteurs pour compenser leurs émissions.

Ex : Une entreprise française finance un projet de restauration de tourbières labellisé pour compenser ses émissions résiduelles.

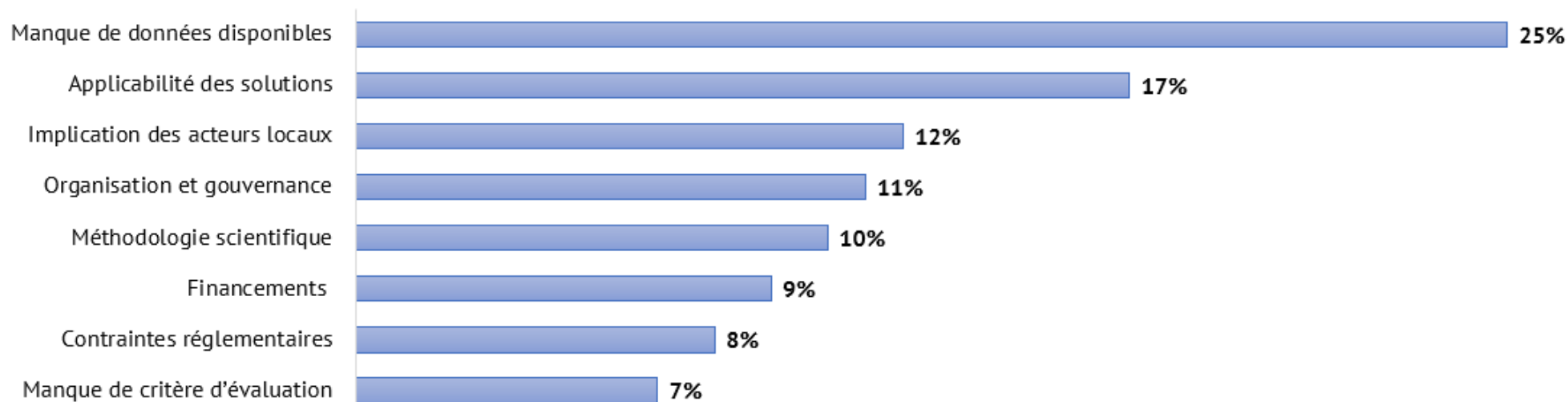
Connaissez vous le marché du carbone ? (A) et la répartition de ces réponses en fonction du type de perception projetée sur celui-ci (B)



- **Paiement pour service environnementaux**
- **Crédit Carbone**
- **Servitude**
- **Prime filière**

Les besoins des acteurs

Thématiques	Manque de critère d'évaluation	Contraintes réglementaires	Financements	Méthodologie scientifique	Organisation et gouvernance	Implication des acteurs locaux	Applicabilité des solutions	Manque de données disponibles
Comptage	16	19	22	25	27	29	41	51

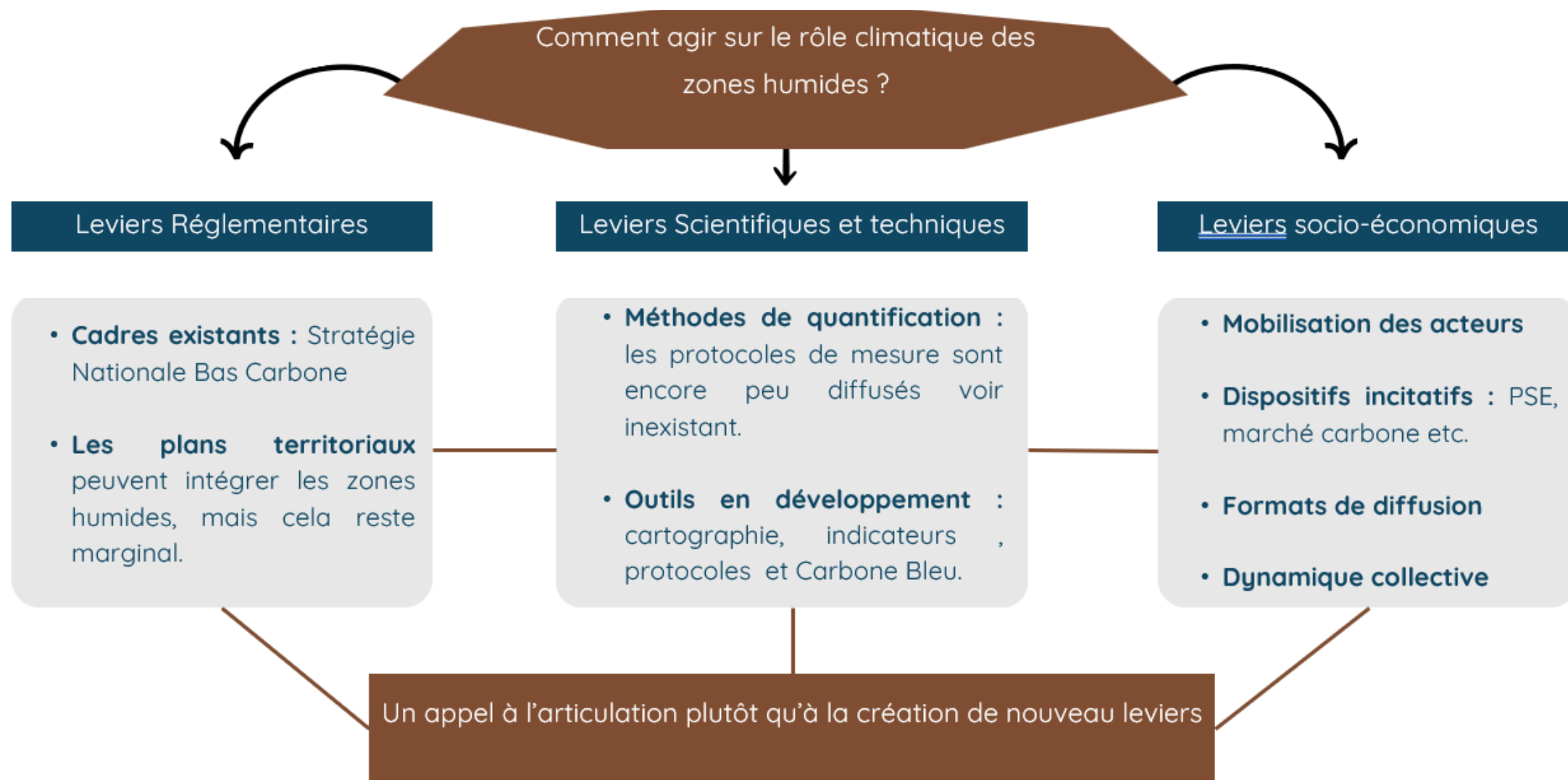


Ce qu'il faut retenir :

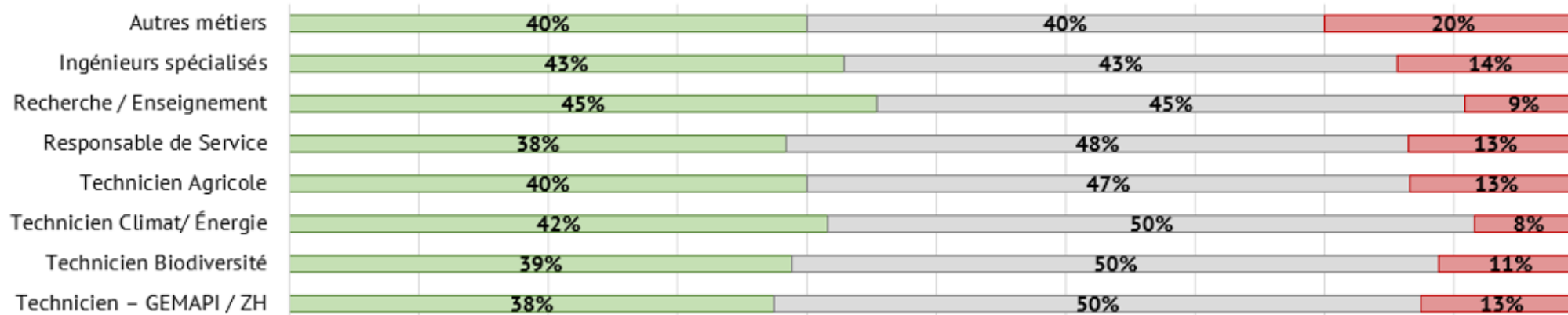
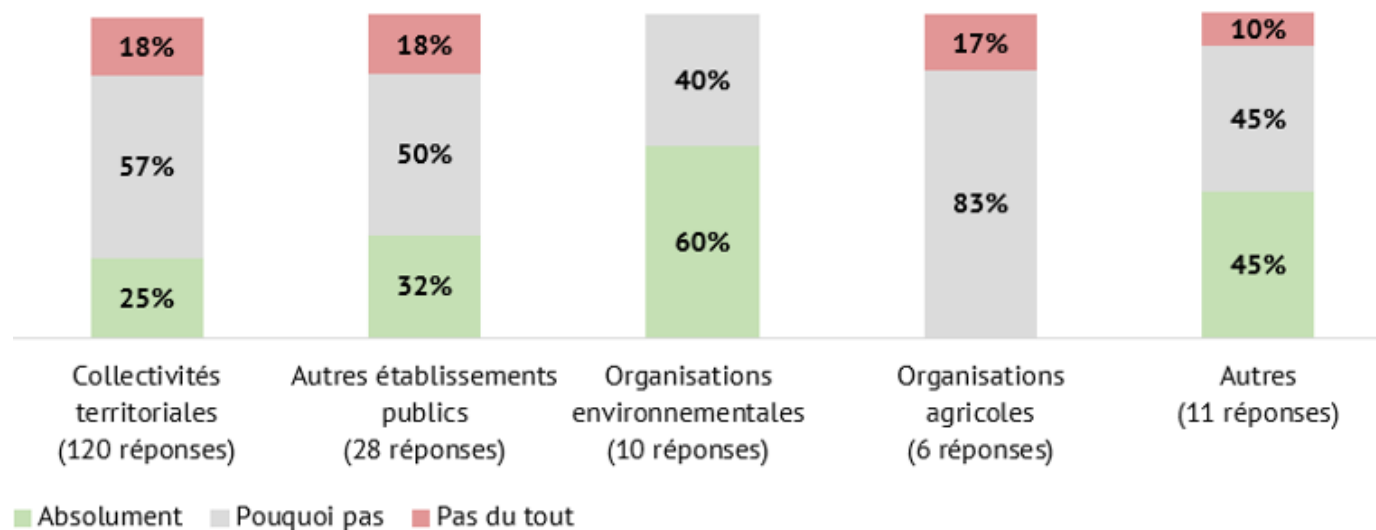
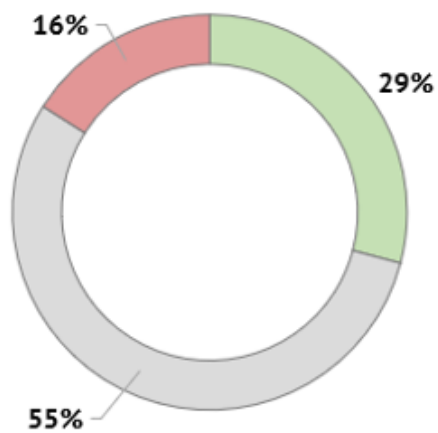
- Un besoin très fort de vulgarisation pour les élus,
- techniciens généralistes, et usagers.
- Les référents techniques expriment un décalage entre recherche académique et besoins de terrain.
- Il manque des indicateurs opérationnels permettant d'évaluer, chiffrer et valoriser simplement.

Les attentes convergent vers un **besoin de simplification, de pédagogie et d'outils concrets**. L'écart entre les avancées scientifiques et la capacité des acteurs à s'en saisir crée une **forme d'inertie**. Ce n'est donc pas seulement un enjeu d'accroissement et de transfert de connaissance, mais aussi de **traduction opérationnelle, d'accessibilité et d'appropriation**.

Les leviers d'actions

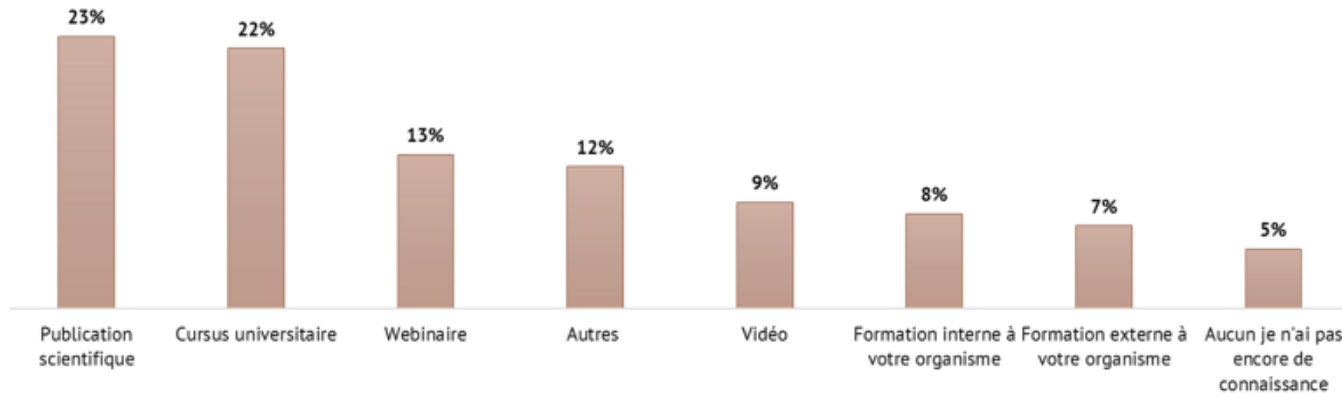


Vers une dynamique collective ? 1/2

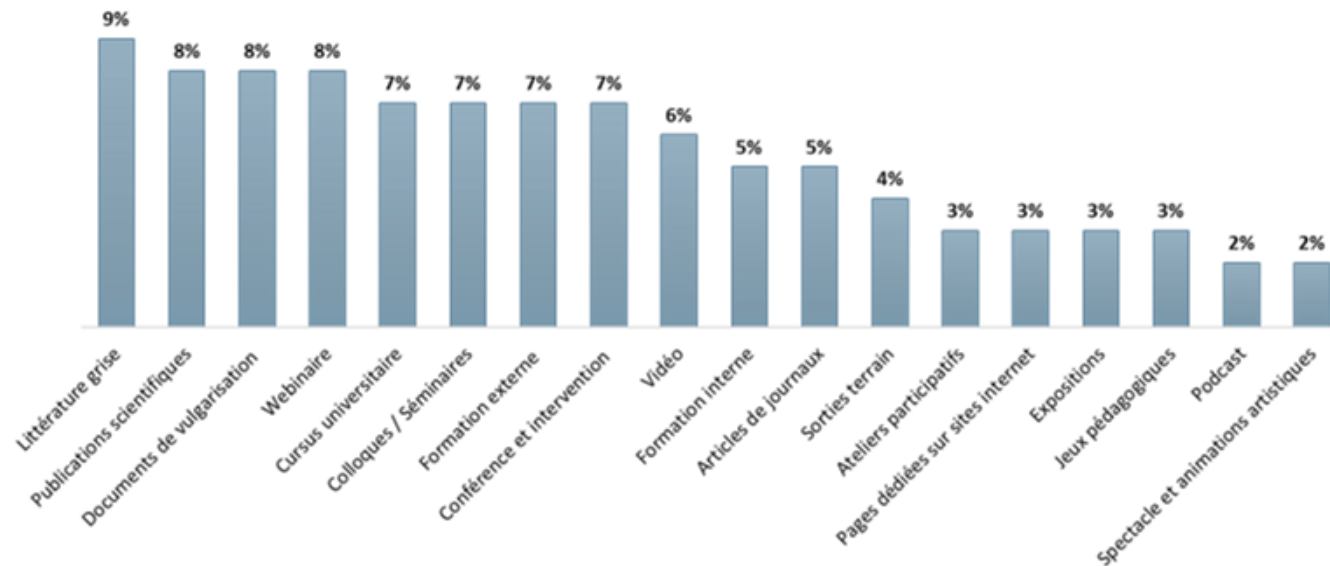


Vers une dynamique collective ? 2/2

Comment acquérir de la connaissance ?



Comment diffuser de la connaissance ?



- Valoriser les retours d'expérience terrain comme source complémentaire aux publications scientifiques
- Des webinaires courts (4 webinaires de 30 minutes plutôt qu'un webinaire de 2h)
- Structurer des groupes d'acteurs autour du lien Zones humides – Climat
- Pourcentage nivelé donc tous les outils sont à mobiliser

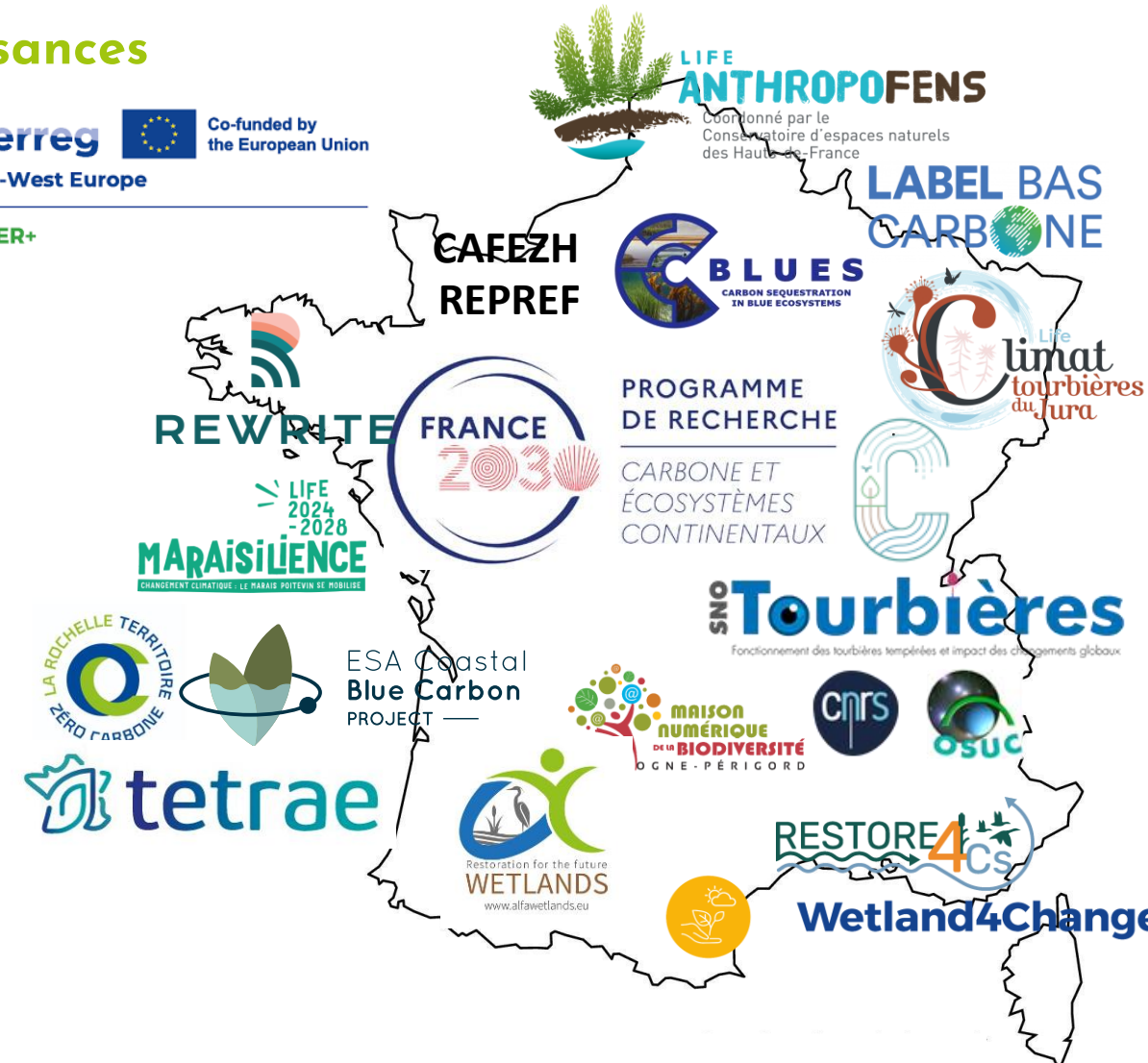
Des questions ?

Perspectives pour l'amélioration de connaissances

Carte de France des projets connus en cours

- Thèse « Fonctionnement biogéochimique des roselières lacustres à *Phragmites australis* » (2019-2023)
- Thèse « Contribution des tourbières françaises à l'objectif national de neutralité carbone d'ici à 2050 » (2021-2025)
- Thèse « Approches multiples pour une meilleure compréhension des émissions de protoxyde d'azote liées à la dénitrification dans les zones humides riveraines (2022-2025) »
- Thèse « Le Carbone Bleu dans l'estuaire de l'Authie : Stockage et échanges de Carbone dans un contexte de dépoldérisation » (2022-2026) »
- Thèse « Impact de la réhabilitation écologique d'une prairie humide méditerranéenne sur le stockage de carbone et la biodiversité » (2025-2029)
- Thèse « Caractérisation de l'état de dégradation des tourbières pour prioriser leur restauration dans le cadre de la stratégie bas carbone française » (2025-2029)

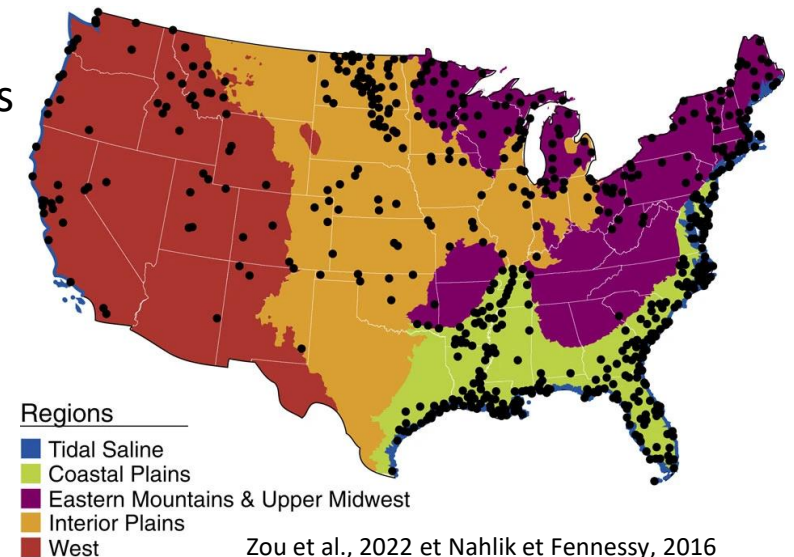
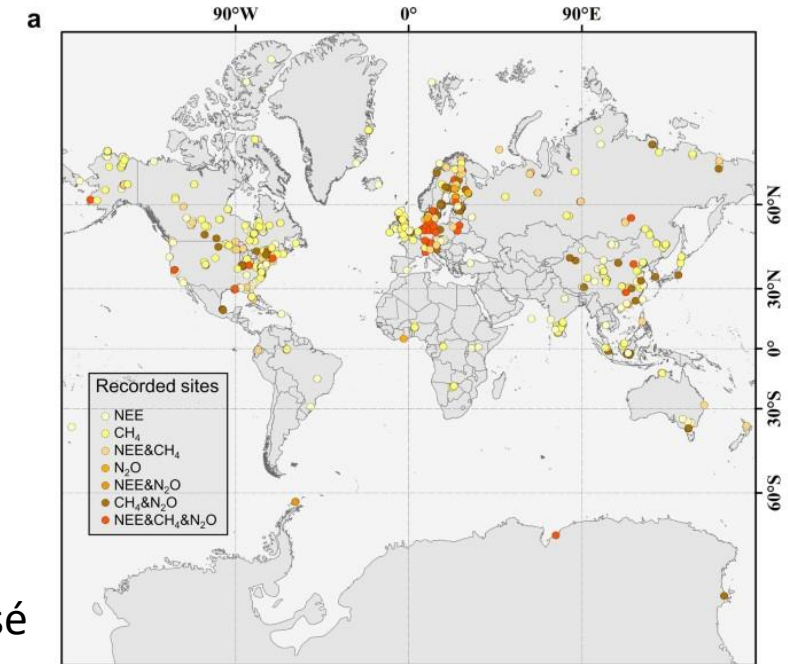
Interreg  Co-funded by
the European Union
North-West Europe
BUFFER+



Perspectives

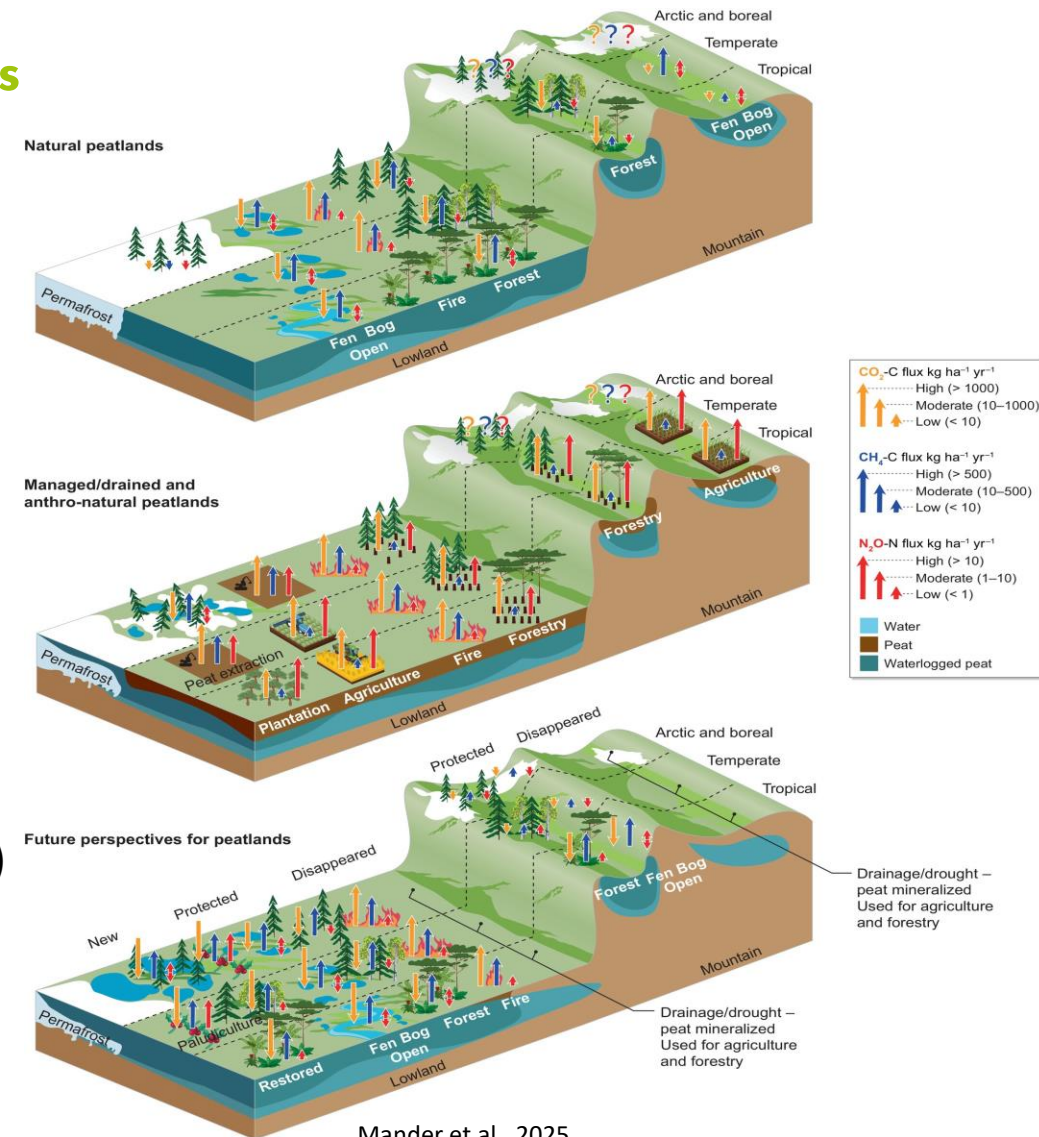
Perspectives pour l'amélioration de connaissances

- Manque de données locales notamment de mesures directes *in situ* (stocks et flux)
- Manque de suivis haute fréquence des flux (y compris la nuit) à long terme avec prise en compte des fluctuations hydrologiques
- Campagne de terrain à grande échelle (stocks et flux) avec protocole harmonisé
- Meilleure prise en compte de certains processus (transferts latéraux DIC/TA, précipitation CaCO_3 , TOC, émission CH_4 par ébullition ou par les tissus végétaux, émission N_2O , relations eau de surface-eau souterraine)
- Approche intégrée multi-GES, multi-compartiment/interfaces, intra-site et inter-sites pour définir des budgets carbone ou budgets GES par écosystème



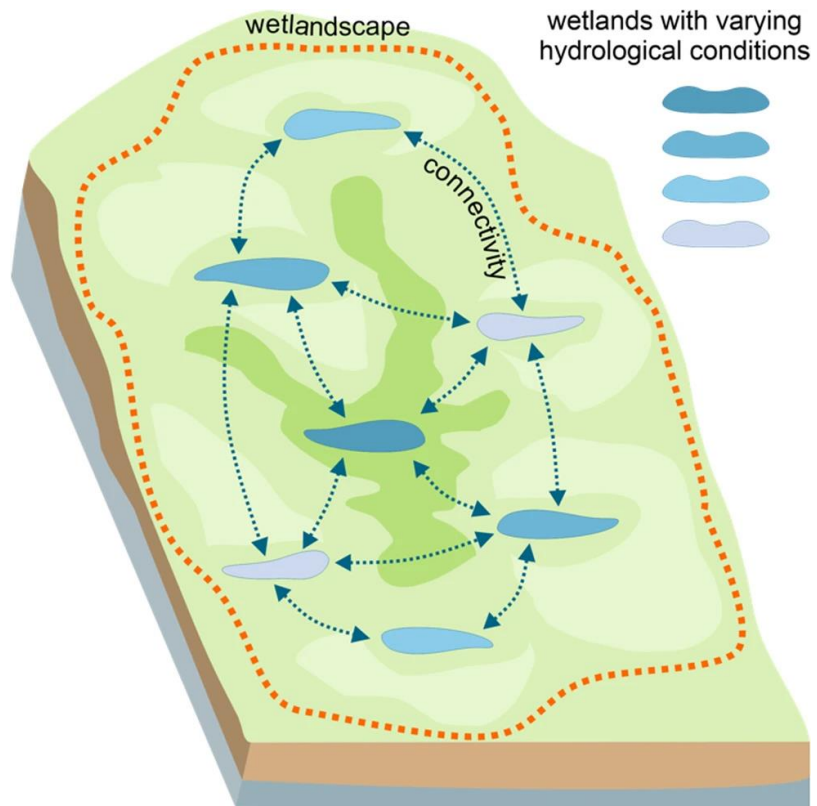
Perspectives pour l'amélioration de connaissances

- Effets des changements climatiques et de facteurs d'influence combinés
- Influence de l'état de conservation, des types d'altérations
- Effet des usages, de la gestion et de la restauration et la dynamique temporelle liée aux changements
- Certains types de zones humides peu investiguées (vasières, roselières, prairies humides, fossés, mares, landes humides, mégaphorbiaies, fourrés et forêts alluviales)
- Apport des sciences humaines et sociales notamment des sciences du comportement

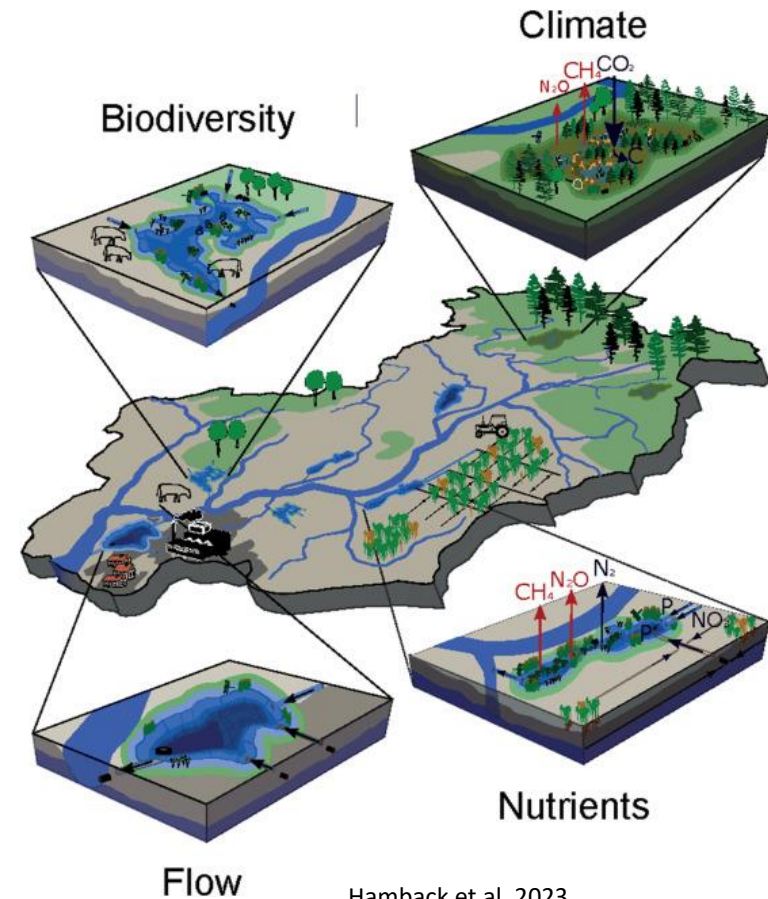


Perspectives pour l'amélioration de connaissances

Approche intégrée des zones humides



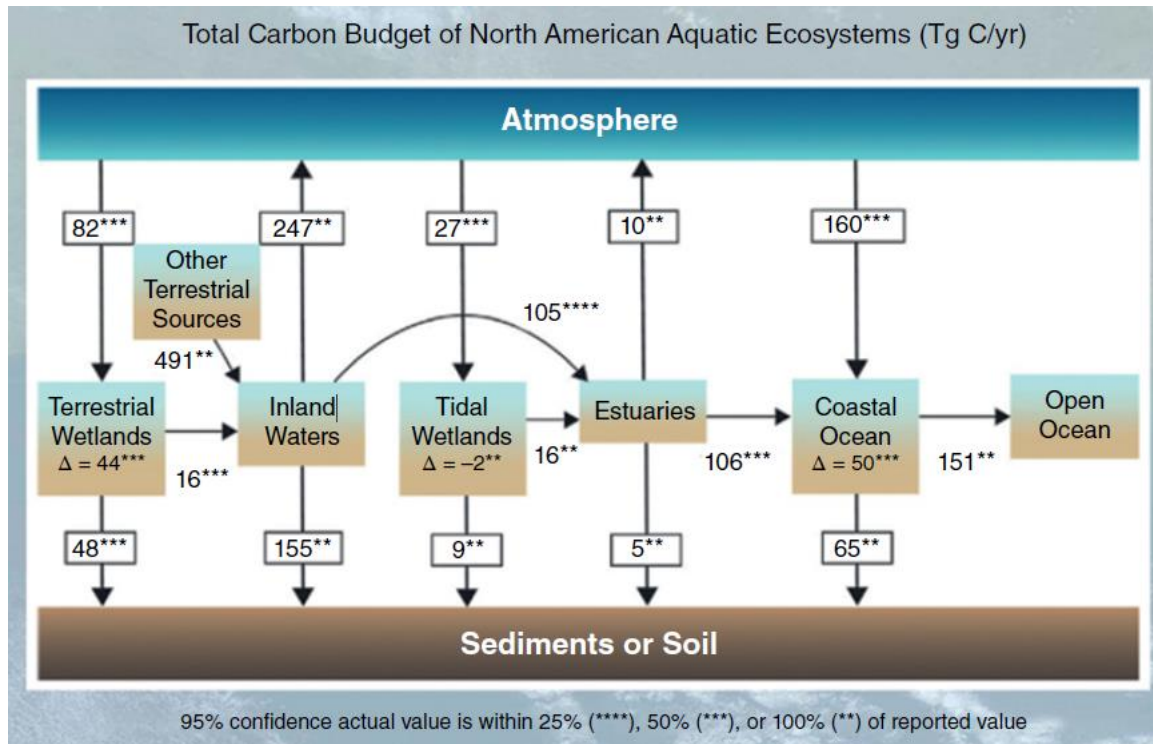
Ma et al, 2025



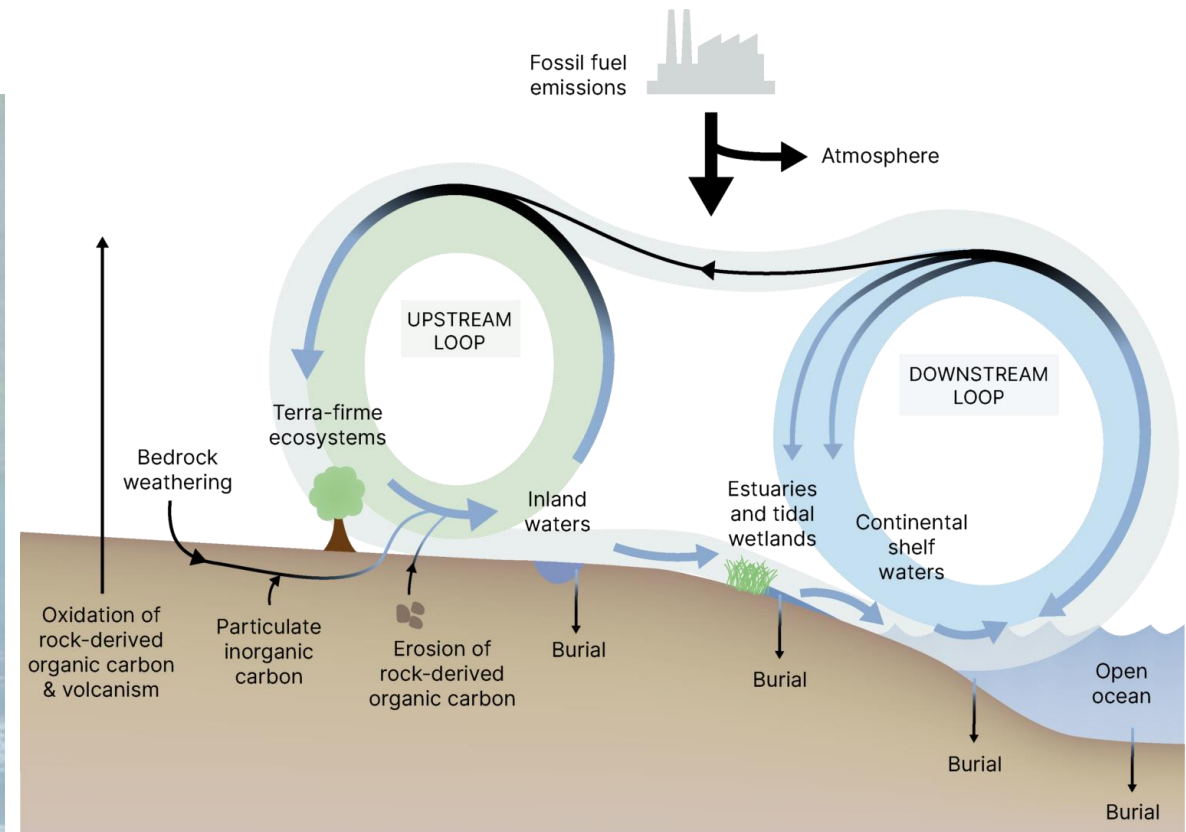
Hamback et al, 2023

Perspectives pour l'amélioration de connaissances

Approche intégrée des zones humides



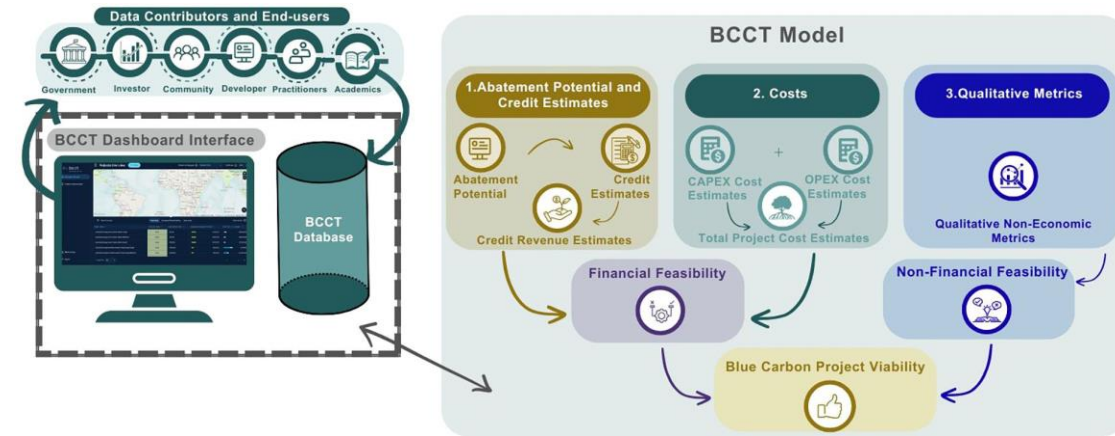
Kolka et al, 2018



Regnier et al, 2022

Perspectives pour l'appropriation de connaissances et le développement d'outils

- Accompagner les gestionnaires et les techniciens pour la meilleure prise en compte du carbone dans les choix de gestion et de restauration
- Mise en place d'expérimentations multi-sites et d'observatoires
- Construction d'un argumentaire pour encourager la préservation des zones humides, leur gestion adaptée et la restauration des zones humides dégradées
- Groupes de travail et de réflexion sur le carbone et les zones humides, journées d'interconnaissances et de formations
- Développement de méthodes de label bas-carbone pour financer les changements d'usage, de gestion et de restauration



Connaître et caractériser les surfaces de zones humides – approche cartographique

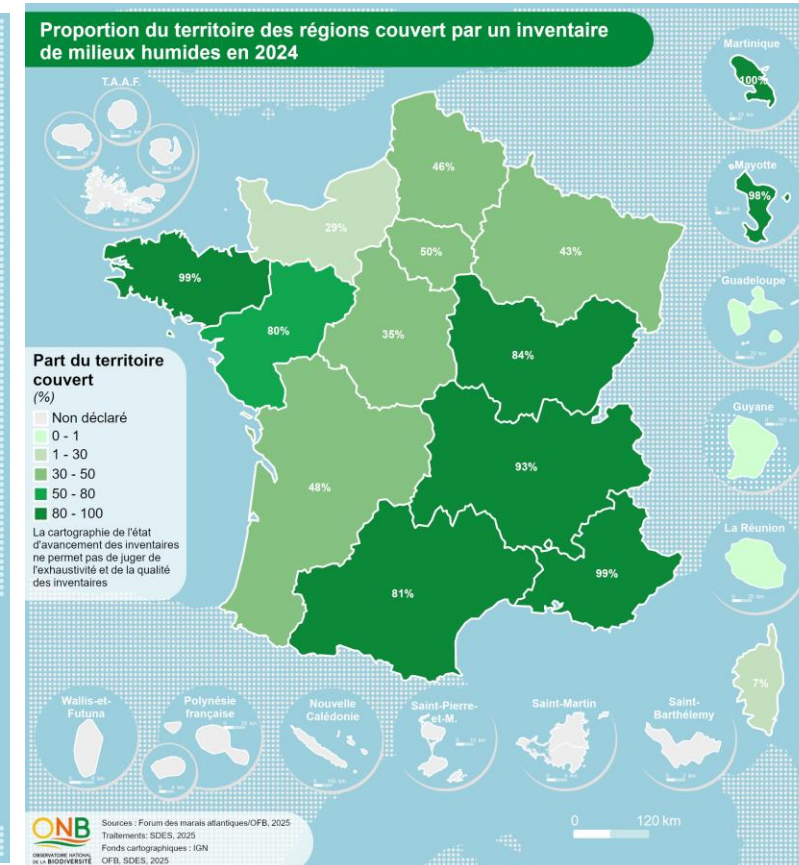
Background

This Policy Brief was prepared by the Scientific and Technical Review Panel (STRP) of the Convention on Wetlands under Task 2.1 of the STRP Workplan 2023-2025 on 'Wetland mapping and inventories to catalyse greater use of available methodologies for wetland carbon assessment'. The Policy Brief offers guidance on utilizing National Wetland Inventories (NWIs) in national greenhouse gas (GHG) reporting.

Wetlands store approximately 30% of the global soil carbon, despite covering only about 5-6% of the Earth's surface. In some regions, wetlands are currently releasing carbon, exacerbating climate change. IPCC has provided methodological guidance to determine national greenhouse gas (GHG) balances, including those of wetlands. However, as of 2023, most countries have not included GHG assessments for wetlands in their national inventories. This highlights the urgent need to improve wetland GHG accounting and its incorporation into NDCs.

National Wetland Inventories (NWI) are essential for any assessment of GHG fluxes and carbon stocks; however, most countries still do not have comprehensive wetland inventories. For simple GHG accounting, it is sufficient to determine the precise extent of wetlands and basic conditions, such as climate zone and soil type. More detailed procedures require much more detailed knowledge of environmental conditions and habitats. To achieve this, global wetland mapping through Earth Observation has become increasingly important for the development of detailed wetland inventories.

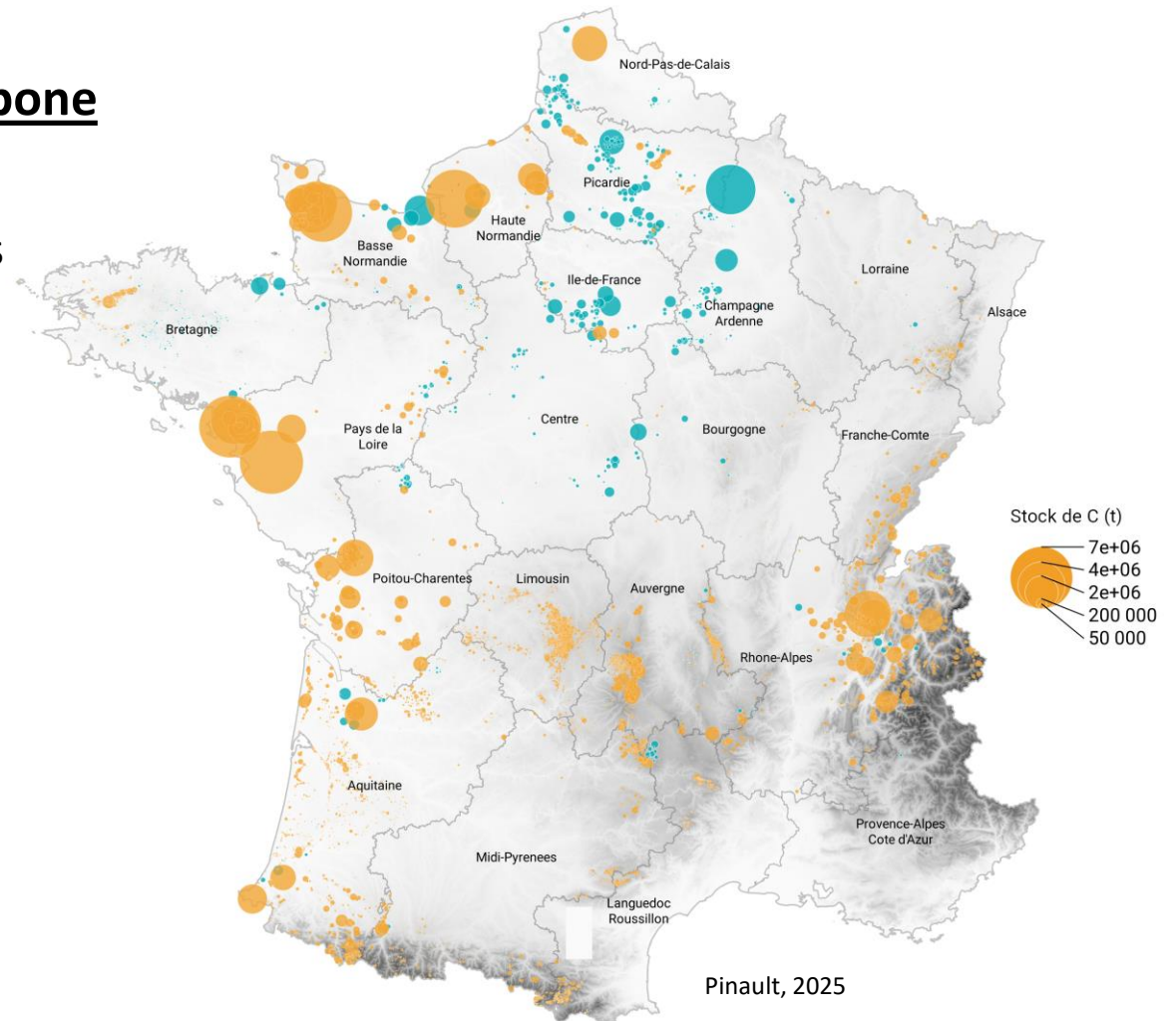
Understanding GHG fluxes, carbon stocks, and carbon sequestration rates for wetlands is critical for calculating national carbon and GHG balances. This Policy Brief guides how to progress the assessment of wetland carbon sequestration and emissions for national GHG accounting.



Perspectives pour l'appropriation de connaissances et le développement d'outils

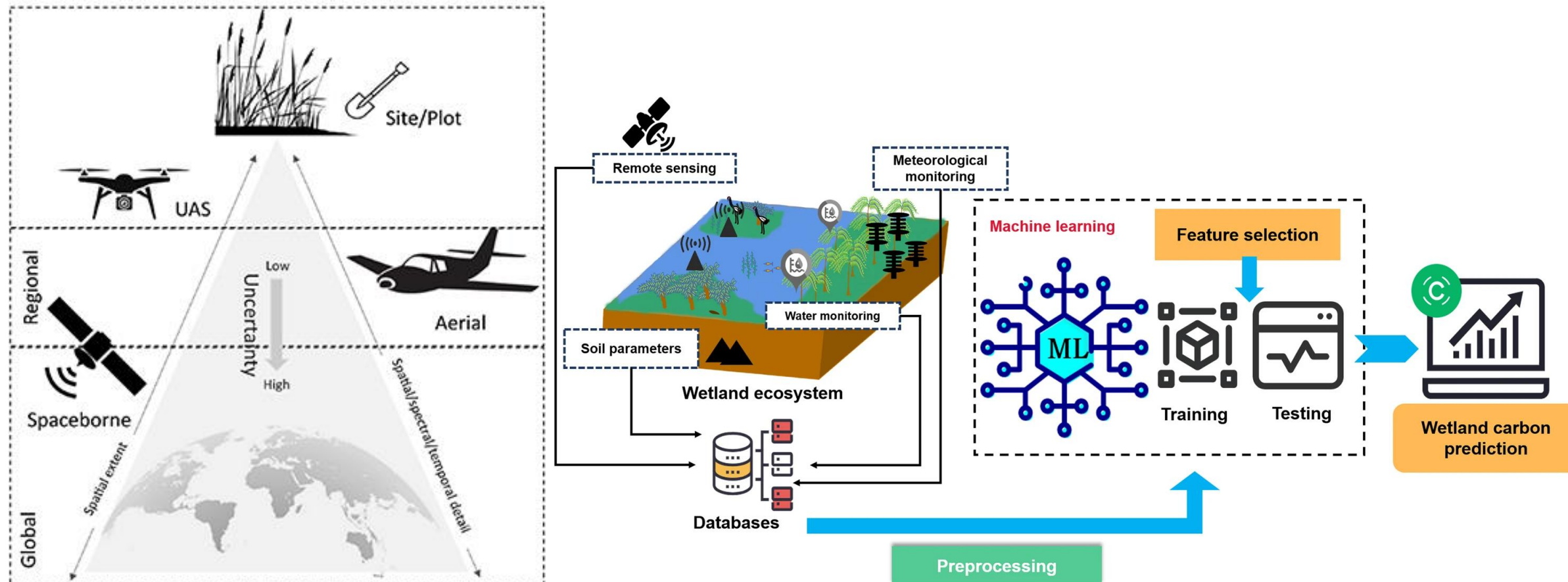
Inventaire des tourbières et des stocks de carbone

- 758 t C ha⁻¹.m⁻¹ pour 100 000-120 000 ha estimées
- 153 Mt C et 188 Mt C estimés avec les sites additionnels de 1949
- Potentiel émissif de 690 Mt CO₂
- 30 % du stock de C en montagne et 70 % du stock de C en plaine
- Inventaire à poursuivre



Perspectives pour l'appropriation de connaissances et le développement d'outils

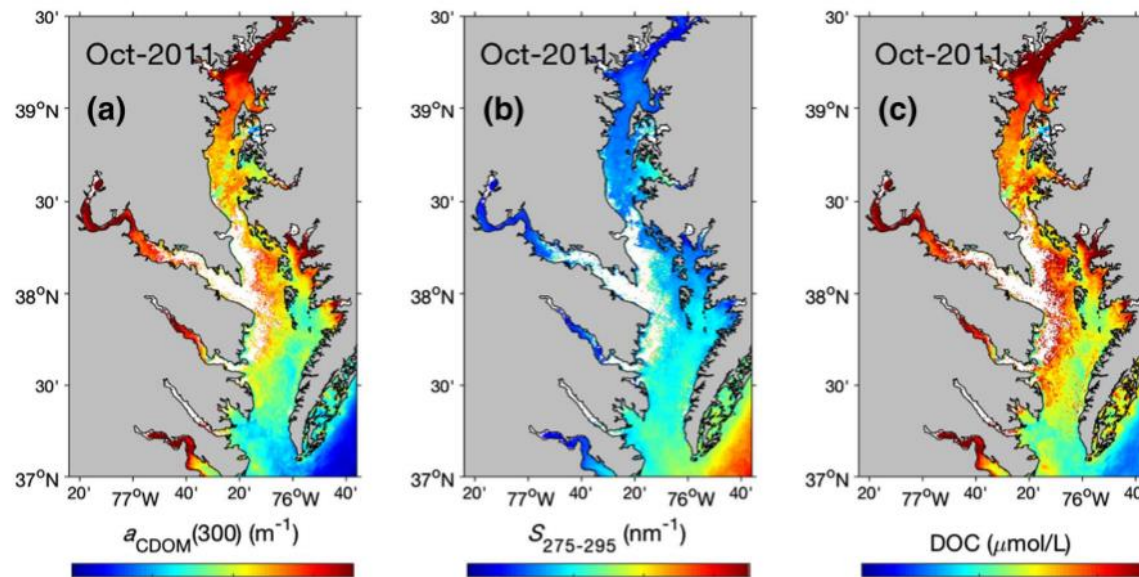
Utilisation de la télédétection



Perspectives pour l'appropriation de connaissances et le développement d'outils

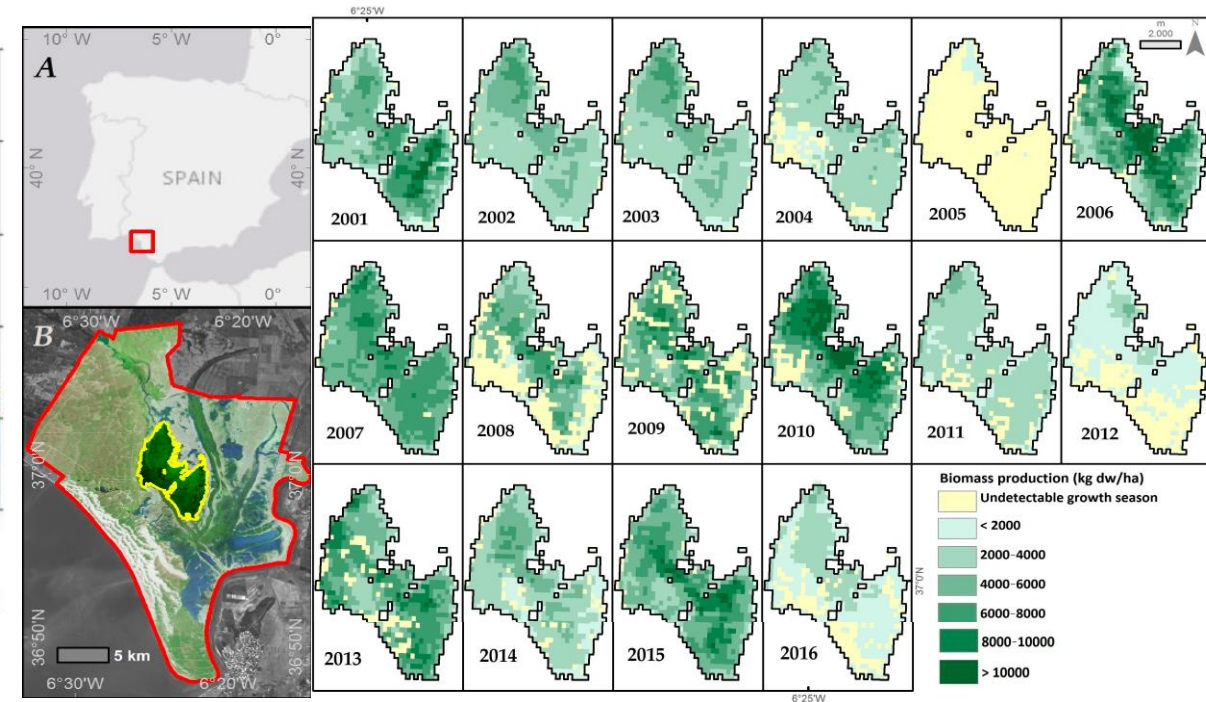
Exemples d'application de la télédétection

Exemple d'application pour estimer les flux latéraux de carbone de la baie de Chesapeake aux USA (MERIS)



Cao et al., 2018

Exemple d'application pour estimer la production primaire des zones humides de Donana en Espagne (MODIS)



Lumbierres et al., 2017

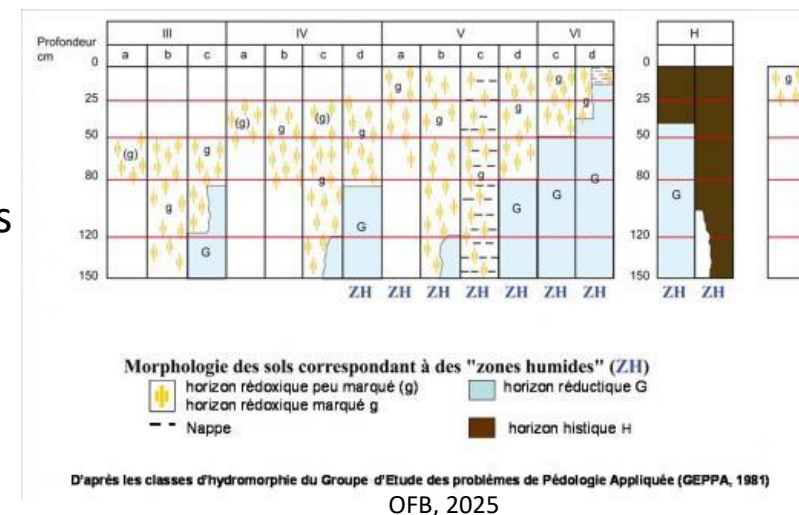
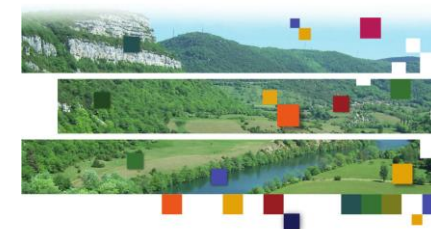
Perspectives pour l'intégration de la fonction climatique dans les politiques publiques

Vers un référentiel national « zones humides et carbone » ?

- Travail collaboratif sur l'échange de données (RMQS, Donesol, Hades, BD Drainage, RPDZH, MNHN, etc...) et l'harmonisation des définitions et typologies entre les différentes politiques concernant les zones humides
- Consolider et mettre à jour des valeurs de référence carbone préidentifiées associées aux habitats humides dans le cadre de l'étude de préfiguration
- Mettre à jour de certaines valeurs de référence à partir de données récentes issues d'études françaises ou apparentées (Tiers 2 ou 3)
- Croisement de la typologie habitats avec d'autres typologies sur les sols ou l'hydrogéomorphologie
- Prise en compte de l'état de conservation et de la gestion/restauration et des domaines bioclimatiques



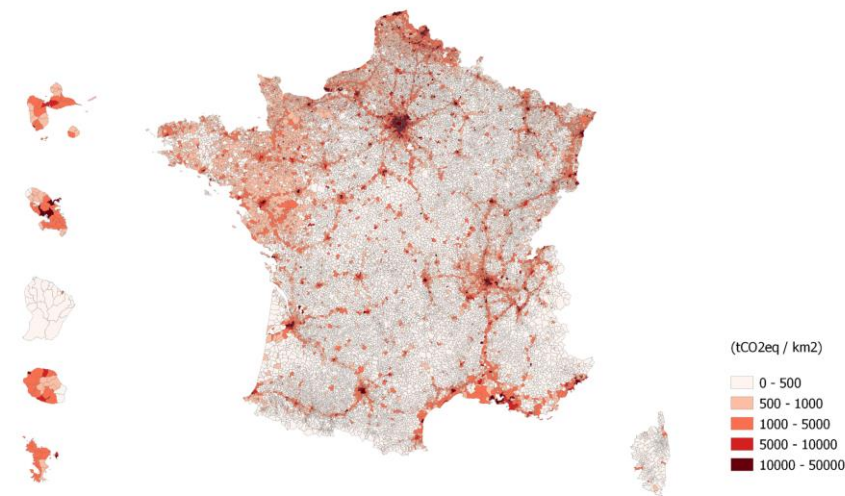
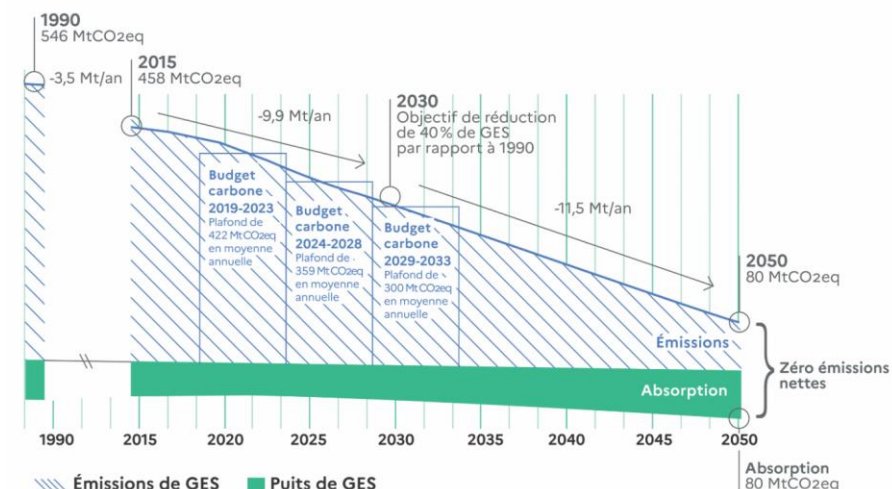
GUIDE de détermination des habitats terrestres et marins de la typologie EUNIS



Perspectives pour l'intégration de la fonction climatique dans les politiques publiques

Zones humides et politiques publiques climatiques

- Quelle place de zones humides dans la Stratégie Nationale Bas-Carbone, l'inventaire national des GES et les PCAET ?
- Facteurs d'émissions par type de zones humides, altérations et changements d'occupation du sol à estimer pour l'inventaire national des GES
- Déclinaisons territoriales au sein des PCAET pour le diagnostic territorial ou son actualisation et la définition d'orientations et de plans d'actions



Perspectives pour l'intégration de la fonction climatique dans les politiques publiques

Exemples d'inventaire nationaux de GES intégrant les zones humides

Peat Condition	Drainage status	Direct CO ₂	CO ₂ from DOC	CO ₂ from POC	Direct CH ₄	CH ₄ from Ditches	Direct N ₂ O	Total
Forest	Drained	2.52 to -1.79 ^c	1.14 ^a	0.3 ^b	0.06 ^a	0.14 ^a	1.31 ^a	5.46 to 1.15
Cropland	Drained	28.60 ^b	1.14 ^a	0.3 ^b	0.02 ^b	1.46 ^a	6.09 ^a	37.61
Eroding Modified Bog (bare peat)	Drained	6.18 ^b	1.14 ^a	5.0 ^b	0.14 ^a	0.68 ^a	0.14 ^a	13.28
	Undrained	6.18 ^b	0.69 ^a	5.0 ^b	0.15 ^a	0 ^a	0.14 ^a	12.17
Modified Bog (semi-natural Heather + Grass dominated)	Drained	0.13 ^b	1.14 ^a	0.3 ^b	1.26 ^b	0.66 ^a	0.06 ^b	3.54
	Undrained	0.13 ^b	0.69 ^a	0.1 ^b	1.33 ^b	0 ^a	0.06 ^b	2.31
Extensive Grassland (combined bog/fen)	Drained	6.96 ^b	1.14 ^a	0.3 ^b	1.96 ^b	0.66 ^a	2.01 ^a	13.03
Intensive Grassland	Drained	21.31 ^b	1.14 ^a	0.3 ^b	0.68 ^b	1.46 ^a	2.67 ^b	27.54
Rewetted Bog	Rewetted	-0.69 ^b	0.88 ^a	0.1 ^b	3.59 ^b	0 ^a	0.04 ^b	3.91
Rewetted Fen	Rewetted	4.27 ^b	0.88 ^a	0.1 ^b	2.81 ^b	0 ^a	0 ^a	8.05
Rewetted Modified (Semi-natural) Bog	Rewetted	-3.54 ^b	0.69 ^a	0 ^b	2.83 ^b	0 ^a	0 ^a	-0.02
Near Natural Bog	Undrained	-3.54 ^b	0.69 ^a	0 ^b	2.83 ^b	0 ^a	0 ^a	-0.02
Near Natural Fen	Undrained	-5.41 ^b	0.69 ^a	0 ^b	3.79 ^b	0 ^a	0 ^a	-0.93

Gregg et al, 2021

Table 6-66: CH₄ Emissions from Vegetated Coastal Wetlands Remaining Vegetated Coastal Wetlands (MMT CO₂ Eq. and kt CH₄)

Year	1990	2005	2018	2019	2020	2021	2022
Methane Emissions (MMT CO ₂ Eq.)	4.2	4.2	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
Methane Emissions (kt CH ₄)	149	151	153	153	154	154	154

Table 6-70: Annual Soil Carbon Accumulation Rates for Vegetated Coastal Wetlands (t C ha⁻¹ yr⁻¹)

Climate Zone	Cold Temperate	Warm Temperate	Subtropical	Mediterranean
Palustrine Scrub/Shrub Wetland	1.010	1.544	0.45	0.845
Palustrine Emergent Wetland	1.010	1.544	0.454	0.845
Estuarine Forested Wetland	N/A	N/A	0.821	N/A
Estuarine Scrub/Shrub Wetland	1.254	1.039	0.821	0.845
Estuarine Emergent Wetland	1.254	1.039	1.587	0.845

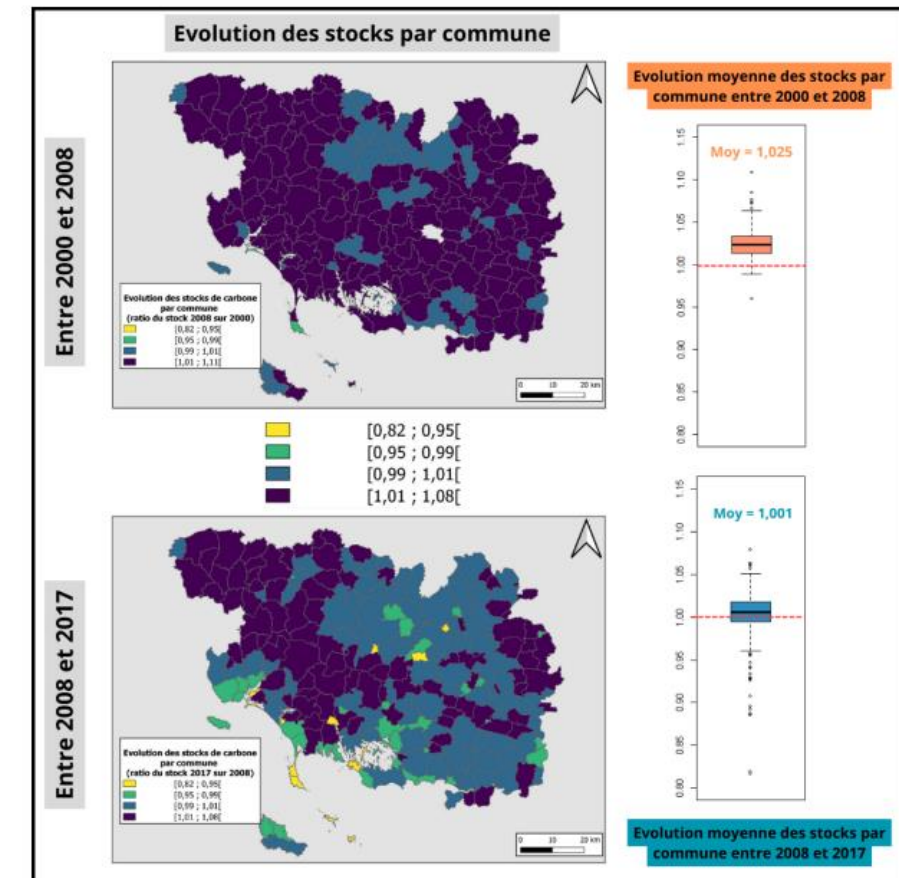
Source: All data from CCRCN (2023)⁵⁹; N/A means there are no estuarine forested wetlands outside of subtropical regions.

EPA et al, 2024

Perspectives pour l'intégration de la fonction climatique dans les politiques publiques

Amélioration de l'outil ALDO

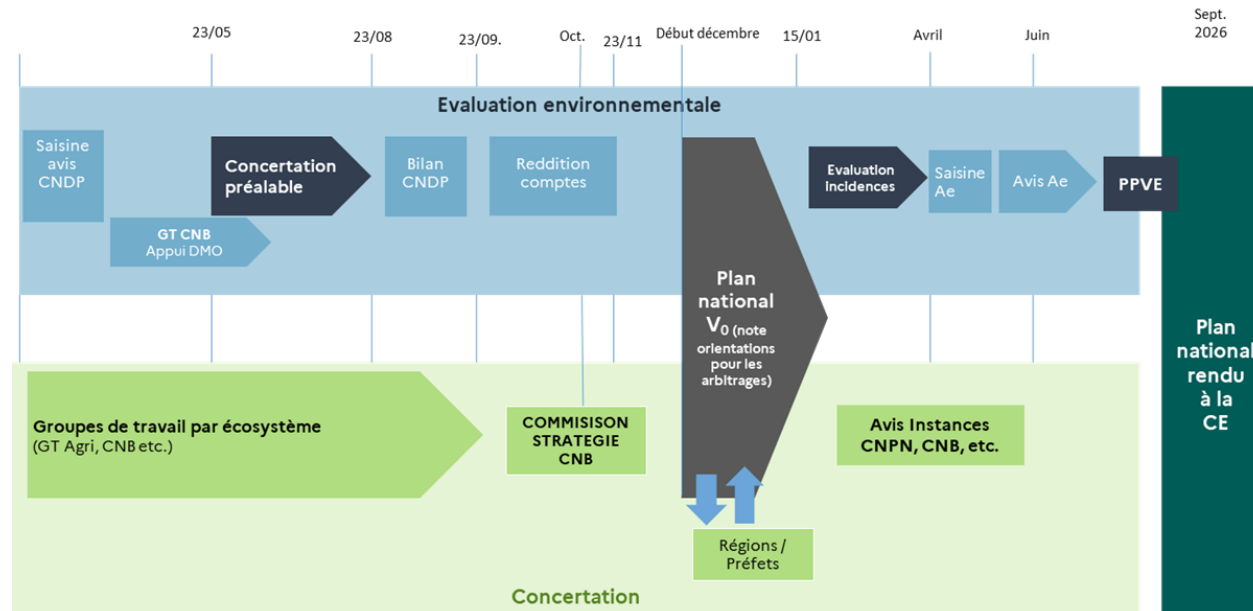
- Problématique de précision et de résolution de l'enveloppe cartographique de référence (Corine Land Cover)
- Une typologie inadaptée aux zones humides avec une valeur unique de stock et pas de prise en compte de l'état d'altération
- Une définition de zones humides en lien avec l'occupation du sol et non liée à des critères pédologiques/botaniques
- Manque d'approche dynamique des stocks et des flux, changements d'occupation du sol et d'interopérabilité



Perspectives pour l'intégration de la fonction climatique dans les politiques publiques

Plan National de restauration

- Restauration des habitats (dont des zones humides) de l'Annexe I et II : 30% d'ici 2030 (sites Natura 2000 en priorité), 60% d'ici 2040 et 90% d'ici 2050
- Restauration de 25 000 km de cours d'eau (2030) et mesures complémentaires pour la fonctionnalité des plaines inondables
- Restauration de 30% des tourbières agricoles en 2030 dont 1/4 remises en eau et 50% en 2050 dont 1/3 remises en eau



MTECT, 2025



POLICY BRIEF

Unlocking potential
of coastal wetlands
in Europe: Integration
into National
Restoration Plans



Restore4Cs, 2025

Perspectives pour l'intégration de la fonction climatique dans les politiques publiques

Perspectives pour une meilleure intégration des ZH dans les politiques publiques

- Vers une vision transversale de la fonction climatique des zones humides dans les politiques publiques ?



UE

- ✚ Directive Nitrate, PAC, Green Deal, règlements LULUCF et CRCE,

France

- ✚ SNBC, PCAET, PNACC, SNB, SNAP, PNMH, aménagement du territoire (PLU, SCOT, SRADDET)

Des questions ?