

Mesurer et estimer les stocks de carbone et les gaz à effet de serre en zones humides





Marais de Brouage (Charente-Maritime) © A. Jomard

Glossaire

AGB :

Above-Ground Biomass aussi appelée biomasse aérienne.

Allochtone :

Désigne l'origine du carbone stocké en provenance de sources extérieures à l'écosystème considéré.

Allométrie :

Etude des relations entre différentes parties d'un organisme et l'organisme dans son ensemble.

Analyseur élémentaire :

Instrument d'analyse permettant de connaître la composition élémentaire de l'échantillon analysé (carbone, hydrogène, azote, oxygène, soufre, etc...) en particulier le carbone organique total ou le carbone inorganique total.

Autochtone :

Désigne l'origine du carbone stocké en provenance directe de l'écosystème considéré in situ.

Captation :

La captation de carbone correspond à la captation de dioxyde de carbone par les organismes photosynthétiques d'un écosystème. A la différence de la séquestration de carbone qui s'inscrit sur le long terme, la captation de carbone correspond à un retrait du carbone de l'atmosphère à court terme.

DBH :

Diameter at Breast Height aussi appelé diamètre à hauteur de poitrine.

Datation radiométrique :

Méthode de datation ayant recours à l'évolution régulière au cours du temps d'isotopes radioactifs selon une vitesse de décomposition fixe.

Dendrochronologie :

Science se basant sur la mesure des cernes des arbres pour dater une série chronologique.

Densité apparente :

Masse de sol sec dans un volume fixe (masse volumique en $g.cm^{-3}$).

Flux :

Circulation de différents composés carbonés et azotés entre les réservoirs de carbone et d'azote.

GES :

Gaz à effet de serre, participant à la rétention d'une partie de la chaleur solaire reçue dans l'atmosphère, phénomène aussi appelé "effet de serre". Dans le document seront considérés sous le terme GES les gaz suivants : CO_2 , CH_4 et N_2O .

LOI :

Méthode d'analyse "Loss Of Ignition" aussi appelée perte au feu.

Métagénomique :

Etude du contenu génétique d'un échantillon prélevé dans un environnement complexe.

Net primary production (NPP) ou production primaire nette :

Différence entre la quantité de carbone atmosphérique entrant dans l'écosystème (production primaire brute) et la quantité de carbone émise vers l'atmosphère par la respiration des organismes autotrophes. La mesure de la production de biomasse sur une année correspond à la production primaire nette. Elle peut être aérienne ou souterraine (aNPP et sNPP).

Séquestration :

La séquestration de carbone correspond au stockage du carbone sur le long terme (végétation ligneuse, sol, sédiment), pour une durée d'au moins 50 à 100 ans. Elle est considérée comme plus pérenne dans les sols ou les sédiments.

Stock :

Quantité de carbone ou d'azote stockée à un instant t dans un réservoir. Le carbone peut se retrouver sous forme inorganique (CO_2 , CH_4 , carbone inorganique particulaire, roche carbonatée, etc...) ou organique (biomasse, carbone organique du sol, carbone organique dissous, carbone organique particulaire) dans les différents réservoirs.

Téledétection :

Ensemble des techniques utilisées pour déterminer des propriétés d'objets à distance, en se basant sur les rayonnements qu'ils émettent, réfléchissent, absorbent, réfractent.

Introduction aux méthodes de suivi et d'évaluation des processus à l'œuvre dans les zones humides influençant le climat

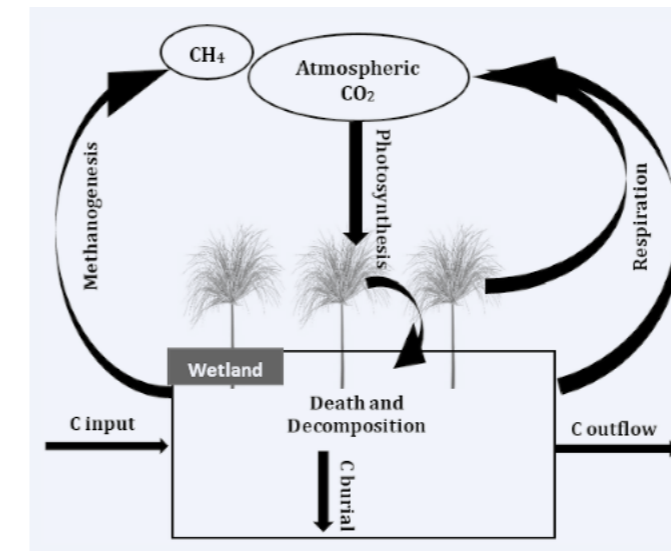


Figure 1 : Principaux processus en zones humides en lien avec le carbone et les GES (Were et al., 2019)

Les zones humides jouent un rôle important dans la régulation du climat (Figure 1) au travers de différents processus (photosynthèse, respiration aérobie, enfouissement du carbone, méthanogenèse, dénitrification, flux latéraux). Mieux comprendre ces processus nécessite la mise en place de dispositifs de suivis et de mesures, choisis et adaptés selon les situations et les processus considérés.

Des disciplines variées sont mobilisées afin d'avoir une vision d'ensemble de ce qui se passe dans la zone humide :

pédologie, écologie, physique des gaz, chimie de l'eau et chimie organique, limnologie, hydrogéologie, microbiologie, génétique, géomatique, télédétection.

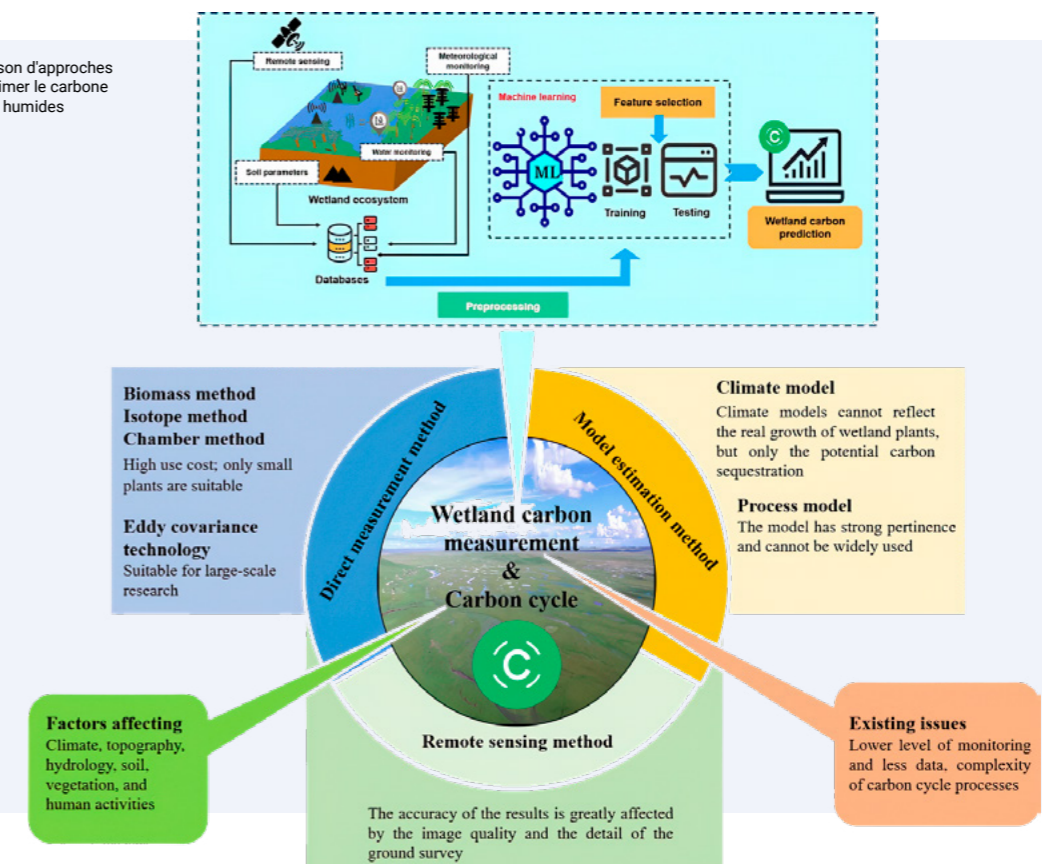
Le suivi et l'estimation quantitative des stocks de carbone et des flux de GES reposent sur des mesures directes¹ *in situ* sur le terrain, ainsi que sur des approches indirectes d'estimation, de modélisation et de télédétection (Figure 2). Les mesures peuvent se décomposer en mesures de stocks et en mesures de flux qui seront détaillées dans les pages suivantes.

Les mesures sont indispensables afin de déterminer si une zone humide représente un stock de carbone important et si le bilan carbone et GES à l'échelle de l'écosystème est globalement positif pour le climat (effet refroidissant) ou négatif (effet réchauffant).

Ce document, à vocation pédagogique, est à destination des techniciens et gestionnaires travaillant en lien avec les zones humides afin de mieux comprendre les différentes méthodes utilisées pour mesurer directement et estimer indirectement les stocks de carbone et les flux de gaz à effet de serre en zones humides.

Il ne constitue ni un guide technique contenant des protocoles précis associés pour l'échantillonnage, l'analyse et l'interprétation des données, ni un document comparatif entre différentes méthodes existantes afin de déterminer la plus pertinente à mettre en œuvre dans une situation donnée, ni un outil de suivi associé à un calculateur de carbone permettant de déterminer si une zone humide est source ou puits de carbone et de GES.

Figure 2 : Combinaison d'approches pour mesurer et estimer le carbone et les GES en zones humides (Li et al., 2024)



¹ <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/3292552/methode-de-mesure-directe>

Mesurer et estimer les stocks

Mare forestière, Flers, (Orne) © L. Lucas

Les stocks de carbone peuvent être mesurés directement ou estimés à partir de relations empiriques et d'équations. Les mesures des stocks de carbone qui seront détaillées concernent le carbone organique. Il s'exprime en tC/ha (tonnes de carbone par hectare). Comme illustré sur la (Figure 3), les stocks de carbone organique peuvent se différencier en fonction du sous-compartiment considéré et de sa nature :

- La **végétation** (biomasse vivante au-dessus du sol, biomasse souterraine, biomasse lignifiée)
- La **litière et le bois mort** (biomasse morte)
- Le **sol ou les sédiments à une profondeur donnée**

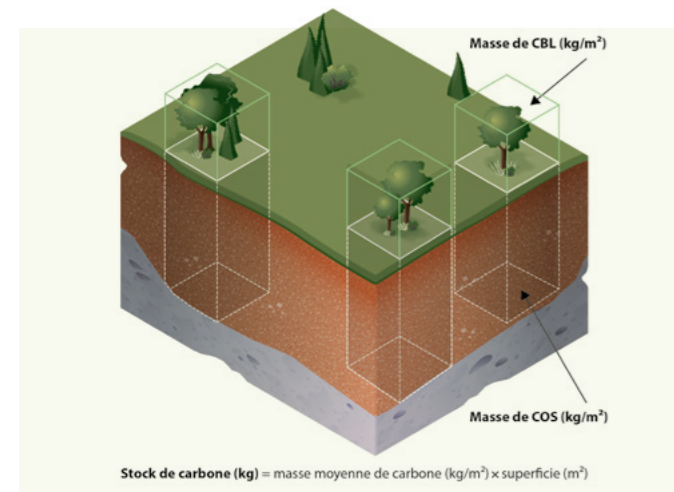


Figure 3 : Stocks de carbone organique en zones humides - CBL = Carbone dans la biomasse ligneuse - COS = Carbone organique du sol (Magnan et al., 2024)

Stock de carbone dans le sol ou les sédiments

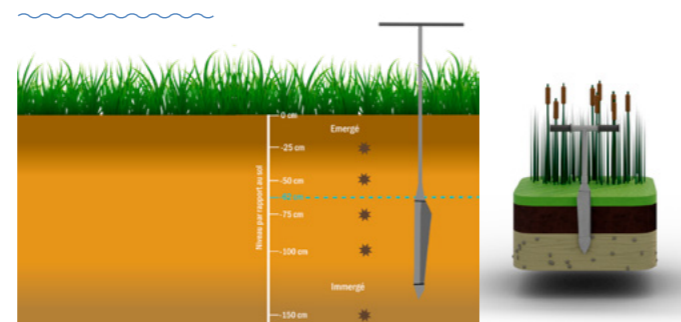


Figure 4 : Utilisation d'un carottier pour estimer les stocks de carbone du sol (WWF Canada, 2024 et Pinault et al., 2025)

Les stocks de carbone dans le sol ou les sédiments sont estimés par des campagnes de carottage réalisées à une profondeur donnée.

Des dispositifs ne compactant pas le sol sont à privilégier. Un **carottier** est souvent utilisé pour prélever des échantillons dans le sol sous forme de « carottes » ou une tarière gouge pour des sols plus compacts (Figure 4). Pour des profondeurs de sol importantes aux sols meubles et cohésifs (vasière, pré salé, marais, tourbière), le recours à un carottier russe est à privilégier. Pendant et après l'extraction du sol, les échantillons doivent être le moins perturbés possibles (teneur en eau, structure, composition chimique, absence de compaction). Des corrections doivent être appliquées dans le cas contraire.

Le nombre minimal de carottes par site d'étude varie selon les protocoles, la surface des sites d'études, l'hétérogénéité de la zone humide et les objectifs de l'étude.



Principes de calcul

■ Stock de carbone organique du sol (tC.ha⁻¹ ou MgC.ha⁻¹) = % Corg* Da* E* (f, f' ou f'')

• % Corg = teneur ou concentration en carbone organique en pourcentage de masse (obtenue par analyse) = Corg/100

• Da = Densité apparente en g.cm⁻³ ou en kg.m⁻³

• E = Epaisseur en cm ou en m

• f = facteur de conversion pour passer de gC.cm⁻² à tC.ha⁻¹ = (1 g = 10⁻⁶ t / 1 cm² = 10⁻⁸ ha) = 10⁻⁶ X 10⁸ = 100

• f' = facteur de conversion pour passer de gC.m⁻² à tC.ha⁻¹ = (1 g = 10⁻⁶ t / 1 cm² = 10⁻⁴ m²) = 10⁻⁶ X 10⁴ = 0,01

• f'' = facteur de conversion pour passer de kgC.m⁻² à tC.ha⁻¹ = (1 kg = 10⁻³ t / ha = 1 m² = 10⁻⁴ ha) = 10⁻³ X 10⁴ = 10

La teneur massique en carbone organique % Corg est mesurée indirectement à l'aide d'analyses en laboratoire comme la méthode de la perte au feu (Loss On Ignition - LOI en anglais) et les méthodes d'oxydation humide (Walkley-Black) et/ou directement par un analyseur élémentaire CHN.

La **LOI** est la plus économique et la plus simple à mettre en œuvre mais demeure moins précise que le recours à un analyseur élémentaire CHN. Les caractéristiques des milieux salés et des sols riches en carbonates introduisent des biais supplémentaires. Après séchage en étuve, l'échantillon est pesé, broyé, tamisé, calciné dans un four à mouffes et à nouveau repesé. A partir du **taux de cendres** présent dans l'échantillon final (résidus minéraux dont une partie est du carbone inorganique) et des différences de masse entre l'échantillon sec et l'échantillon calciné, il est possible d'estimer la teneur en matière organique de l'échantillon initial en prenant en compte le type de sol, la nature de la matière organique, la température de calcination. La **teneur en carbone organique** est ensuite obtenue en associant un **facteur empirique de conversion** qui correspond à la teneur moyenne de carbone organique dans la matière organique. Il n'existe pas de facteur de conversion universel et il peut dépendre du protocole de LOI utilisé, du type de sol, etc. Le facteur de Van Bemmelen de 58% (teneur en matière organique = 0,58 * carbone organique total) est le plus couramment utilisé mais ce facteur est variable selon les sols en particulier en zones humides. Par exemple il est estimé à environ 52% pour les tourbières françaises. La méthode de la perte aux cendres peut être généralisée à plus grande échelle à condition d'être calibrée au préalable par des analyses élémentaires pour estimer des facteurs de conversion spécifiques.

L'**analyseur élémentaire CHN**, plus coûteux, permet d'estimer directement et précisément la **teneur en carbone total** (carbone organique, inorganique), la teneur en azote et en hydrogène d'un échantillon. Il peut nécessiter des pré-traitements spécifiques pour éliminer les carbonates de l'échantillon.

La densité apparente Da en g.cm⁻³ est obtenue en divisant le poids sec de l'échantillon par le volume humide connu du prélèvement par le cylindre du carottier, après passage à l'étuve.

La **profondeur d'échantillonnage** peut varier beaucoup de manière générale selon les études notamment en zones humides et doit être renseignée pour chaque mesure de stock pour permettre des comparaisons. La plupart des sondages se situent **entre 15 et 30 cm**. Ce stock proche de la surface est le plus réactif aux phénomènes naturels, aux activités humaines ou aux changements de paramètres environnementaux.

La valeur moyenne du taux de carbone organique des 15 ou 30 premiers cm extrapolée à de plus grandes profondeurs peut engendrer une surestimation du stock de carbone existant. La réalisation de carottage à **100 cm de profondeur** et au-delà peut permettre de mieux estimer le stock de carbone en place en particulier dans certains types de zones humides comme les zones humides intertidales (Figure 5), alluviales et les tourbières.

Dans le cas de sols présentant des profondeurs au-delà de 50 cm comme pour les tourbières, un **échantillonnage par palier** peut être également prévu, en particulier tous les 25 cm dans le 1^{er} mètre de tourbe puis un échantillon par mètre en plus ou en se basant sur les différents horizons de sol. Cela peut permettre de mieux comprendre la **variabilité de la teneur en carbone organique selon un gradient vertical** et également de mieux comprendre l'**état de conservation du stock de carbone**.

Le sous-échantillonnage est à adapter selon le protocole utilisé dépendant des objectifs de l'étude, du type de sol, de la profondeur du sol et du type de zones humides.



Figure 5 : Exemples de carottes de sols en zones humides, en bas dans un marais et à droite dans un pré salé en Amérique du Nord (Kirwan et al., 2021 et Peck et al., 2025)





Mare du plateau de Millevaches (Corrèze) © M.Bordier

Stock de carbone dans la végétation

Les zones humides végétalisées, en particulier lignifiées (fourrés, arbustes, arbres), peuvent stocker du carbone de manière importante dans leur biomasse.

Une petite partie du stock de carbone lié à la végétation peut également correspondre à la biomasse morte à la surface du sol (débris végétaux, litière, bois mort). En règle générale, le stock de carbone dans la végétation est transitoire, fortement dépendant de la gestion mise en place et est **bien moins durable que dans le sol ou les sédiments.**

Stock de carbone dans la biomasse aérienne

Deux principales approches existent pour estimer le carbone dans la végétation : par récolte (coupe et pesée) et par allométrie.

Le stock de carbone dans la biomasse aérienne ligneuse peut être mesuré par différentes méthodes. Elles consistent à **prélever, peser, sécher et analyser la biomasse** et impliquent donc la **destruction du sujet étudié**. Elles sont souvent utilisées lorsque les sujets sont jeunes et moins quand ils sont adultes.

Certaines méthodes se focalisent sur la **biomasse ligneuse notamment aérienne** de certains types de végétation (arbustes, arbres) aussi appelé AGWB en anglais (Aboveground Woody Biomass).

De la même manière, pour les plantes vasculaires herbacées, un échantillon peut être prélevé, trié et identifié sur des placettes désignées notamment par des quadrats avec une estimation de la biomasse sèche présente, à associer avec un facteur de conversion issu de la littérature ou estimée par analyse (LOI, analyseur élémentaire CHN).

Cette méthode destructrice est plus précise que les méthodes allométriques si elle est répétée plusieurs fois dans l'année notamment pour estimer les valeurs maximales et minimales de stock de carbone dans la végétation.

La teneur en carbone est dérivée d'**équations empiriques** estimant la biomasse. Une valeur standard est établie à environ **47%** de teneur en carbone dans la biomasse végétale en moyenne en zone tempérée.

La **biomasse aérienne ligneuse sèche** correspond à la **densité du bois (Dwb)** multiplié par le **volume**. La Dwb peut être obtenue via des valeurs de référence par espèces ou groupes d'espèces issue de la littérature ou être calculée en pesant un volume de bois sec connu. Le **volume** est calculé à partir de la **hauteur de l'arbre** (mesurée localement par trigonométrie, par un télémètre laser ou issue d'une valeur moyenne de référence) multipliée par la **surface basale du tronc à hauteur de poitrine** (à 1,3 mètre) et un **facteur de forme** ou d'expansion de branches issu de la littérature.



Principes de calcul

■ **AGWB (tonnes de matière sèche par individu)**
= $Dwb * V$

- Où Dwb = Densité du bois en $g.cm^{-3}$ plus précisément la densité SG (Specific Gravity) ou la densité basale
- Et V = Volume en m^3 = $S * H * F$
 - Où S = Surface basale du tronc à hauteur de poitrine en m^2
 - H = Hauteur moyenne en m
 - et F = facteur de forme ou d'expansion de branche

■ **AGWB ($tMS.ha^{-1}$) = AGWB par individu * N**

- Le nombre d'arbres ou d'arbustes à l'hectare (N) permet de calculer un chiffre à l'hectare.

■ **Stock carbone AGWB ($tC.ha^{-1}$)**
= $\%C_{masse} * AGWB$

- $\%C_{masse}$ = fraction massique de carbone dans la biomasse sèche aérienne ligneuse

Des méthodes allométriques peuvent être également appliquées.

Le **diamètre à hauteur de poitrine** (en anglais DBH - Diameter at Breast Height) est souvent utilisé dans les méthodes allométriques (Figure 6). Il mesure le diamètre du tronc ou des tiges à partir d'un ruban circonférentiel ou un compas forestier en se positionnant de manière perpendiculaire à l'axe du tronc à 1.3 m du sol. La circonférence minimale prise en compte peut varier selon les études avec des valeurs souvent comprises entre 5 et 10 cm.

Des équations allométriques universelles existent pour toute espèce d'arbre. Des équations par groupe d'espèces voire par espèces sont considérées comme plus précises si elles existent, mais plus complexes à appliquer.

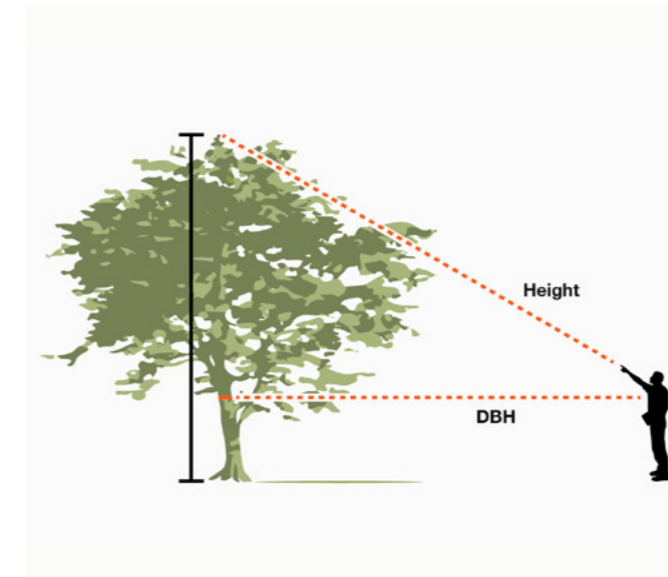


Figure 6 : Méthodes allométriques pour estimer la hauteur et le diamètre à hauteur de poitrine par mètre ruban © VFCS



Stock de carbone dans la biomasse souterraine

La **biomasse souterraine** peut représenter une partie prédominante de la biomasse des milieux herbacés par rapport aux milieux forestiers.

La biomasse souterraine contribuerait davantage au stockage à long terme de carbone dans le sol que la biomasse aérienne. L'addition du stock de carbone dans la biomasse souterraine avec le stock de carbone du sol doit faire l'objet de précautions étant donné les risques de double comptage.

A partir de la même méthode de calcul que pour la biomasse aérienne, des **méthodes d'excavation** existent afin d'extraire la biomasse racinaire de la plante ou de l'arbre considéré. Le système racinaire est extrait, séparé des couches de sols, trié et pesé afin d'obtenir la masse fraîche, qui sera ensuite séchée.

La mesure directe de la biomasse souterraine est complexe et nécessite un temps de travail important et elle est souvent délaissée au profit d'**autres méthodes allométriques**. Des équations allométriques relient la biomasse aérienne à la biomasse souterraine à partir de valeurs de référence : belowground to aboveground biomass ratios ; root-to-shoot ratios ; etc...



Landes humides de la RNN du Pinail (Vienne) © A.Beaumont

Mesurer et estimer les flux

Roselières subhalophiles (Seine Maritime), ©Maison de l'Estuaire

En zones humides, les processus à l'origine des flux peuvent avoir lieu à différentes interfaces (atmosphère-eau, eau-écosystème ou encore atmosphère-écosystème). Les flux peuvent se différencier en flux verticaux et latéraux :

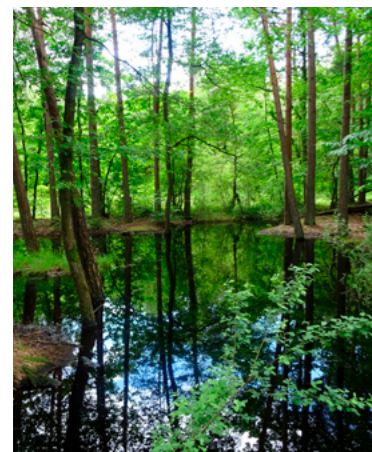
- Flux verticaux :

émission et fixation de dioxyde de carbone, émission et consommation de méthane, émission et consommation de protoxyde d'azote, enfouissement du carbone organique

- Flux latéraux :

exports de carbone inorganique et organique sous forme dissoute ou particulaire et imports de carbone par exemple en provenance du bassin versant

Les mesures portent sur des flux plutôt que les processus en eux-mêmes et impliquent un suivi temporel des échanges molaires ou massiques par unité de temps.



Mare forestière, Flers (Orne), © L.Lucas

Séquestration de carbone dans les sols ou les sédiments

La séquestration du carbone correspond en général à un retrait net du carbone de l'atmosphère à long terme.

Il s'agit plutôt du bilan des flux de carbone intégré dans le temps et non à un flux ou un processus en tant que tel. Il n'existe pas une méthode unifiée pour toutes les zones humides, ce qui rend les comparaisons d'autant plus difficiles.

Elle s'exprime en général en $gC.m^{-2}.an^{-1}$ ou en $tC.ha^{-1}.an^{-1}$, unités pouvant être converties en tCO_2 -équivalent en multipliant les valeurs obtenues par le rapport entre la masse molaire du dioxyde de carbone ($44 g.mol^{-1}$) et la masse molaire du carbone ($12g.mol^{-1}$) soit $44/12 = 3,67$ environ.



Principes de calcul

- **Séquestration carbone ($tC.ha^{-1}.an^{-1}$)** = Séquestration carbone ($gC.m^{-2}.an^{-1}$)/100
- **Séquestration carbone ($gC.m^{-2}.an^{-1}$)** = %Corg * Ta * 10 000 = %Corg * D * V * 10 000

• Où %Corg = teneur ou concentration en carbone organique en pourcentage de masse (obtenue par analyse par LOI ou analyseur élémentaire CHN) = Corg/100

• Où Ta = taux d'accumulation massique dans le sédiment ou le sol en $g.cm^{-2}.an^{-1} = D * V$

- et V = vitesse de sédimentation ou taux d'accrétion du sol en $cm.an^{-1}$

- et D = Densité apparente en $g.cm^{-3}$

• Où 1/100 = taux de conversion de $gC.m^{-2}.an^{-1}$ en $tC.ha^{-1}.an^{-1}$

• Où 10 000 = taux de conversion de $gC.cm^{-2}.an^{-1}$ en $gC.m^{-2}.an^{-1}$

La mesure directe par datation radiométrique du taux d'accumulation massique est à privilégier pour limiter les biais introduits par les mesures de la vitesse de sédimentation et de la densité apparente.

Différents dispositifs peuvent être utilisés pour mesurer le taux de sédimentation :

- **Des horizons artificiels** peuvent être créés pour servir de marqueurs en ayant recours à différentes matières (argile, sable, paillettes, briques, éléments rares). Les composés s'accumulant au fil du temps sont mesurés à partir de ces horizons de référence.

- **Le recours à des broches verticales** ou à des « Sediment Erosion Table » (Figure 7) implantées dans le sédiment et fixées sur une assise stable peut permettre de suivre l'évolution de la sédimentation au cours du temps.

- **la dendrogéomorphie** associe l'âge d'un arbre par dendrochronologie à un repère au sol au niveau de la base du tronc afin d'estimer le taux de sédimentation. Cette méthode est utilisée en zones humides boisées.

- **Des pièges à sédiments** de différentes formes peuvent être conçus pour mesurer la sédimentation des milieux clos et peu sujet à des perturbations. Ces coupelles peuvent être placées à la surface du sédiment à l'horizontal sur un support et ancrées par une attache.

La vitesse de sédimentation ou le taux d'accrétion correspond à une valeur temporelle liée à une variation d'épaisseur. Le taux d'accumulation du carbone peut être estimé à partir de la vitesse de sédimentation en appliquant un facteur de conversion tiré de la littérature ou en analysant la teneur en carbone moyenne des milieux investigués (LOI, analyseur élémentaire).

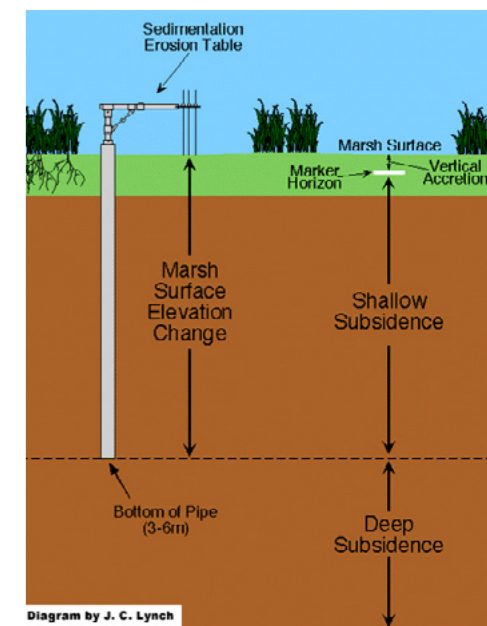


Figure 7 : Schéma de fonctionnement d'une « Sediment Erosion Table » (Bansal et al., 2023)

Les mesures de datation radiométrique (Figure 8 et 9), plus onéreuses, permettent d'attribuer un âge à une profondeur donnée à partir d'un profil de sol et d'estimer des taux de sédimentation ou d'accumulation passés, à partir desquels une séquestration de carbone moyenne peut être estimée.

L'utilisation de radio-isotopes tels que ^{137}Cs , ^{210}Pb (Figure 8) et ^{14}C (Figure 9) sont les plus courants. Certains sols aux sédiments mélangés ou soumis à l'érosion peuvent rendre l'utilisation de ces méthodes inappropriée. L'origine de la matière (autochtone ou allochtone) peut être estimée en ayant recours à des analyses isotopiques notamment à partir du $\delta^{13}C$. Cela peut aider à interpréter les données de séquestration locale de carbone notamment en précisant les contributions de différentes sources de carbone aux stocks observés.

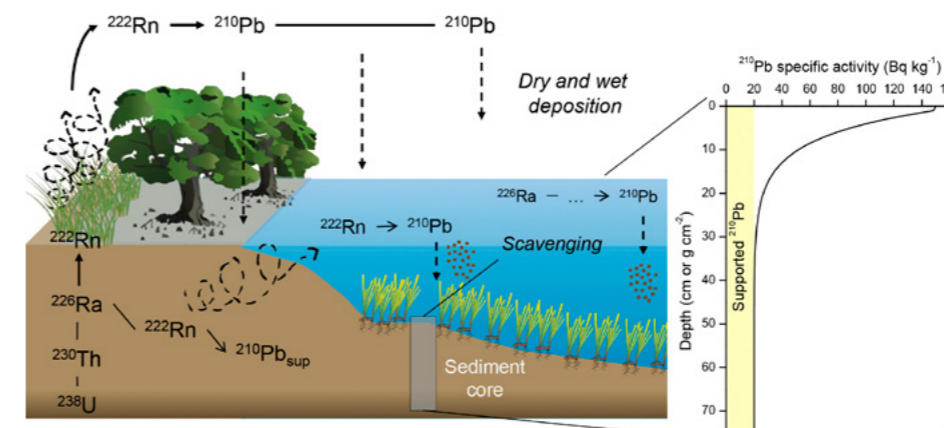
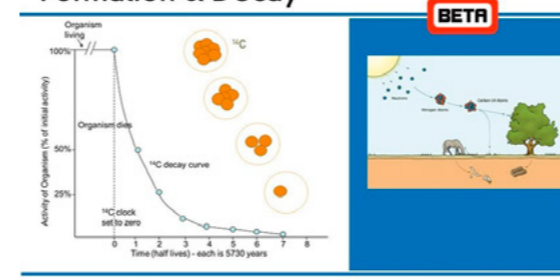


Figure 8 : Principe de datation radiométrique au plomb 210 et profil-type de séquence sédimentaire datée au ^{210}Pb couvrant une échelle séculaire d'environ 150 ans (Arias-Ortiz, 2018)

Radiocarbon Formation & Decay



Source: Beta Analytic's free webinar, Bones: Isotopes in Dating, Diets and Migration Studies

Figure 9 : Principe de datation radiométrique au carbone 14 et profil-type d'une séquence sédimentaire datée au ^{14}C couvrant une échelle millénaire d'environ 2000 ans et plus © Beta Analytic

Des approches historiques peuvent également être utilisées à partir du moment où un événement ou plusieurs événements datés dans le temps peuvent être corrélés à une profondeur donnée.

Plusieurs mesures de stocks de carbone dans le sol ou les sédiments espacés dans le temps sur une même zone humide peuvent donner une estimation de la séquestration de carbone. Cette méthode est potentiellement génératrice d'incertitudes importantes. La prise en compte concomitante des variations de densité apparente, de teneur en carbone et d'épaisseur peut diminuer les erreurs potentielles. Cette méthode nécessite de revenir précisément au même endroit pour échantillonner à plusieurs intervalles de temps pour détecter des variations.

En utilisant la technique de masse de sol équivalent (Equivalent Soil Mass), les incertitudes peuvent être réduites à moindre coût avec par exemple une détection des changements de stocks de carbone du sol à 5-10 ans en grandes cultures.

La différence entre les stocks de carbone sur un même milieu peut être estimée en dernier recours à partir de facteurs d'émission issues de la littérature, sous conditions que les données utilisées correspondent bien au type de zone humide étudiée et aux conditions environnementales locales.

Séquestration de carbone dans la végétation

Dans les écosystèmes arborés, la mesure des **taux de croissance** des cernes des arbres peut donner une estimation du taux annuel moyen de carbone séquestré dans le bois. Ce type d'analyse indirecte par **dendrochronologie** (Figure 10a) peut être réalisée par destruction complète du sujet ou par des prélèvements ciblés sous forme de carottes de bois à l'aide d'une **tarière de Pressler** par exemple (Figure 10b). Des appareils optiques spécifiques retracent les taux de croissance passés de l'arbre à partir du nombre et de la taille de cernes.

Cela permet de calculer l'âge de l'arbre et les taux de croissances annuels sans le détruire.

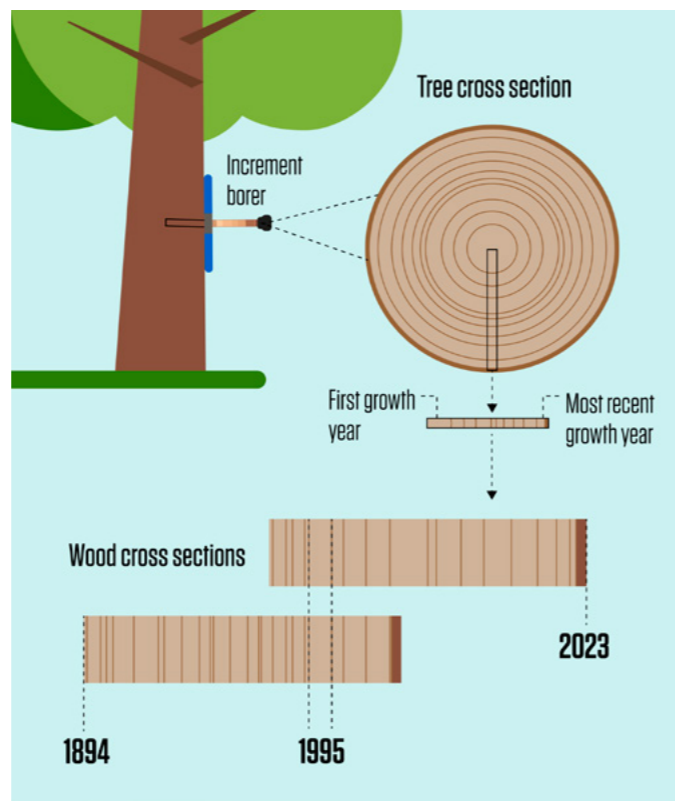


Figure 10a : Principes de fonctionnement de la dendrochronologie, © NIST

La méthode des variations de stock peut également être utilisée pour la végétation de la même manière que pour les sols ou les sédiments.

Elle peut générer des **incertitudes importantes à court terme** en ayant recours aux mêmes méthodes évoquées précédemment et suppose des **suivis individuels réguliers des sujets** concernés sur le long terme pour limiter les marges d'erreur (mortalité, recrutement, jeunes adultes, croissance des adultes, exportation de biomasse).



Figure 10b : Tarière de Pressler, © Haglöf Sweden

Mesures des flux gazeux

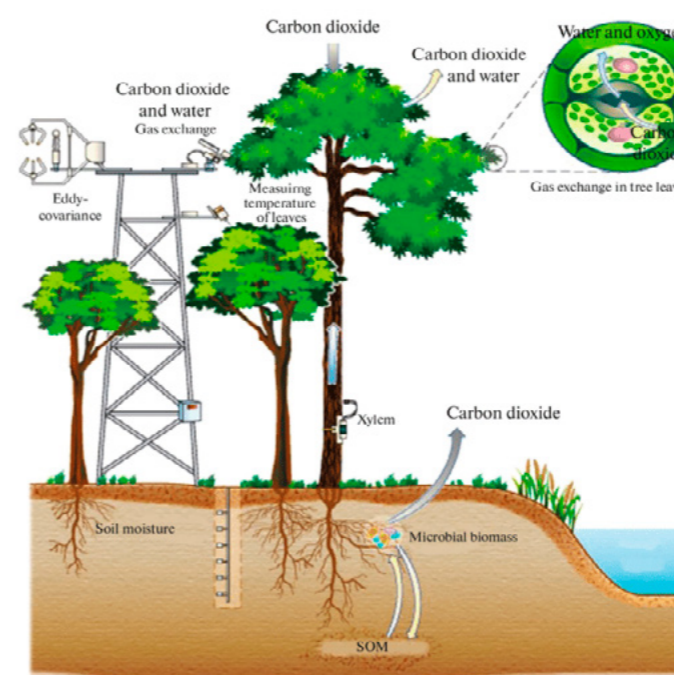
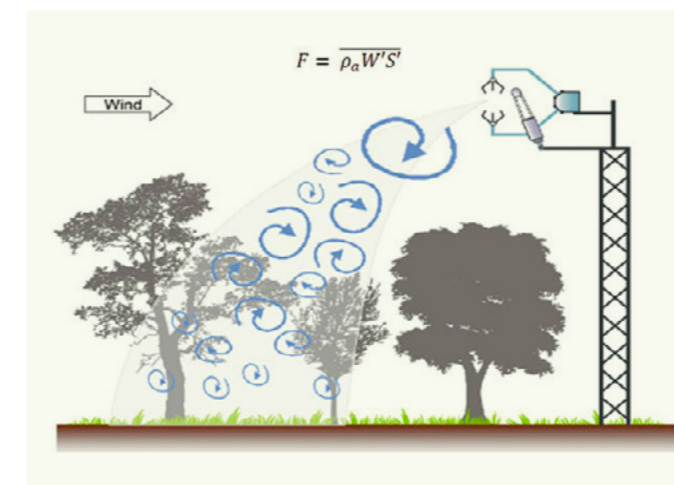


Figure 11 : Principes de fonctionnement des tours à Eddy-Covariance (Patel et al., 2019 et Abakumov et al., 2022)

Les échanges gazeux sont mesurés par un panel d'instruments permettant de quantifier les échanges de masse ou de quantité de gaz par unité de surface et de temps.

Trois grandes méthodes de quantifier les flux de GES existent :

- Les mesures par **Eddy Covariance atmosphérique**
- Les **chambres à flux**
- Les **prélèvements et suivis dans l'eau**

Les deux premières méthodes correspondent à des **mesures directes des flux gazeux**, tandis que les **prélèvements et suivis dans l'eau** correspondent à des **mesures indirectes**, basées sur des concentrations et des gradients à l'interface entre deux compartiments.

L'**Eddy Covariance** est une méthode de mesure de flux à **haute fréquence**, aussi appelée tours à flux, disposées au-dessus du milieu étudié (Figure 11). Elles permettent de suivre de manière intégrée **l'évolution des flux verticaux de GES** au cours de l'année, à l'échelle de l'empreinte spatiale de la tour. Des analyseurs de gaz, à calibrer régulièrement, mesurent l'évolution des concentrations en gaz de manière **continu**, par la suite traduite en flux grâce à un anémomètre sonique 3D (intensité, direction des vents en trois dimensions) et la prise en compte d'autres paramètres (pression atmosphérique, température) mesurés par des capteurs dédiés.

Les **tours à flux** permettent d'obtenir des **cartes spatialisées** des flux de GES dans l'environnement proche du dispositif expérimental sur une année, par saison, par mois ou par jour et nuit. Les mesures par Eddy Covariance peuvent donner des bilans d'échange net de l'écosystème à **grande échelle** (de l'ordre de centaines de m² à plusieurs ha) selon les directions du vent, les conditions atmosphériques, la hauteur des capteurs et la rugosité du milieu sur plusieurs années sans perturber l'environnement ambiant. Les estimations reposent sur des **formules de calculs et des hypothèses établies** (conditions de stationnarité, d'homogénéité), complétées par des modèles. Elles sont potentiellement sources d'incertitudes d'autant plus importantes sur des pas de temps courts.

Une tour à flux peut être mise en place sur un site pendant plusieurs années, ce qui peut aider à rentabiliser son coût initial particulièrement élevé. Ce coût est à relativiser selon l'échelle temporelle et spatiale de l'étude mise en œuvre. Elle nécessite une main d'œuvre qualifiée pour l'installation adéquate en fonction du système étudié, le suivi du dispositif et de l'ensemble des traitements et post-traitements des données associées.

Captation de carbone dans la végétation

En zones humides, la **captation biologique de carbone** correspond essentiellement à la **fixation de dioxyde de carbone de l'atmosphère par les organismes photosynthétiques**. A la différence de la séquestration de carbone qui s'inscrit sur le **long terme**, la captation de carbone correspond à un retrait du carbone de l'atmosphère à **court terme et de façon très variable**.

La mesure de la biomasse produite sur une année correspond à une estimation de la production primaire nette (NPP). Elle intègre différents processus notamment la **fixation de carbone par photosynthèse** (production primaire brute) et la **respiration des organismes photosynthétique**. La productivité primaire souterraine est

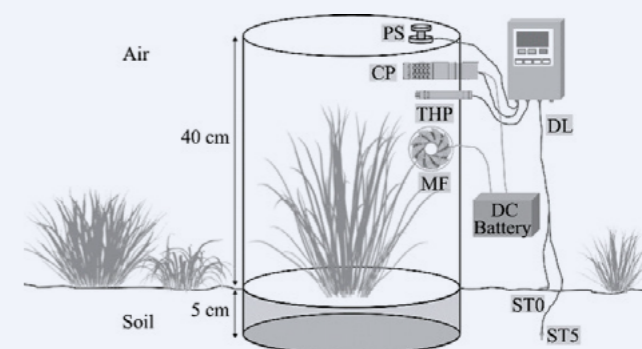
plus rarement mesurée car plus difficile à estimer.

Comme pour l'estimation de stock de carbone, la mesure de la captation de carbone par la biomasse peut se faire **par récolte ou par allométrie**. Plusieurs récoltes au cours de l'année peuvent donner une bonne estimation de la biomasse produite, en faisant la somme des stocks de carbone de la végétation suivie sur une année (« maximum standing crop », maximum et minimum de production primaire, etc...).

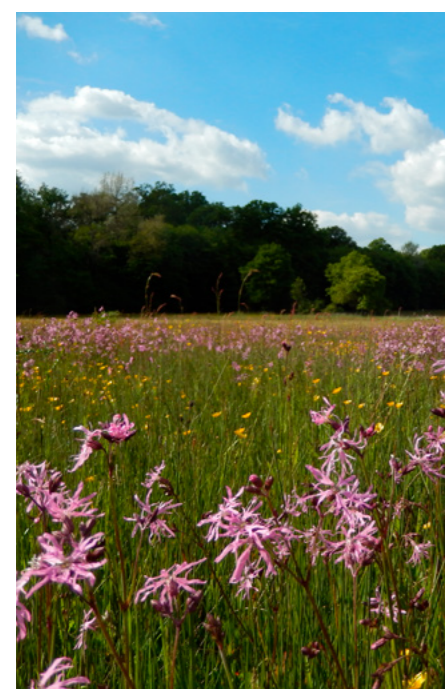
La prise en compte de la mortalité des plantes et de la sénescence des tissus végétaux est indispensable pour éviter des surestimations.

Les **chambres à flux** sont le type de dispositif le plus couramment utilisé (Figure 12). Les plus courantes sont les **chambres statiques fermées**. Elles quantifient l'évolution de la concentration de GES (CO₂, CH₄ et N₂O) au cours du temps, issus du milieu sur lequel elles sont scellées ou installées.

La mesure des flux de CO₂ dans la chambre statique peut être assurée directement par un **analyseur haute fréquence de type IRGA** qui donne une valeur ponctuelle et locale de l'échange net moyen de l'écosystème au sein de la chambre en intégrant la différence entre la production primaire brute et la respiration. Les flux sortants de CO₂ par respiration sont estimés dans des **conditions opaques pour ne prendre en compte que la respiration**. L'empreinte spatiale relativement restreinte de ces dispositifs (du cm² au m²) et la grande variabilité spatio-temporelle des flux de GES (CH₄ et N₂O en particulier) limitent l'extrapolation dans le temps et dans l'espace des résultats obtenus.



Les faibles concentrations et la forte variabilité temporelle des flux du méthane, en particulier les émissions épisodiques par ébullition, représentent un véritable challenge pour le mesurer.



Prairies humides à lycnis fleur-de-coucou (Nord), © S.Mézières

Figure 12 : Schéma de fonctionnement d'une chambre statique fermée (Hu et al., 2019 et Thalasso et al., 2023)

Des **chambres automatisées** peuvent être mises en place et mesurent avec une plus haute fréquence, une plus grande amplitude des concentrations en gaz et une plus longue durée d'échantillonnage que les chambres statiques manuelles. Elles peuvent impliquer un coût plus élevé et une potentielle alimentation électrique à anticiper. En plus des chambres fermées automatisées, les **chambres ouvertes dynamiques** (Figure 13) comportent une circulation active de l'air ambiant associée à un analyseur haute fréquence. Ces types d'instrumentation permettent d'atténuer les artefacts (température, humidité, pression, condensation) liés à la mise en place et au confinement des chambres statiques.

Selon les objets d'étude et les caractéristiques des milieux, des **adaptations** peuvent être mises en œuvre : chambres flottantes en milieux aquatiques, pièges à bulles sous forme d'entonnoir pour les flux de méthane par ébullition, chambres semi-rigides pour les flux des troncs et chambres cylindriques hautes pour les roselières, etc... L'**incubation** en laboratoire d'échantillons peut permettre d'estimer la production et la consommation d'un ou plusieurs GES dans un compartiment donné.

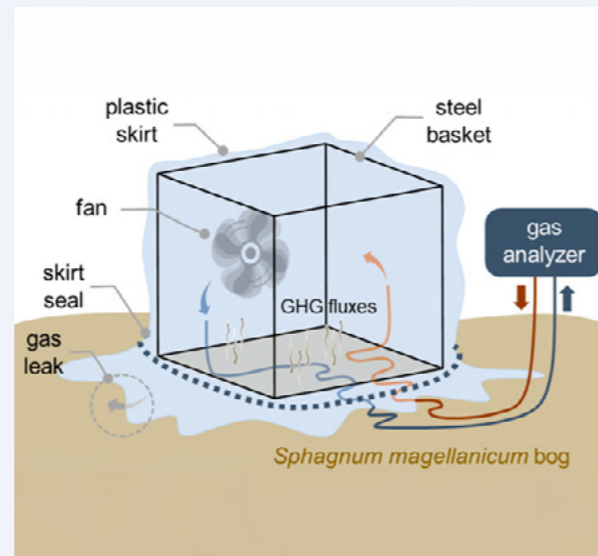


Figure 13 : Schéma de fonctionnement d'une chambre dynamique ouverte (Hu et al, 2019 et Thalasso et al., 2023)

Mesures liées à la chimie organique de l'eau (GES dissous, carbone organique dissous et particulaire)

Le carbone présent sous différentes formes dans l'eau (GES dissous, carbone organique dissous, carbone organique particulaire, carbone inorganique particulaire et dissous) est en étroite interaction avec l'atmosphère même s'il ne représente pas la majorité du carbone présent et échangé en zones humides.

Selon les finalités de l'étude et les formes carbonées étudiées, l'eau peut être collectée selon divers protocoles à différentes interfaces : en surface (interface eau-atmosphère), dans la colonne d'eau ou en profondeur (interface eau-sédiment ou eau souterraine).

La **méthode de l'équilibrage de l'espace de tête** (Figure 14a) (« headspace equilibration ») est fréquemment utilisée. Un volume connu d'eau est prélevé et introduit dans un flacon hermétiquement scellé sous vide. L'échantillon est ensuite mis en contact avec un gaz inerte comme le N₂ ou le He, puis secoué et un équilibre se met en place entre les gaz à analyser et le gaz de référence dans l'espace de tête et dans l'eau.

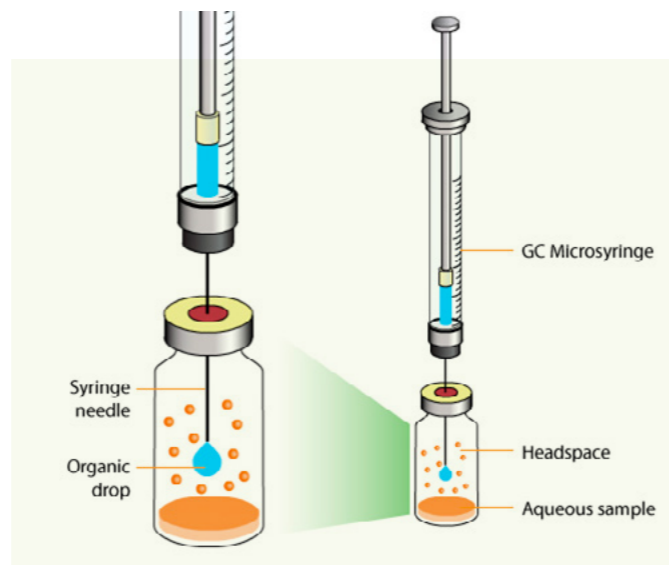
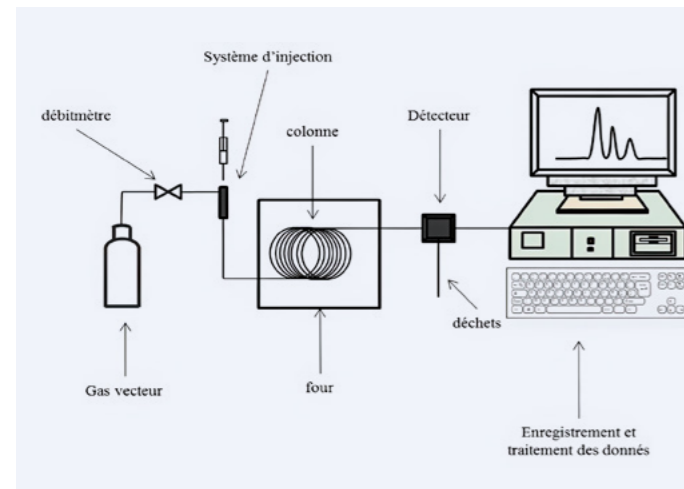


Figure 14a : Méthode de l'équilibrage de l'espace de tête

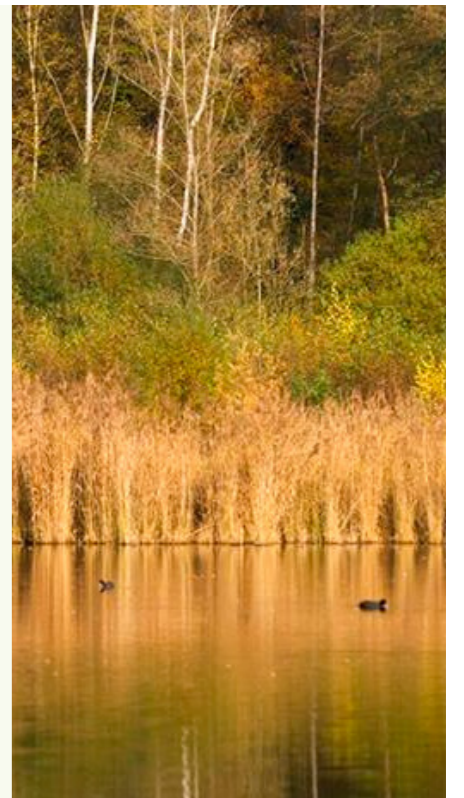


La **concentration en GES** dans l'eau est ensuite mesurée par chromatographie en phase gazeuse. La **chromatographie en phase gazeuse** (Figure 14b) regroupe un ensemble de méthodes de chimie analytique incluant un injecteur (manuelle ou automatique), un gaz vecteur, une ou plusieurs colonnes pour séparer les analytes (espèce chimique recherchée) et des **détecteurs** sensibles aux 3 GES étudiés (CO₂, N₂O et CH₄). Le calcul des concentrations dissoutes en GES dans l'échantillon prend en compte les quantités de GES analysées, les volumes, les températures et les coefficients de partage selon des équations propres à la physique des gaz.

Figure 14b : Méthode d'analyse par chromatographie en phase gazeuse, © V.H.Bui

Des mesures de concentrations dissoutes peuvent s'effectuer indirectement dans l'eau via une variété de sondes et d'analyseurs :

- Des sondes aux mécanismes de détection optique divers (infrarouge, fluorescence, spectroscopie colorimétrique) mesurent spécifiquement les **pCO₂** in situ de l'eau, c'est-à-dire les pressions partielles de CO₂, pouvant être converties en concentration de CO₂ dissous.
- De la même manière, le **pCH₄** peut faire l'objet de mesure spécifique avec des sondes dédiées dont la majorité est basée sur les caractéristiques d'absorbance du méthane.
- Des capteurs optiques peuvent également estimer la matière organique dissoute in situ en caractérisant les composés selon leur absorbance (**CDOM**) et leur fluorescence (**FDOM**). A partir de relations empiriques établies sur chaque site étudié, la concentration en carbone organique dissous peut être déduite de ces premières mesures locales en sachant que de nombreux paramètres peuvent interférer sur les valeurs estimées et nécessitent le recours à des facteurs de correction.
- Le recours à la **titrimétrie** permet de mesurer la **concentration en alcalinité** de l'échantillon, à relier aux équations d'équilibre du système carbonaté et de données *in situ* comme le pH, la température pour estimer la **concentration en CO₂ dissous**. Cette méthode part du principe que les seuls contributeurs à l'alcalinité sont les formes carbonatés (CO₃²⁻, HCO₃⁻), ce qui n'est pas toujours le cas selon les situations (pH ou alcalinité faible, alcalinité liée à d'autres molécules carbonées, azotées, soufrées, organiques, etc...).



RNR Etang des Bonnelles (Yvelines), © PNR HVC

Mesures des flux horizontaux

Des entrées et des sorties du carbone en zones humides peuvent s'effectuer horizontalement par les flux hydrologiques de surface ou souterrains. Le suivi des flux horizontaux est complexe, très fluctuant (variabilités saisonnières, annuelles, événements extrêmes) et souvent peu investigué dans les études portant sur le carbone en zones humides.

En multipliant les concentrations en carbone par litre par les flux hydrologiques, des flux de masse de carbone par unité de temps peuvent être calculés et associés à une surface donnée.

La mesure des flux hydrologiques peut passer par la mesure des débits (Figure 15a) via une **station hydrométrique** (sonde de pression, échelle limnimétrique, débitmètre manuel, courantomètre).

Les flux souterrains nécessitent la mesure du gradient hydraulique et de la conductivité hydraulique par l'utilisation d'un réseau de **piézomètres** (Figure 15b). La mesure des teneurs en carbone organique dissous (DOC) et carbone organique particulaire (POC) passe par la **mesure du carbone organique totale** et la mesure distincte du DOC après **microfiltration** (0,45 µm de manière conventionnelle) selon des protocoles adaptés.

Les concentrations en carbone organique et inorganiques sont estimées selon les méthodes décrites précédemment.

Un piège à flux (« flow trap ») creusé ou posé à la surface du sol permet d'évaluer le flux hydrologique de surface et la quantité de carbone transportée par lessivage ou inondation.



Figure 15a : Station hydrométrique sur le bassin-versant de l'Yzeron, © SAGYRC



Figure 15b : Piézomètre en zone humide drainée par des fossés, © SMDMCA

Mesures indirectes et autres approches

Le recours à des modèles peut permettre d'estimer des stocks carbonés ou des bilans de flux de GES au sein des zones humides.

Des **modèles climatiques**, basés sur des variables météorologiques et des modèles de processus basés sur des variables environnementales (hydrologiques, pédologiques, thermiques, biogéochimiques, biologiques, etc...) peuvent approcher l'évaluation de la production primaire, du potentiel de séquestration de carbone, de l'émission de méthane, etc... Certains types de zones humides ont fait l'objet de modèles

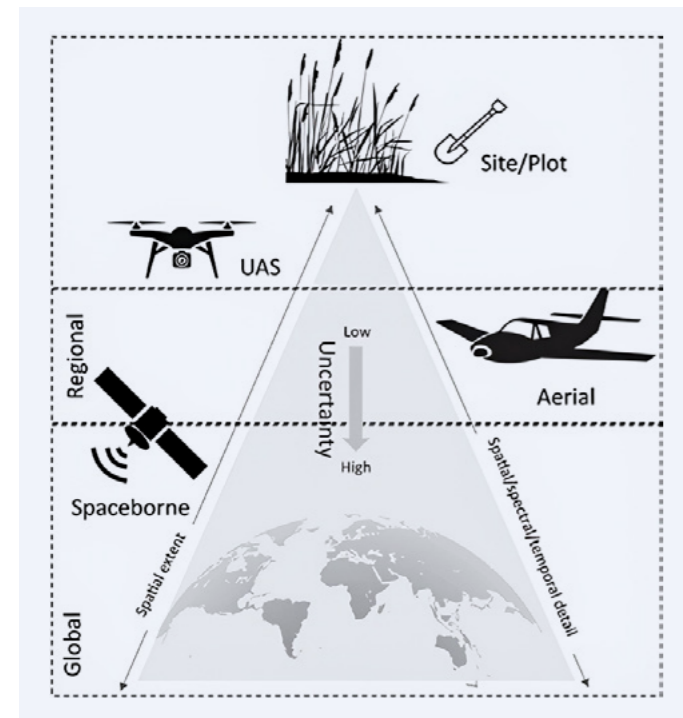


Figure 16 : Suivi du carbone en zones humides à grande échelle par télédétection et incertitudes spatiales, spectrales et temporelles associées (Campbell et al., 2022)



Marais de Lespaut, Vendays-Montalivet (Gironde), © N.Boesch

spécifiques portant sur la production primaire brute ou nette, le taux de minéralisation, l'estimation de l'âge, l'émission de méthane, etc...

Des **approches métagénomiques** en développement se basant sur le séquençage de l'ARN-r 16S permet de mieux caractériser les groupes fonctionnels de micro-organismes méthanogènes et méthanotrophes dans l'optique de mieux quantifier la production de GES. Des modèles à l'échelle de l'écosystème intégrant ces données microbiologiques peuvent être ainsi améliorés car utilisant jusque-là essentiellement des variables abiotiques.

L'essor de la télédétection, lié à l'utilisation d'images satellites de plus en plus fréquentes à large échelle avec une résolution de plus en plus précise, offre de nouvelles possibilités d'études des écosystèmes comme les zones humides (Figure 16). Des modèles basés sur des images satellitaires, entraînés à partir de données terrain sur les processus et d'apports issus de la géomatique, sont développés pour suivre des flux de GES en zones humides à différentes interfaces. Le **suivi des émissions de méthane**, la **production primaire brute**, les **échanges de carbone dissous et particulaires en zones côtières** sont autant de possibles applications.

L'établissement de modèles numériques d'élévation à partir d'images Lidar permettent également d'estimer des stocks de carbone de la biomasse aérienne forestière ou encore d'évaluer des taux d'accrétion moyen en zones côtières par l'acquisition d'images précises à intervalles de temps réguliers.

La qualité des images de référence, le nombre et la précision des mesures terrain utilisées comme données d'entraînement sont autant de points de vigilance à respecter.

Références

Amann, B., Chaumillon, E., Schmidt, S., Olivier, L., Jupin, J., Perello, M. C., & Walsh, J. P. (2023). *Multi-annual and multi-decadal evolution of sediment accretion in a saltmarsh of the French Atlantic coast : Implications for carbon sequestration. Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 293, 108467. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108467>

Amann B., Chaumillon E., Bertin X., Pignon-Mussaud C., Marie-Claire P., Christine D., Long N., Schmidt S. (2024). *Understanding sediment and carbon accumulation in macrotidal minerogenic saltmarshes for climate resilience. Geomorphology*, 467, 109465. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109465>

Anderson, P. (2024). *Carbon in Ecosystems - management, restoration & creation for carbone capture. CIEEM. <https://cieem.net/resource/carbon-and-ecosystems-restoration-and-creation-to-capture-carbon/>*

Arias-Ortiz, A., Masqué, P., Garcia-Orellana, J., Serrano, O., Mazarrasa, I., Marbà, N., Lovelock, C. E., Lavery, P. S., and Duarte, C. M. (2018). *Reviews and syntheses: 210Pb-derived sediment and carbon accumulation rates in vegetated coastal ecosystems - setting the record straight. Biogeosciences*, 15, 6791-6818. <https://doi.org/10.5194/bg-15-6791-2018>

Bansal, S et al. (2023). Practical guide to measuring wetland carbon pools and fluxes. *Wetlands*, 43, 105. <https://doi.org/10.1007/s13157-023-01722-2>

Bartholomé, O., Grigulis, K., Colace, M.-P., Arnoldi, C., & Lavorel, S. (2018). Methodological uncertainties in estimating carbon storage in temperate forests and grasslands. *Ecological Indicators*, 95, 331-342. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.07.054>

Bechtold, M. et al. (2025). Metabolic interactions underpinning high methane fluxes across terrestrial freshwater wetlands. *Nat. Commun.*, 16, 944. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56133-0>

Becker, I., Egger, G., & Wittmann, F. (2024). *Aboveground wood biomass, carbon stocks and annual carbon sequestration of floodplain forests in the Danube Delta, Romania. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.14215480>*

Boivin, P., Lemaître, T., Clark, J., Guittonneau, M., & Deluz, C. (2025). The single-layer equivalent soil mass method for the evaluation of soil organic carbon stocks: Sources of errors, simplification, and associated detectable change. *Geoderma*, 456, 117279. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117279>

Cairns et al. (1997). Root biomass allocation in world's upland forest. *Oecologia*, 111, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s004420050201>

Campbell, A. D. et al. (2022). A review of carbon monitoring in wet carbon systems in remote using. *Environmental Research Letters*, 17, 025009. [10.1088/1748-9326/ac4d4d](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4d)

FAO. 2020. *A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb0509en>*

Günther, A., Barthelmes, A., Huth, V., Joosten, H., Jurasinski, G., Koebisch, F., & Couwenberg, J. (2020). Prompt rewetting of drained peatlands reduces climate warming despite methane emissions. *Nature Communications*, 11 (1), 1644. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15499-z>

Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Telszewski, M., Pidgeon, E. (2014). *Coastal blue carbon : methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses*. 180 pages. <https://cgspace.cgiar.org/items/101fcd8a-b099-4c03-884d-48ad8f2df0f9>

Huynh, T., Lee, D. J., Applegate, G. et Lewis, T. (2021). Field methods for above and belowground biomass estimation in plantation forests. *MethodsX*, 8, 101192. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.101192>

IPCC. (2014). 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/>

Kirwan, M. (2021). Marshes on the move. *Science*, 372 (6548), 1254-1258. [DOI: 10.1126/science.372.6548.1254](https://doi.org/10.1126/science.372.6548.1254)

Ma, S., Mistry, P., Badiou, P. et al. (2025). Factors Regulating the Potential for Freshwater Mineral Soil Wetlands to Function as Natural Climate Solutions. *Wetlands*, 45, 11. <https://doi.org/10.1007/s13157-024-01893-6>

Magnan, G., M. Garneau, L. Perrier, J. Beaulne, N.K. Sanderson, G. Primeau, D. Lachance (2024). *Guide d'inventaire pour l'estimation des stocks de carbone dans les milieux humides - version mai 2024*, Québec, ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, Direction des milieux humides, 20 pages + annexes.

Mayen, J. et al. (2023). Influence of typology and management practices on water pCO and atmospheric CO2 fluxes over two temperate shelf-estuary-marsh water continuums. *Regional Studies in Marine Science*, 67, 103209. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103209>

Mayen, J. et al. (2024). Atmospheric CO2 exchanges measured by eddy covariance over a temperate salt marsh and influence of environmental controlling factors. *Biogeosciences*, 21, 993-1016. <https://doi.org/10.5194/bg-21-993-2024>

Medeiros, S. C., Bobinsky, J. S. et Abdelwahab, K. (2022). *IEEE - Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 5766. [10.1109/JSTARS.2022.3189226](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3189226)

Nahlik, A., Fennessy, M. (2016). Carbon storage in US wetlands. *Nature Communications*, 7, 13835. <https://doi.org/10.1038/ncomms13835>

Pan et al. (2024). The below-ground biomass contributes more to wetland soil carbon pools than the above-ground biomass-a survey based on global wetlands. *Journal of Plant Ecology*, 17 (5), rtae017. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtae017>

Peck et al. (2026). Current methods overestimate coastal blue carbon potential. *Limnology and Oceanography Letters*, 11(1), e70077. <https://doi.org/10.1002/lol2.70077>

Pinault, L. (2025). *Contribution des tourbières françaises à l'objectif national de neutralité carbone d'ici à 2050. Sciences agricoles*. Université Marie et Louis Pasteur. <https://theses.hal.science/tel-05158488>

Polsenaere, P. (2025). Dynamique du carbone en zone côtière tempérée : processus biogéochimiques et échanges aux interfaces terre - zone côtière - atmosphère. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Ecole doctorale 618 EUCLIDE, La Rochelle Université. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00993/110419/>

Rodal, M., Luysaert, S., Balzarolo, M. et al (2025). A global database of net primary production of terrestrial ecosystems. *Sci Data*, 12, 1534. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-05773-4>

Villa, J. A. et Bernal, B. (2018). Carbon sequestration in wetlands, from science to practice: An overview of the biogeochemical process, measurement methods, and policy framework. *Ecological Engineering*, 114, 115-128. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.037>

Were, D., Kansime, F., Fetahi, T. et al (2019). Carbon Sequestration by Wetlands: A Critical Review of Enhancement Measures for Climate Change Mitigation. *Earth Syst Environ*, 3, 327-340. <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00094-0>

WWF-Canada. (2024). *Measuring Carbon in Peat Soils: A Supplemental Guide*. World Wildlife Fund Canada. Toronto, Canada.



2 Quai aux Vivres 17300 ROCHEFORT
Tél. 05 46 87 08 00 • Fax 05 46 87 69 90

www.forum-zones-humides.org • fma@forum-marais-atl.com

Rédaction : Lucas Degos - Forum des Marais Atlantiques
Contributions : Adrien Jacotot - SEMBIOSE, Pierre Polsenaere - Ifremer,
Benjamin Amann et Anaïs Perdrau - Université de La Rochelle

Ce document a été réalisé dans le cadre d'une étude générale et prospective « Carbone et zones humides » menée en 2025 par le Forum des Marais Atlantiques et financée par l'ADEME, WWF, la CDA de La Rochelle, le fonds de dotation Naïa Gaïa et la DREAL Nouvelle-Aquitaine.