



Pierre POLSENAERE

Laboratoire Environnement Ressources
des Pertuis Charentais - PDG-ODE-LERPC
IFREMER L' Houmeau

2.14 | Rôle des marais littoraux dans le budget de Carbone : processus et flux associés

Merci beaucoup. Bonjour à tous.

Pour commencer, effectivement je tiens aussi à remercier chaleureusement les organisateurs de ce congrès pour cette invitation, me permettant de vous présenter le rôle des marais littoraux dans les budgets de carbone en termes de processus et d'échanges.

Je vais commencer cette présentation avec le cycle du carbone à proprement dit et le rôle joué par les zones côtières en général.

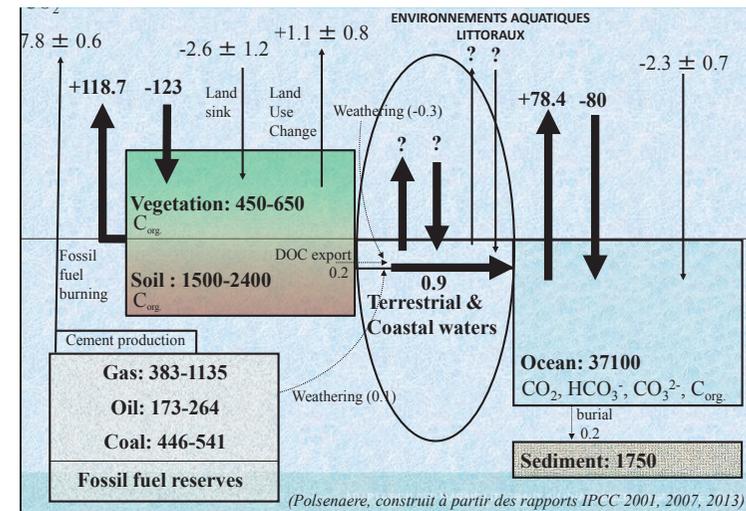
I. CONTEXTE / PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE

Le cycle du Carbone et le rôle des zones côtières

Vous avez de présenté ici le cycle du carbone construit à partir des différents rapports IPCC 2001, 2007 et 2013, vous représentant les différents stocks et échanges de carbone à l'holocène, de manière naturelle : les écosystèmes terrestres et océaniques échangés du CO₂ entre l'atmosphère et ses écosystèmes, à hauteur d'environ 120 et 80 gigatonnes de carbone par an, et finalement, via les processus de photosynthèse qui captent le CO₂ atmosphérique de l'atmosphère vers ces écosystèmes terrestres ou océaniques, en le transformant en carbone organique, et au contraire, via la respiration, en le transformant en sens inverse en CO₂. J'insiste, de manière naturelle,

Sur ces flux naturels sont venus se rajouter des émissions anthropiques de CO₂, notamment par la combustion de matières fossiles, mais aussi par le changement d'occupation des sols ; soit une hausse des concentrations en CO₂ d'environ 280 ppm (μmol - micromole) de CO₂ par mole d'air à environ 406 ou 410 ppm de CO₂ actuellement dans l'atmosphère. Vous pouvez retenir ce dernier chiffre.

Une partie est également recaptée par ces écosystèmes, par les processus de photosynthèse, environ 55 %. Et finalement, on peut s'intéresser au rôle joué par les environnements aquatiques, littoraux, d'une manière générale qui, comme vous pouvez le voir, transportent du carbone de manière horizontale entre les domaines terrestre et océanique, à hauteur d'environ 0,9 gigatonne de carbone par an. Mais en échange également de grandes quantités, lorsqu'on rapporte ces flux par la surface en mètres carrés ou kilomètres carrés occupés par ces écosystèmes côtiers avec l'atmosphère, mais aussi en termes de stockage de carbone dans les sédiments.

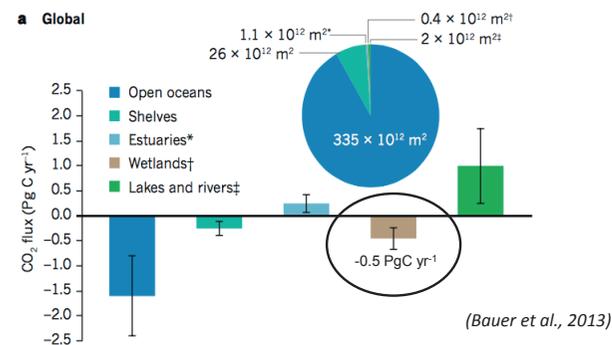


Diapo 02 > Le cycle du carbone et rôle des zones côtières (1)

Pour vous illustrer ce propos, vous avez représenté ici des flux de CO₂ verticaux entre l'atmosphère et différents écosystèmes côtiers, toujours en gigatonnes de carbone par an ou en pétagramme de carbone par an, c'est à dire 10¹⁵gr.

Vous pouvez voir des flux annuels moyens. Si nous prenons l'exemple des zones humides, les wet lands, vous pouvez voir que nous obtenons un flux annuel moyen négatif qui a été mesuré, ce qui vous symbolise le comportement « puit » engendré par l'activité de photosynthèse principalement assurée par ces écosystèmes.

Au contraire, si vous prenez des lacs, des rivières ou encore des estuaires, nous avons un flux positif où ces écosystèmes émettent du CO₂ majoritairement vers l'atmosphère : donc, un fort dynamisme, une très grande hétérogénéité, qui fait qu'en termes de processus et de flux, tout est extrêmement complexe.



➤ Systèmes dynamiques et hétérogènes → Processus et flux aux interfaces complexes (Borges, 2005; Borges et al., 2005; Le Quéré et al., 2016)

II. LES MARAIS TIDaux : DÉFINITIONS ET APPROCHES

Définition, géomorphologie et distribution globale

Je passe aux marais tidaux sur lesquels je vais me centrer au cours de cette présentation et je commencerai par les définir.

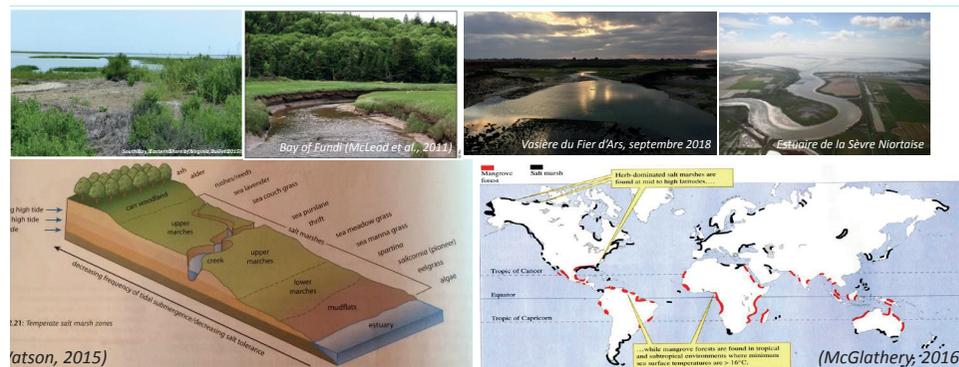
Il y a plusieurs définitions. Mais j'ai repris une définition de l'Administration Nationale Océanique et Atmosphérique aux États-Unis qui définit les marais tidaux ou les salt-marshes comme des zones humides côtières qui sont inondées par la marée ou par des eaux salées, apportées justement par ce processus de marée.

Je la trouvais intéressante dans le sens où elle montre vraiment le lien entre ces marais et également ces marées, au niveau des différentes parties de ces marais tidaux, que ce soit les parties hautes qui sont inondées au moment des marées de vives-eaux et également les zones plus basses, lorsque l'on s'approche du schorre et de la slikke inondées au moment des marées de morte-eau. Vous avez donc des photos pour illustrer ces parties

En termes d'occupation globale, ces écosystèmes occupent une surface relativement restreinte. On a un facteur d'ordre de 1, voire 2, par rapport à des écosystèmes de type forêt.

Vous pouvez retenir une valeur d'environ 55 000 km² avec des marais tidaux principalement localisés au niveau des zones tempérées ou hautes latitudes, symbolisées en noir. Et vous avez également les zones de mangroves qui, elles, occupent les zones subtropicales et tropicales.

Diapo 03 > Le cycle du carbone et rôle des zones côtières (2)



- « Salt marshes are coastal wetlands that are flooded and drained by salt water brought in by the tides » (NOAA)
- Surface globale occupée par les marais tidaux → 22,000 - 400,000 km² (Chumra et al., 2003; Duarte et al., 2005); 54,950 km² (McOwen et al., 2017)

Diapo 04 > Le cycle du carbone et rôle des zones côtières (2)

Production primaire | Définitions

Avant d'aller plus loin et de vous donner des exemples d'études à trouver dans la littérature ou de projets que nous pourrions également mener à l'échelle des pertuis charentais, je voulais aborder avec vous quelques définitions en lien avec la production primaire.

La production primaire - notamment la production nette d'un écosystème ou net ecosystem production - correspond à l'accumulation nette de carbone au sein d'un écosystème et peut être définie comme la différence entre la production primaire brute et la respiration de la communauté, c'est-à-dire à la fois des organismes autotrophes photosynthétiques, mais aussi hétérotrophes.

La production primaire brute est définie comme la somme de la production primaire nette plus la respiration des organismes cette fois-ci, uniquement autotrophes.

Vous avez peut-être entendu parler de ces termes définis ci-dessous:

- lorsque par convention la NEP est supérieure à 0, on parle d'un écosystème autotrophe qui va capter du carbone et en général se comporte comme un puits de CO₂

- au contraire, lorsque cette valeur est inférieure à 0, nous sommes en présence d'un système hétérotrophe plutôt source de CO₂

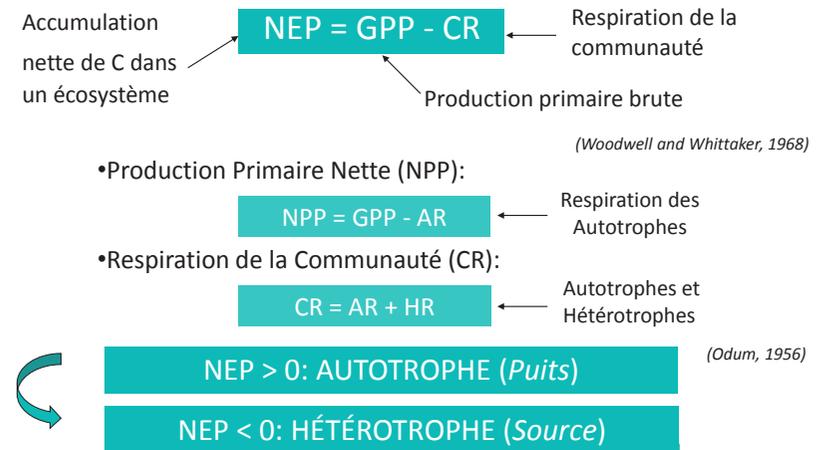
Conceptualisation des processus et flux aux interfaces d'échange

Enfin, en termes de définition, si on essaie de conceptualiser un peu les échanges, que l'on peut avoir au niveau d'un marais, on peut distinguer deux situations, deux périodes :

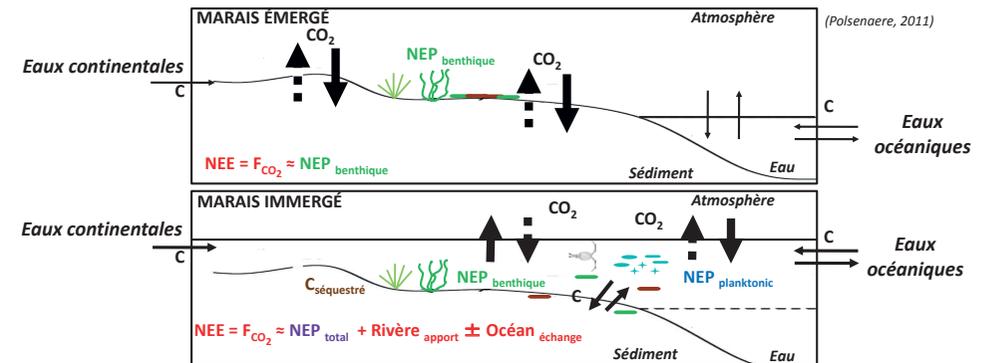
Pendant la basse mer (marais émergé), si on s'intéresse aux parties terrestres d'un marais, les flux de CO₂ que nous sommes capables de mesurer vont avoir lieu entre l'atmosphère et le sédiment. Et dans ce cas-là, la NEE - qui correspond à l'échange net de l'écosystème, au flux de CO₂ entre l'atmosphère et le sédiment - peut être estimée par la production nette du compartiment benthique, c'est-à-dire des plantes des marais, des spartines typiquement, mais aussi des herbiers ou des communautés microphytobenthiques sur les vasières.

Au contraire, lorsque le marais est immergé, les flux de CO₂ ont lieu cette fois-ci entre l'atmosphère et la colonne d'eau et dans ce cas-là, la NEE qui est toujours égale au flux de CO₂, pourra être estimée par la production nette de l'écosystème total. C'est-à-dire du compartiment benthique, mais aussi planctonique de la colonne d'eau.

De manière très importante pendant les périodes de marée montante ou de marée descendante, vous avez des flux très importants, des processus, des flux advectifs horizontaux, notamment des apports de carbone ou de matière par les zones amont,



Diapo 05 > Production primaire | définitions



NEE: Echange net de l'écosystème; NEP: Production nette de l'écosystème (= GPP - CR, Production primaire brute et Respiration de la communauté)

➤ Budget C → approches expérimentales et mesures *in situ* aux interfaces d'échange terre - mer - air adaptées

Diapo 06 > Conceptualisation des processus et flux aux interfaces d'échange

apportés par les rivières par exemple et au contraire, des échanges de carbone avec les masses d'eau océaniques.

Cela peut paraître complexe, mais je suis peu obligé de vous présenter l'ensemble de ces flux et en particulier un dernier, représenté par ce carbone séquestré dans le sédiment, pour nous permettre d'établir un budget ou un bilan de carbone de notre zone côtière.

C'est relativement complexe, mais via des approches expérimentales et des mesures in situ, nous sommes capables d'arriver à calculer, à estimer les processus et ces flux.

III. RÉSULTATS ET PERSPECTIVES

Budget global de Carbone : exemple avec les marais tidaux, estuaires et eaux continentales du Nord-Est américain

Je vais passer le reste de la présentation à vous montrer des exemples de ces différents flux pour que ce soit un peu plus parlant pour vous.

J'ai repris cet exemple de la littérature, cette étude menée par Najjar et al. en 2018 qui s'est intéressée à effectuer un bilan carbone de la côte nord-est américaine. Ils ont via des mesures - je passe sur le détail des différentes mesures ou méthodes ou modélisations - calculé les différents flux que je viens de vous expliquer entre notamment les marais tidaux, les zones estuariennes, le plateau continental jusqu'à l'océan que vous avez symbolisé sur cette photo.

Sans rentrer dans le détail des chiffres représentés en terragrammes de carbone par an soit 10^{12} grammes, ils ont mis en évidence l'importance significative des marais tidaux jouée au sein de ce budget global de carbone. Alors qu'effectivement les surfaces occupées, y compris au niveau de cette zone nord-est américaine, sont extrêmement faibles.

À la fois, ces marais tidaux sont capables de capter le CO_2 atmosphérique, de le transformer en carbone organique, mais également de séquestrer ce carbone dans les sédiments.

Une autre conclusion assez intéressante et qui peut paraître également nouvelle ou en tout cas qui est plus méconnue, c'est que 64 % du carbone organique produit via la NEP est exporté latéralement vers les zones, le plateau continental et in fine via l'océan côtier, et finalement, une plus faible partie est réellement séquestrée dans les sédiments à hauteur de 36 %.

Cela vous montre vraiment les échanges à la fois verticaux, et horizontaux extrêmement importants assurés par ces zones de marais tidaux

(Najjar et al., 2018)

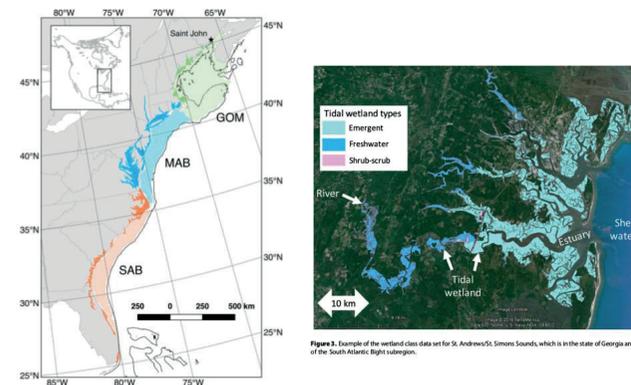
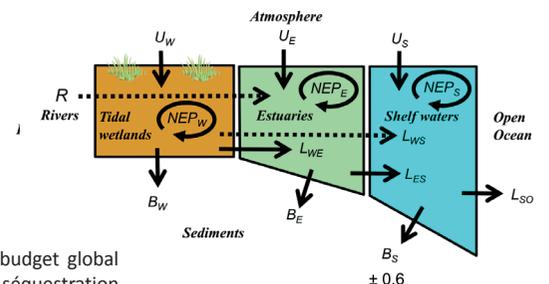


Figure 3. Example of the wetland class data set for St. Andrew's Bay, Georgia, which is in the state of Georgia and part of the South Atlantic Bight subregion.

Total carbon budget ($Tg C yr^{-1}$) of ENA coastal waters Carbon transfers and transformations in coastal ecosystems



- Importance des marais dans le budget global (2.4% surface totale) → PP et séquestration sédiments
- 64% du Corg. produit par la NEP est exporté latéralement et seulement 36% est séquestré

Diapo 07 > Budget global de Carbone : exemple avec les marais tidaux, estuaires et eaux continentales du Nord-Est américain

Séquestration du Carbone : «Blue Carbon»

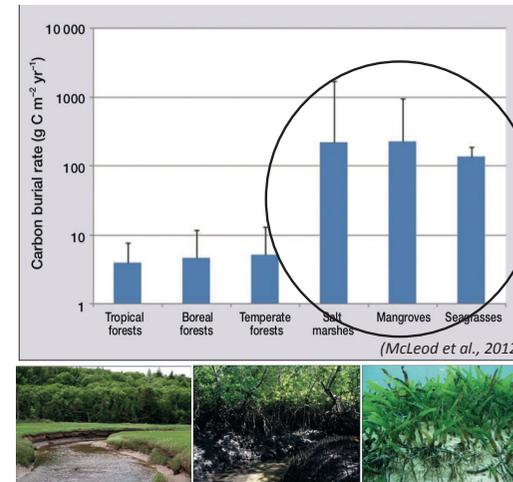
Alors, justement, ça me permet de définir avec vous ou de vous illustrer ce que l'on appelle le « carbone bleu ». On en a parlé sans forcément citer le terme tout au long de la journée. Vous pouvez retenir que le blue carbone, c'est le carbone et plus particulièrement le CO₂ atmosphérique qui est séquestré par les écosystèmes côtiers végétalisés. Je veux parler des marais tidaux effectivement, des zones de mangroves, mais aussi des herbiers - par exemple des herbiers de zostères que nous pouvons avoir dans la région ou les herbiers de posidonie en Méditerranée.

Vous avez représenté ici, la séquestration du carbone en gramme de carbone par mètre carré et par an. On a eu de très beaux exemples de mesures, notamment cet après-midi et ce matin. Vous pouvez voir vraiment que la contribution significative de ces écosystèmes côtiers végétalisés est extrêmement importante, à hauteur d'environ 100 voire 200 grammes de carbone par mètre carré et par an en moyenne. Donc une séquestration quasiment double de ce qui est assuré par les différents types d'écosystèmes forestiers, lorsque l'on rapporte ces flux par unité de surface.

Alors, pourquoi? Comme je vous l'ai dit et j'espère que vous l'aurez compris, ces écosystèmes captent le CO₂ via le processus de photosynthèse ou de NEP, mais également en lien avec la marée, ils vont être capables de piéger les matières en suspension, mais aussi le carbone associé. Et donc, ils ont réellement cette capacité de piège de carbone. Du coup, le carbone va être séquestré à la fois au niveau du sédiment, mais aussi au niveau des parties vivantes et mortes des végétaux.

Et effectivement les surfaces de ces écosystèmes sont actuellement menacées, 1 à 2 % de perte par an pour ce qui concerne les écosystèmes tidaux et donc, des conséquences sur ce statut de puits de carbone, en lien avec les pressions anthropiques et le changement climatique.

Je vais finir cette présentation avec simplement deux exemples d'études régionales que nous menons.



- « Blue Carbon »: C (CO₂) séquestré par les écosystèmes côtiers végétalisés
- Contribution significative à la séquestration du C à long-terme → global estimates (marais) : 100-200 g C m⁻² yr⁻¹ (Chumra et al., 2003)
- Raisons → PP mais aussi capture des MES (C) avec la marée
- Surfaces perdues (marais): 1-2% par an (Duarte et al., 2008) → csq sur le puits de C

Diapo 08 > Séquestration de Carbone : « Bleu Carbon »

Projet PAMPANINO 2018 - ANR PAMPAS 2018-2022

Tout d'abord, le projet Pampanino porté par le laboratoire LIENSs de l'Université de La Rochelle avec la collaboration d'un certain nombre de laboratoires, qui nous ont permis de nous intéresser à ces flux et processus de carbone, et en particulier ces processus au niveau du Fier d'Ars.

Je passe assez rapidement sur le site d'étude, au niveau d'un chenal, le chenal du Vieux Port, qui fait le lien entre la vasière intertidale du Fier et les zones de marais que vous avez un peu plus en amont au niveau du nord de l'île de Ré.

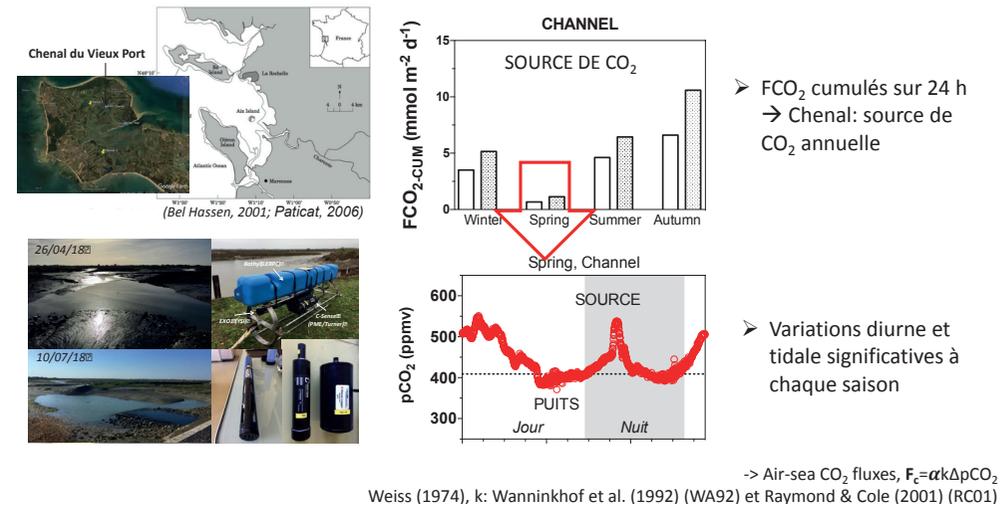
Via une approche de mesures à haute fréquence au niveau de ces eaux en subsurface, donc par différents capteurs nous permettant de mesurer la température de l'eau, l'oxygène, mais aussi les concentrations en CO₂ dans l'eau, nous avons été capables de calculer les flux cumulés que vous avez représentés ici, en millimole par mètre carré par jour, aux quatre saisons.

Et vous pouvez voir que sur l'année, sur nos mesures pendant des cycles de 24 heures aux quatre saisons, ce chenal se comporte comme une source de CO₂ vers l'atmosphère. Cela peut vous paraître paradoxal sachant que les marais effectivement captent du carbone. Mais comme je vous l'ai dit, ils échangent également du CO₂ avec le rythme de la marée de manière horizontale, et finalement, exportent et importent des quantités de carbone assez importantes qu'ils échangent avec ces écosystèmes adjacents.

Il ne faut pas oublier les échelles beaucoup plus courtes, diurnes entre le jour et la nuit, mais aussi tidales, puisque vous pouvez voir à titre d'exemple que pendant la période printanière, vous avez un cycle de 24 heures jour-nuit. Et bien les concentrations en CO₂, toujours en ppm, varient au cours de ce cycle de marée. Lorsque l'on calcule les flux de CO₂ entre l'eau et l'atmosphère, qui dépend notamment du gradient de concentration de CO₂ entre l'eau et l'air, vous pouvez voir qu'on n'obtiendra pas les mêmes flux calculés si on prend une pCO₂ (pression de CO₂) ici que lorsque le système est source ou lorsque l'on est en pleine nuit et que les pCO₂ sont soit sous-saturés en CO₂ soit sur-saturés par rapport à l'équilibre avec l'atmosphère, puisqu'actuellement, on est à 406 ppm.



Diapo 09 > Projet PAMPANINO 2018 - ANR PAMPAS 2018-2022



Diapo 10 > Projet PAMPANINO 2018 - ANR PAMPAS 2018-2022

Projet Aiguillon 2016-2020

Le dernier exemple, c'est un projet qui s'intéresse au continuum Marais poitevin, baie de l'Aiguillon, Pertuis Breton. Un projet qui est soutenu de très près par le Parc naturel régional du Marais Poitevin via le programme Life et qui est mené en collaboration très étroite également avec les gestionnaires de la Réserve Naturelle Nationale de la baie de l'Aiguillon, ONCFS et LPO, avec également l'établissement public du Marais Poitevin et dernièrement le Parc naturel marin, et où nous nous intéressons aux quantités de nutriments et de carbone qui peuvent être exportées du bassin versant vers la baie de l'Aiguillon.

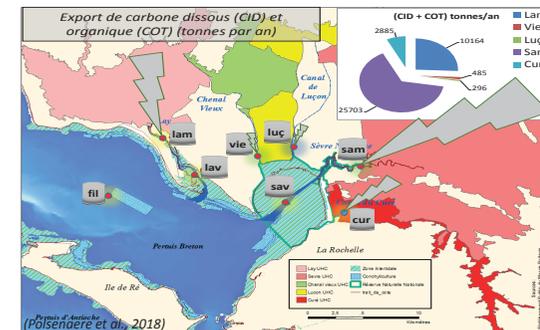
Et en 2017, nous avons été en mesure, via une stratégie d'échantillonnage de mesures des différentes formes de nutriments et de carbone au niveau des différents exutoires des différents sous-bassins versants du Marais poitevin, de calculer un export de carbone horizontal du bassin versant vers la baie de l'Aiguillon. Et très rapidement, nous avons obtenu un flux à hauteur d'environ 40000 tonnes de carbone exporté par an en 2017. Donc un export comparable à ce que l'on peut avoir au niveau du bassin versant de la lagune d'Arcachon.

Ce qu'il ne faut pas oublier, et je vous en ai parlé, c'est que sur le carbone exporté de manière horizontale, une partie significative est dégagée vers l'atmosphère, puisque, là aussi, ces cours d'eau sont sur-saturés en CO₂ et donc dégagent du CO₂ vers l'atmosphère.

Finalement, le carbone n'est rien d'autre que du carbone organique, donc le premier maillon des réseaux trophiques qui sert ensuite à alimenter les consommateurs primaires ou producteurs secondaires et donc, un export de carbone qui confère à la baie de l'Aiguillon un potentiel productif pour les populations sauvages et cultivées, notamment conchylicoles.



Diapo 11 > Projet Aiguillon 2016-2020



Flux calculés avec les débits HydroFrance (Sèvre-Tiffardière et Lay-Bretonnière) + modèles surface-débit (chenaux)

- Export total de carbone de 39533 t an⁻¹ (7.5 t km⁻² an⁻¹) (2017) (CID : 70% et COT : 22%)
- Dégazage significatif de C vers l'atmosphère (source) (excès de CO₂ ≈ 2 à 7% du CID total)
- Potentiel productif (populations sauvages et cultivées)

Diapo 12 > Projet Aiguillon 2016-2020

CONCLUSION / PERSPECTIVES

En conclusion, vous pouvez simplement retenir que les marais tidaux ou littoraux sont de réels puits de carbone et représentent une composante essentielle au niveau des budgets de carbone. Tous ces processus d'assimilation de carbone, d'échange de carbone avec les systèmes adjacents sont extrêmement complexes et hétérogènes, d'où la nécessité finalement de faire des mesures *in situ* pour caractériser ces différents flux.

Ce sont également des écosystèmes menacés et finalement, nous pourrions les étudier au mieux en passant par des approches réellement intégratives et pluridisciplinaires de leur fonctionnement. Mais là aussi, on a eu de très belles présentations, d'un point de vue plus large en terme par exemple d'identité patrimoniale, comme c'est réalisé dans le cadre de nombreux projets de l'Université de La Rochelle en lien avec les différents partenaires régionaux. Voilà, merci beaucoup.

- Puits de C significatif (séquestration) → composante essentielle du C biologique stocké sur terre
- Assimilation, relargage, séquestration, échanges de C → systèmes complexes hétérogènes, dynamiques (composantes terrestre et aquatique) → mesures *in situ* nécessaires
- Ecosystèmes menacés → conséquences sur le rôle de puits de C → préservation & restauration écologique
- Approche intégrative et pluridisciplinaire (du fonctionnement écologique) des marais (« identité patrimoniale »)

Diapo 13 > Conclusions et perspectives