

Année 2023-2024

Coline Carteron

RAPPORT DE STAGE

La séquestration du carbone dans les sols par les végétaux des marais côtiers

Le cas de la Communauté d'Agglomération de La Rochelle

Tutrice professionnelle : Marine Afonso

Tuteur universitaire : Jean-Michel Carozza

Remerciements

Je tiens d'abord à adresser mes remerciements à Marine Afonso qui m'a accueillie au sein du service et m'a fait confiance pour la réalisation du stage. Son aide et ses conseils ont été précieux et sa grande implication dans la bonne réalisation du mémoire m'ont fortement facilité la tâche. Je la remercie enfin pour l'organisation des sorties sur le terrain et les rencontres avec les professionnels rattachés de près ou de loin à mon sujet. Je pense notamment à Christine Dupuy, que je remercie pour son expertise et sa gentillesse, ainsi qu'à Nicolas Blanpain, dont l'immense savoir concernant toutes les petites plantes qui peuplent les marais a été fort utile.

Mes remerciements vont aussi à Jean-Michel Carozza, pour sa disponibilité et sa réactivité, mais également pour son aide précieuse dans la relecture et ses conseils avisés lors de la réalisation des cartes.

Je remercie également l'ensemble du service Nature et paysage pour avoir permis la réalisation de ce stage dans les meilleures conditions, notamment Hélène Rouquette et Éric Pesme ainsi que Ludovic Lucas du service Stratégie bas carbone. Les connaissances qu'ils ont su apporter tout au long du stage m'ont permis d'améliorer et de faire évoluer mes idées.

Je tiens enfin à remercier Lola Chauveau, service civique au sein de la RNN du Marais d'Yves, pour avoir répondu à mes questions presque quotidiennes sur le marais et les précieuses photos fournies. Ces remerciements vont aussi à tous mes proches, amis et famille, mais aussi camarades de promotion, qui ont été d'un grand soutien émotionnel lors de la rédaction du mémoire.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, participé au bon déroulé du stage et ont permis la réalisation de ce mémoire.

Sommaire

INTRODUCTION.....	5
PARTIE 1 : LA SEQUESTRATION DU CARBONE DANS LES SOLS PAR LES VEGETAUX DES MARAIS CÔTIERS – ETAT DES CONNAISSANCES INTERNATIONALES.....	7
I. Le cycle global du carbone à la base de toute forme de vie	7
I.1. Le cycle du carbone : à l'origine du monde (Selosse, 2021)	7
I.2. La séquestration du carbone dans le sol : transition entre biosphère et lithosphère, entre cycle court et cycle long.....	9
I.3. Un cycle dérégulé par les émissions de CO ₂ anthropiques.....	13
II. Une séquestration du carbone inégale à l'échelle des biomes.....	14
II.1. Les puits de carbone : carbone vert, bleu et marron.....	14
II.2. Les puits de carbone : des milieux importants mais fortement menacés.....	17
II.3. Les marais maritimes : une part importante de la capacité de séquestration de carbone des zones humides.....	19
PARTIE 2 : ELABORATION ET MISE EN ŒUVRE D'UNE METHODE DE CARTOGRAPHIE DES HABITATS DES MARAIS MARITIMES ET D'ATTRIBUTION D'UNE VALEUR DE SEQUESTRATION DE CARBONE A CES HABITATS.....	23
I. Matériel et méthode.....	23
I.1. Acquisition des données.....	23
I.2. Pré-traitement et traitement des données.....	31
I.3. Une fiabilité des données à questionner.....	32
II. Résultats.....	34
II.1. Description de la typologie établie.....	34
II.2 Des capacités de séquestration de carbone inégales selon les habitats.....	35
II.3 Une répartition des végétaux très disparate en fonction des marais.....	36
II.4 La capacité de séquestration par les marais : des résultats variés.....	40
III. Discussion.....	43
III.1 L'importance relative des marais maritimes dans l'objectif de neutralité carbone LRTZC et au-delà.....	43
III.2. Les limites de la méthodologie.....	44
III.3. Solutions et perspectives.....	46
CONCLUSION.....	46

Liste des acronymes

CB : Carbone Bleu
CDA : Communauté D'Agglomération
CDC : Communauté De Communes
CH₄ : méthane
CLC : CORINE Land Cover
COS : Carbone Organique du Sol
CO₂ : dioxyde de carbone
CV : Carbone Vert
ENS : Espace Naturel Sensible
FAO : Food and Agriculture Organization
GIEC: Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
LIENSs : Littoral ENvironnement et Sociétés
LPO : Ligue de Protection des Oiseaux
LRTZC : La Rochelle Territoire Zéro Carbone
MO : Matière Organique
OCSGE : OCcupation du Sol à Grande Echelle
RNN : Réserve Naturelle Nationale
RNR : Réserve Naturelle Régionale
RPG : Registre Parcellaire Graphique
SNBC : Stratégie Nationale Bas Carbone
ZNIEFF : Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique
ZPS : Zone de Protection Spéciale
ZSC : Zone Spéciale de Conservation

Liste des unités de mesure

tC.ha⁻¹.an⁻¹ : tonne de carbone par hectare par an
tC.an⁻¹ : tonne de carbone par an
tCO₂eq.an⁻¹ : tonne de dioxyde de carbone équivalent par an
MtC : mégatonne de carbone, soit un million de tonnes
GtC : gigatonne de carbone, soit un milliard de tonnes
ha : hectare
ppmv : partie par million en volume

INTRODUCTION

« Face au changement climatique, nous devons faire de la nature notre alliée ». Ces mots de Jean Jouzel, paléoclimatologue français, démontrent aujourd’hui la nécessité de rechercher des solutions fondées sur la nature. L’objectif : atténuer les changements climatiques liés aux émissions de gaz à effet de serre (GES) anthropiques. C’est dans ce contexte de changement climatique qu’en 2015, à l’issue de la COP21, est signé l’Accord de Paris. Il engage 196 Parties à maintenir l’augmentation de la température moyenne mondiale en dessous de 2°C au-dessus des niveaux préindustriels¹. Pour limiter le réchauffement planétaire à 1,5°C d’ici la fin du siècle, il serait nécessaire de diminuer de 43% les émissions de GES anthropiques. Pour répondre à ces objectifs, de nombreux programmes d’actions ont été mis en place à diverses échelles : l’Initiative 4 pour 1000 à l’échelle internationale, la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) en France ou encore les Plans Climats Régionaux.

C’est dans ce cadre que s’inscrit le projet La Rochelle Territoire Zéro Carbone (LRTZC). L’objectif de ce projet, porté entre autres par La Rochelle Université, la ville et l’agglomération de La Rochelle, est de devenir le premier territoire urbain du littoral français à afficher un bilan zéro carbone en 2040². Il se décline en dix axes clés dont : le carbone bleu, le bâti et la construction, l’écologie industrielle, la mobilité, les énergies renouvelables, le tourisme, etc. L’axe Carbone bleu se concentre sur la capacité des écosystèmes océaniques et littoraux de l’agglomération à capter et séquestrer durablement le dioxyde de carbone (CO₂). En effet, la combinaison de la réduction des émissions de CO₂ et de la séquestration des émissions restantes permettrait d’atteindre la neutralité carbone. Ainsi, le projet LRTZC a pour objectif de réduire de 75% les émissions de CO₂ d’origine anthropique d’ici 2040 et de compenser les 25% restants par les puits de carbone (fig. 1).

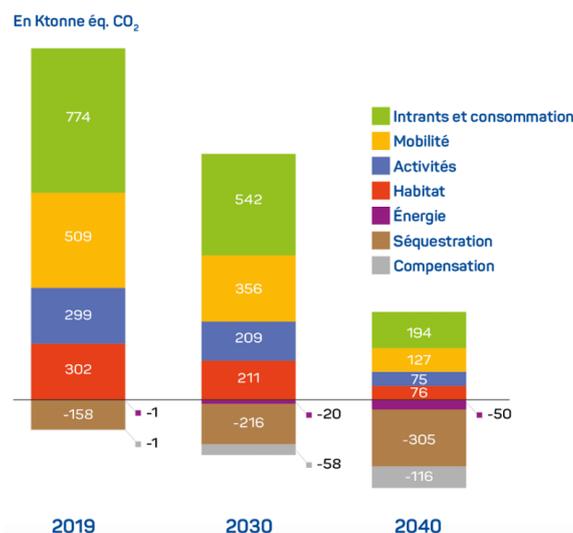


Figure 1 : Les ambitions de réduction des émissions de CO₂ du projet LRTZC (Agglomération La Rochelle, 2019).

Cependant si, dans le cadre de l’axe Carbone Bleu, ce dernier est largement étudié, notamment par des chercheurs et doctorants du laboratoire Littoral ENvironnement et Sociétés (LIENSs), ce n’est pas le cas du carbone vert. Le carbone vert correspond à la capacité de séquestration du CO₂ par les végétaux. En effet, les marais sont considérés comme des espaces de carbone bleu du fait de leur dimension aquatique (bassins, canaux), mais ils renferment aussi une grande richesse végétale beaucoup moins étudiée dans sa dimension de capacité à séquestrer le carbone. C’est donc l’intérêt de ce stage, dont l’objectif majeur est de réaliser une première approche de ce carbone vert sur le territoire de

¹ UNFCCC – L’Accord de Paris : <https://unfccc.int/fr/a-propos-des-ndcs/l-accord-de-paris> [consulté le 06 juin 2024]

² LRTZC – Objectif zéro carbone : <https://www.larochelle-zero-carbone.fr/notre-defi/objectif-zero-carbone> [consulté le 06 juin 2024]

l'agglomération rochelaise. Il a pour objectif de cartographier les surfaces végétalisées au sein des marais de la Communauté d'Agglomération (CDA) et de mettre en place une méthodologie afin de leur attribuer une valeur de séquestration de carbone vert, en plus du carbone bleu de leurs surfaces en eau. Cela permettra à terme de connaître la capacité totale de séquestration de carbone des marais de l'agglomération, qui font partie des puits de carbone comptabilisés dans l'objectif de neutralité carbone, au même titre que les herbiers marins ou les prés salés, par exemple. Ce stage s'est déroulé au sein du service « Nature et Paysage » de la Ville de La Rochelle, dirigé par Hélène Rouquette. La mission du service est de gérer et protéger les espaces naturels et la biodiversité de la ville. Le stage s'est réalisé sous le tutorat de Marine Afonso, cheffe de projet Carbone Bleu pour le projet LRTZC, projet dirigé par Joffrey Perrussel. La Rochelle est une commune littorale de Charente-Maritime, en région Nouvelle-Aquitaine. Elle compte environ 78 000 habitants sur une superficie de 28 km² (fig. 2). Les espaces naturels en eau (au moins une partie) de La Rochelle sont diversifiés. Ils comprennent l'océan, les marais doux, salés et saumâtres, les herbiers de zostère naine, les prés salés et les vasières intertidales. Les marais ont une place prédominante sur le territoire de la CDA avec près de 4550 hectares (ha) de surface, soit 15% du territoire. Les marais doux dominent avec leurs près de 4000 hectares, soit 88% de la surface des marais, à l'inverse des marais salés (232 ha, soit 5%) et des marais saumâtres (331 ha, soit 7%).

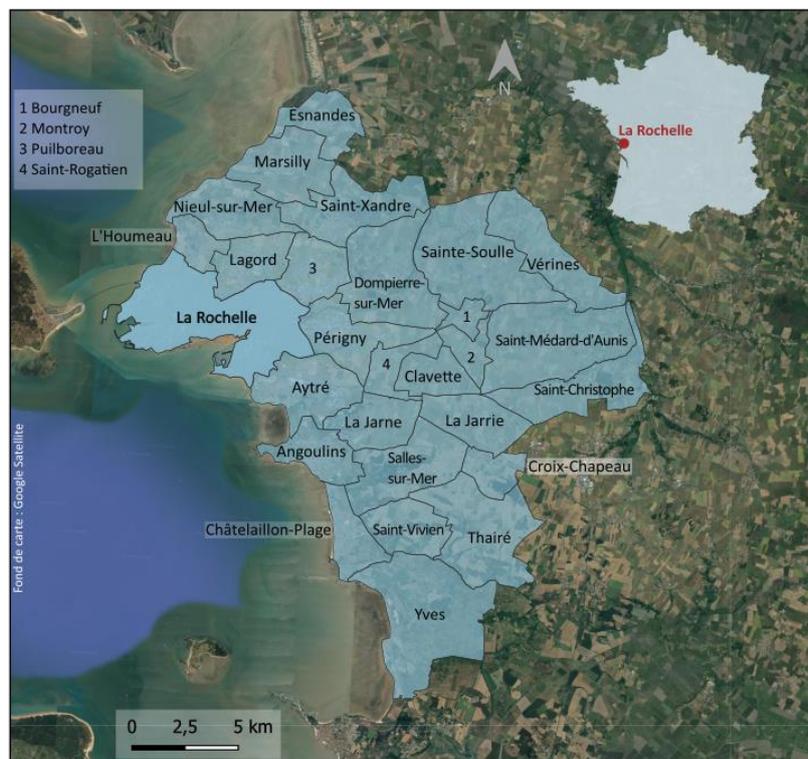


Figure 2 : Localisation de La Rochelle et des communes de la CDA (Carteron, 2024).

Le sujet de ce stage, la séquestration du carbone dans les sols et les végétaux des marais côtiers, suppose que les marais côtiers sont des puits de carbone par, entre autres, leur végétation. Une autre hypothèse conjecture que les marais doux agricoles seraient des sources de carbone plus que de séquestration. Afin de répondre à ces hypothèses, un état général des connaissances scientifiques internationales sera d'abord réalisé. Il présentera les notions essentielles à la compréhension de l'étude. Ainsi, cycle du carbone, séquestration et définition et dynamiques des marais seront successivement abordés. Dans un second temps, il s'agira de mettre en place une méthodologie permettant de répondre à la problématique du stage. Enfin, les résultats obtenus grâce à cette méthode seront présentés puis discutés dans un dernier temps.

PARTIE 1 : LA SEQUESTRATION DU CARBONE DANS LES SOLS PAR LES VEGETAUX DES MARAIS CÔTIERS – ETAT DES CONNAISSANCES INTERNATIONALES

I. Le cycle global du carbone à la base de toute forme de vie

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) estime qu'afin de limiter la hausse des températures globales en-dessous de 2°C (d'après l'Accord de Paris de 2015), il est nécessaire d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 (IPCC, 2021). La neutralité carbone est l'équilibre entre les émissions de carbone dans l'atmosphère et son absorption³. Aujourd'hui, les émissions de gaz à effet de serre (GES) s'élèvent à 59 milliards de tonnes d'équivalent CO₂ chaque année (Royal Society, 2021). Un GES est un gaz présent dans l'atmosphère qui a la capacité d'absorber le rayonnement infrarouge de la surface terrestre (Rice, 2005). A lui seul, le CO₂ contribue à 26% à l'effet de serre de l'atmosphère (Selosse, 2021). L'une des solutions émergentes pour atteindre l'objectif de neutralité carbone serait de concentrer les efforts sur les mécanismes qui permettent de capter et séquestrer du carbone à long terme et d'ainsi en ôter de l'atmosphère (McLeod *et al.*, 2011). Cela passe, entre autres, par la protection et la conservation des écosystèmes capables de séquestrer du carbone, autrement appelés puits de carbone (McLeod *et al.*, 2011). Il convient donc de se demander comment fonctionnent ces puits de carbone, et surtout quels sont-ils ? Il sera nécessaire avant cela d'expliquer le cycle global du carbone, son rôle dans la capacité d'atténuation des changements climatiques, mais aussi son dérèglement par les sociétés.

I.1. Le cycle du carbone : à l'origine du monde (Selosse, 2021)

I.1.1. Le carbone : élément primordial de la vie

Le carbone est un élément chimique, un atome, qui peut se présenter sous trois grandes formes. Le carbone organique, où au moins deux atomes de carbone sont reliés et qui s'associe à d'autres éléments tels que l'hydrogène, l'azote ou l'oxygène pour former les composés organiques, biomolécules qui composent les organismes vivants comme les glucides, etc. (Selosse, 2021 ; EFES, 2019). Le carbone inorganique, qui se présente sous forme de bicarbonates, de carbonates ou de dioxyde de carbone, est présent dans les roches calcaires sous forme solide, dans l'eau sous forme dissoute ou dans l'atmosphère sous forme gazeuse (Reichle, 2020). Le carbone inorganique ne possède qu'un seul atome de carbone (Selosse, 2021). Enfin, le carbone élémentaire est une forme de carbone pur qui peut se trouver sous différentes structures en fonction de l'arrangement des atomes (allotropie), tels que le charbon, le diamant ou la suie (Reichle, 2020). Le carbone est ainsi présent dans de nombreux composés naturels, tels que les gaz carboniques présents dans l'atmosphère que sont le dioxyde de carbone (CO₂) et le méthane (CH₄). Il s'agit d'un constituant fondamental de la matière organique vivante et morte (Selosse, 2021 ; Amiel & Brusset, 2009).

I.1.2. La notion de réservoirs de carbone

A l'instar de l'eau, le carbone suit un cycle, dont il faut distinguer le cycle court du cycle long (Bourque, 2010). Le terme de « cycle » renvoie au fait qu'il n'y a pas de création de nouvel atome de carbone, mais des transferts des atomes dans différents réservoirs (fig. 3) (Gac *et al.*, 2020 ; IPCC, 2007). La

³ Parlement Européen (2019) Qu'est-ce que la neutralité carbone et comment l'atteindre d'ici 2050 ?

URL : <https://www.europarl.europa.eu/topics/fr/article/20190926STO62270/qu-est-ce-que-la-neutralite-carbone-et-comment-l-atteindre-d-ici-2050> [consulté le 25 mai 2024]

quantité de carbone qui réside dans un réservoir à un instant T est appelée stock de carbone (Reichle, 2020). Il existe cinq grands réservoirs : l'atmosphère, dont le stock est estimé à 860 gigatonnes de carbone (GtC), qui se présente surtout sous forme de CO₂ ou de CH₄ ; l'océan (38 000 GtC) sous forme de dioxyde de carbone dissous dans l'eau, dans les sédiments des fonds marins ou de carbonate de calcium, de magnésium, etc. ; la biosphère sous forme de matière organique vivante ou morte tels que les plantes ou les animaux (540-610 GtC) ; les sols sous forme de matière organique (MO) morte telle que la litière (1500 GtC) ; la lithosphère (66-1000 millions GtC) sous forme de roches sédimentaires, hydrocarbures, etc. (Joyard & Sommeria, 2024 ; Launey *et al.*, 2021). Les flux de carbone des trois premiers réservoirs (océan, atmosphère, biosphère) se déroulent à des échelles de temps de l'ordre de la décennie ou du siècle. Le carbone y circule relativement rapidement et constitue ainsi le cycle court (Gac *et al.*, 2020). Par exemple, une molécule de CO₂ reste en moyenne 4 ans dans l'atmosphère avant de s'intégrer à un autre réservoir (Bourque, 2010). Le réservoir lithosphérique, quant à lui, stocke du carbone à une échelle de temps géologique, pendant des millions d'années. Il constitue le cycle long du carbone. Le réservoir du sol représente un réservoir de transition entre ce cycle court et ce cycle long, où le carbone peut résider de quelques minutes à plusieurs milliers d'années (Rice, 2005).

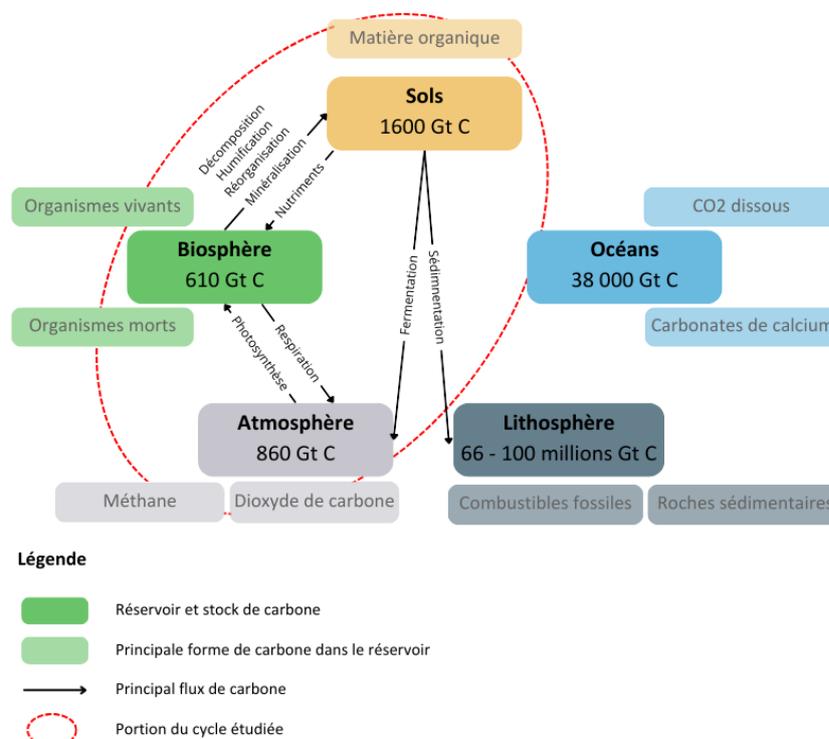


Figure 3 : Schématisation simplifiée des réservoirs, des stocks et des flux de carbone. Seuls les flux entre les réservoirs étudiés ont été inscrits (Carteron, 2024 modifié d'après McLeod *et al.*, 2011).

1.1.3. Le cycle court du carbone : le rôle essentiel de la photosynthèse

Au sein de ce cycle, les organismes vivants, et notamment la végétation, tiennent une place prépondérante. Les échanges de carbone avec l'atmosphère se font essentiellement par le biais du dioxyde de carbone et du méthane, selon deux sens (Gac *et al.*, 2020). La photosynthèse réalisée par les végétaux capte et fixe le carbone du CO₂ (Gac *et al.*, 2020). La photosynthèse est en effet le processus qui permet aux végétaux de synthétiser des molécules organiques (glucides, lipides, protéines, etc.) en utilisant l'énergie solaire, l'eau, les minéraux du sol, mais surtout le CO₂ de l'air (Morot-Gaudry & Joyard, 2020). C'est ce qui leur permet la fabrication des tissus végétaux, des feuilles en surface aux racines souterraines, en fixant ainsi 115 à 120 GtC à partir du CO₂ de l'atmosphère chaque année (Morot-Gaudry & Joyard, 2020).

Ce carbone peut ainsi être stocké dans la biomasse aérienne (feuilles, tiges), dans la biomasse souterraine (racines, rhizomes) ou dans la biomasse dite « morte » lorsqu'une partie du végétal meurt (litière, bois mort) (McLeod *et al.*, 2011). Ce carbone est donc retiré de l'atmosphère pendant un temps. Il est important de noter qu'une hausse de la concentration en CO₂ atmosphérique augmente la photosynthèse, ce qui favorise la pousse des plantes et donc le stockage de carbone dans la végétation, puis dans les sols (Morot-Gaudry & Joyard, 2020).

1.1.4. Le temps de résidence du carbone

Le carbone stocké dans la biomasse aérienne l'est pour quelques heures à quelques décennies tout au plus (notamment dans les arbres), mais celui stocké dans le sol (biomasse souterraine, litière, etc.) et les sédiments peut l'être pour des siècles voire des millions d'années en l'absence de perturbations majeures (anthropiques ou naturelles telles que des incendies) (McLeod *et al.*, 2011). Il s'agit de la notion de temps de résidence, c'est-à-dire le temps moyen passé par un atome de carbone dans un réservoir. Il est estimé à 4 ans dans l'atmosphère, 11 ans dans la biosphère, 385 ans dans l'hydrosphère superficielle, 100 milliers d'années dans l'océan profond et 200 millions d'années dans la lithosphère (Bourque, 2010). Ainsi, la séquestration du carbone dans le sol constitue la transition avec le cycle long du carbone au sein du cinquième réservoir, la lithosphère (Gac *et al.*, 2020). Il est considéré que le carbone est séquestré dans le sol lorsqu'il y est stocké pour au moins 100 ans, ce qui est possible dès les premiers centimètres du sol, dès l'horizon O, en l'absence de perturbations (Rice, 2005).

1.2. La séquestration du carbone dans le sol : transition entre biosphère et lithosphère, entre cycle court et cycle long

1.2.1. Une définition du sol

Le sol est l'interface entre l'atmosphère, la lithosphère, l'hydrosphère et la biosphère. Il s'agit de « la matière minérale ou organique meuble comprenant trois phases (solide, liquide, gazeux) trouvée à la surface de la terre, résultant de processus d'altération à travers les interactions avec la lithosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère servant d'habitat pour les micro et macro-organismes, les plantes et les animaux et supportant la vie humaine et les civilisations » (Cahyana & Mulyanto, 2024). Il peut se définir par six caractéristiques : les matériaux dont il est constitué (fraction organique/inorganique, granulométrie), sa texture et son état (phase liquide, gazeuse et solide), sa roche mère (roches, alluvions, etc.), son comportement (dynamiques, changements), ses propriétés et processus (stock de carbone, stock et filtration de l'eau, etc.) et ses fonctions (production de biomasse, puits de carbone, etc.) (Cahyana & Mulyanto, 2024).

Un sol est structuré en horizons. Un horizon est une couche du sol relativement homogène, mais avec des caractéristiques suffisamment différentes du reste du sol pour être distinguée. Les horizons présents dans la quasi-totalité des sols sont les suivants (Baize, 2018) :

- Horizon O (humus) : essentiellement composé de matière organique ;
- Horizon A (couche arable) : couche organo-minérale ;
- Horizon B (sous-sol) : niveau d'enrichissement en éléments mobiles (fer, matière organique, etc.) ;
- Horizon C : couche de matériau originel, constitué de roches altérées ;
- Horizon R (substrat rocheux) : masse rocheuse saine non altérée.

1.2.2. Les processus d'altération de la matière organique

Dans les premiers centimètres du sol, la matière organique (MO) a une place prépondérante. Sa teneur dans le sol varie de manière générale de 1 à 10%, mais peut aller jusqu'à 100% dans certaines tourbières canadiennes (Selosse, 2021). Par ailleurs, à l'échelle mondiale, il y a plus de MO dans les sols que dans la végétation : 60 à 90% de la biomasse totale des écosystèmes terrestres se situe dans le sol (Selosse, 2021). Elle est divisée en différentes catégories en fonction de sa granulométrie, densimétrie ou chimie : fraîche ou humifiée ; grossière ou fine ; labile (qui se décompose vite) ou stable (qui se décompose lentement) ; oxydable ou récalcitrante ; etc. (Baize, 2018). Lorsque cette MO, composée de carbone, se trouve dans le sol sous forme de litière à la surface ou de racines et rhizomes en subsurface (en moyenne, le tiers d'un végétal se trouve sous la surface (Selosse, 2021)), plusieurs processus vont entrer en jeu qui vont séquestrer le carbone sur des échelles de temps longues, ou le relarguer dans l'atmosphère (Basile-Doelsch, 2020). Le relargage de carbone dans l'atmosphère se réalise au travers de la respiration, sous forme de CO_2 en milieu aérobie ou de CH_4 en milieu anaérobie, principalement par les micro-organismes présents sur le sol (bactéries, microfaunes, champignons, etc.) (fig. 4 ; Rice, 2005). Dans les sols en équilibre, les flux de carbone générés par les processus de respiration et de photosynthèse se compensent, c'est-à-dire que les apports des plantes en carbone sont compensés par les exports de la respiration (Morot-Gaudry & Joyard, 2020).

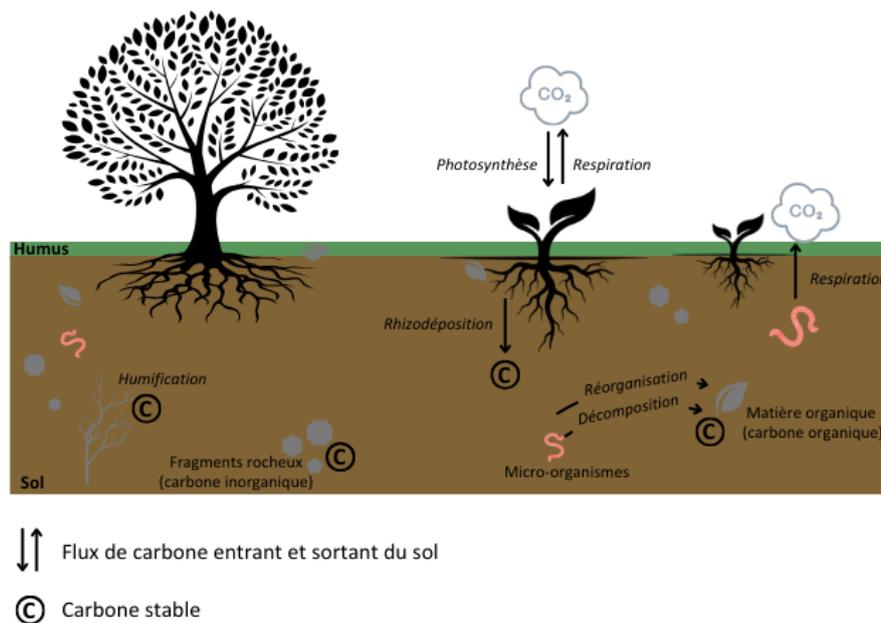


Figure 4 : Processus de stockage et de séquestration du carbone dans le sol par les végétaux et les micro-organismes du sol (Carteron, 2024).

La séquestration du carbone, quant à elle, est réalisée par des processus biologiques et des processus physicochimiques (Rice, 2005). Dans les processus biologiques, il est possible de retrouver la décomposition par les micro-organismes qui vont décomposer la MO en composés stables et en biomasse microbienne par la réorganisation des molécules contenant du carbone (Selosse, 2021). La rhizodéposition, d'autre part, est la capacité des plantes à libérer des composés organiques par leurs racines, augmentant la stabilité du carbone dans le sol. Il existe enfin l'humification, c'est-à-dire la formation d'humus stable, constitué des éléments difficilement décomposés par les micro-organismes du fait de leur structure moléculaire complexe qui, là encore, est une forme stable de matière organique telle que les charbons (Basile-Doelsch, 2020 ; Selosse, 2021). Il s'agit par exemple de la lignine, dont sont notamment composés les arbres et les arbustes (Selosse, 2021). Tous ces processus biologiques participent ainsi à la stabilisation du carbone dans le sol, c'est-à-dire qu'il ne sera pas

remobilisé avant une très longue période. En ce qui concerne les processus physicochimiques, il existe, entre autres, l'adsorption (liaison du carbone organique avec des minéraux) et la formation de complexes organo-minéraux plus résistants à la décomposition microbienne. L'ensemble de ces processus contribuent ainsi à la séquestration du carbone dans le sol par les végétaux, autrement appelé carbone vert (Rice, 2005 ; Basile-Doelsch, 2020).

Il est ainsi nécessaire de bien distinguer le stock de carbone (quantité de carbone dans un réservoir à un instant T) de la captation (flux de carbone de l'atmosphère vers les végétaux ou l'eau) et de la séquestration (stockage du carbone sur le temps long).

1.2.3. Le cas particulier des zones humides

Dans les zones humides, un second processus de stockage de carbone à long terme opère. Lorsqu'une partie ou la totalité d'un végétal meurt, il tombe au fond de l'eau (Morot-Gaudry & Joyard, 2020). La faible teneur en oxygène de l'eau freine la décomposition de la matière organique, ce qui limite le rejet de CO₂ (Gal *et al.*, 2020). Le processus de sédimentation va ensuite peu à peu enfouir cette matière organique, qui va se retrouver séquestrée dans le sol des millénaires durant (McLeod *et al.*, 2011). Ce carbone stocké dans les sols et les sédiments va par la suite, par différents processus complexes tels que la formation d'hydrocarbures par exemple, être enfoui jusque dans la lithosphère. Ce stock enfoui à des dizaines de mètres de profondeur sous la surface constitue ce qui est appelé le « carbone inerte », les stocks se constituant et se dégradant sur des millions d'années (Gac *et al.*, 2020).

1.2.4. Les facteurs d'influence sur la teneur en carbone du sol

Le carbone contribue jusqu'à 10% de la masse totale du sol, voire jusqu'à 50% dans le cas des tourbes. Les horizons de surface n'en contiennent que moins de 3% en moyenne. La majorité du carbone qui réside dans les sols se trouve sous forme organique (Rice, 2005). Toujours d'après Rice (2005), la teneur en carbone dans le sol est influencée par quatre principaux facteurs : le climat, la végétation, le matériau d'origine du sol et la topographie. Le climat, par la température et la disponibilité en eau, affecte la capacité des plantes à produire de la biomasse d'une part et la dégradation de la MO d'autre part. Le rôle de la composition et de la productivité des plantes est également crucial. La décomposition des plantes riches en lignine, telles que les arbres, est lente, tandis que les plantes herbacées, plus riches en cellulose, favorisent la formation de carbone organique dans le sol. La texture du sol et sa capacité à retenir le carbone sont influencées par le matériau d'origine du sol, tel que l'argile ou la craie. Effectivement, elles influencent son pH, paramètre contrôlant la vitesse de dégradation de la MO : un sol acide ralentit la dégradation de la MO, tandis qu'un sol basique la favorise. Enfin, une topographie avec une faible pente peut limiter l'érosion et le ruissellement, augmentant ainsi la capacité de stockage du carbone du sol (Rice, 2005).

Le carbone organique du sol (COS) est distribué selon un gradient vertical, avec, de manière générale, une forte concentration en carbone en surface, qui décroît vers les profondeurs. La concentration en COS est estimée à 400 grammes par kilogramme de sol (g.kg⁻¹) dans l'horizon O, 100 g.kg⁻¹ dans les premiers centimètres de l'horizon organo-minéral et moins de 5 g.kg⁻¹ à 1m de profondeur (Basile-Doelsch *et al.*, 2020). La profondeur à laquelle est enfoui le carbone est également corrélée à son âge (fig. 5). Plus il est en profondeur, plus il est âgé, pouvant atteindre des milliers d'années dans les horizons les plus profonds du sol (Basile-Doelsch *et al.*, 2020).

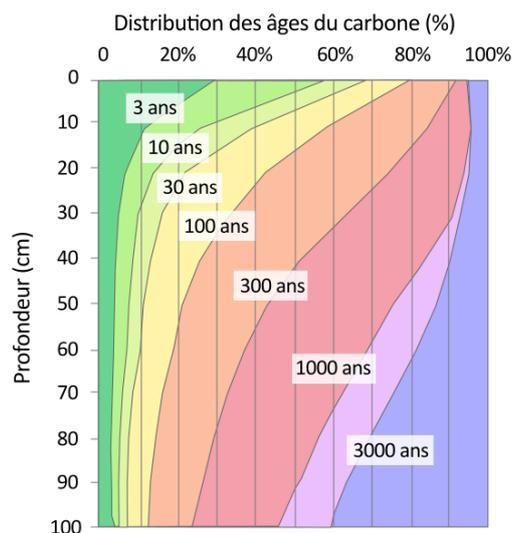


Figure 5 : Distribution de l'âge du carbone en fonction de la profondeur du sol (Basile-Doelsch *et al.*, 2020).

Par ailleurs, le temps de résidence du carbone dans le sol dépend d'une multitude de facteurs : sa position dans le sol (plus il est profond, plus longtemps il sera stocké) ; la température et l'humidité (le froid et l'eau inhibent la décomposition microbienne) ; l'exposition aux feux, etc. (Gac *et al.*, 2020). Ce temps de résidence dépend également de la gestion du milieu par les hommes : déforestation, retournement des prairies, labours, utilisation d'intrants, etc. concourent à la libération dans l'atmosphère de CO₂ enfoui dans le sol (Bourque, 2010).

Ces deux cycles du carbone, court et long, bien qu'évoluant à des échelles de temps différentes, restent ainsi en étroite interaction (Gac *et al.*, 2020). C'est cet équilibre entre les flux entrants et les flux sortants qui permet le bon fonctionnement de ces cycles. Sans cette séquestration du carbone par les sols, les végétaux et les océans, les niveaux de CO₂ dans l'atmosphère seraient aujourd'hui de 600 ppmv⁴, avec un effet de serre deux fois plus important que ce qu'il est aujourd'hui (Royal Society, 2021).

1.2.5. Les couleurs du carbone

La séquestration du carbone par les différents réservoirs a donné lieu à des catégories de séquestration par écosystème : carbone bleu, vert et marron. Néanmoins la définition précise de ces catégories peut varier en fonction des pays ou des structures. Il sera ici utilisé la typologie et les définitions de la Coopérative Carbone de La Rochelle, qui est celle utilisée dans le projet LRTZC. Le carbone bleu est celui qui est capté et séquestré par les zones en eau (océan, bassins et canaux des marais, etc.). Le carbone vert est celui capté et séquestré par les végétaux terrestres voire semi-aquatiques. Le carbone marron, enfin, est le carbone séquestré dans les sols agricoles⁵.

⁴ ppmv : parties par millions en volume. Il s'agit du nombre de molécules de CO₂ présentes pour un million de molécules de tous les constituants présents dans l'air. Une concentration atmosphérique de 400 ppmv de CO₂ signifie que dans un volume d'un million de m³ d'air, 400m³ sont occupés par le CO₂ (Le cycle du carbone, Sorbonne Université).

URL : <https://cycleducarbone.ipsl.jussieu.fr/index.php/visiteurs/2012-06-11-15-23-06.html> [consulté le 17 mai 2024]

⁵ Coopérative Carbone La Rochelle : carbone bleu, vert et marron (Zimmer, 2023)

URL : <https://larochelle.cooperativecarbone.fr/carbone-bleu-vert-et-marron/> [consulté le 17 mai 2024]

I.3. Un cycle dérégulé par les émissions de CO₂ anthropiques

I.3.1. Des émissions de GES en hausse permanente

Le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre primordial pour la survie des formes de vie qui se retrouvent aujourd'hui sur Terre. Sans les GES, les températures sur terre seraient de 33°C plus froides et la planète serait recouverte de glace (Reichle, 2020). Cependant, le rejet de GES en grande quantité depuis la révolution industrielle perturbe le cycle global du carbone (fig. 6) (Gac *et al.*, 2020).

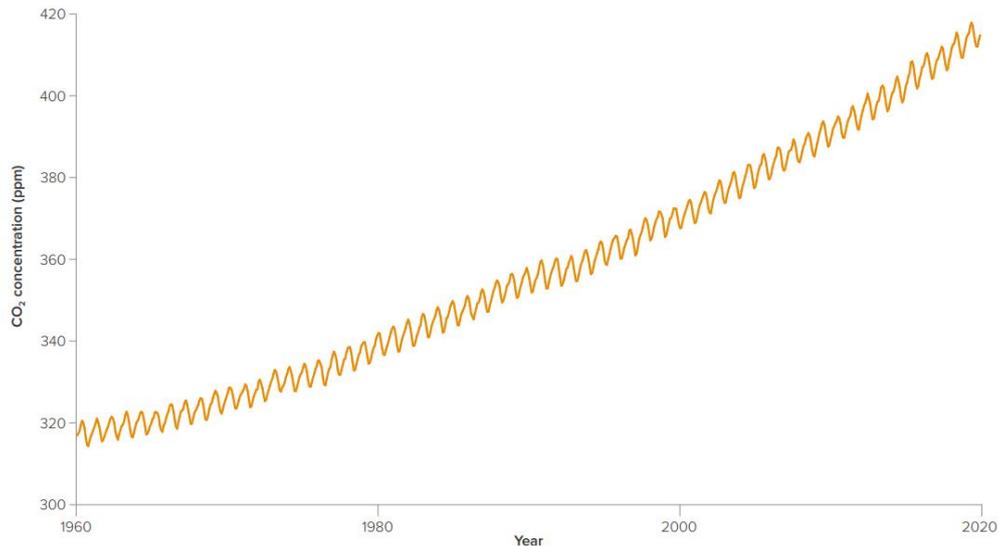


Figure 6 : Concentration en CO₂ dans l'atmosphère globale depuis 1960 (courbe de Keeling) depuis le Mauna Loa Observatory à Hawaï, avec une hausse de 2.5ppm par an (Royal Society, 2021).

La combustion des énergies fossiles court-circuite le cycle du carbone, puisque les hydrocarbures stockés pendant le cycle lent se retrouvent très rapidement injectés dans le cycle court, conduisant à une accumulation rapide de CO₂ dans l'atmosphère (Joyard & Sommeria, 2024). Au cours de la décennie 2000, la combustion des énergies fossiles a produit 7,8 GtC.an⁻¹. Les végétaux, au travers de la photosynthèse, ne sont alors plus capables de gérer cet afflux, ce qui conduit à une accumulation de GES dans l'air (Joyard & Sommeria, 2024). Au cours des 200 dernières années, l'atmosphère a atteint une concentration de CO₂ supérieure à 400 ppmv (Serrano *et al.*, 2019), alors qu'elle était stabilisée autour de 280 ppmv pendant les mille dernières années (Joyard & Sommeria, 2024).

I.3.2. Le rôle majeur du changement d'usage des sols

Ces rejets proviennent essentiellement de la combustion d'énergies fossiles telles que charbon, pétrole ou gaz (Gac *et al.*, 2020), mais aussi des changements d'usage des sols (déforestation, agriculture, aquaculture, dragage, etc.) (Pendleton *et al.*, 2012 ; Hopkinson *et al.*, 2012) qui ont lieu depuis des siècles, mais qui prennent de l'ampleur depuis plusieurs dizaines d'années (Pendleton *et al.*, 2012). Ces pratiques libèrent le carbone « profond » stocké depuis des siècles voire des millénaires dans les horizons du sol, sous forme de CO₂ et de CH₄ (Pendleton *et al.*, 2012). En effet, lorsque ces milieux sont dégradés, le carbone, stocké à l'origine dans le sol ou les sédiments en milieu anaérobie, est à nouveau en contact avec l'oxygène, ce qui l'expose à l'activité microbienne (Duarte *et al.*, 2013). Il en résulte une libération de GES dans l'atmosphère ou l'eau (Pendleton *et al.*, 2012), source d'environ 25% des émissions anthropiques de GES (Serrano *et al.*, 2019). Les changements d'usage des sols et toutes les

pratiques émettrices de GES contribuent à l'injection de 7,9 Gt.an⁻¹ de CO₂ dans l'atmosphère (Gac *et al.*, 2020). Bien que l'océan, la végétation et les sols captent environ 4,6 GtC.an⁻¹, le solde reste positif et ce sont donc 3,3 Gt de CO₂ qui enrichissent l'atmosphère chaque année (Gac *et al.*, 2020).

II. Une séquestration du carbone inégale à l'échelle des biomes

II.1. Les puits de carbone : carbone bleu et carbone vert

II.1.1. Des puits de carbone multiples

Sur Terre, certains biomes stockent plus de carbone qu'ils n'en libèrent et constituent des puits de carbone. C'est entre autres le cas des forêts, des océans ou des zones humides. L'océan en est l'un des plus performants du fait de la forte solubilité du CO₂ dans l'eau et de la proportion des océans sur Terre (Gac *et al.*, 2020). La capacité de stockage des couches supérieures de ces derniers peut ainsi être 63 fois supérieure à celle de l'atmosphère (Gac *et al.*, 2020). La conservation du bon état écologique de ces puits de carbone est donc essentielle pour la réduction du CO₂ dans l'atmosphère et constitue une voie d'atténuation des changements climatiques dans l'objectif de neutralité carbone (Gac *et al.*, 2020).

Certains écosystèmes sont cependant plus efficaces que d'autres à fixer le carbone sur le temps long. C'est notamment le cas des écosystèmes côtiers végétalisés, tels que les mangroves, les herbiers marins ou les marais côtier (aussi appelés marais maritimes) (fig. 7 ; McLeod *et al.*, 2011). Ils sont capables de stocker durablement plus de 150 mégatonnes de carbone par hectare par an (tC.ha⁻¹.an⁻¹) (McLeod *et al.*, 2011).

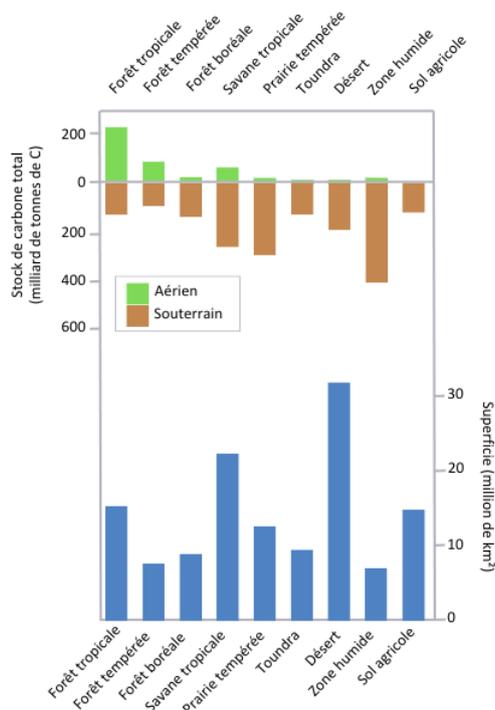


Figure 7 : Superficie occupée par les différents écosystèmes terrestres et stock de carbone total dans la biomasse aérienne et souterraine (Carteron, 2024, d'après Villa & Bernal, 2018). Les zones humides ont la surface la plus restreinte, mais le stock de carbone le plus important, témoin de leur haute productivité en termes de séquestration de carbone.

II.1.2. Les zones humides côtières : des puits de carbone particulièrement efficaces

Eléments de définition et localisation

L'interface entre les écosystèmes aquatiques et terrestres est formée par les zones humides, que la Convention de Ramsar définit comme suit : « des étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas 6 mètres » (art. 1.1 de la Convention de Ramsar, 1971). Ces écosystèmes recouvrent une surface totale de 12,1 millions de kilomètres carrés, soit une superficie supérieure à celle du Canada (Ramsar, 2021). Lorsque ces zones humides se trouvent à l'interface entre terre et mer, on parle alors de zones humides côtières, ou écosystème côtier végétalisé (Jurasinski *et al.*, 2018 ; Rapin *et al.*, 2021). Le Code de l'Environnement les définit comme suit : « Terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire ; la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année »⁶. Ces écosystèmes se retrouvent sur tous les continents de la planète, excepté en Antarctique (Pendleton *et al.*, 2012), principalement sur les littoraux où l'énergie des vagues et de la houle est faible (fig. 8 ; Serrano *et al.*, 2019). Les grands écosystèmes qui les constituent sont les mangroves (zones tropicales et subtropicales), les herbiers marins, les marais côtiers (essentiellement en zone tempérée) et les estuaires (Buczko *et al.*, 2022). Les marais côtiers comprennent, d'après la Convention de Ramsar et la nomenclature du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), les marais salés et les marais saumâtres⁷. Le carbone séquestré dans ces milieux est appelé « carbone bleu », et comprend également le carbone stocké par les océans et les mers (Buczko *et al.*, 2022). Hopkinson *et al.* (2012) distinguent néanmoins le carbone bleu « côtier », correspondant aux mangroves et marais côtiers, du carbone bleu « océanique », correspondant au puits de carbone qu'est l'océan.

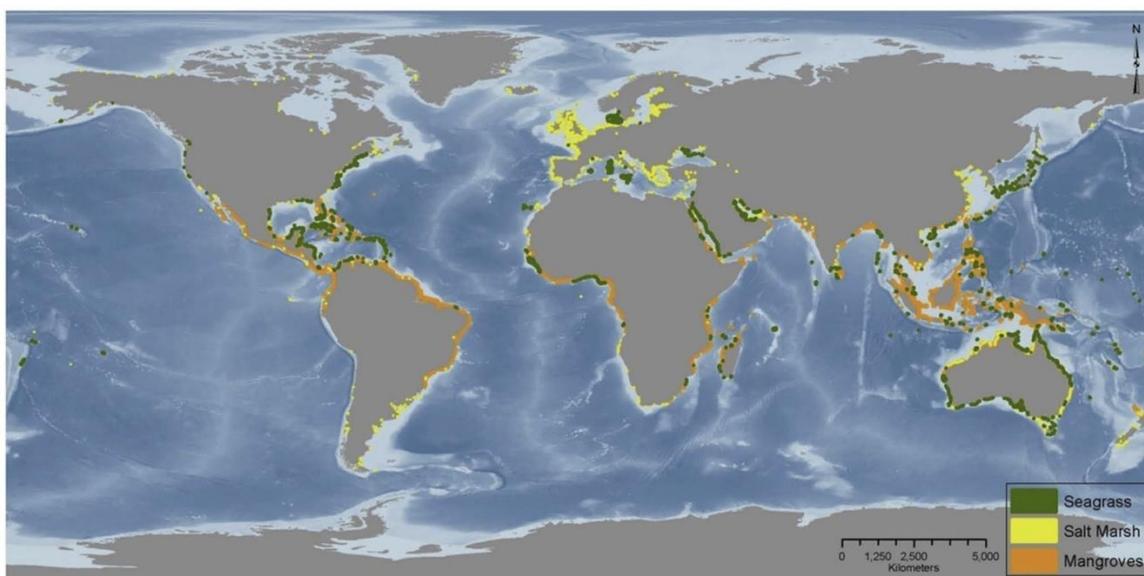


Figure 8 : Distribution mondiale des herbiers marins, des marais maritimes et des mangroves d'après les données de l'United Nation Environment Programme World Conservation Monitoring Center (Pendleton *et al.*, 2012).

⁶ Article L.210-1 du Code de l'Environnement, URL : <https://www.legifrance.gouv.fr/>

⁷ Centre de ressources milieux humides, Office Français de la Biodiversité, URL : <https://www.zones-humides.org/typologie-sdage> [consulté le 26 mai 2024]

Combinés, ces espaces couvrent environ 49 millions d'hectares (Pendleton *et al.*, 2012), soit 0,2% de la surface des océans (Duarte *et al.*, 2013). Ils contribuent néanmoins à hauteur de 50% à la séquestration du carbone dans les sédiments marins (fig. 9 ; Duarte *et al.*, 2013).

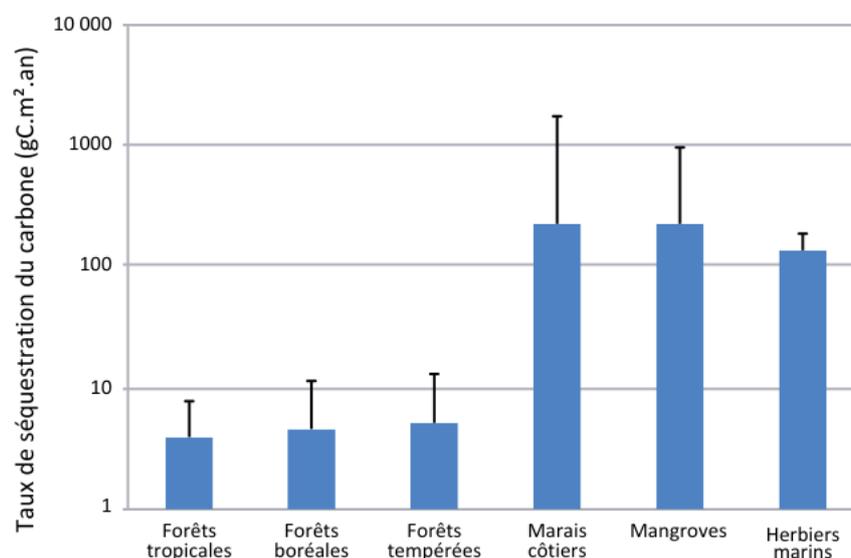


Figure 9 : Séquestration du carbone dans les sols sur le long terme par les grands biomes terrestres. Les barres d'erreur indiquent les valeurs maximales d'accumulation (Carteron, 2024, d'après McLeod *et al.*, 2011).

Une séquestration du carbone efficace

La superficie des mangroves est estimée à 152 000 km², celle des herbiers entre 177 000 et 600 000 km² et celle des marais salés entre 22 000 et 400 000 km² (Serrano *et al.*, 2019). En France, les milieux humides de la métropole recouvrent 1,8 million d'hectares, soit 3% du territoire⁸. La surface totale occupée par les zones humides est faible en comparaison de celle occupée par les autres écosystèmes (forêt, prairie, etc.) (Buczko *et al.*, 2022). Conséquemment, la quantité de carbone qu'ils stockent est proportionnellement faible (10-25 Gt, contre 1500 Gt dans les sols mondiaux) (Serrano *et al.*, 2019). Néanmoins, le carbone qui y est séquestré a une importance majeure, puisqu'en l'absence de perturbations anthropiques, il y est stocké pendant des milliers d'années sans retourner dans l'atmosphère (Buczko *et al.*, 2022). De plus, dans ces écosystèmes, les taux de séquestration sont élevés par rapport aux autres écosystèmes : en moyenne 2 tC.ha⁻¹.an⁻¹ contre 0,2 tC.ha⁻¹.an⁻¹ pour les zones humides terrestres et 0,05 tC.ha⁻¹.an⁻¹ pour les forêts (Ouyang & Lee, 2014). Ils dépassent de 30 à 50 fois les taux d'enfouissement du carbone dans les sols des forêts (Duarte *et al.*, 2013 ; Bu *et al.*, 2015) et de 20 fois celui en haute mer (Hopkinson *et al.*, 2012). Il est estimé que les mangroves séquestrent 31 millions de tonnes par an (MtC.an⁻¹); les marais salants entre 5 et 87 MtC.an⁻¹ et les herbiers marins de 48 à 112 MtC.an⁻¹ (McLeod *et al.*, 2011). Combinés à la captation du carbone par les estuaires, ces puits de carbone captent et séquestrent l'équivalent de la moitié des émissions du secteur du transport (entre 235 et 450 MtC.an⁻¹), estimé à environ 1000 MtC.an⁻¹ (Nellemann *et al.*, 2009). Au cours du dernier millénaire, les mangroves, herbiers marins et marais côtiers ont séquestré dans le premier mètre de leurs sols entre 10 et 25 GtC, soit l'équivalent de 2,4% à 6,3% des émissions globales liées aux

⁸ Centre de ressources des milieux humides, OFB

URL : <https://www.zones-humides.org/entre-terre-et-eau/diversite-des-milieux-humides> [consulté le 18 mai 2024]

énergies fossiles entre 1751 et 2014 (Serrano *et al.*, 2019). La haute productivité de ces écosystèmes explique ces niveaux de séquestration élevés (McLeod *et al.*, 2011 ; Ouyang & Lee, 2014).

Le carbone est capté par les organismes vivants qui peuplent ces écosystèmes (plantes, phytoplancton, zooplancton, etc.) puis séquestré sous forme de sédiment ou de MO qui vont s'accumuler en couches successives (McLeod *et al.*, 2011). La majorité du stock de carbone est présent dans le sol, à hauteur de 90% du total du stock des marais salés et des herbiers (Serrano *et al.*, 2019). A la différence des sols terrestres qui peuvent être saturés en carbone, ce n'est pas le cas des milieux côtiers végétalisés. En effet, le processus de sédimentation de ces milieux fait que l'accrétion sédimentaire se produit verticalement, il y a donc une capacité de stockage permanente (McLeod *et al.*, 2011). Cela ne se produit néanmoins que dans les milieux en bonne santé écologique (McLeod *et al.*, 2011), c'est-à-dire un écosystème dont le bon fonctionnement (biologique, physique, chimique et sanitaire) permet un usage durable (Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin, 2020). Cette accrétion verticale est estimée à environ 0,4 à 21mm.an⁻¹ en moyenne (Serrano *et al.*, 2019). Certains sols organiques peuvent ainsi dépasser une profondeur de 10m (Donato *et al.*, 2011). Ainsi, dès lors que la sédimentation se poursuit, le milieu restera un puits de carbone non saturé (Chmura *et al.*, 2003).

II.1.3. Des facteurs d'explication multiples

La préservation du carbone dans le sol des zones humides s'explique par plusieurs facteurs : des taux de décomposition de la matière organique lents, de faibles concentrations en azote et en phosphore dans les tissus végétaux, un faible niveau d'oxygène dans les sédiments, une proportion importante de la biomasse totale de la plante en racines et rhizomes souterrains (Duarte *et al.*, 2013). Cette forte séquestration dans le sol des écosystèmes côtiers végétalisés s'explique également par la composition structurale complexe de ces milieux (McLeod *et al.*, 2011). La végétation dense et leur réseau de racines et de rhizomes leur permettent non seulement de capter et stocker durablement le carbone autochtone (carbone *in situ*), mais aussi le carbone allochtone (carbone *ex situ*). Ce carbone provient de l'océan ou des cours d'eau (McLeod *et al.*, 2011 ; Serrano *et al.*, 2019). Il est par exemple estimé qu'environ 50% du carbone stocké par les herbiers marins provient de source externe aux limites de l'écosystème (Kennedy *et al.*, 2010). Chaque année à l'échelle mondiale, les habitats végétalisés des zones côtières enfouissent une quantité de carbone comparable à celle stockée dans les forêts (Duarte *et al.*, 2013).

II.2. Les puits de carbone : des milieux importants mais fortement menacés

II.2.1. Des milieux dégradés

Les activités humaines menacent et détruisent les milieux humides côtiers par l'urbanisation, l'aquaculture, l'agriculture, le drainage, la poldérisation, etc. (tab. 1 & fig. 10 ; Buczko *et al.*, 2022).

Ecosystème	Superficie (millier de km ²)	Taux de perte mondiale par an	Taux de perte depuis 1950	Séquestration de carbone (MtC.an ⁻¹)
Marais côtiers	22 - 400	1-2%	-	4,8-87,3
Mangroves	137 - 152	1-3%	30-50%	22,5-24,9
Herbiers marins	177 - 600	0,9%	30%	48-112

Tableau 1 : Superficie, perte et taux de séquestration de carbone des écosystèmes côtiers végétalisés (Carteron, 2024, d'après Duarte *et al.*, 2013).

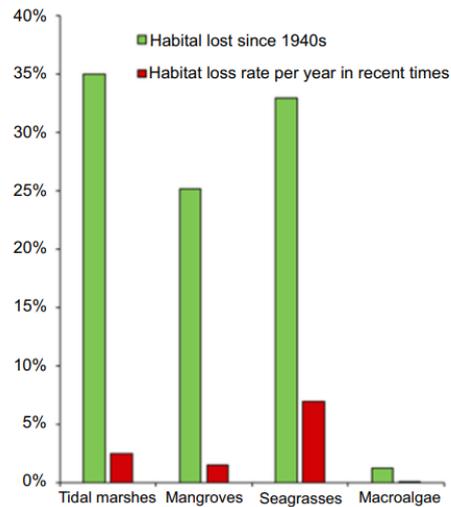


Figure 10 : Perte de la partie aérienne des zones humides côtières depuis 1940 et taux de perte par an (Serrano *et al.*, 2019).

La disparition de ces milieux se produit à un rythme 10 fois plus rapide que celui des forêts tropicales (Duarte *et al.*, 2013). De plus, la hausse du niveau de la mer les érode et les ennoie (McLeod *et al.*, 2011). C'est l'une des menaces uniques à ces milieux, à savoir le « coastal squeeze », qui est le phénomène aggravant la hausse du niveau de la mer, car réduisant la superficie de ces milieux, qui ne peuvent souvent plus se développer en arrière du fait de l'urbanisation littorale accrue (Serrano *et al.*, 2019). La disparition de ces milieux entraîne quotidiennement le rejet de CO₂ et de CH₄ dans l'atmosphère (Buczko *et al.*, 2022). A elles seules, les zones humides (côtières et continentales) sont responsables de 55% des émissions de CH₄ chaque année dans l'atmosphère, le méthane étant un GES quatre fois plus puissant que le CO₂ (Pastore *et al.*, 2016). La combinaison de la perte de ces habitats qui rejettent des GES et la baisse de leur capacité à stocker du carbone entraîne une perte de capacité de ce puits de carbone d'environ 7 à 20 Mt de CO₂ par an (Duarte *et al.*, 2013). Ainsi, malgré les services écosystémiques que ces milieux apportent, ils font partie des milieux les plus menacés sur Terre (Serrano *et al.*, 2019).

1.1. Des milieux encore très méconnus

Malgré leur importance majeure pour l'atténuation des changements climatiques, les zones côtières végétalisées sont des milieux encore aujourd'hui assez peu connus et sont sources d'incertitudes (Duarte *et al.*, 2013; Serrano *et al.*, 2019). Les stocks de carbone sont mal connus, du fait de la forte variabilité spatiale de ces stocks d'un écosystème à un autre. En effet, une multitude de facteurs entrent en jeu : température, humidité, salinité, espèces, etc. (Hopkinson *et al.*, 2012). Leur superficie totale est aussi très incertaine (McLeod *et al.*, 2011). Les études les plus récentes estiment par exemple à 54 950 km² la superficie des marais salés (Mcowen *et al.*, 2017; Hopkinson *et al.*, 2019), mais les nombreux marais de la côte baltique ne semblent par exemple pas être pris en compte (Buczko *et al.*, 2022). Serrano *et al.* (2019) considèrent même que cette superficie oscille entre 22 000 et 400 000 km², tout comme celle des herbiers marins est comprise entre 177 000 et 600 000 km² (Serrano *et al.*, 2019). Cette dernière incertitude s'explique par la difficulté à cartographier ces milieux qui sont partiellement ou en permanence submergés (Serrano *et al.*, 2019). Nellemann *et al.* (2009) évoquent aussi la possibilité d'un « charisma gap », ces écosystèmes étant moins visibles et moins attrayants à étudier que les océans ou les forêts.

II.3. Les marais maritimes : une part importante de la séquestration du carbone des zones humides

II.3.1. Une définition floue et des dynamiques complexes

Les marais côtiers sont des écosystèmes côtiers salins ou saumâtres limités aux zones intertidales supérieures, souvent inondés par les courants de marée (Serrano *et al.*, 2019). Ils se répartissent sur une large portion des côtes mondiales à faible énergie de houle (fig. 11 ; Nellemann *et al.*, 2009 ; Pratolongo *et al.*, 2019).



Figure 11 : Répartition mondiale des marais côtiers (Nellemann *et al.*, 2009).

Les marais côtiers peuvent être catégorisés selon un gradient de salinité. La salinité se mesure par la quantité de sel dissous dans un volume d'eau donné. Elle s'exprime en unité pratique de salinité (psu), qui mesure la conductivité électrique d'un échantillon d'eau salée (Scott *et al.*, 2014). C'est ainsi qu'il est possible de distinguer un marais salé d'un marais saumâtre. Une eau saumâtre est comprise entre 5 et 25 psu, et une eau salée à plus de 30 psu (Scott *et al.*, 2014). Il ne sera traité dans cette partie que des marais saumâtres, qui sont l'objet de l'étude. Les marais salés présentant des dynamiques complexes et légèrement différentes des marais saumâtres, ils ne seront pas discutés plus en détail.

La saumure des marais saumâtres provient d'un mélange entre une arrivée d'eau de mer et un apport d'eau douce via un cours d'eau et/ou le ruissellement d'eau de pluie (Baustian *et al.*, 2017). Ces entrées d'eau sont très souvent contrôlées de manière anthropique via des pelles ou des écluses, afin d'avoir une gestion mesurée des niveaux d'eau. Cela évite que le marais ne s'assèche trop ou au contraire qu'il se retrouve submergé par une trop grande quantité d'eau lors d'épisodes pluvieux intenses ou de marées de vive-eau. Ils sont donc aménagés avec des canaux et des bassins, plus ou moins salés en fonction du gradient de salinité, qui décroît de la mer vers la terre (Serrano *et al.*, 2019). Les marais sont très souvent submergés en hiver du fait des fortes précipitations (fig. 12) et des possibles tempêtes qui favorisent les infiltrations d'eau salée, et partiellement asséchés en été lorsque les précipitations diminuent. Les marais saumâtres qui ont toujours leur dynamique naturelle présentent les mêmes caractéristiques, à la seule différence que les niveaux d'eau n'étant pas contrôlés, ils peuvent être entièrement submergés ou entièrement asséchés en fonction des conditions climatiques.



Figure 12 : Un marais inondé par les eaux pluviales, ici dans le marais d'Yves en Charente-Maritime (Chauveau, 2024).

II.3.2. Un gradient de salinité qui organise la végétation

En ce qui concerne la végétation, elle se répartit elle aussi en fonction du gradient de salinité et de la fréquence des inondations (Pratolongo *et al.*, 2019). Les marais saumâtres comportent essentiellement des plantes herbacées dites halophiles, adaptées aux submersions d'eau salée, telles que les joncs, graminées et herbes (Serrano *et al.*, 2019). En considérant le marais comme une rampe dont la pente augmente en s'enfonçant dans les terres, les zones submergées diminuent avec la pente (Pratolongo *et al.*, 2019). Ainsi, la zone basse du marais proche de la mer et potentiellement inondée à chaque marée haute accueille des plantes très résistantes au sel telles que des salicornes, des obiones ou des spartines. La zone haute, en revanche, très rarement voire jamais submergée par la marée, reçoit de l'eau douce provenant du bassin versant et des eaux de pluie. Elle voit s'installer des espèces moins tolérantes au sel et aux submersions (mésophiles) telles que les phragmites. Il y est ainsi retrouvé un zonage de la végétation parallèle au trait de côte (Pratolongo *et al.*, 2019). Elle est moins limitée que celle des marais salés, du fait de la baisse de salinité. La richesse spécifique est également plus importante (Więski *et al.*, 2010). Le stock de carbone dans la biomasse aérienne est donc logiquement plus important dans les marais saumâtres que salés, tout comme celui dans le sol (fig. 13) (Więski *et al.*, 2010).

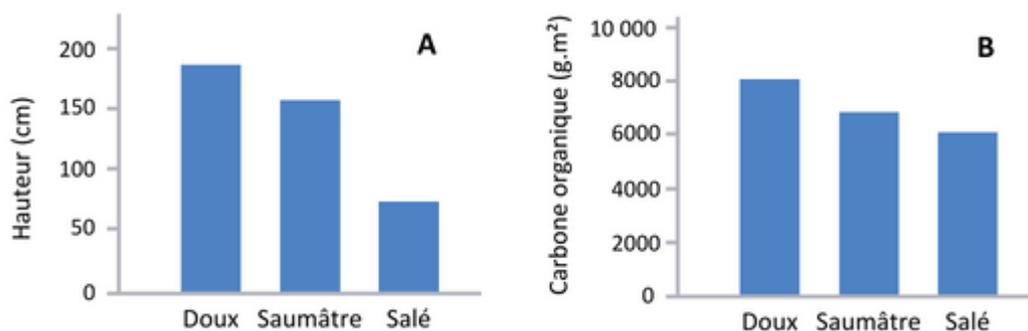


Figure 13 : Hauteur de la végétation (A) et stock de carbone dans le sol (B) d'un marais de Géorgie, Etats-Unis (Carteron, 2024, d'après Więski *et al.*, 2010).

II.3.3. Une capacité de séquestration dépendante d'une multitude de facteurs

La capacité de séquestration des marais salés dépend de nombreux facteurs, tant physiques (salinité, apport en nutriments, précipitations) que géomorphologiques (hydrologie) ou biologiques (production primaire, taux de reminéralisation) (Serrano *et al.*, 2019). Cette capacité dépend également du type d'espèce présente sur le marais, des joncs n'ayant pas la même capacité de séquestration de carbone que des roseaux par exemple, du fait des différences de capacité à capter le CO₂ ou à retenir les sédiments où est présent le carbone (Scott *et al.*, 2014). Les conditions tidales, hydrodynamiques ou encore fluviales peuvent là aussi affecter l'apport de carbone allochtone (Serrano *et al.*, 2019). Malgré ces fortes variabilités, les marais salés semblent être les zones humides côtières qui séquestrent le plus de carbone, avec une fourchette allant de 0,29 à 2,1 tC.ha⁻¹.an⁻¹ (Chmura *et al.*, 2003). A la différence des marais doux, les marais salés, du fait de l'apport de sulfates par les eaux marines aux sols, produisent peu d'émission de méthane (Scott *et al.*, 2014). En effet, les sulfates inhibent la méthanogenèse (Serrano *et al.*, 2019). Cependant, lorsque les marais sont déconnectés de la mer et perdent peu à peu en salinité et en apport de sulfates, ils peuvent devenir des sources majeures d'émission de méthane (Serrano *et al.*, 2019).

Concernant les marais saumâtres, il est considéré qu'ils séquestrent la même quantité de carbone que les marais salés, c'est-à-dire une moyenne de 210 tC.ha⁻¹.an⁻¹ (Pastore *et al.*, 2016). Ces milieux précis, où eau salée et eau douce se mélangent, sont peu étudiés par la littérature scientifique et il est ainsi difficile de connaître leur superficie globale (Pratolongo *et al.*, 2019).

II.3.4. Des milieux fortement impactés par les sociétés

Les marais sont parmi les milieux les plus impactés par les activités humaines. L'agriculture, notamment, est l'une des causes principales de leur disparition, par le processus de dessiccation provoqué par le drainage des terres (Pendleton *et al.*, 2012). L'apport d'intrants (tels que l'azote) dans les marais destinés à l'agriculture (notamment les marais doux) réduit également leur capacité à séquestrer le carbone (Turner *et al.*, 2009). En effet, cela réduit leur besoin d'avoir un réseau de racines et de rhizomes développé, ce qui réduit la biomasse souterraine capable de stocker le carbone (Turner *et al.*, 2009). Ces intrants peuvent aussi stimuler la dégradation microbienne de la matière organique et ainsi libérer du carbone (McLeod *et al.*, 2011). Il est ainsi estimé qu'au cours des 50 à 100 dernières années, ce sont entre 25 et 50% de la superficie des zones humides côtières qui ont disparu (Pendleton *et al.*, 2012). Aujourd'hui, leur déclin est estimé entre 0,5 et 7% de perte par an (Hopkinson *et al.*, 2012). A ce rythme actuel, 30 à 40% des marais côtiers pourraient disparaître au cours des 100 prochaines années (Pendleton *et al.*, 2012).

Les marais maritimes sont donc des écosystèmes clés dans la réduction de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère. Considérés comme espaces de carbone bleu du fait de leur forte dimension aquatique, ce sont néanmoins des milieux avec une grande richesse floristique terrestre et semi-aquatique. Cependant, aujourd'hui, la dimension terrestre des marais en termes de séquestration de carbone (carbone vert) reste très peu étudiée. La capacité de séquestrations par leurs surfaces en eau, qu'elles soient végétalisées ou non, est largement étudiée (par exemple Hendriks *et al.*, 2020). De même le carbone vert est beaucoup traité dans la littérature scientifique, mais essentiellement en ce qui concerne les milieux de forêt ou de prairie par exemple (Pugh *et al.*, 2019). Il n'existe en revanche aucune étude publiée qui se focalise sur la séquestration du carbone par la végétation terrestre des marais côtiers. C'est pourquoi il va désormais falloir se demander :

Dans quelle mesure la végétation des marais maritimes contribue-t-elle à la capacité de séquestration durable de carbone vert dans le sol de ces écosystèmes dans un objectif de neutralité carbone ?

Cette problématique sera traitée sur le territoire de la Communauté d'Agglomération de La Rochelle. Le carbone bleu des zones humides côtières est un sujet déjà largement traité au sein de la CDA, notamment au travers du LIENSs où de nombreux chercheurs se penchent sur le sujet. Le carbone vert au sein des marais l'est en revanche beaucoup moins, d'où l'objet du stage, qui consiste en une approche préliminaire du sujet. Il constitue en quelque sorte la première approche d'une nouvelle branche de l'axe carbone bleu du projet LRTZC. Ce travail sera par la suite repris par la Ville de La Rochelle pour être approfondi et appliqué à l'ensemble du territoire de la CDA.

PARTIE 2 : ELABORATION ET MISE EN ŒUVRE D'UNE METHODE DE CARTOGRAPHIE DES HABITATS DES MARAIS MARITIMES ET D'ATTRIBUTION D'UNE VALEUR DE SEQUESTRATION DE CARBONE A LEURS HABITATS

I. Matériel et méthode

Afin de quantifier le rôle de la végétation dans la séquestration du carbone dans le sol des marais côtiers de la communauté d'agglomération de La Rochelle, il a été nécessaire de sélectionner des sites d'études sur l'ensemble des marais de la CDA, dont la cartographie est présentée en annexe 1. La deuxième étape a consisté à identifier les zones en eau (associées au carbone bleu) et les zones hors d'eau (associées au carbone vert). L'objectif a ensuite été de répertorier l'ensemble des végétaux terrestres et semi-aquatiques qu'il était possible de retrouver sur ces sites d'études (habitats). Il a par la suite été question de rechercher des valeurs de séquestration de carbone par des espèces/habitats identiques ou similaires à ceux qui ont été recensés précédemment au sein de la bibliographie internationale. En fonction des valeurs obtenues, il a fallu réaliser une typologie d'habitats des marais afin de regrouper certaines espèces et leur attribuer une moyenne de séquestration de carbone par hectare et par an. Pour finir, des cartographies des habitats et des graphiques de séquestration de carbone ont été réalisés (fig. 14).



Figure 14 : Déroulé méthodologique suivi pour répondre à la problématique (Carteron, 2024).

I.1. Acquisition des données

I.1.1. Localisation et description des sites d'études

L'étude a été réalisée à l'échelle de la CDA de La Rochelle, mais seuls quatre sites d'études de marais côtiers ont été retenus pour cette première approche : trois marais saumâtres et un marais doux agricole (fig. 15 ; tab. 2). Il s'agit du marais de Tasdon, du marais de Pampin et de la Réserve Naturelle Nationale (RNN) du marais d'Yves pour les marais saumâtres et du marais d'Aytré pour le marais doux. Tous présentent des dynamiques et des modes de gestion différents. Le choix s'est effectué en fonction des données les plus complètes et les plus récentes disponibles en termes de recensement des habitats végétaux. Aucun marais salé n'a été étudié car ils représentent une part faible sur le territoire de l'agglomération, qu'ils sont essentiellement composés de surfaces en carbone bleu et qu'ils sont déjà largement étudiés par les chercheurs du LIENSs.



Figure 15 : Localisation des quatre sites d'études au sein de la CDA de La Rochelle (Carteron, 2024)
Source des données : Ville La Rochelle, 2023

	Type de marais	Surface	Communes	Protection	Gestionnaires
Marais de Tasdon	Saumâtre	103 ha	La Rochelle Aytré	ZNIEFF*	Ville de La Rochelle
Marais de Pampin	Saumâtre	27 ha	La Rochelle L'Houmeau	ZNIEFF 1 Ramsar ZPS, ZSC, ENS**	Ville de La Rochelle
Marais d'Yves	Saumâtre	200 ha	Yves	Réserve Naturelle Nationale	Ligue de Protection des Oiseaux
Marais d'Aytré	Doux	344 ha	Aytré La Jarne Angoulins	Aucune	Association Syndicale Autorisée (ASA) Aytré – La Jarne - Angoulins

Tableau 2 : Caractéristiques des sites d'étude (Carteron, 2024).

*Classement en cours pour Espace Naturel Sensible (ENS) et Réserve Naturelle Régionale (RNR)

** ZNIEFF : Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique ; ZPS : Zone de Protection Spéciale ; ZSC : Zone Spéciale de Conservation

Le marais de Pampin

Le marais de Pampin est situé à cheval sur les communes de La Rochelle et de L'Houmeau. Il s'agit d'une ancienne crique qui abritait un port, puis a servi de marais salant et a été utilisé pour l'élevage de poissons. Il a ensuite été poldérisé pour le convertir en pâturages. Il a aujourd'hui le statut de RNR. Il est constitué d'un réseau dense de canaux qui lui permettent d'alimenter les bassins en eau. Les entrées d'eau salée sont maîtrisées par un ouvrage hydraulique à l'ouest (fig. 16), et les entrées d'eau douce se font par les eaux de pluie et de ruissellement du petit bassin versant à l'est, qui sont également gérées. Le gradient de salinité, perpendiculaire au trait de côte, détermine la végétation, avec des plantes halophytes dans les eaux salées de l'ouest et des espèces ligneuses d'eau douce à l'est (bois de Bas Pampin). Il y a ainsi une succession de prés salés, de prairies inondables salées et

saumâtres, de roselières et de bassins doux⁹. Il est à noter que le marais de Pampin se salinise par des entrées souterraines d'eau salée (biseau salé). Ce phénomène va s'amplifier avec l'élévation du niveau de la mer. Cela entraîne une diminution des espèces non tolérantes au sel comme les roseaux et l'étendue d'espèces halophytes telles que la salicorne.



Figure 16 : Dynamiques hydrologiques du marais de Pampin (Carteron, 2024).

La surface grisée ne sera pas traitée dans l'étude car elle appartient à la commune de L'Houmeau et les données disponibles ne sont pas les mêmes que pour la partie rochelaise.

Le marais d'Yves

Le marais d'Yves, localisé sur la commune d'Yves, est composé d'une vaste lagune d'eau saumâtre de 55 ha, au cœur de la réserve (fig. 17). Cette lagune est influencée par le rythme des marées, en eau lors des marées hautes et hors d'eau à marée basse. Les prairies environnantes sont inondées occasionnellement lors des marées de vives-eaux. La partie Est de la réserve est occupée par des prairies traversées par des canaux d'eau saumâtre et douce. Elles sont inondées en hiver lors des fortes précipitations (fig. 18A), puis le niveau d'eau baisse en été où une végétation à fleurs peuple l'espace. Les sols sont en grande partie sableux, même dans la zone d'eau douce, du fait des dynamiques de formation de cet espace. La réserve accueille également dans sa partie Ouest une activité ostréicole sur 25 ha, avec des claires et des bassins. Enfin, la dune, le long du trait de côte (fig. 18B), évolue sans intervention humaine. Le maintien de la diversité écologique est assuré par le pâturage des vaches et des chevaux, qui empêchent la fermeture des milieux. Certaines prairies sont également fauchées annuellement. Une maîtrise des niveaux d'eau permet une gestion écologique de la réserve. En hiver, le marais se recharge en eau grâce aux précipitations, puis s'assèche partiellement en été. Là encore,

⁹ Marais de Pampin – Infiniment Charentes

URL : <https://www.infiniment-charentes.com/fiche-sit/marais-de-pampin-5740473/#truncate> [consulté le 19 mai 2024]

la gestion de l'eau est assurée par des ouvrages hydrauliques¹⁰ (fig. 17). Tout comme Pampin, Yves est un marais qui se salinise, notamment avec la brèche dans la digue qui provoque l'entrée d'eau salée à la suite des tempêtes de l'automne 2023.



Figure 17 : Localisation et périmètre du marais d'Yves (Carteron, 2024).

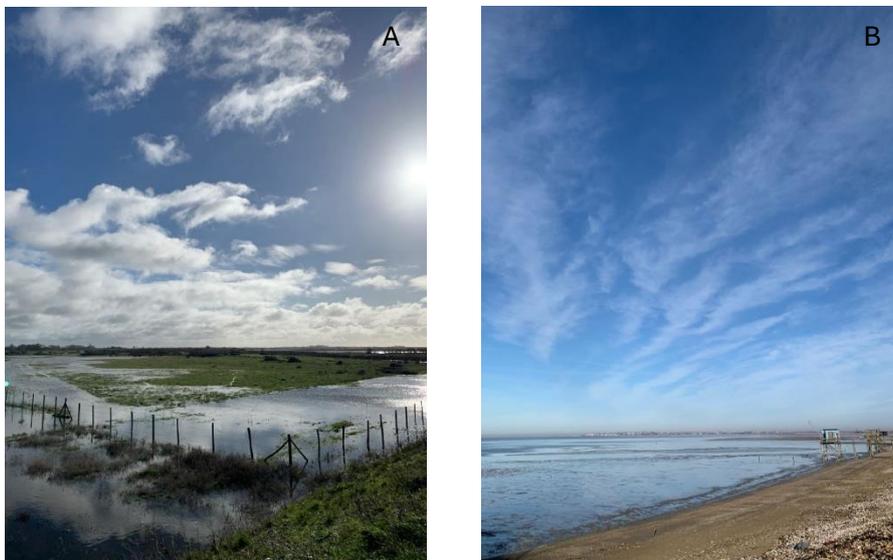


Figure 18 : Le marais d'Yves sur sa partie terrestre (A) et sa partie côtière (B) (Chauveau, 2024).

¹⁰ RNN Marais d'Yves

URL : <https://marais.yves.reserves-naturelles.org/visiter-la-reserve/supports-pedagogiques/> [consulté le 19 mai 2024]

Le marais de Tasdon

Le marais de Tasdon a servi de marais salant du Moyen Âge jusqu'en 1935, puis de zone de pâturage bovin entre 1935 et 1960. L'édification du barrage de la Moulinette en 1962 l'a déconnecté de la mer, puis il a été remblayé dans les années 1970 lors de la construction du quartier de Villeneuve-les-Salines. Le marais a ainsi perdu une grande partie de ses fonctions écologiques initiales, avec la prolifération d'espèces invasives et la réduction des surfaces en eau. D'importants travaux de renaturation ont été mis en œuvre entre 2019 et 2021 et ont permis au marais de retrouver ses fonctions écologiques, régulatrices et protectrices. Aujourd'hui, il assure un espace d'accueil pour la biodiversité et permet la régulation des flux d'eaux douces et salées. Les bassins à l'ouest et à l'est recueillent les eaux pluviales, tandis que les bassins au cœur du marais reçoivent les eaux salées en provenance de l'océan. Des ouvrages hydrauliques permettent une gestion maîtrisée de ces flux d'eau¹¹ (fig. 19 et 20).

Le carbone vert du marais de Tasdon ne sera étudié que sur la végétation présente avant sa restauration car la cartographie des habitats n'a pas été mise à jour depuis 2018.



Figure 19 : Dynamiques hydrologiques du marais de Tasdon (Carteron, 2024).



Figure 20 : Partie Est du marais de Tasdon (Carteron, 2024).

¹¹ Marais de Tasdon – Ville La Rochelle

URL : <https://www.larochelle.fr/action-municipale/ville-durable/marais-de-tasdon> [consulté le 19 mai 2024]

Le marais d'Aytré

Le marais d'Aytré se situe au carrefour de trois communes : Aytré, La Jarne et Angoulins. Il s'agit d'un marais doux agricole desséché, où l'eau circule essentiellement par des canaux (fig. 21) permettant le drainage des champs. Ils permettent d'évacuer le surplus d'eau en hiver afin de pouvoir les cultiver au printemps. En été, l'eau est conservée dans les canaux pour irriguer ces cultures. Il y est pratiqué une agriculture conventionnelle, les principales cultures étant le maïs, le tournesol et le blé.



Figure 21 : Image satellite et périmètre du marais d'Aytré (Carteron, 2024).

1.1.2. Identification des milieux « carbone bleu » et « carbone vert » et recensement de la végétation présente sur site

Identification des milieux « carbone bleu » et « carbone vert »

Dans cette étude, seuls les milieux dits « carbone vert » (CV) sont traités, c'est-à-dire les milieux végétalisés terrestres. Ont donc été exclus l'ensemble des milieux en eau, tels que les canaux et les bassins, associés au carbone bleu (CB). Les milieux mixtes, tels que les roselières dont le pied est dans l'eau mais le reste du végétal est aérien (végétation hygrophile), ont été gardés. En revanche, les bassins en eau partiellement recouverts de végétation aquatique basse (végétation hydrophile), tels que les renoncules, ont été considérés comme carbone bleu et n'ont pas fait partie de l'étude.

Données utilisées pour le recensement des habitats

Il n'existe pas, à l'échelle de la France ni même des collectivités, une cartographie fine et universelle des habitats naturels. Les cartographies d'occupation du sol existantes (Registre Parcellaire Graphique (RPG), CORINE Land Cover (CLC), l'Occupation des Sols à Grande Echelle (OCSGE)) ne sont pas suffisamment précises en ce qui concerne les habitats naturels, ou sont incomplètes. Il a donc fallu utiliser d'autres méthodes et sources de données afin d'identifier la végétation des quatre sites. L'objectif était ensuite de réaliser une typologie regroupant les habitats semblables. Pour le marais de Tasdon, le bureau d'étude « SCE Aménagement et Environnement » a produit en 2018, pour la ville,

une cartographie en couches vectorielles des habitats, se basant sur la typologie CORINE Biotopes¹². Chaque polygone de la couche était associé à un habitat de la typologie (annexe 2) détaillé dans la table attributaire associée. Chaque polygone était aussi associé à un code d'habitat, correspondant à un habitat CORINE Biotopes. Par exemple, le code 15.33 correspond à l'habitat « Communautés du schorre supérieur ».

Concernant le marais d'Yves, la LPO a produit en 2012 le même format de cartographie d'habitats, en utilisant également la typologie CORINE Biotopes (fig. 22).

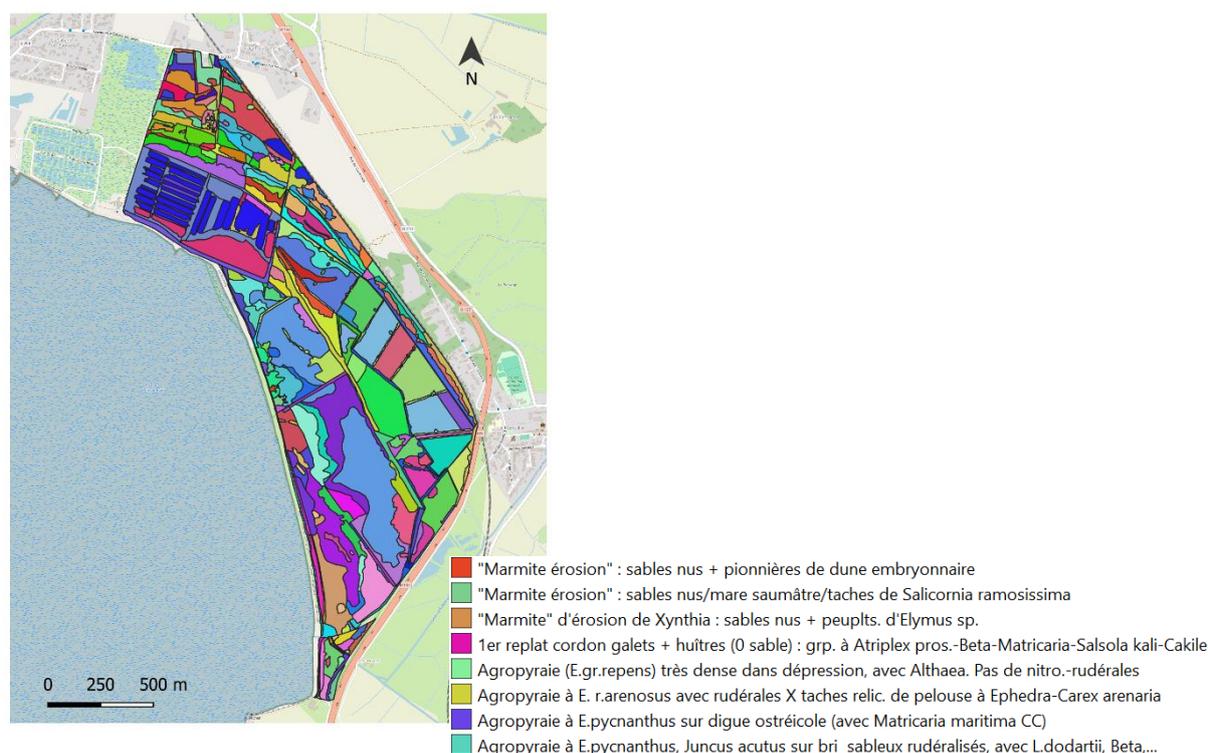


Figure 22 : Exemple de cartographie d'habitat utilisée sur Yves et extrait de sa légende. L'ensemble de la légende comptant 311 éléments, elle sera placée en annexe 3 (Terrisse, LPO, 2012).

La végétation de Pampin a quant à elle été identifiée sur le terrain « à dire d'expert », via la méthode du transect. Cette méthode consiste à identifier la végétation selon une ligne droite tracée en fonction de la variabilité linéaire d'un facteur. Le facteur déterminant a ici été la salinité, qui décroît de la mer vers la terre. Cela a permis d'identifier la végétation selon le gradient de salinité, depuis le bas marais jusqu'à la zone boisée. À la suite de ce relevé de terrain, une cartographie générale des habitats a pu être réalisée, complétée au besoin par des relevés phytosociologiques réalisés en 2021 par la ville de La Rochelle (annexe 4) et par de la photo-interprétation d'images satellites. La cartographie a été réalisée avec le logiciel QGIS, en traçant des polygones pour chaque type de végétation identifié.

Le marais d'Aytré étant un marais agricole, les cartographies CLC de 2018 et du RPG de 2021 ont pu être utilisées (annexe 5 et 6). Elles ont été chargées directement dans QGIS ce qui a permis, via les tables attributaires, d'obtenir le détail des habitats et des cultures du marais.

¹² Typologie CORINE Biotopes : système hiérarchisé de classification des habitats européens élaboré dans le cadre du programme CORINE (Coordination of Information on the Environment) (Devillers et al. 1991)

Recensement des espèces

Une fois l'ensemble des cartographies d'habitats obtenues, toutes les espèces présentes dans les quatre sites d'étude ont été recensées dans un tableur du logiciel Excel (version 2016). En effet, les cartographies d'habitat utilisées pour Yves et Tasdon ne recensent que des habitats et non des espèces précises, idem pour CLC et le RPG en ce qui concerne Aytré. Par exemple, l'habitat « 15.33. Communauté du schorre supérieur » présent sur Yves regroupe des Carex, des Joncs, des gazons, etc. Ainsi, pour les marais de Tasdon et Yves, la typologie CORINE Biotopes a donc été utilisée pour identifier chaque espèce présente dans chaque habitat à l'aide de la clé de lecture fournie par l'INPN¹³ (tab. 3).

1 – Habitats littoraux et halophiles	11- Mers et océans						
	12- Bras de mer						
	13- Estuaires et rivières tidales						
	14- Vasières et bancs de sable sans végétation						
	15- Marais salés, prés salés (schorres), steppes salées et fourrés sur gypse	15.1- Gazons pionniers salés					
		15.2- Prairies à Spartine					
		15.3- Prés salés atlantiques	15.31- Prés salés à <i>Puccinellia maritima</i>				
			15.32- Groupements à <i>Puccinellia maritima</i> des prés salés				
			15.33- Communautés du schorre supérieur	15.331- Formations dominées par, ou riche en, <i>Juncus gerardii</i>			
				15.332- Formations dominées par <i>Plantago maritima</i>			
15.333- Gazons à <i>Festuca rubra</i> ou <i>Agrostis stolonifera</i>							
15.334- Gazons à <i>Statice</i>							
	15.335- Zones à <i>Carex distans</i>						

Tableau 3 : Extrait de la clé de lecture de la typologie CORINE Biotopes, pour l'entité « 15.33- Communautés du schorre supérieur » (Carteron, 2024, d'après CORINE Biotopes, 2024).

Dans l'exemple ci-dessus, il est ainsi possible de voir que l'habitat « 15.33 Communautés du schorre supérieur » recense les espèces suivantes : *Juncus gerardii*, *Plantago maritima*, *Festuca rubra*, *Agrostis stolonifera*, Gazons à *Statice* et *Carex distans*.

1.1.3. Recherche bibliographique des valeurs de séquestration de carbone

Une fois que l'ensemble des espèces présentes sur les sites d'études a été recensé, il est nécessaire de déterminer les valeurs de séquestration de carbone disponibles dans la littérature internationale. Cela permettra ensuite de réaliser une typologie des habitats en fonction des données disponibles. Les moteurs de recherche ScienceDirect et ResearchGate ont été utilisés afin de recenser l'ensemble des articles scientifiques internationaux qui présentaient une étude sur la séquestration de carbone de l'un des habitats ou espèce présents sur l'un des quatre sites d'études. Etant donné que cette étude porte uniquement sur la séquestration du carbone dans les sols des végétaux, seuls les articles qui traitaient de la séquestration du carbone dans le sol ont été retenus, et non ceux qui ont étudié uniquement la captation par la biomasse ou les valeurs de stock. Malgré la quantité restreinte d'études recensées, de

¹³ Classification des habitats CORINE Biotopes, INPN, URL : https://inpn.mnhn.fr/habitat/cd_typo/22

nombreux critères de sélection ont dû être appliqués afin que les chiffres sélectionnés se rapprochent au plus près des sites d'étude. Voici les critères qui ont été appliqués :

- Année de publication de l'article : entre 2000 et 2024 ;
- Article publié dans une revue à comité de lecture ;
- Climat similaire au climat rochelais : climat tempéré ; moyenne annuelle des températures aux alentours de 13°C ; précipitations annuelles d'environ 700mm ; environ 2300 heures d'ensoleillement ;
- Méthode d'échantillonnage : carottage entre 0 et 50cm dans le sol ;
- Milieu similaire : marais maritime salé, saumâtre, doux et/ou agricole ;
- Dynamiques naturelles : régime des marées, dynamiques sédimentaires, etc. ;
- Habitats/espèces similaires.

Les articles scientifiques répondant à l'ensemble de ces critères sont rares. Ainsi, il a été nécessaire d'élargir les recherches et de sélectionner aussi des articles traitant d'espèces ou de milieux légèrement différents, bien que très similaires à ceux recensés sur les sites d'étude. Par exemple, une étude réalisée sur des espèces de saules en Suède (Kalita *et al.*, 2021) ne traitait pas de l'espèce précise présente sur la CDA, mais a tout de même été conservée. De plus, il n'y avait pas de chiffres disponibles pour l'ensemble des espèces et/ou des milieux recensés sur les sites d'études, il a donc été nécessaire d'établir des typologies de milieu. Cela a permis de réaliser des moyennes de valeur de séquestration de carbone avec les données obtenues dans la bibliographie et de les appliquer à un type de végétation regroupant plusieurs espèces.

L'ensemble des données récoltées dans les articles scientifiques ont été enregistrées et classées dans un tableau, comme le présente l'exemple du tableau 4.

<i>Milieu étudié</i>	<i>Espèce(s) présente(s)</i>	<i>Valeur retenue</i>	<i>Localisation</i>	<i>Profondeur du carottage</i>	<i>Source</i>
Saulaie	<i>Salix viminalis</i>	0,74 tC.ha ⁻¹ .an ⁻¹	Suède	20cm	Kalita <i>et al.</i> 2021

Tableau 4 : Exemple d'enregistrement d'une donnée de séquestration de carbone (Carteron, 2024).

I.2. Pré-traitement et traitement des données

I.2.1. Elaboration d'une typologie et cartographie des habitats

Afin d'attribuer un chiffre de séquestration carbone à chaque type de végétation qui peuple les différents milieux, une typologie a dû être établie afin de regrouper certains habitats et espèces similaires. Ils ont été regroupés en fonction de leurs similarités écologiques, morphologiques et physiologiques. Par exemple, toutes les espèces ligneuses de taille intermédiaire (type arbuste) ont été regroupées sous l'intitulé « formation arbustive ». Cette catégorisation des espèces a été réalisée en utilisant plusieurs typologies d'occupation du sol existantes : CLC, RPG, OCSGE. Elle a également été suivie par des agents de la collectivité en charge de la biodiversité et par des scientifiques du laboratoire LIENSs.

Ces catégories d'habitats ont ensuite été cartographiées avec le logiciel QGIS (version 3.22.12), à partir des couches des habitats précédemment cartographiés en ce qui concerne Tasdon, Yves et Aytré et en créant de nouveaux polygones pour Pampin. Pour les trois premiers marais, il a suffi d'utiliser la fonction « fusionner les entités » afin d'agrèger les polygones dont les habitats se retrouvent dans le

même type. Concernant Pampin, les polygones ont été retracés d’après une photo-interprétation et les schémas réalisés sur des photographies aériennes lors des relevés « à dire d’expert » réalisés sur le terrain. Les tables attributaires des couches ont été organisées selon les variables suivantes : Espèces ; Typologie ; Surface ; tC.ha⁻¹.an⁻¹ ; tC.an⁻¹ ; Source de la donnée. La surface de chaque habitat a été calculée (en hectares) grâce à la calculatrice de champs.

Concernant les surfaces en eau, la Ville de La Rochelle a réalisé en 2023 une étude sur le carbone bleu des marais au sein de la CDA (Afonso, 2023). Ce sont ces couches vectorielles de CB qui ont été utilisées pour déterminer les zones en eau.

En ce qui concerne les fonds de carte utilisés, il s’agit des images Google Satellite de 2024 pour Aytré, Yves et Pampin, des images Pléiades de 2018 pour Tasdon et de la carte OpenStreetMap Standard. Les couches vectorielles de délimitation des marais ont été produites en 2023 par la Ville de La Rochelle. Enfin, les délimitations administratives (type CDA, communes, etc.) sont issues des données géographiques mises à disposition par l’IGN sur le site Géoservice¹⁴.

1.2.3. Le calcul des taux de séquestration de carbone par habitat et réalisation de graphiques

Cette étape a consisté à faire des moyennes des valeurs de séquestration carbone obtenues dans la bibliographie par habitat de la typologie établie. Les valeurs minimum et maximum ont également été conservées afin de garder une fourchette d’incertitude. En effet, pour la majorité des types, seules deux valeurs de séquestration étaient disponibles, il n’était donc pas possible de réaliser un écart-type pour obtenir l’incertitude. Ces moyennes ont permis d’obtenir un taux de séquestration de carbone par hectare et par an moyen, minimal et maximal de chaque type d’habitat. Ces trois valeurs de taux de séquestration de carbone ont ensuite été multipliées avec la surface de chaque habitat, afin d’obtenir une valeur de séquestration de carbone moyenne, minimale et maximale par habitat par an. Un exemple est présenté dans la figure 23 et la version complète est disponible en annexe 7. L’ensemble des calculs et des formules utilisées au cours de cette étape est consigné en annexe 8.

Type de milieu	Espèces des sites étudiés	Données disponibles dans la bibliographie			Calcul	Séq. Moyenne (tC.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Séq. Min	Séq. Max
		Valeur de séquestration	Milieu étudié, pays	Source				
Formation herbacée	Elymus, Althaea, Atriplex, Salsola, Matricaria, Ephedra, Carex, Juncus, etc.	0,82	Prairies à Carex, haut midwest (USA)	Lawrence et al. 2013	Moyenne des trois valeurs	1,11	0,82	1,33
		1,33	Jonçaie, Portugal	Sousa et al. 2017				
		1,19	Peuplements de joncs, côte atlantique nord (USA)	Else-Quirk et al. 2011				

Figure 23 : Exemple d’enregistrement de données bibliographiques selon la typologie et de réalisation d’une moyenne de séquestration (séq.) de carbone (Carteron, 2024). La colonne « Description/espèces présentes » regroupe l’ensemble des espèces recensées sur les quatre sites d’étude.

Des graphiques ont ensuite été réalisés sous Excel afin de mettre en forme ces données et permettre une étude comparative des données entre habitats et entre marais.

¹⁴ Géoservice – IGN, URL : <https://geoservices.ign.fr/>

I.3. Une fiabilité des données à questionner

Il est important de prendre les données utilisées ici avec précaution. En effet, elles restent source d'une grande incertitude, pour plusieurs raisons. D'abord, les données issues de la bibliographie ne viennent pas de milieux parfaitement identiques aux conditions présentes sur le territoire rochelais. Les conditions les plus variables ont été les conditions climatiques, notamment en termes de pluviométrie et de température, mais aussi de type de milieux, certaines données étant issues de marais continentaux. L'annexe 10 compare les caractéristiques climatiques de La Rochelle et celles des milieux étudiés dans la bibliographie. De plus, les données utilisées ne recouvrent qu'une faible part de l'ensemble des espèces présentes.

La deuxième source d'approximation réside dans les moyennes réalisées. Etant donné le nombre réduit de données disponibles, les moyennes ont pour la plupart été réalisées sur seulement deux ou trois valeurs de séquestration de carbone, ce qui ne permet pas de gommer les incertitudes qui pourraient leur être associées.

Une autre incertitude réside dans l'obsolescence des cartographies d'habitats utilisées. Par exemple, la cartographie d'Yves date de 2012, il est donc possible et même probable que la végétation ait changé en 12 ans.

Malgré ces sources d'incertitudes concernant les valeurs de séquestration de carbone, la méthodologie en elle-même reste fiable et a donné des résultats probables et réalistes.

II. RESULTATS

II.1. Description de la typologie établie

La typologie retenue a été discutée puis modifiée à de nombreuses reprises avec les agents de la collectivité et les chercheurs/doctorants du LIENSs. Elle est présentée dans le tableau 5. Les catégories formation herbacée, formation arbustive et formation arborée ont été reprises de la typologie OCSGE ; les catégories terre arable et milieux sableux ont été empruntées à CLC ; les catégories de prairie (temporaire et permanente) sont issues du RPG et les salicorniales et les roselières à phragmites ont été déterminées à dire d'expert.

Habitat	Description	Espèces
Milieux sableux	Sols ensablés tels que les dunes (végétalisées ou non) et les plages	Sable nu, dune , dune embryonnaire, <i>Oyat</i> , <i>Euphorbia paralias</i>
Salicorniaie	Espèces halophytes basses et éparses telles que la salicorne et les genres voisins (<i>Soude</i> , <i>Sarcocornia</i>)	<i>Salicornia ramosissima</i> , Salsoletum , <i>Sarcocornia</i> , Gazons
Roselière à phragmites	Toutes les espèces de types roseaux (essentiellement le genre Phragmite) qui sont des graminées hauts et hygrophiles	Phragmites , roseaux, <i>Atriplex</i> , <i>Holcus</i> , <i>Bolboschoenus</i>
Prairie temporaire	Terre en jachère, recouverte d'espèces de jachère telle que la fétuque, en attente d'exploitation agricole	Prairie temporairement non exploitée, jachère de 6 ans ou plus, jachère de 5 ans ou moins, prairie à rotation longue
Prairie permanente	Surface essentiellement recouverte de végétation herbacée en peuplement dense, fauchée occasionnellement avec une diversité floristique faible	Herbe dominante , <i>Brachypode penne</i> , Prairie calcaire, Prairie mésophile
Formation herbacée	Espèces herbacées en formation dense, essentiellement des graminées, jamais fauchée	<i>Elymus</i> , <i>Althaea</i> , <i>Atriplex</i> , <i>Salsola</i> , <i>Matricaria</i> , <i>Ephedra</i> , Carex , Juncus , <i>Limonium</i> , <i>Arrhenatherum</i> , <i>Inula</i> , <i>Dispacus</i> , <i>Ononis</i> , <i>Sonchus</i> , <i>Potentilla</i> , <i>Agrostis</i> , <i>Brachypodium</i> , <i>Alopecuro</i> , <i>Lolietum</i> , <i>Trifolium</i> , <i>Polypogon</i> , <i>Parapholis strigosa</i> , <i>Aster tripolium</i> , <i>Chenopodium chenopoides</i> , <i>Ludwigia</i> , <i>Urtica</i> , <i>Cynosurion cristati</i> , <i>Dittrichia viscosa</i>
Formation arbustive	Espèces ligneuses au stade d'arbuste, type haie ou bosquet	<i>Prunus</i> , <i>Ligustrum</i> , <i>Crataegus</i> , <i>Rubus</i> , <i>Sambucus</i> , Tamarix , <i>Galium</i> , <i>Asparagus</i> , <i>Buddleja</i> , <i>Helichrysum</i> , <i>Baccharis</i> , renouée du Japon, saule, aubépine, haie jardinière, <i>Pyracantha</i> , <i>Cotoneaster</i>
Formation arborée	Espèces ligneuses au stade d'arbre	Frêne , saule , prunellier, <i>Galium aparine</i> , peuplier, <i>Sambucus</i> , orme, <i>Rubus</i> , aulne, platane, <i>Sophora japonica</i>
Terres arables	Terres exploitées pour un usage agricole	Surface agricole non exploitée, féverole, orge de printemps, maïs, fétuque, blé tendre d'hiver, tournesol

Tableau 5 : Typologie des habitats des quatre marais étudiés et espèces correspondantes. Les espèces en gras sont celles pour lesquelles des données de séquestration de carbone ont été obtenues dans la bibliographie (Carteron, 2024)

La catégorie « formation herbacée » est celle qui a la diversité spécifique la plus importante, du fait de la richesse des marais en végétation basse de graminées. Les genres qui y sont dominants sont notamment les joncs, les *Elymus* et les *Carex*. La frontière entre « prairie permanente » et « formation herbacée » est floue, les principales distinctions étant le mode de gestion (fauchage raisonné dans les prairies et fauchage absent dans la formation herbacée) et une diversité floristique moins importante dans la prairie. Il est également possible de retrouver les mêmes espèces entre les catégories « formation arbustive » et « formation arborée ». Cela est dû au stade de croissance de la végétation. Un saule dans la catégorie arborée aura atteint le stade d'arbre (plus de 7m), tandis que dans la catégorie arbustive, il sera au stade d'arbuste (4 à 7m).

Lorsque la clé de lecture des habitats de CORINE Biotopes ne permettait pas de déterminer les espèces présentes dans un habitats, ils ont été saisis comme tel dans la colonne « espèces ». C'est par exemple le cas de « dune embryonnaire », « prairie calcaire », ou encore « herbe dominante ». C'est également

le cas des habitats qui ont été recensés via CORINE Land Cover sur le marais d'Aytré tels que « prairie à rotation longue » ou « jachère de 6 ans ou plus ».

II.2. Des capacités de séquestration de carbone inégales selon les habitats

Une fois cette typologie établie, les calculs des taux de séquestration de ces types d'habitats ont pu être réalisés (tab. 6 ; fig. 24). Parmi l'ensemble des habitats, tous séquestrent du carbone, excepté les terres arables. Cela s'explique par les pratiques agricoles qui y sont associées. En effet, les cultures étant fauchées chaque année, la végétation n'a pas le temps de stocker le carbone suffisamment en profondeur pour pouvoir parler de séquestration. De plus, la mise en culture d'une parcelle est associée au retournement de la terre, ce qui va mettre la MO au contact de l'air et donc l'exposer à la décomposition, relarguant du carbone. L'utilisation de pesticides peut aussi impacter la capacité de séquestration des sols, car ils peuvent tuer les micro-organismes du sol qui permettent de stocker la MO morte en profondeur.

Type	Séquestration de carbone (tC.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Séquestration de carbone minimal (tC.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Séquestration de carbone maximal (tC.ha ⁻¹ .an ⁻¹)
Milieux sableux	0,66	0,58	0,73
Salicornaie	1,00	0,62	1,37
Roselière à phragmites	3,89	2,25	5,52
Prairie temporaire	0,58	0,41	0,75
Prairie permanente	0,64	0,45	0,82
Formation herbacée	1,11	0,82	1,33
Formation arbustive	1,01	1,01	1,01
Formation arborée	1,14	0,74	1,83
Terres arables	-3,11	-3,11	-3,11

Tableau 6 : Séquestration de carbone par habitat (tC.ha⁻¹.an⁻¹) avec les valeurs minimales et maximales (Carteron, 2024)

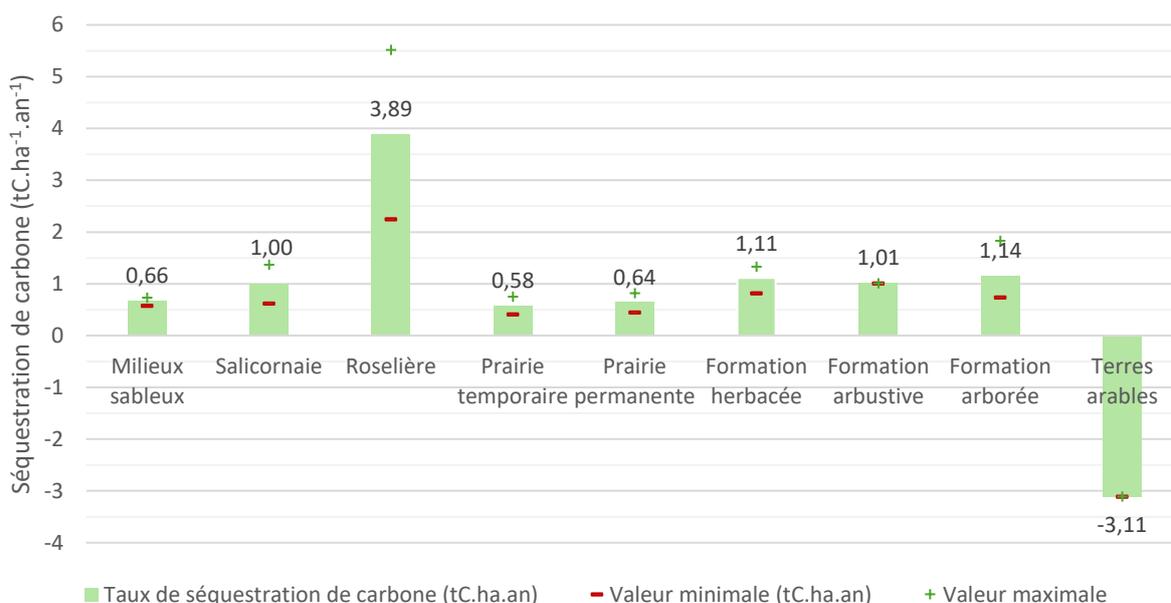


Figure 24 : Séquestration de carbone par habitat (tC.ha⁻¹.an⁻¹), avec les valeurs maximales et minimales (Carteron, 2024).

A l'inverse, l'habitat qui séquestre le plus de carbone est la roselière à phragmites, ce qui peut s'expliquer par la forte productivité des espèces de roseaux. Ce sont en effet des espèces qui se développent très rapidement avec un dense réseau de rhizomes. Leur capacité à pousser dans l'eau peut également accroître cette capacité de séquestration, puisqu'en milieu anaérobie, la MO se dégrade très lentement, concourant à la séquestration du carbone.

Le résultat le plus surprenant est le fait que les milieux sableux séquestrent plus de carbone que les prairies permanentes. En effet, les milieux sableux peuvent certes être végétalisés, mais la végétation y est rarement dense ni très développée. Une hypothèse plausible serait le rôle des rhizomes des plantes qui poussent dans le sable, dont le réseau souterrain peut être très vaste. Une autre hypothèse serait que les prairies, même permanentes, peuvent être fauchées régulièrement, ce qui peut limiter leur capacité de séquestration de carbone.

Les autres résultats sont assez proches les uns des autres et semblent tous logiques. Par exemple, le fait que les prairies temporaires soient celles qui séquestrent le moins, puisqu'elles sont très régulièrement fauchées ou utilisées pour l'agriculture, la qualité de leur sol est donc moindre.

II.3. Une répartition des végétaux très disparate en fonction des marais

Les marais de la CDA présentent des configurations assez diverses. Pampin a une surface en eau quasi-équivalente à sa surface CV, tandis qu'Aytré n'est presque pas recouvert d'eau (fig. 25). Quant à Tasdon et Yves, ils semblent avoir la même proportion de CV et CB, avec environ 1/3 de leur surface en eau. De manière générale, les marais sont dominés par une surface CV, à hauteur de 84% de la surface totale de l'ensemble des marais, et de 73% sans prendre en compte Aytré. Le carbone bleu représente quant à lui 16% de la surface totale des quatre marais.

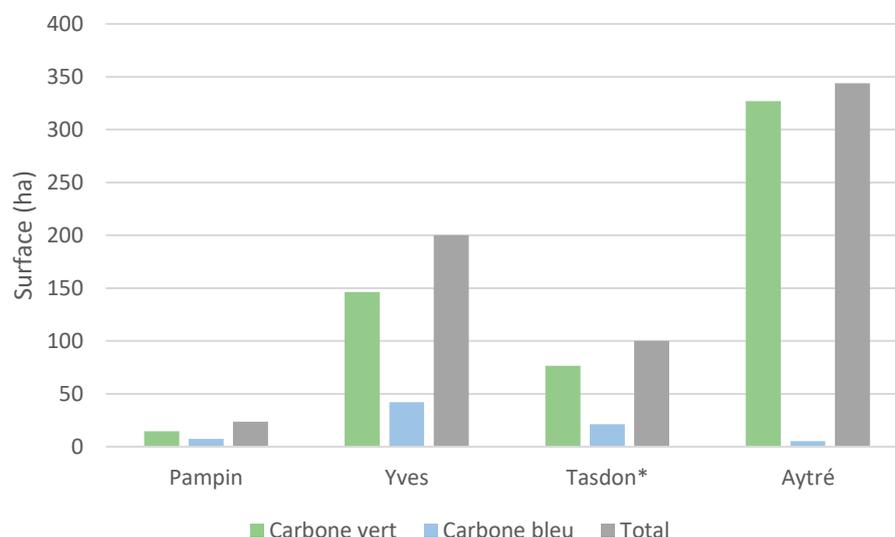


Figure 25 : Comparaison des surfaces CV, CB et surface totale des marais (Carteron, 2024)

*Tasdon avant restauration

Les cartographies des habitats recensent l'ensemble des habitats carbone vert et les surfaces en eau, ainsi que les surfaces construites et/ou non étudiées telles que les routes, chemins, digues, bâtiments, surfaces remblayées, claires ostréicoles, plages de galet, etc. qui font l'objet de la catégorie « autre ».

II.3.1. Le marais de Pampin

Sur le marais de Pampin (fig. 26), la surface en carbone vert représente 62% de la surface totale. Les bassins en eau ne sont, pour la grande majorité, pas recouverts de végétation. La pointe à l'extrême nord du marais n'est pas cartographiée car elle n'est pas sous la gestion de la Ville de La Rochelle, mais sous celle de l'Houmeau.



Figure 26 : Les habitats en carbone vert du marais de Pampin et leur surface (Carteron, 2024).
Source des données : Ville de La Rochelle, 2024.

La répartition des habitats CV dans le marais de Pampin est plutôt homogène, bien qu'il y ait une légère domination de roselières à phragmites et de formations herbacées. La salinisation progressive du marais par l'infiltration sous-terrain d'eau de mer entraîne le recul de la végétation intolérante à une forte concentration en sel telle que les roseaux, tandis que la végétation halophile telle que les salicornes gagne du terrain. La zone grisée à l'ouest correspond à une plage de galet avec une végétation très éparse, il a donc été choisi de ne pas la traiter. La zone grisée à l'Est se réfère à un champ privé. Les haies qui bordent le marais sont essentiellement des Tamaris et la zone boisée au sud-est correspond à une aulnaie-frênaie.

II.3.2. Le marais d'Yves

La surface en eau du marais d'Yves représente 42% de sa surface totale. Une majeure partie de cette surface correspond à la lagune salée, qui se situe au centre du marais, et aux claires ostréicoles au nord-ouest (fig. 27).

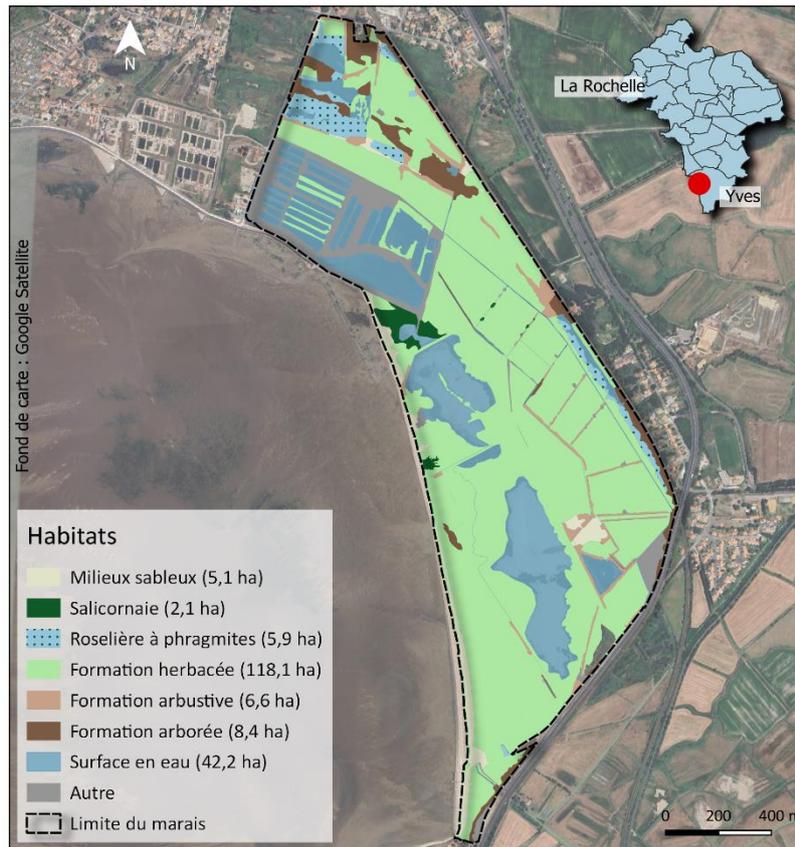


Figure 27 : Les habitats en carbone vert du marais d’Yves et leur surface (Carteron, 2024). Les surfaces grisées correspondent à la plage de galet et à un champ privé.
 Source des données : J. Terrisse, LPO, 2012 ; Ville de La Rochelle, 2024.

Le marais d’Yves est clairement dominé par les formations herbacées, à hauteur de 80% de la surface en CV, soit plus de la moitié de la surface totale. Les zones grisées « autre » correspondent, au nord-ouest, à des zones remblayées pour l’usage ostréicole et au sud-est aux bâtiments utilisés pour la gestion par la LPO de la Réserve Naturelle Nationale.

II.3.3. Le marais de Tasdon

La surface en CV de Tasdon avant sa restauration constitue plus de 80% de sa surface totale (fig. 28). La surface en eau est répartie en canaux et bassins, dont une partie est recouverte par des espèces hydrophytes telles que des scirpes et des renoncules. Les zones grisées correspondent essentiellement à la route qui traverse le marais et aux chemins piétons. A la différence des deux marais précédents, il existe aussi des bassins vides d’eau de manière quasi-permanente et recouverts de vase. Toutes ces zones ne sont pas étudiées (vase, surface en eau végétalisée et non végétalisée, autre).

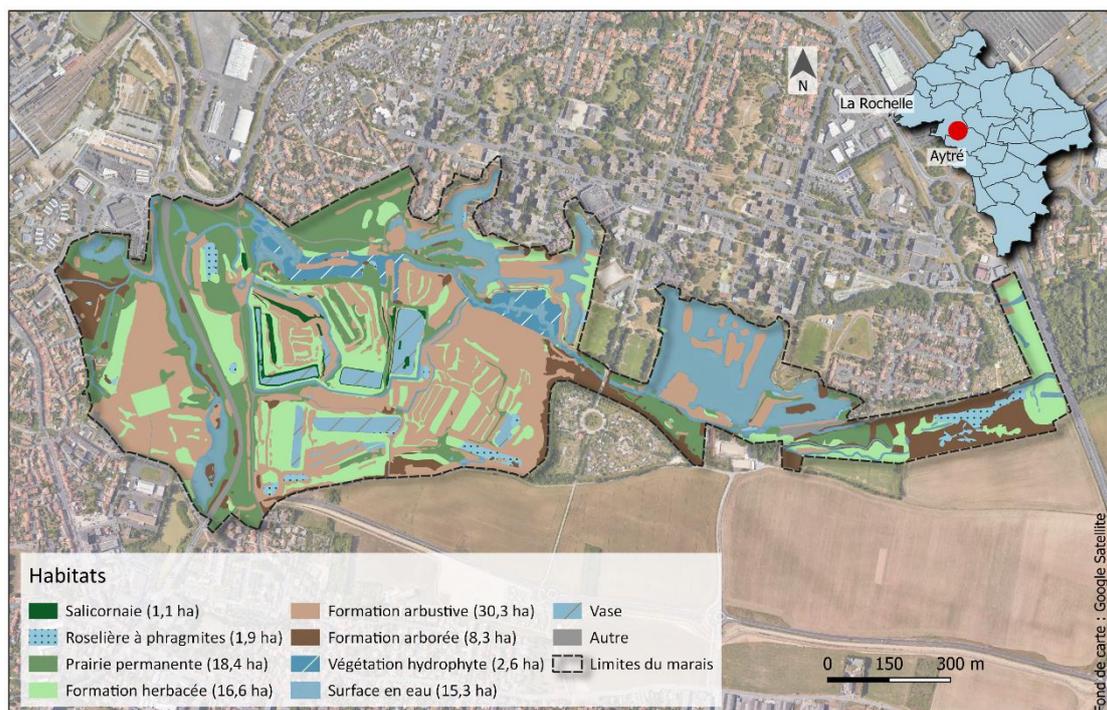


Figure 28 : Les habitats en carbone vert du marais de Tasdon avant sa restauration et leur surface (Carteron, 2024).

Source des données : SCE Environnement et Aménagement, 2018 ; Ville de La Rochelle, 2024.

Le marais de Tasdon est dominé par les formations arbustives (40% de la surface CV et un tiers de la surface totale), essentiellement composées de Tamaris et de Prunus. On y retrouve également quelques espèces exotiques envahissantes (EEE) telles que le Buddleia.

II.3.4. Le marais d'Aytré

La surface en carbone vert représente 95% de la surface totale du marais d'Aytré (fig. 29). Les zones en eau consistent essentiellement en petits canaux permettant le drainage et/ou l'irrigation des surfaces agricoles. Par ailleurs, les terres arables dominent les habitats, avec plus de 40% de la surface CV. Il s'agit essentiellement d'agriculture conventionnelle de maïs, tournesol, blé, orge, etc. Les prairies temporaires correspondent à des jachères avec des plantes telles que la fétuque, avec un temps de rotation inférieur à 5 ans. Les zones grisées correspondent ici aux bâtiments agricoles et aux routes et chemins qui traversent le marais.

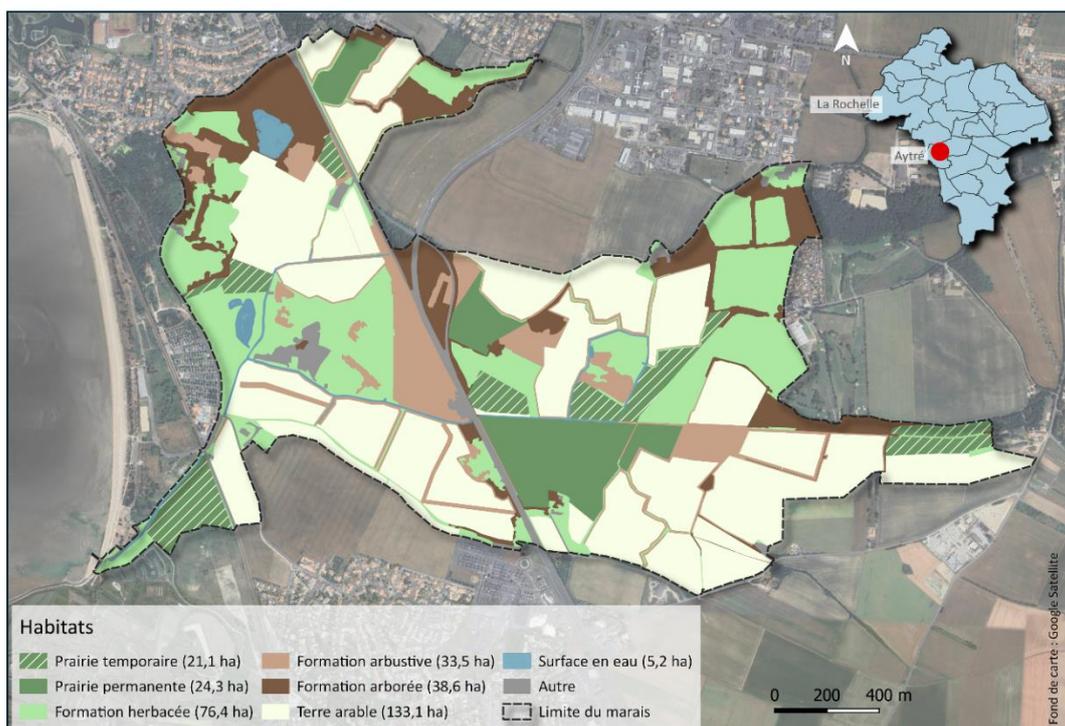


Figure 29 : Les habitats en carbone vert du marais d’Aytré et leur surface (Carteron, 2024).
Source des données : CORINE Land Cover, 2018 ; RPG, 2021 ; Ville de La Rochelle, 2024

II.4. La capacité de séquestration par les marais : des résultats variés

Le détail de la séquestration de carbone par habitat par marais est présent en annexe 9. Le marais d’Aytré est le seul marais émetteur de carbone sur les quatre sites d’études, avec une émission moyenne de $223,21 \text{ tC.an}^{-1}$ (fig. 30). A l’inverse, le marais d’Yves, avec une séquestration d’environ 175 tC.an^{-1} , est celui qui stocke chaque année le plus de carbone. En revanche, en ramenant ces niveaux de séquestration par hectare (fig. 31), il s’agit du marais de Pampin qui séquestre le plus de carbone annuellement, avec environ $1,6 \text{ tC.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$. Le marais de Tasdon avant restauration est celui qui en séquestre le moins et le marais d’Aytré en émet à hauteur de $0,7 \text{ tC.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$. Ainsi, le marais de Pampin est le plus efficace, mais sa faible superficie n’en fait pas un espace qui séquestre beaucoup. A l’inverse, le marais d’Yves est moins efficace, mais son importante superficie lui confère la capacité de séquestrer une grande quantité de carbone chaque année.

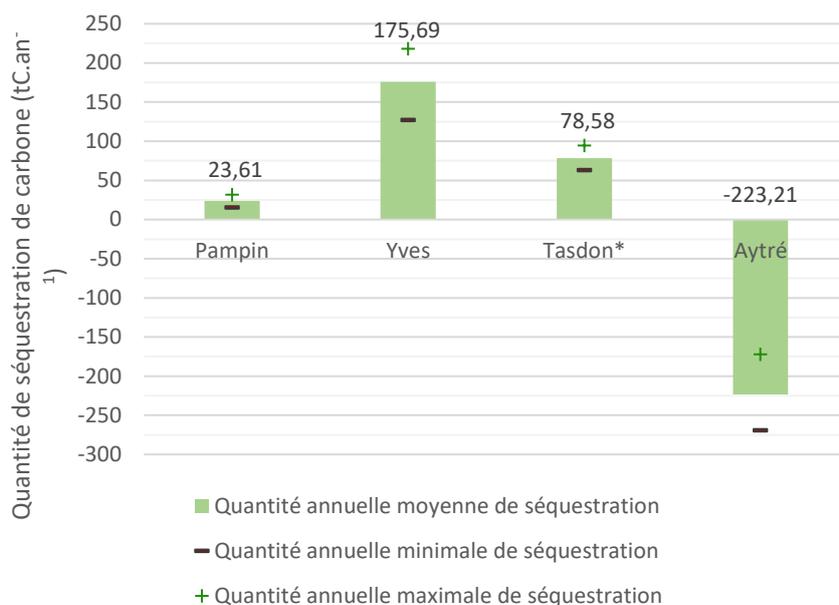


Figure 30 : Quantité moyenne, minimale et maximale de carbone séquestrée/émise chaque année par les quatre marais étudiés (Carteron, 2024).

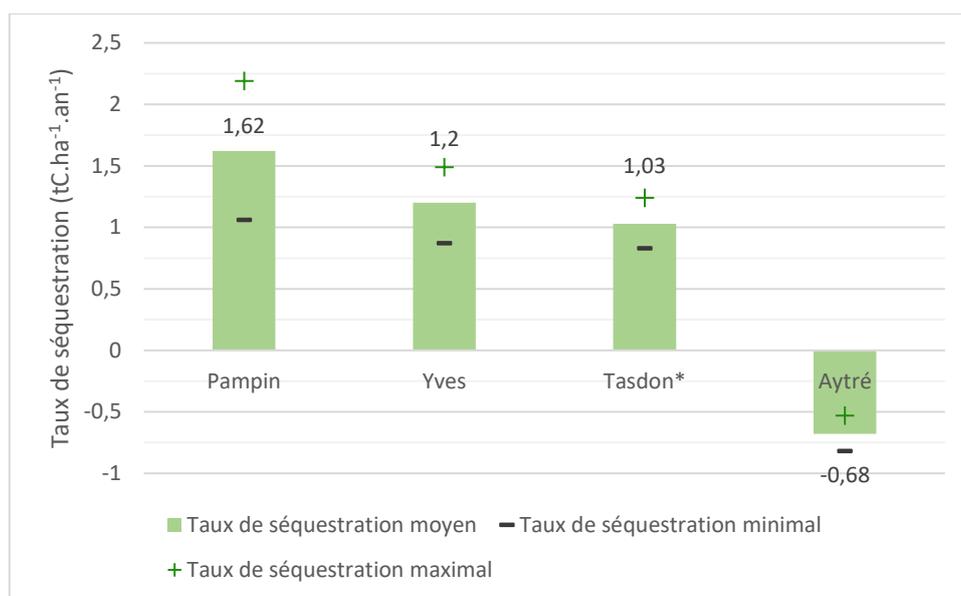


Figure 31 : Séquestration de carbone par hectare et par an par les quatre marais étudiés (Carteron, 2024).

*Tasdon avant restauration

La figure 32 montre l'importance du rôle des formations herbacées dans la séquestration du carbone, qui représentent 50% de la séquestration annuelle de carbone sur l'ensemble des quatre sites d'étude. Viennent ensuite les formations arbustives et arborées avec 15% chacune. Il y a ainsi un fort déséquilibre des habitats, puisque seuls trois d'entre eux (formations herbacées, arbustives et arborées) représentent 80% de la séquestration de carbone annuelle des quatre sites. Les roselières, qui est le type qui a la plus importante capacité de carbone par hectare, représentent 10% de la séquestration annuelle des marais malgré sa faible superficie totale (2% de la surface CV).

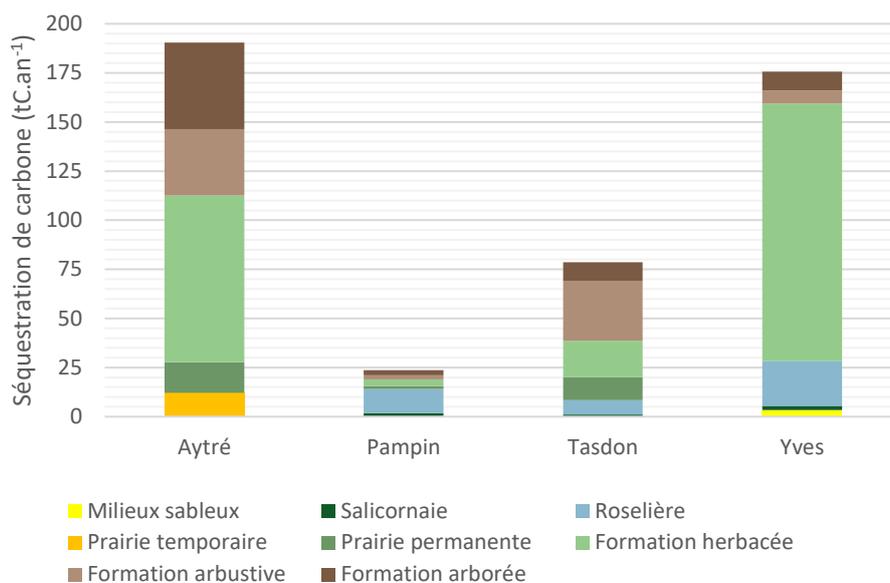


Figure 32 : Séquestration annuelle de carbone de chaque marais en fonction des habitats (Carteron, 2024).

Les émissions du marais d'Aytré n'ont pas été prises en compte afin de ne comparer que les capacités de séquestration.

Cette figure montre aussi la capacité de séquestration du marais d'Aytré lorsque les terres arables ne sont pas incluses. Cette capacité est due d'une part à son importante superficie en carbone vert (327 ha), mais aussi à la part importante de formations herbacées et d'espèces ligneuses.

Au total, les trois marais saumâtres séquestrent donc presque 280 tC.an^{-1} , soit environ $3,85 \text{ tC.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$. Cette estimation monte à près de 470 tC.an^{-1} lorsque la capacité de séquestration de carbone du marais d'Aytré est ajoutée, mais redescend à 55 tC.an^{-1} lorsque sa valeur d'émission due aux terres arables est aussi prise en compte. Ces résultats confirment l'hypothèse qu'un marais agricole émet du carbone au lieu d'en séquestrer. Ils confirment également le fait qu'en plus des puits de carbone bleu que représentent leurs surfaces en eau, la végétation des marais saumâtres est elle aussi un puits de carbone.

III. Discussion

III.1. L'importance relative des marais maritimes dans l'objectif de neutralité carbone LRTZC et au-delà

III.1.1. Analyse des résultats généraux

Il est considéré qu'en moyenne, les marais maritimes séquestrent entre 2 et 8 tC.ha⁻¹.an⁻¹ (Pendleton *et al.*, 2012). La moyenne de séquestration de carbone sur les trois marais saumâtres (1,28 tC.ha⁻¹.an⁻¹), bien que légèrement en dessous des estimations, ne semble donc pas improbable. La légère différence pourrait s'expliquer en premier lieu par l'incertitude liées aux données, mais surtout par le fait que les surfaces en eau ne soient pas intégrées dans ce chiffre, ce qui pourrait le faire largement augmenter. Il est en effet important de rappeler que tous les chiffres qui ont été donnés font fi du carbone bleu, qui représente tout de même 16% de la surface totale. Ces valeurs de carbone bleu font l'objet d'une étude en cours par des chercheurs du LIENSs, qui ont réalisé des carottages au sein des bassins (par exemple à Tasdon), ce qui permettra à l'avenir d'attribuer une valeur de séquestration globale à l'ensemble du marais, afin de conjuguer carbone vert et carbone bleu.

III.1.2. Le poids des quatre sites d'étude dans l'objectif de neutralité carbone de la CDA

En 2019, selon l'ADEME, les émissions totales de carbone de l'agglomération de La Rochelle s'élevaient à 1,9 million de tonnes de CO₂ équivalent, soit environ 513 000 tC.an⁻¹ (Agglomération La Rochelle, 2019)¹⁵. Les quatre marais étudiés (sans prendre en compte la part des émissions d'Aytré liées aux terres arables, mais uniquement sa capacité de séquestration) permettent de séquestrer 0,1% des émissions de la CDA. Ils séquestrent par exemple l'équivalent de 0,3% des émissions de l'agglomération en termes de mobilité (fret et transport de personnes) et 0,6% des émissions liées aux activités (industrie, tertiaire, agriculture).

En 2040, le projet LRTZC a pour objectif que les puits de carbone de l'agglomération puissent séquestrer 305 000 tCO₂eq.an⁻¹, soit 82 350 tC.an⁻¹. Ainsi, la capacité de séquestration de Tasdon, Yves, Pampin et Aytré (toujours sans prendre en compte l'émission des terres arables) permettrait de participer à hauteur de 0,6% à cet objectif.

Bien que ces chiffres paraissent assez faibles, il faut cependant noter que ces quatre sites d'étude ne représentent que 6% de la surface carbone vert de l'ensemble des marais de la CDA, qui s'élève à 7334 ha. Cette surface n'est aussi elle-même qu'une portion de la surface de l'ensemble des puits de carbone de la CDA. En effet, l'agglomération regorge aussi d'herbiers marins, de prés salés, etc. qui ont une capacité de séquestration plus importante que les marais maritimes. Ainsi, bien que les sites étudiés ne séquestrent qu'une faible part des émissions, leur protection et la conservation de leur bon état écologique est nécessaire. Il est aujourd'hui primordial de ne pas les urbaniser ni les détruire. En effet, un marais en mauvais état peut être source de carbone, notamment de méthane, ce qui peut amplifier les émissions de carbone au lieu de les atténuer.

III.1.3. Le poids des marais par rapport aux émissions de carbone d'un Français moyen

Il est estimé qu'en 2021, un Français moyen a émis 8,9tCO₂eq sur l'année, soit environ 2,4 tC.an⁻¹. A la lumière des résultats obtenus précédemment, il est possible de dire que la végétation des trois marais saumâtres permettrait de compenser les émissions de 115 Français moyens. Ce chiffre est éloigné de

¹⁵ La neutralité carbone – Agglomération La Rochelle
URL : <https://www.agglo-larochelle.fr/-/la-neutralite-carbone> [consulté le 05 juin 2024]

la volonté de neutralité carbone de la CDA de La Rochelle, mais s'il est étendu à l'ensemble des marais et des zones humides en général de l'agglomération, il pourrait avoir une importance significative dans la capacité de séquestration de carbone totale. Il ne faut néanmoins pas négliger le rôle inverse des marais doux agricoles, comme le montre Aytré, qui fait passer le chiffre de séquestration de carbone de la végétation des sites d'étude de 277 tC.an⁻¹ à 54 tC.an⁻¹, soit de la compensation d'émission de carbone de 115 habitants à 27.

III.1.4. Le marais d'Aytré et l'objectif 4 pour 1000

L'initiative « 4 pour 1000 sur les sols pour la sécurité alimentaire et le climat », lancée en 2015 lors de la Conférence des parties sur le changement climatique à Paris (Bamière *et al.*, 2020), estime qu'augmenter de 0,4% le stock de carbone des sols agricoles permettrait de neutraliser l'augmentation annuelle de CO₂ dans l'atmosphère¹⁶. Cela reviendra à stocker 0,31 tC.ha⁻¹.an⁻¹ en plus de ce qui est déjà stocké. Dans le marais d'Aytré, cela reviendra donc à séquestrer 0,89 tC.ha⁻¹.an⁻¹ au lieu des 0,58 tC.ha⁻¹.an⁻¹ qu'il séquestre aujourd'hui. Cela serait possible en plantant d'autres haies entre les cultures ou en pratiquant l'agroforesterie, par exemple (Méty *et al.*, 2013). En effet, en termes d'émissions pures, Aytré relâche chaque année 413 tC, mais en séquestre 190. La séquestration compense donc la moitié des émissions des terres arables. Cela montre que la présence de haies et d'arbres dans les systèmes agricoles est efficace pour limiter les émissions de CO₂ des cultures.

III.2. Les limites de la méthodologie

III.2.1. Les limites de la dichotomie vert/bleu

La méthodologie employée se heurte à plusieurs limites. La première et la plus importante est la distinction des différents types de carbone. Lorsque des sites bien distincts tels que les forêts ou les océans sont étudiés, il est simple de leur attribuer un type de carbone : vert pour une forêt, bleu pour l'océan. En revanche, sur les écotones, les écosystèmes de transition entre deux milieux, la distinction est bien plus floue. Les marais étant des zones partiellement immergées, avec des niveaux d'eau qui fluctuent fortement en fonction des marées, de la pluviométrie, des saisons, etc., il y est ainsi bien plus difficile de distinguer les milieux en carbone vert des milieux en carbone bleu. C'est l'une des principales difficultés qui a été rencontrée pour réaliser la typologie. Un bassin recouvert entièrement de renoncules est-il toujours considéré comme carbone bleu pour sa dimension aquatique ou carbone vert pour sa dimension végétale ? Est-ce toujours le phytoplancton dans l'eau qui capte le plus de carbone ou la végétation en surface ?

L'exemple peut aussi être pris dans le cas du marais d'Yves qui, selon les précipitations, peut être en grande partie submergé une partie de l'année. Ces zones inondées la moitié de l'année sont-elles considérées comme des zones en eau ou des zones terrestres végétalisées ?

Cette question est la problématique majeure qui a émergé du stage et à laquelle aucune réponse n'a été trouvée à l'heure actuelle.

III.2.2. La fiabilité et la précision des données

Une deuxième limite à laquelle s'est heurtée la méthodologie est la fiabilité des données. Les données récoltées dans la bibliographie internationale n'ont pas toujours été réalisées dans des milieux exactement identiques à ceux étudiés à La Rochelle. De même la réalisation d'une typologie qui

¹⁶ INRAE – Stocker 4 pour 1000 de carbone dans les sols : le potentiel en France
URL : <https://www.inrae.fr/actualites/stocker-4-1-000-carbone-sols-potentiel-france>

regroupe plusieurs espèces entraîne une perte de précision dans les données, d'autant plus que les valeurs de séquestration obtenues n'ont été obtenues que pour quelques espèces de chaque type catégorisé. Par exemple, dans la catégorie « formation arbustive », seule une valeur pour les tamaris a été trouvée, or la typologie regroupe une dizaine d'autres espèces, qui peuvent potentiellement séquestrer plus ou moins de carbone qu'un tamaris. Les moyennes de séquestration de carbone ne sont donc pas nécessairement d'une grande fiabilité.

La donnée d'émission de carbone concernant les terres arables ($3,11 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$) est notamment à prendre avec beaucoup de précaution. Ce chiffre, fourni par la FAO (Food and Agriculture Organization), est une moyenne à l'échelle nationale. Ce chiffre prend donc en compte des terres en agriculture autant extensive qu'intensive, des open-fields aux petites parcelles bocagères. Ce chiffre n'est donc pas forcément très représentatif des pratiques culturelles d'Aytré. Bien qu'il y ait beaucoup d'études sur la captation et les stocks de carbone par les sols agricoles, les chiffres de séquestration se font rares. La chambre d'agriculture a récemment réalisé une étude (Abiven, 2023) sur le sujet sur le territoire de l'Aunis (CDA de La Rochelle, Communauté de Communes (CDC) Aunis Atlantique et CDC Aunis Sud) dont Aytré fait partie, mais la question de la séquestration ou de l'émission du carbone séquestré n'a pas été traitée. L'unique valeur qui en ressort est qu'il y a un déstockage annuel de $0,43 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$ des sols agricoles.

D'autre part, les cartographies d'habitats utilisées, notamment sur Yves, peuvent être source d'imprécisions. Par exemple, la cartographie d'Yves a été réalisée en 2012, néanmoins la végétation peut changer très rapidement, il est donc possible qu'elle ne soit plus à jour aujourd'hui. D'autant plus qu'elle a été réalisée juste après la tempête Xynthia de 2010, qui a pu bouleverser sur plusieurs années la répartition de la végétation.

Ainsi, la précision des données peut être légitimement questionnée. D'un autre côté, la question de la nécessité de la précision se pose. C'est ce qui a fait l'objet du troisième questionnement majeur de la méthodologie.

III.2.3. Le manque d'une cartographie des habitats à l'échelle nationale

Les cartographies d'habitats utilisées (sur Yves et Tasdon) ont été réalisées soit par un bureau d'étude, soit par les gestionnaires des espaces naturels. Or, selon les réalisateurs, les cartographies d'habitats répondent à des normes différentes et ne sont donc pas universelles, tant dans leur contenu que dans leur symbolologie, puisqu'elles s'appuient sur des typologies d'habitats qui peuvent différer. En effet, il n'existe pas, à l'échelle de la France, de cartographie précise des habitats des espaces naturels avec une typologie universelle. CLC et l'OCSGE ne sont pas assez précis et le RPG n'est pas toujours complet. Ce manque d'une cartographie universelle empêche, ou du moins limite fortement, la diffusion de l'étude sur d'autres territoires, notamment sur les sites où aucune cartographie des habitats n'existe. En effet, la typologie réalisée ici ne peut s'appliquer qu'uniquement si le territoire possède une cartographie de ses habitats suffisamment précise.

III.2.4. Quelle nécessité de la précision ?

L'un des premiers questionnements qui s'est posé lors de l'établissement de la typologie a été le niveau de précision de cette typologie. Était-il nécessaire d'atteindre une précision très fine, ou une typologie assez englobante pouvait être suffisante ? Le choix d'une précision très fine a rapidement été écarté du fait de l'indisponibilité des valeurs de séquestration pour chaque espèce, par exemple. Une précision intermédiaire a donc été choisie, en regroupant les espèces entre elles, mais en conservant des catégories suffisamment fines. La question s'est notamment posée sur le marais d'Aytré, où deux sources de données pour les cartographies d'habitats étaient disponibles : CLC et le RPG. Le RPG est

plus précis que CLC, avec le détail de la culture sur chaque parcelle. Néanmoins, les parcelles sont en rotation, ce qui signifie que la culture qui est présente une année donnée ne sera pas la même l'année suivante. Ainsi, en se basant sur le RPG et en attribuant une valeur de séquestration de carbone sur chaque parcelle en fonction de la culture qui y est présente, les résultats seront erronés l'année suivante. CLC, en revanche, en étant moins précise, permet de réaliser une étude qui restera juste sur le temps long, puisqu'elle catégorise sous un même type l'ensemble des terres arables.

III.2.5. La pérennité des résultats

Les marais sont des milieux qui peuvent évoluer rapidement, notamment dans un contexte de changement climatique. Par exemple, Yves et Pampin sont des marais qui se salinisent conséquemment à l'élévation de la mer. Ils pourraient, sur une échelle de temps relativement courte, se transformer en prés salés, milieux qui séquestrent beaucoup plus de carbone, et rendre cette étude partiellement obsolète. Le phénomène est déjà observable sur Pampin, où les roselières à Phragmites ont perdu plusieurs mètres carrés en quelques années, remplacées par la salicorne. Ainsi toutes les roselières cartographiées cette année pourraient être largement réduites d'ici quelques années.

III.3. Solutions et perspectives

III.3.1. Solutions

Des solutions existent pour pallier les limites soulevées précédemment. Afin de remédier à la problématique de la couleur du carbone, il serait possible de ne plus faire cette distinction carbone bleu/carbone vert et de parler de séquestration de carbone dans les sols ou dans les sédiments par les habitats/milieux. Une autre solution serait de créer une nouvelle catégorie pour les milieux d'interface tels que les marais côtiers, ou les zones humides végétalisées de manière plus générale. Cela reviendra néanmoins à démultiplier les catégories, ce qui peut être contre-productif.

Une solution qui peut être apportée pour pallier le manque de précision des données serait de réaliser des mesures directement sur les sites d'étude et sur les habitats de la typologie où les valeurs sont les plus incertaines (comme les salicornaires par exemple, où les valeurs de séquestration sont issues de milieux plus secs que le climat rochelais). Cela pourrait se faire par une campagne de carottages, par exemple par les chercheurs du LIENSs, au sein des marais afin d'obtenir une valeur de séquestration de carbone par type d'habitat.

Enfin, pour régler la problématique de l'obsolescence de l'étude menée, il pourrait être intéressant de réaliser des modélisations sur ce que pourraient devenir les marais en réponse au changement climatique en cours et à venir. Cela permettrait d'obtenir des données spéculatives de séquestration de carbone des marais et ainsi permettre une meilleure capacité d'adaptation au changement climatique.

III.3.2. Perspectives

Ce travail constitue une première approche exploratoire et a permis de mettre en place une méthodologie applicable sur les autres marais de la CDA. Il mène donc à de nombreuses perspectives. Il serait d'abord intéressant d'appliquer à ces marais des valeurs de séquestration de carbone des zones en eau afin d'avoir une valeur de séquestration de carbone sur la totalité du marais, comprenant surface en eau et surface végétalisée. Ces données sont déjà en cours de traitement par les chercheurs du LIENSs.

Une réflexion sur la végétation hydrophyte et hygrophile serait aussi à mener, afin d'établir si l'entité qui séquestre le carbone est l'eau via la dissolution ou le phytoplancton, la végétation qui y pousse, ou les deux. Une hypothèse serait de prendre en compte le recouvrement en végétation de la surface en eau. Un bassin entièrement recouvert de scirpes, par exemple, ne permet potentiellement plus au phytoplancton de se développer du fait du manque d'apport lumière dans l'eau. La principale source de séquestration de carbone serait donc les scirpes et non le bassin en lui-même. Il s'agirait donc d'un habitat de carbone vert.

Ensuite, il serait pertinent d'étendre la méthodologie à l'ensemble des marais de la CDA, ce qui permettrait d'obtenir une capacité de séquestration globale à l'échelle de l'agglomération. En effet, les marais étudiés lors du stage sont représentatifs des autres marais de la CDA. La végétation y est similaire, la typologie réalisée peut donc s'y appliquer. La première étape peut être d'étudier Tasdon après restauration, afin d'analyser les bénéfices qu'apporte la renaturation d'un milieu naturel dans une ville. Il faudrait avant cela pouvoir cartographier l'ensemble des surfaces CV (selon la classification réalisée ici) et CB de l'agglomération. Cela serait une avancée pour le projet LRTZC car ferait avancer les connaissances sur la séquestration de l'ensemble des marais du territoire et donc les autres leviers à améliorer ou mettre en œuvre pour atteindre la neutralité carbone. Par ailleurs, ces données devraient être utilisées dans les bases de données des outils numériques de l'agglomération de La Rochelle, en complément des données CB qui sont déjà connues ou en cours de traitement.

CONCLUSION

Pour conclure, la méthodologie mise en place et appliquée a pu démontrer que les marais saumâtres de la CDA sont des puits de carbone par leur végétation. Ils participent donc bel et bien à l'objectif de neutralité carbone du projet LRTZC, bien que dans une moindre mesure. Cette capacité de séquestration de carbone est cependant atténuée par les marais doux agricoles qui, eux, émettent plus de carbone qu'ils n'en séquestrent. Cette méthode s'est également heurtée à plusieurs limites, notamment le manque de données et la distinction carbone bleu/carbone vert. L'étude du CV au sein des marais est assez innovante, car ils sont plus souvent traités sous le prisme du CB. C'est pourquoi les données de séquestration sont rares. Néanmoins, en étant améliorée et validée par des experts du sujet, la méthodologie pourrait être répliquée sur d'autres territoires similaires. Les données acquises et les cartographies réalisées seront également remobilisées par la CDA dans une base de données des outils numériques de l'agglomération. Cette étude montre aussi qu'il est primordial de préserver les zones humides, notamment les marais, qui jouent un rôle majeur dans la séquestration du carbone et l'atténuation du changement climatique. Le stage a ainsi ouvert des perspectives sur l'étude du carbone vert dans les marais de l'agglomération rochelaise et laisse place à de futures études sur le sujet.

BIBLIOGRAPHIE

Abiven F. (2023) Déploiement de la démarche ABC'Terre sur le SCoT de l'Aunis. Chambre d'agriculture interdépartementale Charente-Maritime Deux-Sèvres Rapport final, 38p.

Afonso M. (2023) Analyse des typologies et surfaces des milieux de carbone bleu de l'Agglomération de La Rochelle. Rapport final, 24p.

Alonso I., Weston K., Gregg, R., Morecroft M. (2012) Carbon storage by habitat : Review of the evidence of the impacts of management decisions and condition of carbon stores and sources. Natural England Research Reports, 43 p.

Baize D. (2018) Guide des analyses en pédologie. Ed. Quae, Paris, 328p.

Bamière L., Pellerin S., Launay C. Martin R., Schiavo M. *et al.* (2020) Stocker du carbone dans les sols français, quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Rapport scientifique de l'étude, INRA, France, 540 p.

Baustian M., Stagg C., Perry C., Moss L., Carruthers T., Mead A. (2017) Relationships between salinity and short-term soil carbon accumulation rates from marsh types across a landscape in the Mississippi River Delta. *Wetlands*, 37, pp. 313-324.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s13157-016-0871-3>

Basile-Doelsch I., Balesdent J., Pellerin S. (2020) Reviews and syntheses: The mechanisms underlying carbon storage in soil. *Biogeosciences*, 17, pp. 5223-5242.

DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-17-5223-2020>

Bourque P.A. (2010) Le cycle du carbone. Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Québec.

URL : <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s3/cycle.carbone.html>

Brix H., Sorrell B.K., Lorenzen B. (2001) Are phragmites-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases ?, *Aquatic Botany*, 69(2-4), pp. 313-324.

DOI : [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(01\)00145-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(01)00145-0)

Bu N.S., Qu J.F., Li G., Zhao B., Zhang R.J., Fang C.M. (2015) Reclamation of coastal salt marshes promoted carbon loss from previously sequestered soil carbon pool. *Ecological Engineering*, 81, pp. 335-339.

Buczko U., Jurasinski G., Glatzel S., Karsten S. (2022) Blue carbon in coastal phragmites wetlands along the southern Baltic Sea. *Estuaries and Coasts*, 45, pp. 2274-2282.

DOI : <https://doi.org/10.1007/s12237-022-01085-7>

Cahyana D., Mulyanto B. (2024) A simple definition of soil. *Soil Security*, 16.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2024.100146>

Chmura G., Anisfeld S., Cahoon D., Lynch J. (2003) Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4).

DOI : <https://doi.org/10.1029/2002GB001917>

Commissariat général au développement durable (2019) EFESE – La séquestration de carbone par les écosystèmes français. Ed. La documentation Française, Collect. Théma Analyse, 102 p.

Devillers P., Devillers-Terschuren J., Ledant J.P. & coll. (1991) CORINE biotopes manual. Habitats of the European community. Data specifications, part 2. European Commission, Luxembourg, 300p.

Dittman S., Bestland E., Davies R., Stirling E. (2016) Carbon burial and sediment accumulation rates in coastal marsh sediment on Adelaide's northern shores. Report for the Adelaide and Mount Lofty Ranges NRM Board, Flinders University, Adelaide.

URL : https://www.researchgate.net/profile/Richard-Davies-19/publication/301684901_Carbon_burial_and_sediment_accumulation_rates_in_coastal_saltmarsh_sediments_on_Adelaide's_north_shores/links/5c7734e5a6fdcc4715a149ba/Carbon-burial-and-sediment-accumulation-rates-in-coastal-saltmarsh-sediments-on-Adelaides-north-shores.pdf

Duarte C., Losada I., Hendriks I., Mazarrasa I., Marbà N. (2013). The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change*, 3(11), pp. 961-968.

DOI : 10.1038/nclimate1970

Elsy-Quirk T., Seliskar D., Sommerfield C., Gallagher J. (2011) Salt marsh carbon pool distribution in a Mid-Atlantic lagoon, USA: sea level rise implications. *Wetlands*, 31(1), pp. 87–99.

DOI : 10.1007/s13157-010-0139-2

Gac A., Dollé J.B., Le Gall A., Klumpp K., Tallec T., Mousset J., Eglin T., Bispo A., Peyraud J.L., Faverdin P. (2020) Le stockage de carbone par les prairies : une voie d'atténuation de l'impact de l'élevage herbivore sur l'effet de serre. Institut de l'élevage – INRA, 12p.

DOI : hal-02824535

González-Alcaraz E., Jiménez-Cárceles F., Párraga I., Maria-Cervantes A., Delgado M., Álvarez-Rogel J. (2012) Storage of organic carbon, nitrogen and phosphorus in the soil-plant system of *Phragmites australis* stands from a eutrophicated Mediterranean salt marsh. *Geoderma*, 185, pp. 61–72.

DOI : <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.03.019>

Guzman J., Al-Kaisi M. (2010) Soil carbon dynamics and carbon budget of newly reconstructed tall-grass prairies in South Central Iowa. *Journal of Environmental Quality*, 39(1), pp. 136-146.

DOI : <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0063>

Hendriks K., Gubbay S., Arets E., Janssen J. (2020) Carbon storage in European ecosystems; a quick scan for terrestrial and marine EUNIS habitat types. Wageningen Environmental Research, internal report, 66 p.

Hopkinson C., Cai W.J., Hu X. (2012) Carbon sequestration in wetland dominated coastal systems – a global sink of rapidly diminishing magnitude. *Carbon and nitrogen cycles*, 4(2), pp. 186-194.

IPCC (2007) Bilan 2007 des changements climatiques : rapport de synthèse. Sous la direction de Pachauri R., Genève, 103p.

IPCC (2021) Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.

Jones M., Sowerby A., Williams D., Jones R. (2008) Factors controlling soil development in sand dunes: evidence from a coastal dune soil chronosequence. *Plant and Soil*, 307(1), pp. 219-234.

DOI : 10.1007/s11104-008-9601-9

Jurasinski G., Janssen M., Voss M., Böttcher M., Brede M., Burchard H., Forster S., Gosch L., Gräwe U., Gründling-Pfaff S., Haider F., Ibenthal M., Karow N., Karsten U., Kreuzburg M., Lange X., Leinweber P., Massmann G., Ptak T., Rezanezhad F., Rehder G., Romoth K., Schade H., Schubert H., Schulz-Vigt H., Sokolova I., Strehse R., Unger V., Westphal J., Lennartz B. (2018) Understanding the coastal ecocline : Assessing sea-land interactions at non-tidal, low-lying coasts through interdisciplinary research. *Front. Mar. Sci.*, 5(342).

Kalita S., Karlsson Potter H., Weih M., Baum C., Nordberg A., Hansson P.A. (2021) Soil Carbon Modelling in Salix Biomass Plantations: Variety Determines Carbon Sequestration and Climate Impacts. *Forests*, 12(11), pp. 1529.

DOI : <https://doi.org/10.3390/f12111529>

Kennedy H., Beggins J., Duarte C., Fourqurean J., Holmer M., Marbà N., Middelburg J. (2010) Seagrass sediments as a global carbon sink: isotopic constraints. *Global Biogeochemical Cycles*, 24(4).

DOI: <https://doi.org/10.1029/2010GB003848>

Launay C., Constantin J., Chlebowski F., Houot S., Graux A.I., Klumpp K., Martin R., Mary B., Pellerin S., Therond O. (2021) Estimating the carbon storage potential and greenhouse gas emissions of French arable cropland using high-resolution modeling. *Global Change Biology*, 27(8), pp. 1645-1661.

DOI : <https://doi.org/10.1111/gcb.15512>

Lawrence B., Zedler J. (2013) Carbon storage by *Carex stricta* Tussocks: a restorable ecosystem service ? *Wetlands*, 33, pp. 483-493.

DOI : <https://doi.org/10.1007/s13157-013-0405-1>

McLeod E., Chmura G.L., Bouillon S., Salm R., Bjork M., Duarte C.M., Lovelock C.E., Schlesinger W.H., Silliman B.R. (2011) A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and Environment*, 9, pp. 552-560.

DOI: <https://doi.org/10.1890/110004>

Mcowen C., Weatherdon L., Van Bochove J.W., Sullivan E., Blyth S., Zockler C., Stanwell-Smith D., Kingston N., Martin C., Spalding M., Fletcher S. (2017) A global map of saltmarshes. *Biodiversity Data Journal*, 5.

DOI : <https://doi.org/10.3897/BDJ.5.e11764>

Métay A., Butault J.P., Bamière L. (2013) Développer l'agroforesterie dans les parcelles cultivées et les prairies pour favoriser le stockage du carbone dans le sol et dans la biomasse végétale. *INRA*, 38 p.

Nellemann C., Corcoran E., Duarte C.M., Valdés L., De Young C., Fonseca L., Grimsditch G. (2009) Blue carbon. A rapid response assessment. GRID-Arendal: United Nations Environment Programme, 80p. ISBN: 978-82-7701-060-1.

ONU (1971) Convention relative aux zones humides d'importance internationale particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau.

URL : https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/current_convention_text_f.pdf

Ouyang X., Lee S. (2014) Updated estimates of carbon accumulation rates in coastal marsh sediments. *Biogeosciences*, 11, pp. 5057-5071.

DOI : 10.5194/bg-11-5057-2014

Pastore M., Megonigal P., Langley A. (2016) Elevated CO₂ and nitrogen addition accelerate net carbon gain in a brackish marsh. *Biochemistry*, 1(133), pp. 73-87.
DOI : [10.1007/s10533-017-0312-2](https://doi.org/10.1007/s10533-017-0312-2)

Pendleton L., Donato D., Murray B., Crooks S., Jenkins W., Sifleet S., Craft C., Fourqurean J., Kauffman J., Marbà N., Megonigal P., Pidgeon E., Herr D., Gordon D., Baldera A. (2012) Estimating global « Blue Carbon » emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems. *Plos One*.
DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043542>

Poulton P., Johnston J., Macdonald A., White R., Powlson D. (2018). Major limitations to achieving “4 per 1000” increases in soil organic carbon stock in temperate regions: Evidence from long-term experiments at Rothamsted Research, United Kingdom. *Global Change Biology*, 24(6), pp. 2563-2584.
DOI : <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.14066>

Pratolongo P., Leonardi N., Kirby J., Plater A. (2019). Temperate coastal wetlands: morphology, sediment processes, and plant communities. *Coastal Wetlands*, pp. 105-152.
DOI : <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63893-9.00003-4>

Pugh T., Lindeskog M., Smith B., Calle L., Poulter B., Arneeth A., Haverd V. (2018) Role of forest regrowth in global sink dynamics. *PNAS*, 116(10), pp. 4382-4387.
DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1810512116>

Rapin A., Fontanel F., Chambaud F. (2021) Fonctions hydrologique, biogéochimique et biologique des zones humides : éléments de connaissance. Collection « eau & connaissances », Agence de l’eau Rhône Méditerranée Corse, 198 p.

Reichle, D.E. (2020) The global carbon cycle and climate change. Scaling ecological energetics from organism to the biosphere. Edition Elsevier Inc, 360p.
URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128202449/the-global-carbon-cycle-and-climate-change>

Rice C. (2005) Carbon cycle in soils – Dynamics and management *in* Encyclopedia of soils in the environment, Hillel D., New York, pp. 164-170.
DOI : [10.1016/b0-12-348530-4/00183-1](https://doi.org/10.1016/b0-12-348530-4/00183-1)

Royal Society (2021) The carbon cycle: better understanding carbon-climate feedback and reducing future risks. *Climate change: science and solutions, briefing 7*, 11p.

Scott D., Frail-Gauthier J, Mudie P. (2014) Chapter 2: Physical aspects – geological, oceanic and climatic conditions *in* Coastal wetlands of the world – Geology, ecology, distribution and application. Cambridge University Press, pp. 5-14.

Selosse M.A. (2021) L’origine du monde – Une histoire naturelle du sol à l’intention de ceux qui le piétinent. Ed. Actes Sud, 469p.

Serrano O., Kelleway J., Lovelock C., Lavery P. (2019) Chapter 28 – Conservation of blue carbon ecosystems for climate change mitigation and adaptation. *In* Coastal wetlands, Perillo G., Wolanski E., Cahoon D., Hopkinson C. (eds.), pp. 965–996, Amsterdam, Oxford, and Cambridge.
DOI : <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63893-9.00028-9>

Sousa A., Santos D., Ferreira da Silva E., Sousa L., Cleary D., Soares A., Lillebo A. (2017) « Blue carbon » and nutrient stocks of salt marshes at temperate coastal lagoon (Ria de Aveiro, Portugal). *Scientific Reports*, 7(41225).

Soussana J.F., Tallec T., Blanfort V. (2010) Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *Animal: An International Journal of Animal Bioscience*, 4(3), pp. 334–350.
DOI : [10.1017/S1751731109990784](https://doi.org/10.1017/S1751731109990784).

Tang J., Ye S., Chen X., Yang H., Sun X., Wang F., Wen Q., Chen S. (2018) Coastal blue carbon: Concept, study method, and the application to ecological restoration. *Science China Earth Sciences*, 61, pp. 637-646.
DOI : [10.1007/s11430-017-9181-x](https://doi.org/10.1007/s11430-017-9181-x)

Villa J., 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, pp. 115-28.
DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.037>

Wellock M., Rafique R., LaPerle C., Peichl M, Kiely G. (2014) Changes in ecosystem carbon stocks in a grassland ash (*Fraxinus excelsior*) afforestation chronosequence in Ireland. *Journal of plant ecology*, 7(5), pp. 429-438.
DOI : <https://doi.org/10.1093/jpe/rtt060>

Więski K., Guo H., Craft C., Pennings S. (2010) Ecosystem functions of tidal fresh, brackish and salt marshes on the Georgia coast. *Estuaries and coasts*, 33, pp. 161-169.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12237-009-9230-4>

SITOGRAPHIE

Agglomération La Rochelle. La neutralité carbone.

URL : <https://www.agglo-larochelle.fr/-/la-neutralite-carbone> [consulté le 05 juin 2024]

Amiel J., Brusset H. (2009) Carbone. Encyclopaedia Universalis.

URL : <https://www.universalis-edu.com/encyclopedie/carbone/> [consulté le 16 mai 2024]

Code de l'Environnement (version en vigueur au 9 juin 2024) Article L.210-1 « Eaux et milieux aquatiques et marins. Légifrance. URL : <https://www.legifrance.gouv.fr/>

Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (2020) Définition du bon état écologique.

URL : <https://dcsmm.milieumarinfrance.fr/A-propos/Definition-du-bon-etat-ecologique> [consulté le 31 mai 2024]

FAOSTAT (2021) Climate change : agrifood systems emissions.

URL : <https://www.fao.org/faostat/en/#data>

IGN. Géoservice.

URL : <https://geoservices.ign.fr/>

Infiniment Charentes. Le marais de Pampin.

URL : <https://www.infiniment-charentes.com/fiche-sit/marais-de-pampin-5740473/#truncate> [consulté le 19 mai 2024]

INPN. Classification des habitats CORINE Biotopes.

URL : https://inpn.mnhn.fr/habitat/cd_typo/22 [consulté le 30 avril 2024]

INRAE (2019) Stocker 4 pour 1000 de carbone dans les sols : le potentiel en France.

URL : <https://www.inrae.fr/actualites/stocker-4-1-000-carbone-sols-potentiel-france> [consulté le 05 mai 2024]

Institut Pierre-Simon Laplace. Le cycle du carbone, Sorbonne Université.

URL : <https://cycleducarbone.ipsl.jussieu.fr/index.php/visiteurs/2012-06-11-15-23-06.html> [consulté le 17 mai 2024]

Joyard J., Sommeria J. (2024) Un cycle du carbone perturbé par les activités humaines. Encyclopédie de l'Environnement.

URL : <https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/cycle-du-carbone/> [consulté le 17 mai 2024]

La Rochelle Territoire Zéro Carbone. Objectif zéro carbone.

URL : <https://www.larochelle-zero-carbone.fr/notre-defi/objectif-zero-carbone> [consulté le 06 juin 2024]

LPO. Réserve Naturelle du marais d'Yves.

URL : <https://marais.yves.reserves-naturelles.org/visiter-la-reserve/supports-pedagogiques/> [consulté le 19 mai 2024]

Morot-Gaudry J.F., Joyard J. (2020) Le chemin du carbone dans la photosynthèse. Encyclopédie de l'environnement.

URL : <https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/chemin-carbone-photosynthese/>
[Consulté le 17 mai 2024]

Office Français de la Biodiversité. Centre de ressources milieux humides

URL : <https://www.zones-humides.org/typologie-sdage> [consulté le 26 mai 2024]

Parlement Européen (2019) Qu'est-ce que la neutralité carbone et comment l'atteindre d'ici 2050 ?

URL : <https://www.europarl.europa.eu/topics/fr/article/20190926STO62270/qu-est-ce-que-la-neutralite-carbone-et-comment-l-atteindre-d-ici-2050> [consulté le 25 mai 2024]

Ramsar (2021) Les zones humides et le captage du carbone. Convention sur les zones humides.

URL : https://www.ramsar.org/sites/default/files/ramsar_50_factsheet_carbon_capture_fr_v7.pdf
[consulté le 18 mai 2024]

UNFCCC. L'accord de Paris.

URL : <https://unfccc.int/fr/a-propos-des-ndcs/l-accord-de-paris> [consulté le 19 mai 2024]

Ville de La Rochelle. Le marais de Tasdon.

URL : <https://www.larochelle.fr/action-municipale/ville-durable/marais-de-tasdon> [consulté le 19 mai 2024]

Zimmer G. (2023) Coopérative Carbone La Rochelle : carbone bleu, vert et marron.

URL : <https://larochelle.cooperativecarbone.fr/carbone-bleu-vert-et-marron/> [consulté le 26 mai 2024]

Table des matières

Remerciements.....	2
Sommaire.....	3
Liste des acronymes et des unités de mesure.....	4
INTRODUCTION.....	5
PARTIE 1 : LA SEQUESTRATION DU CARBONE DANS LES SOLS PAR LES VEGETAUX DES MARAIS CÔTIERS – ETAT DES CONNAISSANCES INTERNATIONALES.....	7
I. Le cycle global du carbone à la base de toute forme de vie	7
I.1. Le cycle du carbone : à l’origine du monde (Selosse, 2021)	7
I.1.1. <i>Le carbone : élément primordial de la vie.....</i>	<i>7</i>
I.1.2. <i>La notion de réservoirs de carbone.....</i>	<i>7</i>
I.1.3. <i>Le cycle court du carbone : le rôle essentiel de la photosynthèse.....</i>	<i>8</i>
I.1.4. <i>Le temps de résidence du carbone.....</i>	<i>9</i>
I.2. La séquestration du carbone dans le sol : transition entre biosphère et lithosphère, entre cycle court et cycle long.....	9
I.2.1. <i>Une définition du sol.....</i>	<i>9</i>
I.2.2. <i>Les processus d’altération de la matière organique.....</i>	<i>10</i>
I.2.3. <i>Le cas particulier des zones humides.....</i>	<i>11</i>
I.2.4. <i>Les facteurs d’influence sur la teneur en carbone du sol.....</i>	<i>11</i>
I.2.5. <i>Les couleurs du carbone.....</i>	<i>12</i>
I.3. Un cycle dérégulé par les émissions de CO ₂ anthropiques.....	13
I.3.1. <i>Des émissions de GES en hausse permanente.....</i>	<i>13</i>
I.3.2. <i>Le rôle majeur du changement d’usage des sols.....</i>	<i>13</i>
II. Une séquestration du carbone inégale à l’échelle des biomes.....	14
II.1. Les puits de carbone : un mécanisme de séquestration de carbone.....	14
II.1.1. <i>Des puits de carbone multiples.....</i>	<i>14</i>
II.1.2. <i>Les zones humides côtières : des puits de carbone particulièrement efficaces...15</i>	<i>15</i>
II.1.3. <i>Des facteurs d’explication multiples.....</i>	<i>17</i>
II.2. Les puits de carbone : des milieux importants mais fortement menacés.....	17
II.2.1. <i>Des milieux dégradés.....</i>	<i>17</i>
II.2.2. <i>Des milieux encore très méconnus.....</i>	<i>18</i>
II.3. Les marais maritimes : une part importante de la capacité de séquestration de carbone des zones humides.....	19
II.3.1. <i>Une définition floue et des dynamiques complexes.....</i>	<i>19</i>
II.3.2. <i>Un gradient de salinité qui organise la végétation.....</i>	<i>20</i>
II.3.3. <i>Une capacité de séquestration dépendante d’une multitude de facteurs.....</i>	<i>21</i>
II.3.4. <i>Des milieux fortement impactés par les sociétés.....</i>	<i>21</i>

PARTIE 2 : ELABORATION ET MISE EN ŒUVRE D'UNE METHODE DE CARTOGRAPHIE DES HABITATS DES MARAIS MARITIMES ET D'ATTRIBUTION D'UNE VALEUR DE SEQUESTRATION DE CARBONE A CES HABITATS.....	23
I. Matériel et méthode.....	23
I.1. Acquisition des données.....	23
I.1.1. Localisation et description des sites d'études.....	23
I.1.2. Identification des milieux « carbone bleu » et « carbone vert » et recensement de la végétation présente sur site.....	28
I.1.3. Recherche bibliographique des valeurs de séquestration de carbone.....	30
I.2. Pré-traitement et traitement des données.....	31
I.2.1. Elaboration d'une typologie et cartographie des habitats.....	31
I.2.3. Le calcul des taux de séquestration de carbone par habitat et réalisation de graphiques.....	32
I.3. Une fiabilité des données à questionner.....	32
II. Résultats.....	34
II.1. Description de la typologie établie.....	34
II.2 Des capacités de séquestration de carbone inégales selon les habitats.....	35
II.3 Une répartition des végétaux très disparate en fonction des marais.....	36
II.3.1. Le marais de Pampin.....	37
II.3.2. Le marais d'Yves.....	37
II.3.3. Le marais de Tasdon.....	38
II.3.4. Le marais d'Aytré.....	39
II.4 La capacité de séquestration par les marais : des résultats variés.....	40
III. Discussion.....	43
III.1 L'importance relative des marais maritimes dans l'objectif de neutralité carbone LRTZC et au-delà.....	43
III.1.1. Analyse des résultats généraux.....	43
III.1.2. Le poids des quatre sites d'étude dans l'objectif de neutralité carbone de la CDA.....	43
III.1.3. Le poids des marais par rapport aux émissions de carbone d'un Français moyen.....	43
III.1.4. Le marais d'Aytré et l'objectif 4 pour 1000.....	44
III.2. Les limites de la méthodologie.....	44
III.2.1. Les limites de la dichotomie vert/bleu.....	44
III.2.2. La fiabilité et la précision des données.....	44
III.2.3. Le manque d'une cartographie des habitats à l'échelle nationale.....	45
III.2.4. Quelle nécessité de la précision ?.....	45
III.2.5. La pérennité des résultats.....	46
III.3. Solutions et perspectives.....	46
III.3.1. Solutions.....	46
III.3.2. Perspectives.....	46
CONCLUSION.....	47
Bibliographie et sitographie.....	48
Table des figures et des tableaux.....	54

Table des figures

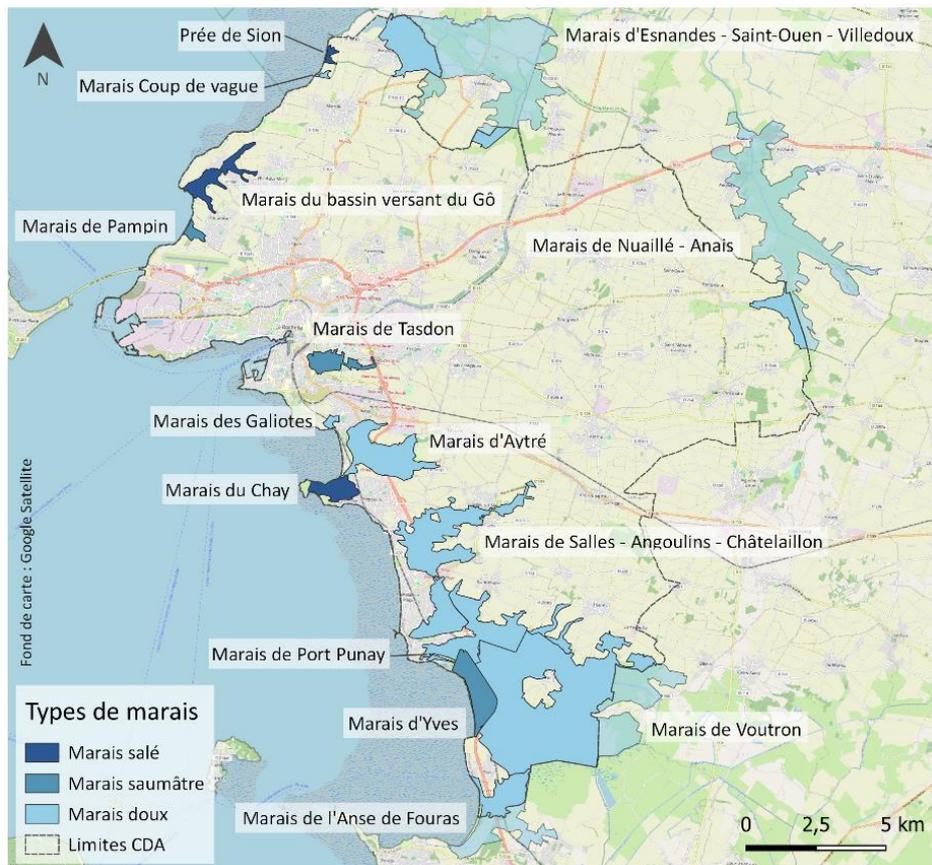
Figure 1. Les ambitions de réduction des émissions de CO ₂ du projet LRTZC (Agglomération La Rochelle, 2019).....	5
Figure 2. Localisation de La Rochelle et des communes de la CDA (Carteron, 2024).....	6
Figure 3. Schématisation simplifiée des réservoirs, des stocks et des flux de carbone (Carteron, 2024 d'après McLeod <i>et al.</i> , 2011).....	8
Figure 4. Processus de stockage et de séquestration du carbone dans le sol par les végétaux et les micro-organismes du sol (Carteron, 2024).....	10
Figure 5. Distribution de l'âge du carbone en fonction de la profondeur du sol (Basile-Doelsch <i>et al.</i> , 2020).....	12
Figure 6. Concentration en CO ₂ dans l'atmosphère globale depuis 1960 (courbe de Keeling) depuis le Mauna Loa Observatory à Hawaï (Royal Society, 2021).....	13
Figure 7. Superficie occupée par les différents écosystèmes terrestres et stock de carbone total dans la biomasse aérienne et souterraine (Carteron, 2024, d'après Villa & Bernal, 2018).....	14
Figure 8. Distribution mondiale des herbiers marins, des marais maritimes et des mangroves (Pendleton <i>et al.</i> , 2012).....	15
Figure 9. Séquestration du carbone dans les sols sur le long terme par les grands biomes terrestres (Carteron, 2024, d'après McLeod <i>et al.</i> , 2011).....	16
Figure 10. Perte de la partie aérienne des zones humides côtières depuis 1940 (Serrano <i>et al.</i> , 2019).....	18
Figure 11. Répartition mondiale des marais côtiers (Nellemann <i>et al.</i> , 2009).....	19
Figure 12. Un marais inondé par les eaux pluviales, ici dans le marais d'Yves en Charente-Maritime (Chauveau, 2024).....	20
Figure 13. Hauteur de la végétation (A) et stock de carbone dans le sol (B) d'un marais de Géorgie, Etats-Unis (Carteron, 2024, d'après Więski <i>et al.</i> , 2010).....	20
Figure 14. Déroulé méthodologique suivi pour répondre à la problématique (Carteron, 2024).....	23
Figure 15. Localisation des quatre sites d'études au sein de la CDA de La Rochelle (Carteron, 2024).....	24
Figure 16. Dynamiques hydrologiques du marais de Pampin (Carteron, 2024).....	25
Figure 17. Localisation et périmètre du marais d'Yves (Carteron, 2024).....	26
Figure 18. Le marais d'Yves sur sa terrestre (A) et sa partie côtière (B) (Chauveau, 2024).....	26

Figure 19. Dynamiques hydrologiques du marais de Tasdon (Carteron, 2024).....	27
Figure 20. Partie Est du marais de Tasdon (Carteron, 2024).....	27
Figure 21. Image satellite et périmètre du marais d'Aytré (Carteron, 2024).....	28
Figure 22. Exemple de cartographie d'habitat utilisée sur Yves et extrait de sa légende (Terrisse, LPO, 2012).....	29
Figure 23. Capture d'écran du tableur utilisé pour enregistrer l'ensemble des données bibliographiques selon la typologie et pour réaliser les moyennes (Carteron, 2024).....	32
Figure 24. Séquestration de carbone par habitat (Carteron, 2024).....	35
Figure 25. Comparaison des surfaces CV, CB et surface totale des marais (Carteron, 2024).....	36
Figure 26. Les habitats en carbone vert du marais de Pampin et leur surface (Carteron, 2024).....	37
Figure 27. Les habitats en carbone vert du marais d'Yves et leur surface (Carteron, 2024).....	38
Figure 28. Les habitats en carbone vert du marais de Tasdon avant sa restauration et leur surface (Carteron, 2024).....	39
Figure 29. Les habitats en carbone vert du marais d'Aytré et leur surface (Carteron, 2024).....	40
Figure 30. Quantité moyenne, minimale et maximale de carbone séquestrée/émise chaque année par les quatre marais étudiés (Carteron, 2024).....	40
Figure 31. Séquestration de carbone par hectare et par an par les quatre marais étudiés (Carteron, 2024).....	41
Figure 32. Séquestration annuelle de carbone de chaque marais en fonction des habitats (Carteron, 2024).....	41

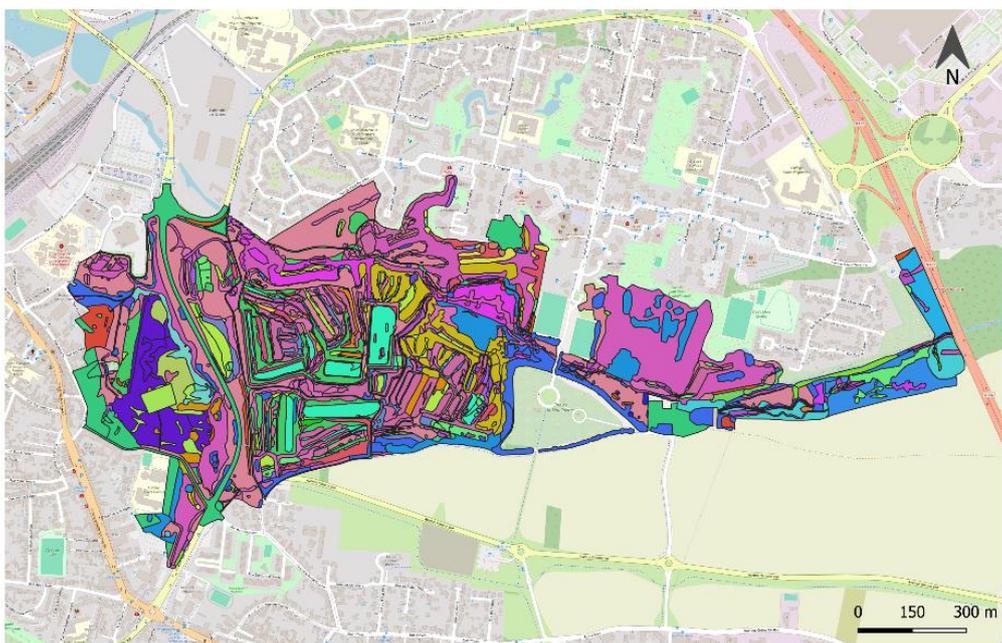
Table des tableaux

Tableau 1 : Superficie, perte et taux de séquestration de carbone des écosystèmes côtiers végétalisés (Carteron, 2024, d'après Duarte <i>et al.</i> , 2013).....	17
Tableau 2 : Caractéristiques des sites d'étude (Carteron, 2024).....	24
Tableau 3 : Extrait de la clé de lecture de la typologie CORINE Biotopes (Carteron, 2024, d'après CORINE Biotopes, 2024).....	30
Tableau 4 : Exemple d'enregistrement d'une donnée de séquestration de carbone (Carteron, 2024).	31
Tableau 5 : Typologie des habitats des quatre marais étudiés et espèces correspondantes (Carteron, 2024).....	34
Tableau 6 : Séquestration de carbone par habitat (Carteron, 2024).....	35

Annexes



Annexe 1 : Localisation des différents types de marais de la CDA de La Rochelle (Carteron, 2024).
Source des données : Ville de La Rochelle, 2023



- Arbres exotiques (Platane, Sophora japonica)
- Arbustes alloctones (Buddleja, Baccharis, Renouée du japon)
- Aulnaie-Frênaie relictuelle - Frêne linéaire
- Bois de feuillus divers
- Bois de peupliers
- Bois riverain d'Orme
- Bosquets xérophiles
- Eau douce
- Eau saumâtre à salée sans végétation
- Forêt humide marécageuse à Carex pendula
- Forêt humide marécageuse à Carex pendula x Fourrés à Punellier et Aubepine
- Formation à Dittrichia viscosa
- Formation halophile dominée par Juncus gerardii = prairie subhalophile thermo-atlantique
- Fourrés à Baccharis et Tamaris
- Fourrés à Baccharis, Aubépine et Prunellier
- Fourrés à Prunus spinosa et Rubus sp ou Ligustrum vulgare
- Friche à Sisymbrium officinale, Dipsacus fullonum et Carduus
- Friche haute pré-forestière
- Fruticées à Pyracantha coccinea, Cotoneaster sp.
- Gazons pionniers d'annuelles halophiles et végétation pionnière à Salicornia
- Gazons pionniers d'annuelles halophiles et végétation pionnières à Salicornia x Vase sans végétation
- Groupement rudéral à Urtica sp
- Groupement xérophyle à Helichrysum
- Groupements à Jussie (Ludwigia grandiflora/peploïdes)
- Haie de Tamaris gallica
- Haie Jardinière
- Haut schorre à Elymus pycnanthus
- Herbiers de Lagarosiphon major
- Jeunes boisements de Frêne sur Prairie humide à Juncus inflexus
- Mégaphorbiaie
- Mosaïque de cariçaie à Carex divisa et de prairies à Elymus pycnanthus
- Mosaïque de prairie sèche et de fruticées xérophiles exotiques (Pyracantha, Cotoneaster, Dittrichia viscosa)
- Mosaïque Fourrés à Prunus spinosa et Rubus sp X Ronciers à Rubus sp X Haie de Tamaris gallica X Saule
- Pelouse xérophile sur remblais
- Phragmitaie
- Potager
- Prairie calcaire diversifiée du Mésobromion
- Prairie calcaire dominée par le Brachypode penné
- Prairie humide à Juncus inflexus
- Prairie mésophile dense de l'Arrhenatherion
- Prairie mésophile graminéenne du Cynosurion cristati
- Prés à Aster tripolium x Vase sans végétation
- Prés salés à Atriplex prostrata et Chenopodium chenopoïdes x Vase sans végétation
- Prés salés à Juncus maritimus
- Prés salés atlantiques à Aster tripolium
- Ronciers à Rubus sp
- Routes chemins zones urbanisées
- Saulaie riveraine à Salix sp
- Secteur hygrophile à Jonc
- Vase sans végétation
- Végétation de vases saumâtres à Atriplex prostrata et Chenopodium chenopoïdes
- Végétation de vases saumâtres à Polypogon monspeliensis

Annexe 2 : Cartographie des habitats utilisée sur le marais de Tasdon (SCE, 2018).

- "Marmite érosion" : sables nus + pionnières de dune embryonnaire
- "Marmite érosion" : sables nus/mare saumâtre/taches de *Salicornia ramosissima*
- "Marmite" d'érosion de *Xyinthia* : sables nus + peuplts. d'*Elymus* sp.
- 1er replat cordon galets + huitres (0 sable) : grp. à *Atriplex* pros.-*Beta*-*Matricaria*-*Salsola* kali-*Cakile* (R)...
- Agropyraie (*E.gr.repens*) très dense dans dépression, avec *Althaea*. Pas de nitro.-rudérales
- Agropyraie à *E. rarenosus* avec rudérales X taches relic. de pelouse à *Ephedra*-*Carex arenaria*
- Agropyraie à *E.pycnanthus* sur digue ostréicole (avec *Matricaria maritima* CC)
- Agropyraie à *E.pycnanthus*, *Juncus acutus* sur bri sableux rudéralisés, avec *L.dodartii*, *Beta*,...
- Agropyraie dense à *Elymus hybride*
- Agropyraie saumâtre à *E.pycnanthus*, *Juncus acutus*, *Limonium dodartii* (CC), *Agrostis stolonifera*...
- Alopecuro-Juncetum (moitié Est) et *Carici-Lolietum* (Ouest) sans clairières à thérophytes *Xyinthia*
- Alopecuro-Juncetum gerardii à *Trifolium resupinatum* X clairières à *Salsola soda*-*Polypogon maritimus*-*Sali* ra
- Alopecuro-Juncetum ras, faciès à *Polypogon maritimus* avec taches de *Sali.ramo*-*Atriplex* prost. post-*Xynt*.
- Alopecuro-Juncetum trifolietosum resupinati
- Alopecuro-Juncetum trifolietosum resupinati perturbé (ancienne culture)
- Alopecuro-Juncetum trifolietosum resupinati X clairières *Xyinthia* à *Polypogon maritimus*-*Trifolium resupinatum*
- Alopecuro-Juncetum trifolietosum resupinati X clairières *Xyinthia* à *Polypogon maritimus*-*Trifolium* sp.pl.
- Alopecuro-Juncetum typique dans rigole, avec *Polypogon maritimus* abondant
- Arrhénathéraie-élymaie xéro. sur sable + bri et galets, avec *Inula conyza* CC et *Dispacus*
- Bande boisée : A : *Fraxinus* 1. a : *Salix atro*. 3 (moribonds), *Prunus spinosa* + végé. nitro. à *Galium aparine*
- Bande boisée : A : *Salix alba*-*Populus alba*; a : *Sambucus nigra*-*Salix atro*, *Ulmus*, *Rubus*
- Bande boisée à *Salix alba*, *Populus alba*. a : *Sambucus nigra*, *Salix atrocinerea*, *Ulmus*, *Rubus*...
- Bas-marais "halophilisé" à *Scirpus holo*-*Juncus maritimus*
- Bas-marais (haut niveau) de lède : *Scirpus holo*., *Ononis repens*, *Sonchus maritimus*, *Potentilla reptans*, *Agrostis stolo*.,
- Bas-marais arrière-dunaire haut niveau à *Scirpus holoschoenus* DO mais *Carex arenaria* C
- Bas-marais haut niveau à *Scirpus holo*., *Samolus*, *Trifolium repens*. Rudéralisé ++ : *Conyza*, *Echium*...
- Bas-marais haut niveau à *Scirpus holoschoenus*
- Bas-marais hn à *Scirpus holo*. "halophilisé" avec *Elymus pycnanthus*, *Limonium dodartii*
- Bâtiments + friche nitrophile-rudérale
- Bâtiments et abords
- Bordure de lagune à *Elymus pycnanthus*
- Bosquet de *Populus alba* et *Fraxinus*, très ouvert à strate H de bas-marais haut n., +- rudéralisée
- Cariçaie à *Carex riparia* + ceinture *Juncus acutus* et dépression à *Salicornia ramosissima*
- *Carici-Lolietum* rudéralisé (ancienne culture) avec *Ranunculus parviflorus*, *Hirschfeldia incana*, *Rubus*..
- *Carici-Lolietum* trifolietosum resupinati (*Polypogon maritimus* AC)
- *Carici-Lolietum* trifolietosum resupinati + 1 tache *Salicornia ramosissima*
- *Carici-Lolietum*/*Alopecuro-Juncetum*, faciès à *Hordeum secalinum* 4
- Ceinture à *Juncus maritimus* dense (5.5)
- chemins, digues et autres espaces intertiels
- Dépression : faciès pionnier post-*Xynt*. à *Samolus*, *Atriplex* pros., *Bolboschoenus*, du bas-marais
- Digue à *Elymus pycnanthus*
- Digue de lagune, à *elymus pycnanthus* + rudérales halophiles
- Digue de sable *Xyinthia* : grp. pionnier à *Glaucium*-*Salsola* kali-*Euphorbia paralias* + es. de friche xéro
- Digue SACOM
- Dune mobile à *Ammophila arenaria* (taux floraison Oyat < 10%)
- Eau dormante à taches de *Ranunculus* ss.g.*Batrachium* + nappes de *Characées*
- Eau saumâtre sans végétation
- Espace pique-nique aménagé : plantations *Eleagnus*, *Tamarix* x pelouse à *Cynodon dactylon*
- Faciès à *Althaea* dominante
- faciès à *Althaea* du *Carici-Lolietum* : *Althaea* 3, *J.gerardii* 3, *Hordeum secalinum*, *Cynodon*, *Festuca arundi*.
- faciès à *Althaea officinalis* de l'*Alopecuro-Juncetum*
- Faciès à *Ephedra distachya* dense
- Faciès à *Salix arenaria* du bas-marais (haut niveau) de lède
- Faciès mixte jonçaie maritime-*Althaea*
- Faciès très ouvert, bryo-lichénique à *Sedum* acre 3-4 (lapins ++)
- Forêt dunaire à *Fraxinus*-*Salix* très dégradée par *Xynt*. avec strate H envahie par nitro. des *Galio-Urticetea*
- Fourré bas à *Rubus*, *Ligustrum*, *Vitis* avec 1 *Populus alba* et quelques *Salix* encore vivants (*Xynt*.)
- Fourré dunaire de *Populus alba*
- Fourré mésophile sur bourrelet sableux : *Prunus spi.*, *Ligustrum*, *Tamarix gallica*, *Galium aparine*, *Asparagus*
- Fourré sur bourrelet sableux très ouvert-rudéralisé à *Ligustrum*, *Sambucus*, *Arctium*, *Cirsium*, *Galium* apa.
- Fourrés bas en nappe (hallier) à *Prunus spinosa*, *Rubus*, *Crataegus*, *Ligustrum*
- Fourrés dunaires à *Prunus*, *Ligustrum*, *Sambucus* + friche nitro. à *Galium aparine*, *Urtica*, *Solanum dulcamara*, *Brassica*
- Fourrés eutrophes
- Fourrés eutrophes à *Prunus*, *Crataegus*, *Sambucus*, *Rubus*, *Ligustrum* + 1 *Quercus robur* 5m haut
- Fourrés eutrophes sur (et en pied de) bourrelet sableux perturbé (talus SNCF) à *Salix atrocinerea*, *Prunus*, *Sambucus*, F
- Fourrés eutrophes sur bourrelet sableux : *Prunus spinosa*, *rubus*, *Solanum dulcamara*, *Ulmus*...
- Fourrés mésophiles eutrophes sur sable
- Fourrés mésophiles sur bourrelet sableux : *Prunus spi.*, *Ligustrum*, *Crataegus*, *Rubus*, *Sambucus nigra*..
- Fourrés mésophiles sur sable à *Prunus spinosa*...

- Friche nitrophile haute à Conium, Urtica, Arctium minus, Balotta foetida, Beta maritima...
- Friche nitrophile sur digue à Conium, Silybum, Brassica nigra, Matricaria maritima, Dipsacus...
- Friche nitrophile sur digues et remblais ostréicoles
- Friche nitrophile-rudérale xéro. à Hirschfeldia, Echium vulgare, Cynodon + taches de Rubus
- Friche sèche à Arrhenatherum, Elymus gr.repens, Hirschfeldia, Carduus, Dipsacus, Dactylis...
- Friche sèche sur bri sableux à Elymus gr.repens, Hirschfeldia, Eryngium, Carduus gr.tenui., Echium (les 2)...
- Friche xéro. à Hirschfeldia surexploitée lapins à : Anagallis, Arenaria lept., Verbascum virgatum, Inula (ros.)
- Friche xéro. nitrophile sur sables + galets à Hirschfeldia, Glaucium, Dipsacus, Beta...
- Friche xérophile sur galets et sables à Hirschfeldia, Carduus gr; tenui., Malva silvestris...
- Friche xérophile sur sables à Hirschfeldia, Carduus dans les trouées anciennes plantations
- Friche xérophile sur sables à Hirschfeldia, Carduus gr.tenui., Echium + tonsures à Erodium cicu, Arenaria l.
- Haie d'Ulmus minor
- Haie de Tamaris
- Haie de Tamaris sur digue
- haie de Tamaris très lacunaire (40% recouvrement)
- Haie de Tamarix gallica
- Haie lacunaire de Tamaris, avec Prunus spinosa
- Haie tamaris, ouverte, très eutrophe avec Sambucus, Bryonia + taches de Brassico-Carduetum
- Hallier de Prunus spinosa très déstructuré par Xynthia mais en plein dynamique
- Haut cordon de galets (+ sables) : Gpt. à Matricaria maritima, Beta maritima, Glaucium, Hirschfeldia...
- Hétérogène : roselière à J.maritimus-Phragmites-J.acutus-Bolboschoenus X bas-marais bas niveau à Samolus, Orchis
- Jonçaille à J.gerardii
- Jonçaille à J.gerardii avec taches de Salicornia ramo. + Polygogon monspeliensis, Centaurium tenuiflorum...
- Jonçaille à J.maritimus-J.acutus X clairières à Agro.stol., C.distans, les 2 Blackstonia, Samolus...
- Jonçaille à J.maritimus, J.acutus, Althaea, Carex cuprina
- Jonçaille maritime à Carex extensa (Carici extensae-Juncetu maritimi)
- Jonçaille maritime à Elymus X avec nitrophytes : Matricaria, Onopordon, Dispacus...
- Jonçaille maritime à Elymus X en mosaïque avec Agrostietalia psammophiles peu diversifiés
- Jonçaille maritime à J.maritimus 4, Althaea 2b, Carex divisa 3 (stérile), Cirsium arvense, Atriplex prostrata...
- Jonçaille maritime à J.maritimus, J.acutus + clairières à Salicornia ramo., Polygogon maritimus...
- Jonçaille maritime à Juncus maritimus, Althaea...
- Jonçaille maritime avec Elymus pycnanthus (Limonium dodartii CC sur bordures bassins)
- Jonçaille maritime de lède à J.maritimus 5, Phragmites 2b, Bolboschoenus +, Juncus acutus +, Samolus CC bordures
- Jonçaille maritime dense
- Jonçaille maritime physiognomique : J .maritimus, Elymus sp., Althaea +, Lythrum salicaria
- Jonçaille maritime saumâtre à Elymus sp (hybride ?)
- Jonçaille saumâtre à Juncus gerardii envahie par Elymus repens, Galium aparine
- Jonçaille saumâtre à Juncus gerardii, Elymus pycnanthus
- Jonçaille sur bri sableux à J.maritimus-J.acutus (avec Althaea, Scirpus holo., Dipsacus, Urtica...)
- Jonçaille-agropyraie (E.pycnanthus) avec Vicia gracilis, Limonium dodartii...
- Juncetum gerardii à Polygogon monspe.-Aster tripolium x taches de Salicornia ramosissima
- Lagune ostréicole avec Ruppia
- Lagune ostréicole sans végétation
- mare à Ranunculus baudotii
- mare de lède, sans végétation
- Mare permanente connectée au réseau, à Potamogeton pectinatus 4, R.baudotii 2b...
- mare profonde à Ranunculus baudotii + Bolboschoenus. Quelques pieds de Saarcocornia perennis !
- mare saumâtre à Ruppia/ ceintures à Elymus pycnanthus-J.acutus/à J.gerardii/taches de Salicornia ramo.
- mare saumâtre de lède dunaire, sans végétation (herbier P.pectinatus détruit par Xynt.)
- Mare saumâtre de lède sans végétation (Xynthia)
- Mare temporaire à Bolboschoenus maritimus + thérophytes subhalo : Crypsis, Polygogon, Salsola...
- mare temporaire à Bolboschoenus maritimus avec un peu de R.baudotii
- mare temporaire à Bolboschoenus maritimus-Sarcocornia perennis-Juncus gerardii, Juncus acutus...
- mare temporaire à Bolboschoenus maritimus-Sarcocornia perennis-Juncus gerardii, Salicornia ramosi...
- Mare temporaire à J.maritimus/Bolboschoenus/Phragmites. Rives exondées à Salicornia ramosi. (Xynthia)
- mare temporaire à Ranunculus baudotii
- mare temporaire à Ranunculus baudotii + ceinture à Bolboschoenus, Juncus gerardii, Salsola soda...
- mare temporaire à Ranunculus baudotii et ceinture amphibie à Juncus gerardii
- mare temporaire asséchée avec Polygogon maritimus...
- mare temporaire exondée à Bolboschoenus maritimus-Polygogon monspeliensis-Juncus gerardii
- mare temporaire exondée à Bolboschoenus, Juncus gerardii, Salicornia ramosi., Sarcocornia pere., Crypsis
- mares récentes, saumâtres, sans végétation
- Mosaïque : vases nues/jonçaille à J.gerardii, Polygogon monsp., Hordeum mari./taches Salic.ramo-Salsola sod.
- Mosaïque jonçaille à J.gerardii-C.divisa-Polygogon mari./jonçaille à J.maritimus, Phragmites, Bolboschoenus...
- Mosaïque pelouse sèche à Carex arenaria X bas-marais haut n. à Scirpus holo, rudéralisé ++
- Mosaïque sur digue : agropyraie rudérale X fourrés eutrophes à Sambucus-Salix X friche à Hirschfeldia
- Ormaie rudérale
- Ormaie rudérale (Ulmus graphiosés > 50%)
- Ormaie rudérale avec arbres adultes tous morts graphiosés + nbx drageons formant hallier

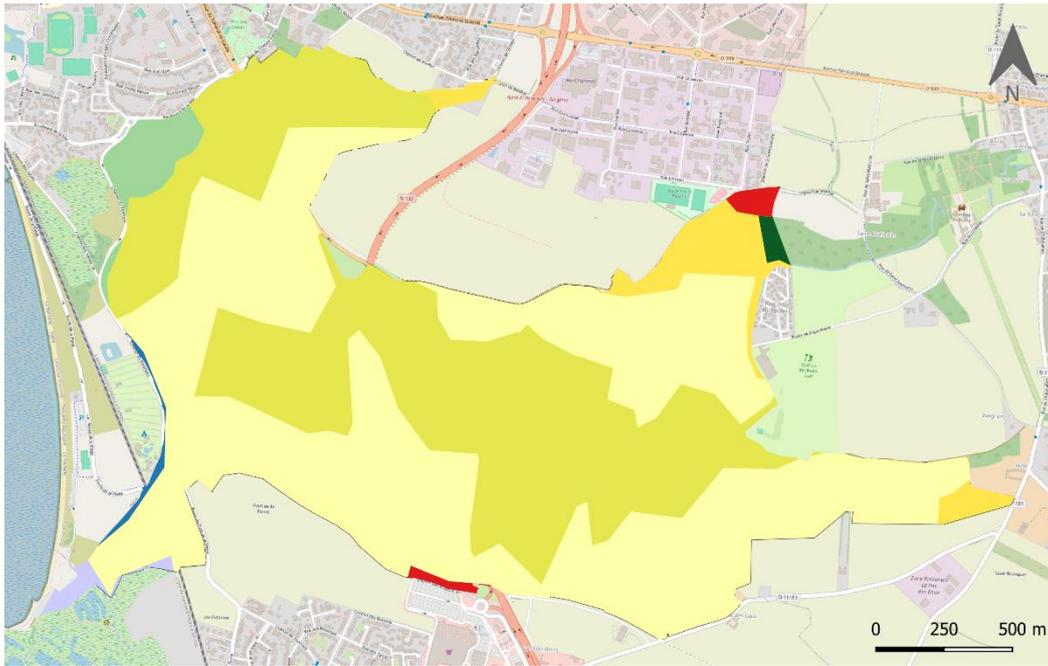
- Pelouse dunaire sèche très rudéralisée sur talus SNCF : Echium (les 2), Conyza, Lagurus, Carduus...
- Pelouse fixée à C.arenaria avec voile d'Euphorbia paralias (2b à 3) post-Xynthia
- Pelouse fixée à Ephedra-Carex dénudée par Xynthia (rec = 50%) avec nbx. thérophytes
- Pelouse mixte dense à Carex-Ephedra
- Pelouse mixte dense à Carex-Ephedra ou, en situation plus interne à Carex arenaria pur
- Pelouse psammophile à Carex divisa, Scirpus holoschoenus, Brachypodium, Cynodon, Eryngium, Sedum
- Pelouse rase sur sable, piétinée-rudéralisée (lapins, piétinement) avec Echium, Verbascum, Erodium..
- Pelouse sabl. humide à C.divisa, Agro.stol., Blackstonia imperf., Black.perf., Cynodon, Carex distans...
- Pelouse sablo. à Carex arenaria, Ononis repens, Carex liparocarpos et nbx. nitrophytes xéro.
- Pelouse sur bri sableux à Carex divisa-Scirpus holoschoenus, (Agrostietalia psammophiles)
- Pelouse sur sable à Sedum acre, C.arenaria, Euphorbia portl. très perturbée lapins (Matricaria, Echium...)
- Pelouse sur sables secs rudéralisés à Sedum acre, Eryngium, Centaurea aspera, Hypericum perforatum...
- Pelouse-ourlet sur bourrelet dunaire à : Carex divisa, Cynodon, Sedum acre, Trifolium campestre, L.dodartii
- Pelouses à Carex arenaria rudéralisée-salinisée par Xynthia
- Pelouses fixée à C.arenaria
- Phragmitaie de lède
- Phragmitaie de lède avec Atriplex prostrata, Holcus, bolboschoenus...
- Phragmitaie dense (en défens)
- Phragmitaie dense oligo-haline de lède avec un peu de Bolboschoenus
- Phragmitaie sèche plus ou moins rudéralisée
- Phragmitaie sèche, basse (110 cm) sur sables à/ Phragmites 4, Bolboschoenus 1, Elymus repens 1, Atriplex prostrata...
- Phragmitaie secondaire à Phragmites 5, Calystegia +, Typha angusti. +, Samolus...
- Phragmitaie sur sables
- Plan d'eau saumâtre (marmite d'érosion Xynthia)
- Prairie à Carex divisa-Cynodon-Lotus tenuis-Agrostis stolo. (Agrostietalia psammophiles)
- Prairie de lède à Carex divisa, C.distans, Atriplex prostata...(Xynthia)
- Prairie saumâtre à J.gerardii 5, Polypogon maritimus 2a, Althaea 1
- Prairie saumâtre à J.gerardii, Polypogon maritimus, P.monspeliensis, Samolus, Salicornia ramo, Suaeda mar.
- prairie subhalo à C.divisa-J.gerardii, faciès à Hordeum secalinum 4, Elymus repens, Lotus tenuis...
- prairie subhalo à C.divisa-J.gerardii, faciès à Hordeum secalinum, Elymus repens, Lotus tenuis...
- Prairie subhalo. à C.divisa-Cynodon X mégaph. à Althaea-Juncus maritimus
- Prairie sur sables à C.divisa, C.distans, Agro.stol., Cynodon, Holcus...
- Puccinellio-Sarcocornietum perennis spatial dense
- Roselière (pâturée) de lède à Juncus mari.-Phragmites X plages halo-nitro. à Salicornia ramo.-Suaeda mari
- Roselière mixte à Juncus maritimus-Bolboschoenus-Phragmites
- Sables nus
- Sables nus (érosion Xynthia) + pionnières de dune embryonnaire
- Sables nus en pied de ganivelles et digue : touffes éparses Euphorbia paralias (pas d'Elymus farctus)
- Salsotetum sodae spatial dense sur vases eutrophes exondées
- Saulaie destruct. Xynth à Salix atrocinerea X clairières de bas-marais haut niveau très rudéralisé
- Saulaie dunaire à Salix atrocinerea-Salix arenaria, moribonde (Xynthia) X taches de bas-marais
- Saulaie moribonde (Xynthia) X clairières à bas-marais hn/bn de lède
- Scirpaie maritime
- Scirpaie maritime à Bolboschoenus 4, Althaea, Holcus, Samolus, Pulicaria dysenterica, Phragmites. Les Salix sont morts
- Scirpaie maritime avec un peu de Phragmites
- Scirpaie maritime avec un peu de Phragmites + taches mégaph. à Althaea-Juncus maritimus
- Scirpaie maritime enclavée dans les tamaris
- Scirpaie maritime ou jonçaie maritime de dépression arrière-dunaire, oligo-halin
- Scirpaie maritime X jonçaie à J.gerardii + taches Saolsola soda sur vase nue
- Scirpaie-phragmitaie sèche sur sables
- Scirpaie maritime avec un peu de Phragmites + taches mégaph. à Althaea-Juncus maritimus
- Scirpaie maritime enclavée dans les tamaris
- Scirpaie maritime ou jonçaie maritime de dépression arrière-dunaire, oligo-halin
- Scirpaie maritime X jonçaie à J.gerardii + taches Saolsola soda sur vase nue
- Scirpaie-phragmitaie sèche sur sables
- Sous quelques Salix rescapés, strate H très nitrophile à Rubus caesius, Galium aparine, Holcus, Urtica...
- Strate H de l'ancienne saulaie morte à >95% : bas-marais hn, avec Holcus lanatus, Carex divisa ++ et nitro.
- Tache de pelouse dunaire sèche à Carex arenaria
- Talus cordon galets exposé mer : variante de 200 avec Crithmum AC, Eryngium campestre, Verbascum floc.
- Tamaris isolés
- Tonsures lapins à Anagallis arvensis, Matricaria + rosettes de Verbascum virgatum et d'Echium
- Transition jonçaie à J.maritimus-J.acutus/scirpaie maritime (disparition clairières herbacées à Agrostis...)
- Très hétérogène : prairie subhalo sur sables à J. gerardii-C.divisa + reliques du bas-marais originel à SH + thérophytes
- Zone de prélèvement de sable pour digue : très hétérogène sec/humide friche/thérophytes pionnières

Annexe 3 : Légende complète de la cartographie des habitats utilisée sur le marais d'Yves (Terrisse, LPO, 2012).



relevé A	R : 75 %	S habitat	relevé B	R : 100 %	S habitat	relevé C	R : 95 %	S habitat
10/10/19	S relevé 100 m2		10/10/19	S relevé 100 m2		10/10/19	S relevé 30 m2	
zone dépressionnaire			zone intermédiaire			zone Haute		
		ref photo			ref photo			ref photo
Taxons		dominance	Taxons		dominance	Taxons		dominance
juncus maritimus		3	juncus maritimus		R	Elytrigia acuta agg.		4
salicornia emerici		3	salicornia emerici		2	Phragmites australis		2
salicornia europea		2	salicornia europea		R	juncus maritimus		R
Festuca rubra littoralis		1	Puccinellia maritima		4	Cirsium		R
Bolboschoenus maritima		R	Polypogon maritima		1	Centaurium littoralis		i
			Salsola soda		R	Dipsacus fullonum		i
			Phragmites australis		2			
			Chenopodes chenopoïdes		R			
relevé E	R : 20 %	S habitat	relevé E'	R : 40 %	S habitat	relevé F	R : 100 %	S habitat
10/10/19	S relevé 10 m2		10/10/19	S relevé 10 m2		10/10/19	S relevé 25 m2	
Bords lagune			Bords lagune			Bossis pré salé		
		ref photo			ref photo			ref photo
Taxons		dominance	Taxons		dominance	Taxons		dominance
juncus maritimus		4	Frankenia laevis		2	Spergularia media		3
salicornia emerici		2	salicornia emerici		3	Atriplex prostrata		2
salicornia europea		R	salicornia europea		1	Salsola soda		1
Salsola soda		R	Salsola soda		2	Frankenia laevis		3
Atriplex prostrata		1	Sueda maritima		2	salicornia emerici		1
			juncus gerardii		1	Pannonicum tripolium		R
						Hordeum marinum		1
						Poacées		2

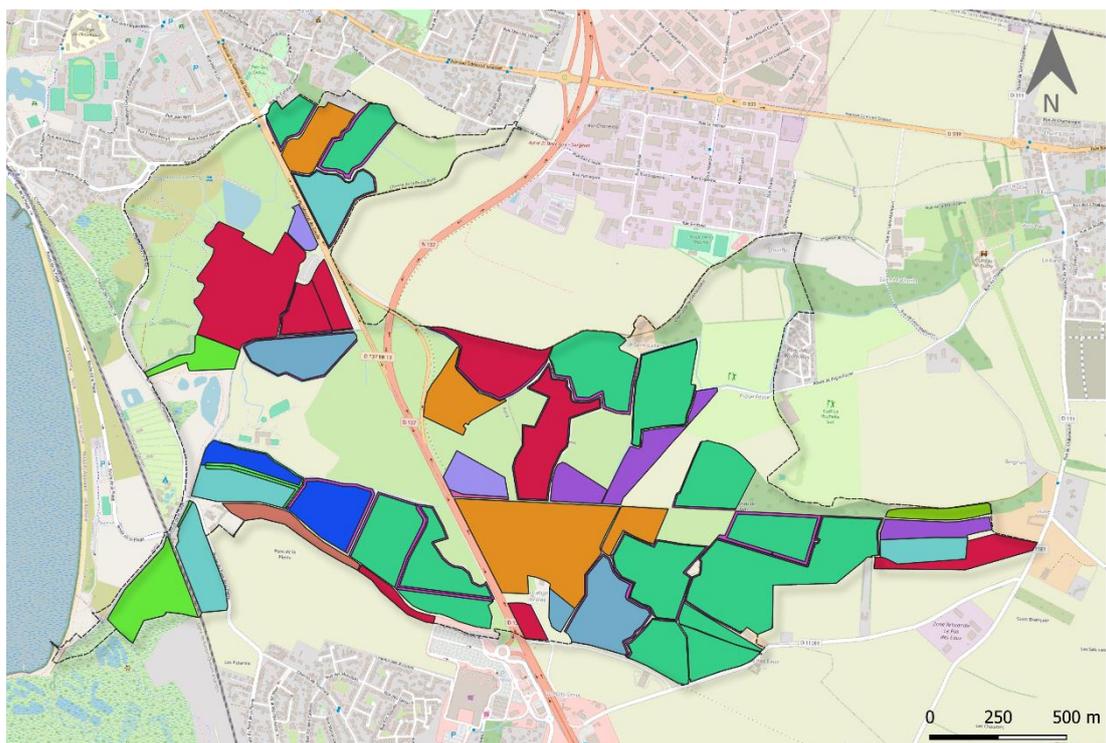
Annexe 4 : Extrait des relevés phytosociologiques du marais de Pampin (Ville de La Rochelle, 2019).



CLC_Marais_Aytré [15]

- 112 - Tissu urbain discontinu [2]
- 121 - Zones industrielles ou commerciales et installations publiques [2]
- 142 - Equipements sportifs et de loisirs [1]
- 211 - Terres arables hors périmètres d'irrigation [1]
- 231 - Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole [2]
- 242 - Systèmes culturaux et parcellaires complexes [3]
- 311 - Forêts de feuillus [1]
- 322 - Landes et broussailles [1]
- 331 - Plages, dunes et sable [1]
- 421 - Marais maritimes [1]

Annexe 5 : Données CORINE Land Cover pour le marais d'Aytré, chargées dans QGIS (Copernicus – Land monitoring service, 2018, URL : <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover>).



- ▼ **RPG_Marais_Aytre**
 - Autre prairie temporaire de 5 ans ou moins
 - Bande tampon
 - Blé tendre d'hiver
 - Bordure de champ
 - Fétuque de 5 ans ou moins
 - Féverole semée avant le 31/05
 - Jachère de 5 ans ou moins
 - Jachère de 6 ans ou plus
 - Maïs
 - Orge de printemps
 - Prairie en rotation longue (6 ans ou plus)
 - Prairie permanente - herbe prédominante (ressources fourragères ligneuses absentes ou peu présentes)
 - Surface agricole temporairement non exploitée
 - Tournesol

Annexe 6 : Registre Parcellaire Graphique du marais d'Aytré chargé dans QGIS (Géoservices, URL : <https://geoservices.ign.fr/rpg>)

Type de milieu	Description/Espèces présentes	Données disponibles			Calcul	Taux de séquestration carbone tC.ha.an	Min	Max
		Valeur biblio	Milieu étudié, pays	Source				
Milieux sableux	Sable nu, dune embryonnaire, Oyat, Euphorbia paralias	0,58 0,73	Dune sèche, Angleterre Dune humide, Angleterre	Jones et al. 2008 Jones et al. 2008	Moyenne des deux valeurs	0,66	0,58	0,73
Salicorniaie	Salicornia ramosissima , Salsolium, Sarcocornia , Gazons	0,62 1,37	Mélange de Sarcocornia et Soude en Australie (Adélaïde) Marais colonisé par Sarcocornia quinqueflora, Espagne	Dittman et al. 2016 Gonzalez-Alcaraz et al. 2012	Moyenne des deux valeurs	1,00	0,62	1,37
Roselière	Phragmite , roseaux, Atriplex, Holcus, Bolboschoenus	5,52 2,25	Marais à phragmites, Danemark Herbier dominé par phragmites, côte atlantique européenne	Brix et al., 2001 Hendriks et al., 2020	Moyenne des deux valeurs	3,89	2,25	5,52
Prairie temporaire	Prairie temporairement non exploitée, jachère de 6 ans ou plus, jachère de 5 ans ou moins, prairie à rotation longue	0,57 0,41 0,75	Prairie, France Prairie pâturée, Angleterre Prairie pâturée, France	Soussana et al. 2010 Poulton et al. 2018 Soussana et al. 2010	Moyenne des trois valeurs	0,58	0,41	0,75
Prairie permanente	Herbe dominante, Brachypode penné, Prairie calcaire, Prairie mésophile	0,82 0,45	Prairie humide, Prairie à herbe haute, Iowa (USA)	Alonso et al. 2012 Guzman et al. 2010	Moyenne des deux valeurs	0,64	0,45	0,82
Formation herbacée	Elymus , Althaea, Atriplex, Salsola, Matricaria, Ephedra, Carex , Juncus , Limonium, Agrostis, Arrhenatherum, Inula, Dispacus, Ononis, Sonchus, Potentilla, Agrostis, Brachypodium, Alopecuro, Lolietum, Trifolium, Polygona, Scirpus , Parapholis strigosa, Aster tripolium, Chenopodium chenopoides, Ludwigia, Urtica, Pelouse, Cynosurion cristati,	0,82 1,33 1,19	Prairies à Carex, haut midwest (USA) Jonçaille, Portugal Peuplements de joncs, côte atlantique nord	Lawrence et al. 2013 Sousa et al. 2017 Eisey-Quirk et al. 2011	Moyenne des trois valeurs	1,11	0,82	1,33
Formation arbustive	Prunus , Ligustrum, Crataegus, Rubus, Sambucus, Tamarix , Galium, Asparagus, Buddleja, Helichrysum, Baccharis, Renouée du Japon, Saule, Aubépine, Haie jardinière, Pyracantha, Cotoneaster	1,01	Marais dominé par les Tamaris, Chine	Tang et al. 2018	Valeur brute	1,01	1,01	1,01
Formation arborée	Fraxinus, Salix, Prunus, Galium aparine, Populus, Sambucus, Ulmus, Rubus, Aulne, Platane, Sophora japonica	1,83 0,74 1,01 1,47 1,03 0,91 1,01	Fraxinus, Irlande S. schwerinii x S. viminalis, Suède S. burjatica x S. dasycladus, Suède S. viminalis, Suède S. dasycladus, Suède S. schwerinii x S. viminalis, Suède S. schwerinii x S. viminalis, Suède	Wellok et al. 2014 Kalita et al. 2021 Kalita et al. 2021	Moyenne des sept valeurs	1,14	0,74	1,83
Terres arables	Surface agricole non exploitée, féverole, orge de printemps, maïs, fêtuque, blé tendre d'hiver, tournesol	-3,11	Ensemble des terres cultivées françaises	FAO, 2021	Valeur brute	-3,11	-3,11	-3,11

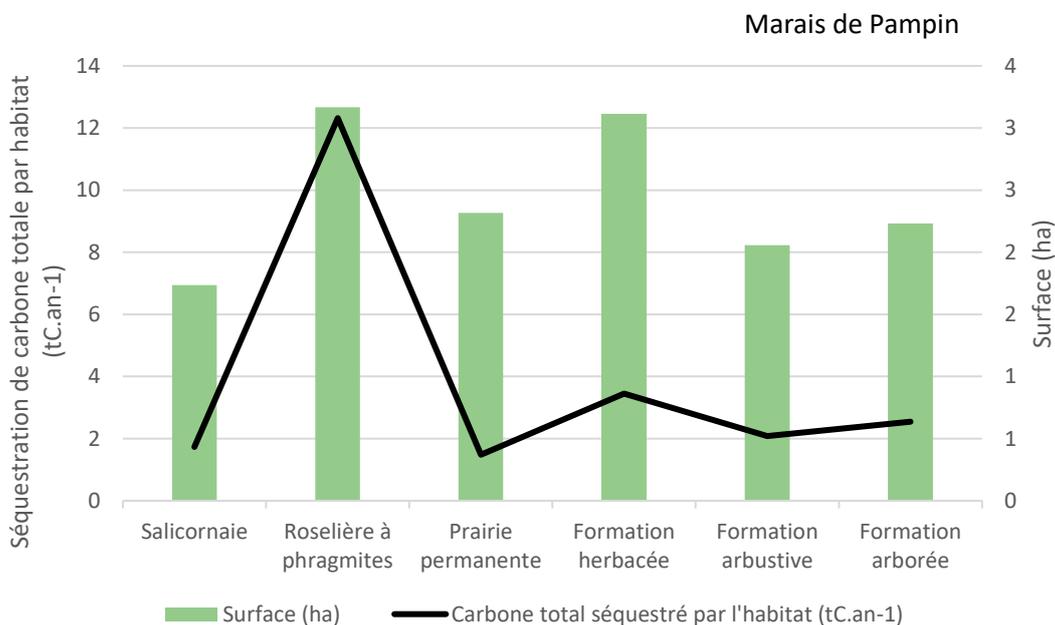
Annexe 7 : Extrait du tableau Excel recensant l'ensemble des données issues de la bibliographie internationale utilisées pour calculer les valeurs de séquestration de carbone des habitats des marais (Carteron, 2024).

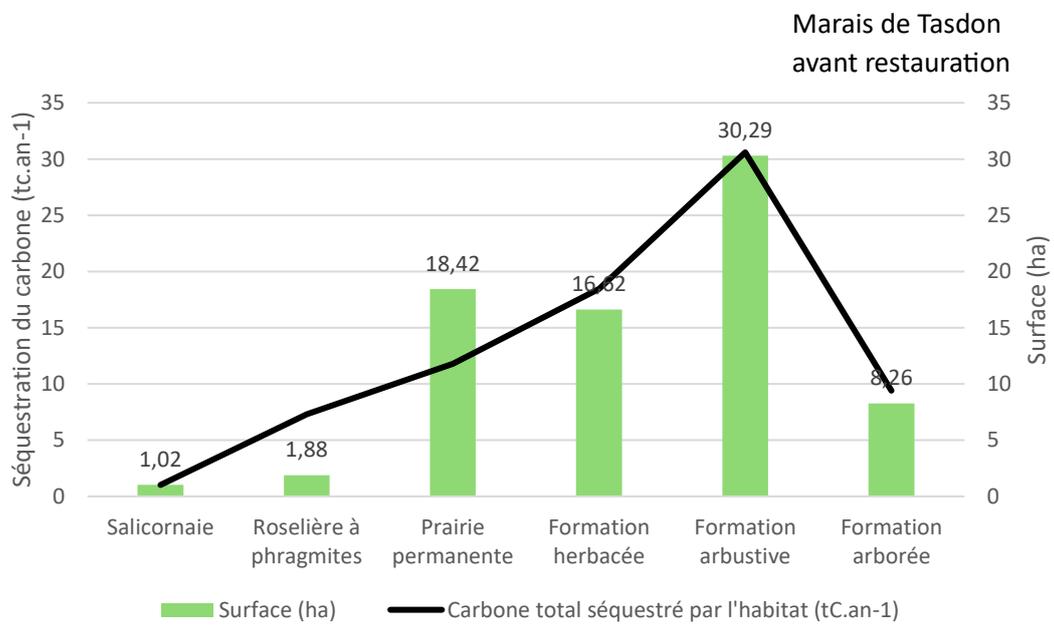
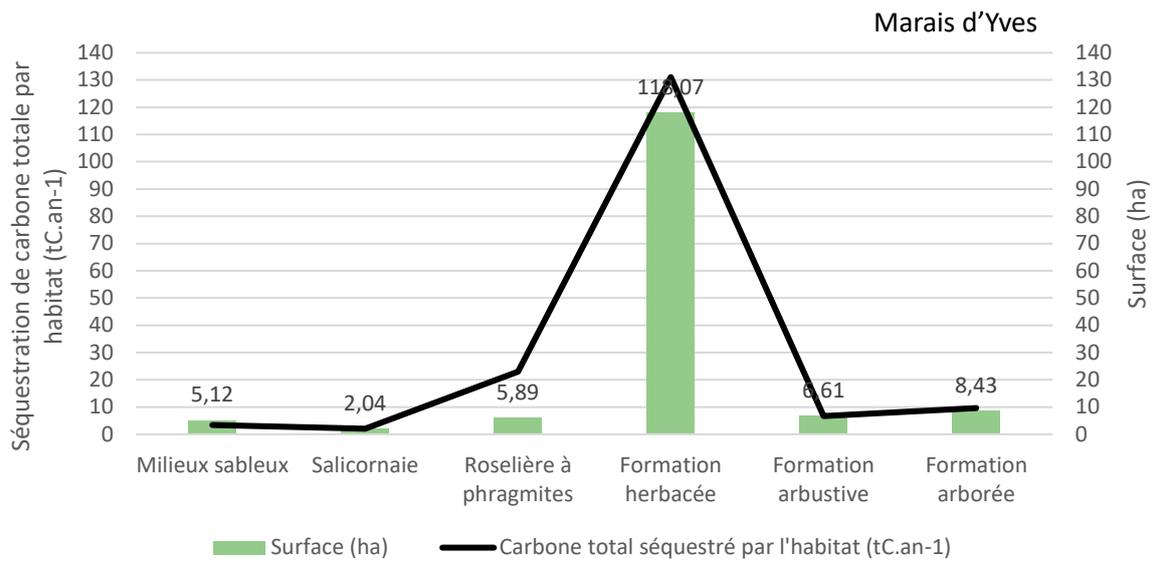
Par type d'habitat	
Moyenne de séquestration (tC.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	=moyenne(plage de données)
Minimum de séquestration (tC.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	=min(plage de données)
Maximum de séquestration (tC.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	=max(plage de données)

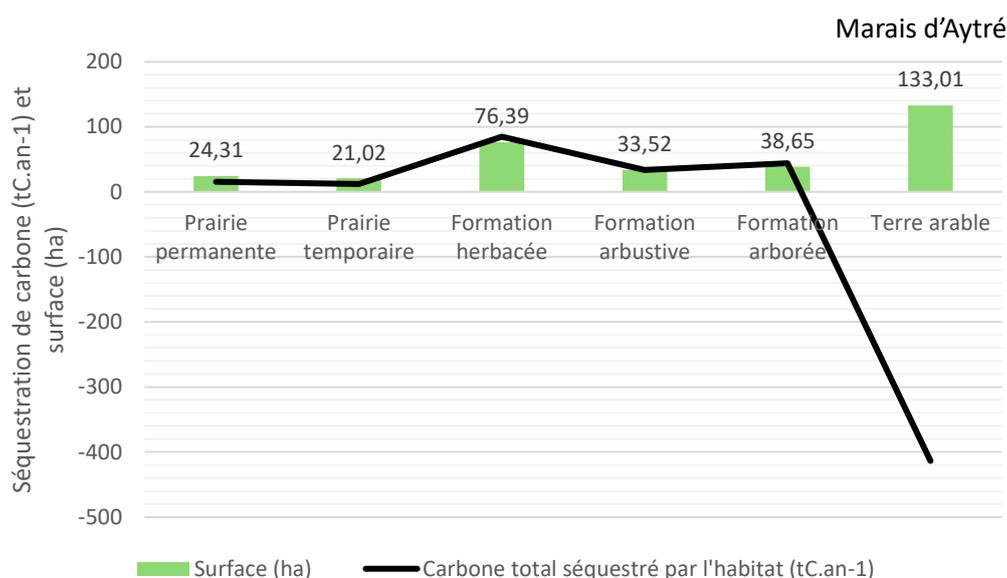
Par habitat dans chaque marais	
Moyenne de séquestration de carbone par an (tC.an ⁻¹) de chaque habitat du marais	=surface*taux de séquestration
Valeur minimale de séquestration de carbone par an (tC.an ⁻¹) de chaque habitat du marais	=surface*taux minimum de séquestration
Valeur maximale de séquestration de carbone (tC.an ⁻¹) de chaque habitat du marais	=surface*taux maximum de séquestration

Par marais	
Séquestration de carbone par an par hectare (tC.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	=séquestration moyenne/surface CV
Séquestration de carbone par an par hectare (tC.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	= séquestration minimale/surface CV
Séquestration de carbone par an par hectare (tC.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	= séquestration maximale/surface CV

Annexe 8 : Ensemble des calculs réalisés sur les données de séquestration de carbone et de surface (Carteron, 2024).







Annexe 9 : Comparaison entre la séquestration de carbone par habitat de marais et leur surface (Carteron, 2024).

Lieux de l'étude	Etude	Ville d'acquisition des données*	Pluviométrie annuelle (mm)	Température moyenne annuelle (°C)	Ensoleillement annuel (h)	Source
Valeur témoin	NULL	La Rochelle	754	13	2303	Météo France https://donneespubliques.meteofrance.fr/
Newborough, Pays de Galles	Jones <i>et al.</i> , 2008	Liverpool	859	10	1499	National Oceanography Center https://noc.ac.uk/
Adelaide, Australie	Dittman <i>et al.</i> , 2016	Adelaide	536	17	2765	Bureau of Meteorology http://www.bom.gov.au/
Marina del Carmoli, Espagne	Gonzalez-Alcaraz <i>et al.</i> , 2012	Alicante	311	18,5	2967	Agencia Estatal de Meteorologia https://www.aemet.es/fr/p_ortada
Vejlerne Nature Reserve, Danemark	Brix <i>et al.</i> , 2001	Aalborg	689	7,5	1500	Danmarks Meteorogiske Institut https://www.dmi.dk/
Côte atlantique européenne	Hendriks <i>et al.</i> , 2020	Supposition d'un climat similaire à celui de La Rochelle	-	-	-	-
Hongrie, Ecosse, Irlande, France, Pays-Bas, Italie, Suisse, Danemark	Soussana <i>et al.</i> , 2010		Moyenne des 8 sites : 886	Moyenne des 8 sites : 8,9		Soussana <i>et al.</i> , 2010 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880906004373
Rothamsted Research, Royaume-Uni	Poulton <i>et al.</i> , 2018	Londres	622	11,1	1653	Met Office https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/maps-and-data/uk-climate-averages#?tab=climateTables
Plusieurs sites en Angleterre	Alonso <i>et al.</i> , 2012	Londres	622	11,1	1653	Met Office https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/maps-and-data/uk-climate-averages#?tab=climateTables

Centre-Ouest de l'Iowa, USA	Guzman & Al-Kaisi, 2010	Des Moines	841	10	NULL	World Climate http://www.climate-charts.com/Locations/u/US72546001322031.php
Sud du Wisconsin, USA	Lawrence & Zebler, 2013	Milwaukee	941	8,8	NULL	Climate Data https://fr.climate-data.org/amerique-du-nord/etats-unis-d-amerique/wisconsin/milwaukee-5667/?utm_content=cmp-true
Ria de Aveiro, Portugal	Sousa <i>et al.</i> , 2017	Porto	1100	14,2	2500	Institut portugais de la mer et de l'atmosphère https://www.ipma.pt/pt/index.html
Little Assawoman Bay, Delaware, USA	Elsey-Quirk <i>et al.</i> , 2017	Ocean City, Maryland	1150	14,4	NULL	Climate Data https://fr.climate-data.org/amerique-du-nord/etats-unis-d-amerique/maryland/ocean-city-876056/
Laizhou Bay, Chine	Tang <i>et al.</i> , 2018	Qingdao	720	12,4	NULL	Hong-Kong Observatory https://www.hko.gov.hk/tc/index.html
Centre de l'Irlande	Wellock <i>et al.</i> , 2014	Limerick	1116	10	NULL	Climate Data https://fr.climate-data.org/europe/irlande/limerick/limerick-4553/
Uppsala, Suède	Kalita <i>et al.</i> , 2021	Stockholm	540	8,3	1830	MSN Weather Information Service

Annexe 10 : Caractéristiques climatiques des zones étudiées dans les articles scientifiques d'où ont été extraits les valeurs de séquestration de carbone (Carteron, 2024).

*Les villes d'acquisition des données sont les grandes villes les plus proches du site étudié possédant des données sur le climat local

Mots-clés : carbone vert, séquestration, sol, végétation, habitats, marais côtier

Résumé

Le changement climatique qui s'opère aujourd'hui est en partie causé par une hausse de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Afin de limiter le réchauffement planétaire, il est ainsi nécessaire de limiter l'émission de gaz à effet de serre, mais aussi de favoriser leur captation et leur séquestration dans les puits de carbone, ces écosystèmes qui stockent à long terme le carbone. Il est important pour cela de les connaître, de les protéger et de les conserver. Les marais maritimes sont des puits de carbone particulièrement performants et stockent dans leurs parties aquatiques ce qui est appelé le « carbone bleu », c'est-à-dire le carbone séquestré par les surfaces en eau (océan, bassin et canaux des marais, etc.). Leurs parties terrestres végétales sont moins connues et moins étudiées pour leur capacité de séquestration de carbone, appelé « carbone vert » lorsqu'il est stocké par la végétation. Dans le cadre du projet La Rochelle Territoire Zéro Carbone, qui a pour objectif d'atteindre la neutralité carbone au sein de l'agglomération de La Rochelle d'ici 2040, il est intéressant de se questionner sur l'importance de la végétation des marais dans la séquestration durable du carbone dans les sols par les marais maritimes. L'élaboration d'une méthodologie répondant à cette problématique a fait naître des questionnements sur cette distinction des types de séquestration de carbone (vert et bleu). Elle a tout de même permis de déterminer le poids des marais maritimes dans un objectif de neutralité carbone d'une ville.

Keywords : green carbon, sequestration, soil, plants, habitats, coastal marsh

Abstract

The climate change occurring today is partly caused by an increase in the concentration of greenhouse gases in the atmosphere. In order to limit global warming, it is therefore necessary to reduce greenhouse gases emissions, but also to promote their capture and sequestration in carbon sinks, those ecosystems that store carbon long-term. To do this, it is important to understand, protect and conserve them. Coastal marshes are particularly efficient carbon sinks, storing what is called « blue carbon » in their aquatic parts, that is, carbon sequestered by water surfaces (oceans, basins, and marsh channels, etc.). Their terrestrial vegetative parts are less known and less studied for their carbon sequestration capacity, referred to as « green carbon » when it is stored by vegetation. As part of the La Rochelle Territoire Zéro Carbone project, which aims to achieve carbon neutrality within the La Rochelle agglomeration by 2040, it is worth looking at the importance of marsh vegetation in the sustainable sequestration of carbon in the soil by coastal marshes. The development of a methodology to address this issue has raised questions about the distinction between types of carbon sequestration (green and blue). It has nevertheless made it possible to determine the weight of coastal marshes in achieving a city's carbon neutrality goal.