

Fonction puits de carbone sur le territoire du Morbihan

Exploration des méthodes d'évaluation, mise en évidence des enjeux et des leviers de gestion du territoire, premières perspectives pour les ENS



Rapport d'étude

Réalisé par Margot Tricoche
pour la collectivité départementale du Morbihan

2024

Photo de couverture : Prairie permanente pâturée sur les rives du Vincin (56) ©2024 Tricoche Margot

Résumé

En complément de son Bilan des émissions de gaz à effet de serre (BEGES) réalisé en 2023, le Département du Morbihan cherche à savoir dans quelle mesure ses espaces naturels et semi-naturels constitueraient des puits de carbone, et ainsi à déterminer les éventuels leviers de gestion dont elle dispose pour les préserver.

Cette étude propose une approche afin d'estimer la fonction puits de carbone sur le territoire morbihannais. Une estimation des stocks et des flux de carbone liés au secteur de l'Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (UTCATF) basée sur l'utilisation et l'adaptation de données et d'outils existants a été réalisée. Une partie du travail a été allouée à la prise de recul sur les résultats proposés et une manière de les interpréter avec le moins de biais possible. Des pistes d'approfondissement sont suggérées pour améliorer l'estimation sur les Espaces naturels sensibles, propriétés de la collectivité. Les résultats sont discutés afin de délimiter les enjeux les plus importants et les leviers d'actions envisageables pour le volet UTCATF de la stratégie bas carbone de la collectivité départementale.

Mots clés : **Puits de carbone, Collectivité départementale, Stratégie Bas Carbone, Espaces Naturels Sensibles, Stocks de carbone, Flux de carbone**

Abstract

The Collectivity of Morbihan, after having completed its mandatory Greenhouse Gas Emissions Balance, is looking forward to getting more information about the carbon sinks on its territory and thus identify any management levers in its fields of competence to preserve them.

This study suggests an approach for estimating the carbon sink function in the Morbihan area. An estimate of carbon stocks and flows linked to the Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF) sector was carried out, based on the use and adaptation of existing data and tools. Part of the work was devoted to taking a step back from the results and finding a way of interpreting them with as little bias as possible. More in-depth suggestions were made to improve the estimate for sensitive natural areas (ENS) owned by the collectivity. The results are discussed to highlight the most important issues and possible action levers to build the LULUCF component of the low-carbon strategy.

Keywords : **Carbon sinks, low-carbon strategy, sensitive natural areas, carbon stocks, carbon flux**

Table des matières

<i>Remerciements</i>	4
<i>Table des illustrations</i>	5
<i>Table des annexes</i>	12
<i>Glossaire</i>	12
<i>Sigles et abréviations</i>	11
<i>Introduction</i>	12
1. Fonctionnement et comptabilité des puits de carbone dans le territoire morbihannais	15
1.1 Le Département du Morbihan et ses leviers de gestion pour la fonction puits de carbone du territoire	15
1.1.1 Territoire morbihannais : un territoire à l'interface terre-mer	15
1.1.2 La collectivité départementale, décisionnaire et gestionnaire du territoire	16
1.2 Les puits de carbone, des écosystèmes-clé dans la lutte contre le changement climatiques	18
1.2.1 La fonction puits de carbone, une fonction écosystémique complexe	18
1.2.2 Les réservoirs de carbone, des fonctionnements multiples encore difficiles à appréhender	20
1.3 La comptabilité de la séquestration carbone, des approches complexes avec encore beaucoup d'incertitudes	26
1.3.1 Recommandations du GIEC, un cadre international de référence pour l'approche de comptabilité des émissions et absorption de GES liés au secteur de l'UTCATF	26
1.3.2 Méthode OMINEA, une application des recommandations du GIEC dans le cadre de l'inventaire national pour le secteur UTCATF réalisé par le CITEPA	29
2. Evaluation à l'échelle départementale de la fonction puits de carbone : adaptation d'outils existants	32
2.1 Comptabilité départementale des puits de carbone, enjeux stratégiques de réalisation et principaux freins	32
2.2 Etat des lieux des outils et données existants, prise de recul sur leur adaptation à l'échelle départementale	33
2.2.1 Estimation des stocks (et flux) à destination des EPCI : l'outil Aldo développé par l'ADEME	33
2.2.2 Estimation des stocks et flux à la maille communale sur le territoire breton : une approche par le CITEPA et l'OEB	36
2.3 Interprétation des résultats et remise en contexte	39
2.3.1 Stocks de carbone du territoire : estimation avec l'aide de l'outil Aldo	39
2.3.2 Flux de carbone : utilisation des données issues de l'approche CITEPA et OEB	43
2.4 Pistes d'approfondissement et de réflexion pour l'estimation de la fonction puits de carbone du territoire morbihannais	50
3. Discussion et propositions	53

3.1	Leviers d'action du secteur UTCATF sur le territoire, des leviers de gestion avec des bénéfices complémentaires	53
3.2	Approfondissement de l'évaluation de la fonction puits de carbone du territoire, proposition d'une méthode de constitution d'un indicateur carbone pour les ENS	58
3.3	Limites de l'étude, spécificité et freins méthodologiques	61
	<i>Conclusion</i>	63
	<i>Bibliographie</i>	65
	<i>Annexes</i>	71

Remerciements

Mes remerciements vont en premier à mes encadrants, Jean-Louis et Franck, pour leur présence et leur soutien tout au long de mon stage, ainsi que Romain pour son investissement.

Je pense également à remercier toute l'équipe du SEAFEL et du service des ENS pour m'avoir accueillie dans leur locaux et intégrée dans leur quotidien. Merci en particulier à Emmanuelle pour ses conseils et les discussions sur les ENS qui m'ont aiguillée, ainsi que Sophie et François pour m'avoir emmenée avec eux lors de sorties de terrain et permis de respirer un peu d'air frais.

Merci aux membres du CSEM pour leur avis éclairé, à Bernard en particulier pour sa disponibilité et ses retours, ainsi que de m'avoir fourni de la documentation, merci également à David pour son intérêt envers mon sujet.

Je remercie Blandine de l'UMR SAS pour m'avoir accordé du temps pour discuter de mon travail et m'avoir apporté son point de vue sur mes réflexions.

Merci à mon ami Léon qui m'a fourni de la documentation de pédologie qui m'a été bien utile.

Merci enfin à mon référent, Julien, pour son écoute et sa disponibilité, ainsi qu'à Philippe pour avoir été présents lors de mes moments de doute.

Table des illustrations

Liste des figures :

- Figure 1 - Evolution des émissions et des puits de GES sur le territoire français entre 1990 et 2050 (en Mt CO₂e) d'après les données de l'inventaire CITEPA 2018 et projections révisées en 2020 pour atteindre la neutralité carbone en 2050 _ Source : SNBC¹ _____ 12
- Figure 2 – Puits du secteur UTCATF comparé aux autres émissions anthropiques depuis 1990 à aujourd'hui en Mt CO₂e (Gauche), Evolution actuelle du puits du secteur UTCATF comparé aux objectifs d'absorptions de la SNBC2 calculés pour atteindre la neutralité carbone en 2050 (Droite) _ Source : données de l'inventaire national, CITEPA 2023 _____ 13
- Figure 3 - Situation géographique du département du Morbihan et quelques éléments paysagers remarquables (Source : Atlas de l'environnement, CSEM) _____ 15
- Figure 4 - Mosaïque d'espaces naturels typiques du territoire. De gauche à droite, de haut en bas : marais salé, prairie de fond de vallée bocagère, lande, littoral rocheux – Photographies ODEM __ 17
- Figure 5 - Cycle global du carbone, flux mondiaux moyens (2013-2020) (Source : Friedlingstein et al. 2023) (NB : CDR (Carbon Dioxide Removal) fait référence à des techniques additionnelles de géo-ingénierie encore anecdotiques et parfois controversées de captage du carbone atmosphérique, e.g. fertilisation océanique) _____ 19
- Figure 6 - Flux de carbone anthropiques cumulés sur la période 1850-2020 en Gt C (a) et moyens sur la période 2016-2022 en Gt C/an (b). (NB : les flux ne sont pas en Gt CO₂e.) (Source : Friedlingstein et al., 2023) _____ 21
- Figure 7 – Effets du changement d'occupation des sols sur les émissions et la séquestration du carbone. Source : (ADEME, 2023a) _____ 23
- Figure 8 - Ventilation du stock carbone (t C) par occupation du sol (tous réservoirs confondus) sur le territoire morbihannais, d'après Aldo en 2024 – ADEME _____ 39
- Figure 9 - Répartition du stock de carbone (%) par réservoir sur le territoire morbihannais, toutes occupations du sol confondues, d'après Aldo en 2024 – ADEME _____ 40
- Figure 10 - Révision des stocks de carbone (kt C) par occupation du sol avec les données de la carte des végétations du CBNB estimés pour le **réservoir des sols** (0-30 cm et litière) à partir de l'outil Aldo – ADEME _____ 41
- Figure 11 - Répartition des stocks de carbone morbihannais (% du stock total) par occupation du sol ajustée d'après les données du Conservatoire botanique de Brest, avec la méthode d'estimation d'Aldo (Par un souci de lisibilité, les vergers et les vignes ont été retirés de la légende.) - ADEME _____ 41
- Figure 12 - Médiane communale du taux de matière organique dans les sols en Bretagne (données 1990 – 1994) _____ 42
- Figure 13 - Bilan net des principaux flux de carbone (t CO₂e/ha/an) : croissance forestière, artificialisation, évolution du linéaire bocager et changement d'occupation du sol, calculé pour

chaque commune du Morbihan en 2018 (Pour rappel les flux négatifs désignent un retrait de CO₂ à l'atmosphère) – données CITEPA _____ 44

Figure 14 - Principaux flux de carbone liés aux sols et à la forêt sur la période 2005-2015 (Série 2, au-dessus) et en 2018 (Série 1, en dessous) sur l'ensemble du territoire morbihannais (en t CO₂e/an) – données CITEPA _____ 44

Figure 15 - Evolution des stocks de carbone par commune du Morbihan entre 2 périodes : 2000-2008 et 2008-2017 (Un taux d'évolution supérieur à 1 correspond à une augmentation du stock entre 2 dates et donc à un stockage moyen sur la commune, inversement un taux inférieur à 1 correspond à un déstockage. Une évolution moyenne de 1,025 signifie que les stocks de carbone par commune ont en moyenne augmenté de 2,5 % sur la période.) – données CITEPA _____ 46

Figure 16 - Evolution des stocks de carbone, dynamique paysagère et répartition des communes morbihannaises divisées en 4 groupes de communes. Les groupes sont identifiés par un code couleur et ont été créés selon les similarités des communes par rapport aux différentes dynamiques paysagères qui les caractérisent (forestière, bocagère et artificialisation) – données CITEPA _____ 48

*Figure 17 – Schéma d'illustration des deux méthodes proposées pour l'estimation des stocks de carbone pour les ENS, exemple de l'ENS d'Er Varquez. * produite par le Conservatoire national botanique de Brest, ** données de référence fournies par l'ADEME ou autre spécifique à un écosystème local si les données sont estimées pertinentes, *** données issues de la plateforme Sols de Bretagne produite par l'UMR SAS, **** la densité apparente pourra être estimée par une fonction de pédo-transfert à partir des données caractéristiques des sols.* _____ 60

Liste des tableaux :

Tableau 1 - Stocks de référence par unité de surface utilisée dans Aldo utilisées pour le territoire du Morbihan pour différentes occupation du sol (les haies ne sont pas considérées comme une catégorie d'occupation du sol à part entière, ce qui explique l'absence de stock dans les sols pour cette nomenclature). Source : (ADEME, 2023c)..... 22

Tableau 2 - Compartiments carbone pris en compte pour les calculs liés aux flux de GES par maille. Source : Citepa 2024..... 30

Tableau 3 - Synthèse de propositions de mesures à mettre en place ou déjà existantes et à appliquer dans le cadre du volet « absorption » de la stratégie bas carbone du Département. Les compétences du Département évoquées sont les plus déterminantes, mais dans certains cas les mesures proposées peuvent également faire appel à des compétences transversales non renseignées dans le tableau. P, R et A désignent respectivement les axes de travail sur la Préservation, la Restauration et l'Amélioration. (CC = changement climatique, D = Directe, I = Indirecte) Inspiré de la Figure SPM.8 AR6 IPCC Mitigation of Climate Change..... 53

Table des annexes

Annexe 1 : Bilan des émissions de gaz à effet de serre de la collectivité départementale du Morbihan (2023) _ Source : Département du Morbihan (document interne)

Annexe 2 : Routine du modèle de variation de stock par maille utilisé dans la méthode OMINEA 2024 par le CITEPA _ Source : rapport OMINEA 2024

Annexe 3 : Typologie des nomenclatures utilisées dans l'inventaire UTCATF national réalisé par le CITEPA _ Source : rapport OMINEA 2024

Annexe 4 : Typologie des nomenclatures d'occupation des sols utilisée par Aldo _ Source : (ADEME 2023c)

Annexe 5 : Correspondance des typologies d'occupation des sols par le CBNB et fiabilité de l'estimation _ Source : (CBNB, 2019)

Annexe 6 : Comparaison des surfaces utilisées par Aldo avec les références locales disponibles _ Source : ADEME

Annexe 7 : Carte des EPCI du territoire morbihannais en 2017 _ Source : CSEM

Annexe 8 : Surfaces brûlées depuis 1975 dans le Morbihan et nombre de départs de feux associés _ Source : DRAAF Bretagne 2023

Annexe 9 : Liste des EPCI (datant de 2018) agrégées et rentrées dans l'outil Aldo pour l'estimation des stocks et flux de carbone sur le territoire du Morbihan

Annexe 10 : Cartes de la moyenne des dynamiques paysagères en 2018 par commune considérées dans les estimations de flux du secteur UTCATF par le CITEPA dans l'ordre : dynamique bocagère, forestière et taux d'artificialisation _ Source : CITEPA

Glossaire

Adaptation : stratégie de lutte contre le changement climatique par la limitation de la vulnérabilité aux impacts, ce qui consiste à favoriser la résilience

Aldo : outil gratuit et libre d'accès pour aider les territoires à intégrer la séquestration carbone dans leur diagnostic et répondre au besoin de prendre en compte cette thématique dans les Plans climat-air-énergie territoriaux (PCAET)

Atténuation : stratégie de lutte contre le changement climatique par limitation des causes directes, ce qui peut consister à réduire les émissions de gaz à effet de serre vers l'atmosphère

Biomasse : masse de la matière vivante

Bonnes pratiques : désignent, pour un secteur donné, un ensemble de pratiques consensuellement admises comme essentielles à appliquer et recommandées pour différentes raisons : éthiques, de sécurité, de qualité, de durabilité ...

Carbone bleu : carbone séquestré par des écosystèmes marins, ou côtiers tels que les herbiers marins, les marais salés, les mangroves ou encore la colonne d'eau. Ces écosystèmes sont également désignés sous le terme d'écosystèmes carbone bleu.

Carbone organique : carbone associé à des molécules vivantes

Carbone inorganique : carbone lié à des composés inorganiques

Densité apparente du sol : masse de sol sec à 105°C dans un volume donné

Déstockage de carbone : voir Stockage de carbone

El Niño : Phénomène climatique d'ampleur mondiale associé à des températures caniculaires

Ener'GES territoires Bretagne : outil gratuit fourni par l'ADEME d'aide à la décision réservé à l'usage des collectivités bretonnes, qui permet, à l'échelle d'une commune ou d'un groupement de communes de calculer les consommations d'énergie et les émissions de GES

Equivalent CO₂ (CO_{2e}) : unité de mesure permettant de comparer le forçage radiatif d'un GES au dioxyde de carbone. Cette unité est calculée à partir des Pouvoirs de réchauffement globaux (PRG) à cent ans définis par le 4^e rapport du GIEC, tels que la référence soit celui du CO₂. A titre d'exemple, après leur actualisation dans le 5^e rapport du GIEC qui est utilisé comme référence dans les inventaires actuels, celui du CH₄ vaut 28 et du N₂O 265.

Gaz à effet de serre (GES) : gaz présent dans l'atmosphère qui absorbe le rayonnement infrarouge, participe à la rétention d'une partie de la chaleur solaire reçue dans l'atmosphère

Horizon (de sol) : couche de sol homogène qui se caractérise par son épaisseur, sa structure et sa composition

Lande : Formation végétale dominée par une majorité d'arbrisseaux et sous-arbrisseaux à feuilles persistantes parmi lesquels on peut compter les bruyères ou les ajoncs

Masse de terre fine : masse de terre totale d'un volume de sol séché à 105 °C à laquelle on a retranché la part d'éléments grossiers (> 2 mm, extraits par tamisage humide).

Minéralisation : dégradation de la matière organique par les micro-organismes du sol en molécules simples comme des gaz et des composés minéraux de base

Neutralité carbone : objectif politique établi dans le cadre de l'atténuation du changement climatique de l'atteinte d'un bilan net des flux de GES nul. Il repose simultanément sur une réduction drastique des émissions de GES et un accroissement du puits de carbone continental.

Puits de carbone : système favorisant la séquestration du carbone atmosphérique dans un réservoir

Rhizodéposition : apport de matière organique au sol par les racines des végétaux

Station forestière : étendue de terrain de superficie variable, homogène dans ses conditions physiques et biologiques (IGN)

Stock de carbone : quantité totale de carbone présente dans un réservoir donné

Stockage de carbone : désigne une dynamique d'augmentation du stock de carbone pour un même réservoir au cours du temps, le déstockage correspond à la dynamique inverse.

Séquestration de carbone : désigne un retrait net de CO₂ de l'atmosphère à un réservoir à temps de renouvellement lent.

Teneur en carbone : masse de carbone contenue dans un kilogramme de masse de terre fine (g/kg)

Sigles et abréviations

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

AFOLU : Agriculture, foresterie et autres utilisations des terres (*Agriculture, forestry and other land uses*)

BEGES : Bilan des émissions de gaz à effet de serre

CA : Communauté d'agglomérations

CBNB : Conservatoire botanique de Brest

CC : Communauté de communes

CCNUCC : Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques

CCS : Capture et stockage de carbone (*Carbon capture and storage*)

CDR : Extraction de dioxyde de carbone (*Carbon dioxide removal*)

CEREMA : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

CIPAN : Cultures intermédiaires pièges à nitrates

CIVE : Cultures intermédiaires à vocation énergétique

CITEPA : Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique

CLC : Corine Land Cover

CO : Carbone organique

DREAL : Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement

EFESE : Evaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques

ENS : Espace naturel sensible

EPCI : Etablissements publics de coopération intercommunale

ERC : Eviter Réduire Compenser

FAO : Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (*Food and agriculture organization of the United Nations*)

GES : Gaz à effet de serre

GIEC : Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat

HCC : Haut conseil pour le climat

INRAe : Institut national pour la recherche agronomique, l'alimentation et l'environnement

LBC : Label bas-carbone

ML (ml dans le texte) : mètre linéaire

MO : Matière(s) organique(s)

MTES : Ministère de la transition écologique et solidaire

ODEM : Observatoire départemental de l'environnement du Morbihan

OEB : Observatoire de l'environnement de Bretagne

OMINEA : Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France

PCAET : Plan climat-air-énergie territorial

PPM : (ppm dans le texte) partie par million, 1 ppm = 2.124 Gt C

RA : Recensement agricole

RMQS : Réseau de mesures de la qualité des sols

RPG : Registre parcellaire graphique

SAU : Surface agricole utile

SDBC : Stratégie départementale bas carbone

SDENSB : Schéma départemental des espaces naturels sensibles et de la biodiversité

SECTEN : Secteurs économiques et énergie

SIG : Système d'information géographique

SNBC : Stratégie nationale bas carbone

SRADDET : Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires

UTCATF : Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (équivalent de LULUCF en anglais)

ZAN : Zéro artificialisation nette

Introduction

Dès 1990, le Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat (GIEC) alerte déjà sur la nécessité de prendre des mesures à l'échelle internationale pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique, afin d'atténuer les effets du changement climatique en cours. 25 ans plus tard, les Accords de Paris fixent officiellement comme objectif international l'atteinte de la neutralité carbone pour la deuxième moitié du XXI^e siècle. Cette ambition est poursuivie par la France dans le cadre de sa Stratégie nationale bas carbone (SNBC) révisée en 2020. Elle définit pour l'horizon 2050 une trajectoire de réduction des émissions de GES avec en parallèle une trajectoire d'augmentation de la captation de carbone pour atteindre une neutralité carbone effective¹ (Figure 1).

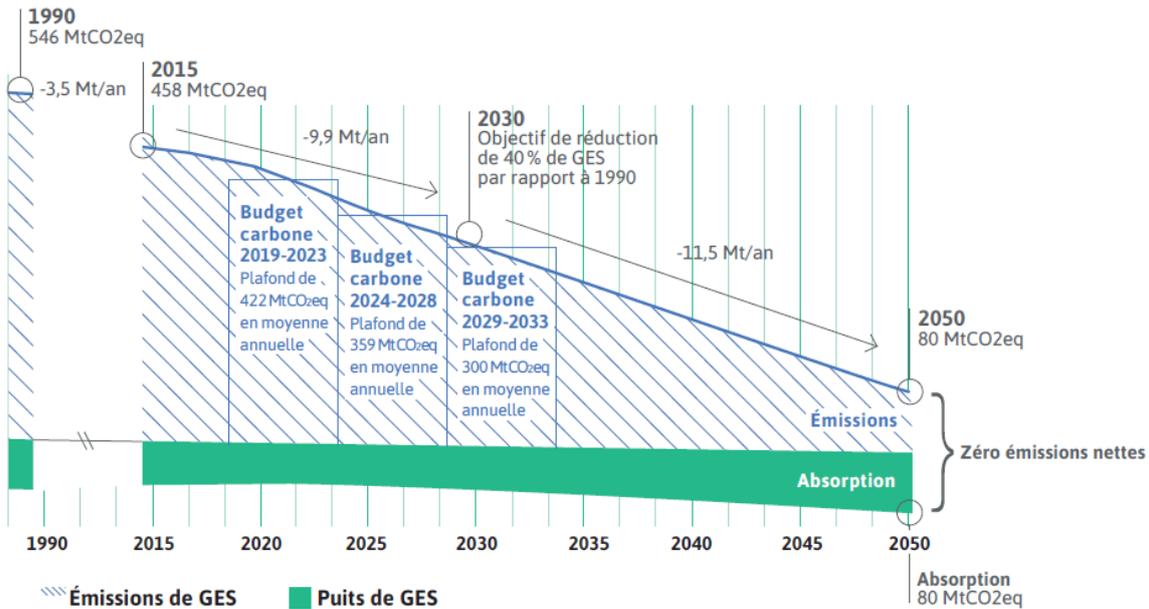


Figure 1 - Evolution des émissions et des puits de GES sur le territoire français entre 1990 et 2050 (en Mt CO₂e) d'après les données de l'inventaire CITEPA 2018 et projections révisées en 2020 pour atteindre la neutralité carbone en 2050 _ Source : SNBC¹

L'activité des puits de carbone français est comptabilisée annuellement par le biais de l'inventaire national des flux de GES réalisé sectoriellement par le Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA). Elle est prise en compte parmi le secteur de l'Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (UTCATF) qui correspond à une catégorie regroupant les flux de GES ayant lieu sur les terres « gérées ».

Le dernier rapport du format Secten (Secteurs économiques et énergie) publié le 19 juin 2024 par le CITEPA fait état d'une tendance plus qu'alarmante sur l'évolution actuelle du stockage de carbone par les puits naturels². Tandis que les projections de la SNBC tablaient sur un bilan net du secteur de - 40 Mt CO₂e pour 2022 avec une augmentation progressive vers l'objectif de - 80 Mt CO₂e à l'horizon 2050, le bilan net réel semble plutôt stagner autour de la barre des - 20 Mt CO₂e depuis 2017 (Figure 2).

¹ Stratégie nationale bas carbone (MTEF, 2020)

² Rapport Secten (Citepa, 2024b)

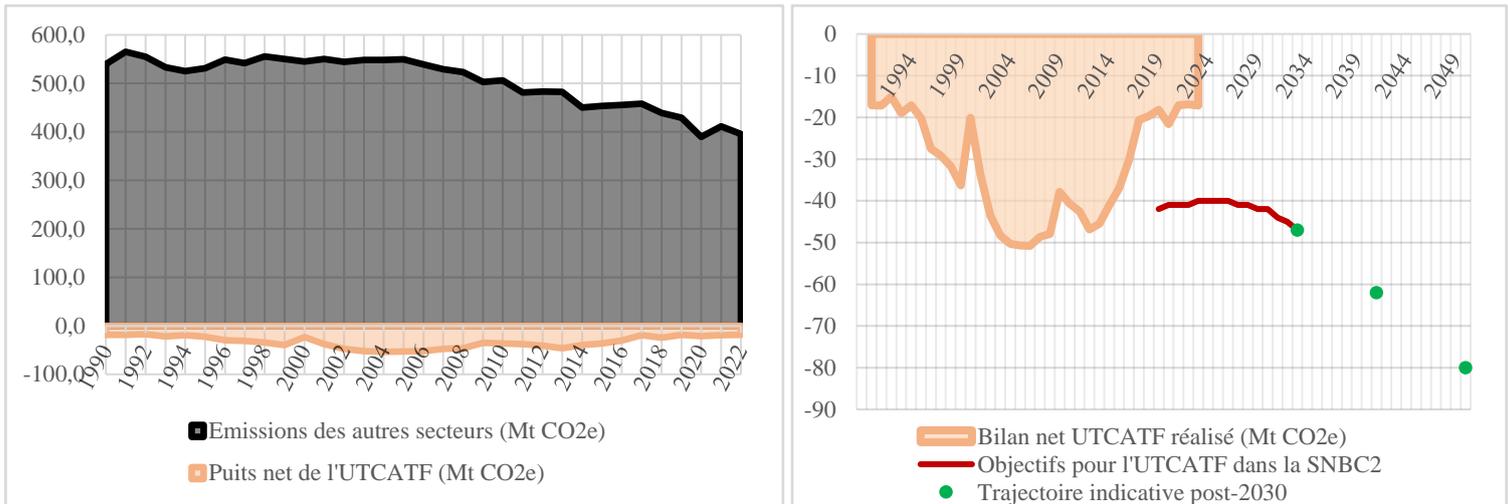


Figure 2 – Puits du secteur UTCATF comparé aux autres émissions anthropiques depuis 1990 à aujourd'hui en Mt CO_{2e} (Gauche), Evolution actuelle du puits du secteur UTCATF comparé aux objectifs d'absorptions de la SNBC2 calculés pour atteindre la neutralité carbone en 2050 (Droite) _ Source : données de l'inventaire national, CITEPA 2023

Cette tendance à l'échelle nationale est également soulignée dans son dernier rapport par le Haut conseil pour le climat (HCC) qui dresse le constat d'un effondrement de la fonction puits de carbone depuis 2013³. Publiée le 17 juillet 2024, l'étude de (Ke et al., 2024) à paraître, a déjà fait l'objet d'articles pour ses résultats au sujet du bilan des puits de carbone terrestres en 2023. En raison de mégafeux et de sécheresses importantes qui ont eu lieu cette année, le puits terrestre mondial aurait été notablement bas, et si cette tendance se poursuit dans les prochaines années, les efforts d'atténuation des émissions de GES devraient être revus à la hausse car ce genre d'évolution n'était pas comprise dans les modèles de projection climatique.

Dans son rapport Secten, le CITEPA explique que cette baisse constatée pour le secteur UTCATF est en grande partie due à une fragilisation du puits forestier. La croissance des arbres se serait ralentie de 4 % sur la période 2013-2021 par rapport à 2005-2013. Parallèlement, la mortalité des arbres grimpe (+ 77 %), et donc les prélèvements (+ 9 %)². Ainsi en France, le HCC et l'Académie des sciences s'accordent pour tirer la sonnette d'alarme sur l'évolution du puits forestier, en réelle souffrance face au changement climatique^{3,4}. Les stratégies bas carbone s'appuyant sur une augmentation du puits forestier devraient impérativement être revues pour s'adapter à ce phénomène.

Devant la nécessité de l'établissement d'une planification écologique réaliste et pertinente, et compte tenu de la différence de qualité d'estimation entre les flux de GES directement liés aux activités anthropiques et ceux liés au secteur UTCATF, il semble essentiel de tenter d'améliorer la précision et la résolution des estimations de la fonction puits de carbone naturelle. Comme souligné dans le dernier article de (Friedlingstein et al., 2023) inclure des niveaux plus régionaux dans la comptabilité carbone est primordial pour limiter les incertitudes.

La comptabilité des puits de carbone dans les bilans d'activité n'est pas une obligation pour toutes les collectivités. A l'échelle régionale, les schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET), créés en 2015 par la Loi NOTRe, fixent les orientations à moyen et long termes en matière d'aménagement du territoire et de développement durable. Le SRADDET doit inclure une

³ Rapport annuel 2022 – Dépasser les constats, mettre en œuvre les solutions (Haut conseil pour le climat, 2022)

⁴ Les forêts françaises face au changement climatique (Académie des sciences, 2023)

stratégie régionale sur la séquestration de carbone prenant en compte la SNBC, mais aucune comptabilité des flux n'est exigée. *A contrario*, obligatoire depuis 2016 pour tous les Etablissements publics de coopération intercommunale (EPCI), le Plan climat-air-énergie territorial (PCAET) doit s'appuyer sur un diagnostic du territoire parmi lequel comptent les émissions territoriales de GES. Pour aider les EPCI dans leur comptabilité des stocks et flux de carbone sur leur territoire, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) a mis en ligne et à disposition de tous l'outil ALDO (cf. §§ 2.2.1). Il n'existe pas encore de tel outil adapté à l'échelle départementale.

En effet, les collectivités départementales doivent réaliser un bilan des émissions de GES (BEGES) tous les 3 ans. Depuis la loi Climat énergie de 2019, les collectivités doivent inclure dans leur bilan un plan de transition. Ce dernier doit décrire les objectifs, moyens et actions envisagés pour réduire les émissions de GES, ainsi que les actions déjà entreprises lors du précédent bilan. Cependant, bien que la loi exige un BEGES, c'est un bilan réalisé à l'échelle de l'organisation (« type organisation ») et non du territoire, ce qui n'impose pas de comptabiliser l'ensemble des émissions du territoire, mais seulement celles dues au fonctionnement de la collectivité. La prise en compte des puits de carbone reste encore marginale et assez peu de collectivités, dont le Morbihan fait partie, ont pris la décision d'approfondir cette thématique.

L'objectif de ce mémoire est de dresser un état des lieux global des connaissances et estimations actuelles sur les stocks et les dynamiques du carbone pour les écosystèmes puits de carbone (comptés dans le secteur UTCATF), de les utiliser et de les adapter sur le cas du territoire morbihannais. Cette approche permettra de poser un cadre réaliste de réflexion sur les priorités d'action et les leviers du Département pour la gestion du territoire et son lien avec la fonction puits de carbone. Il se contentera de traiter des puits de carbone liés aux espaces naturels et semi-naturels, à savoir des types de milieux avec plus ou moins d'influence humaine, mais où la nature conserve une grande partie de son intégrité.

Le travail s'articulera autour de l'échelle départementale, alimentée par des recherches menées sur l'état des connaissances actuelles, des recommandations des experts du domaine, ainsi qu'inspirées de démarches existantes. Il s'agira donc dans un premier temps de délimiter les enjeux de la comptabilité de la fonction puits de carbone sur des espaces naturels et semi-naturels par une synthèse des informations pouvant alimenter la réflexion à ce sujet. Dans un second temps, les méthodes de comptabilité applicables dans le cas du territoire morbihannais seront explorées, adaptées et commentées dans le but d'en tirer des axes d'approfondissement pour la construction de la stratégie départementale bas carbone. Dans un dernier temps, une discussion sur les enjeux du travail sera amenée, nourrie de propositions de mesures et d'actions estimées pertinentes à mettre en place.

ou encore la colonne d'eau.) Le département dispose également de nombreuses îles avec des caractéristiques faunistiques et floristiques bien étudiées. C'est aussi le département breton avec le plus d'accumulation sableuse (environ 11 000 ha de dunes). La frange littorale est également une zone où les habitats de landes du département sont bien représentés. Par ailleurs, ils sont, comme les landes du Massif de Paimpont, en proie à des feux fréquents.

L'intérieur des terres est composé d'habitats forestiers et landicoles, de nombreuses zones humides dont 47 sites de tourbières recensés⁸, et une grande partie de zones agricoles. Le Morbihan est le département breton avec le plus de couverture forestière (19.5% du territoire)⁹, mais reste en deçà des 30% de couverture moyenne en France métropolitaine. Les principaux massifs sont les landes de Lanvaux, les forêts de Paimpont et de Lanouée. A l'inverse, le département morbihannais dispose du linéaire bocager le plus faible de la région (avec environ 42 874 km de linéaire recensé¹⁰ en 03/2024), mais sa régression ralentit ces dernières années.

Le département est un territoire à forte dominance agricole, avec une Surface agricole utile (SAU) qui représente 53 % de la surface totale¹¹. Le paysage agricole est constitué, soit de parcelles entourées d'un bocage plus ou moins dense avec des activités de polyculture élevage principalement, soit de larges parcelles ouvertes dirigées vers la monoculture intensive souvent céréalière. Au dernier Recensement agricole (RA) de 2020¹², 84 % des exploitations agricoles du département ont au moins une partie de leur activité basée sur l'élevage, avec notamment 26 % des exploitations en bovins lait et 12 % en production de volailles.

La majorité de la population se concentre sur le littoral, ce qui a participé à développer les secteurs d'activité liés à la pêche et au tourisme. Le secteur de l'*Armor* a ainsi connu une vague d'urbanisation importante et les territoires qui s'y trouvent font face à une pression d'artificialisation encore conséquente.

1.1.2 La collectivité départementale, décisionnaire et gestionnaire du territoire

1.1.2.1 Fonctionnement et compétences d'une collectivité départementale

La collectivité départementale, ou le Département, est constituée d'un conseil départemental et de l'ensemble des services. Le conseil départemental délibère sur les politiques du Département. Il est composé d'une assemblée délibérante de 42 conseillers élus dans chaque canton pour 6 ans et présidé par un Président. Les décisions nécessitent une majorité absolue pour être validées. Le Président, assisté par une commission permanente où siègent les vice-présidents, exécute les délibérations et définit les orientations politiques. Il existe également diverses commissions thématiques composées d'élus représentatifs de l'hémicycle, elles préparent le travail de l'assemblée sur des thématiques précises. Le directeur général des services tient également un rôle majeur dans l'organisation du Département, il dirige et coordonne l'ensemble des services composés d'agents qui, par leur travail, appliquent les décisions votées.¹³

Le Département, dont les compétences ont été redéfinies à la suite de la loi du 7 août 2015, dite loi NOTRe (Nouvelle organisation territoriale de la République), joue un rôle majeur dans l'action sociale, couvrant l'enfance, les personnes handicapées, les personnes âgées, et les prestations d'aide sociale comme le revenu de solidarité active. Le Département a également des compétences dans les domaines de l'éducation (gestion des collèges), de l'aménagement du territoire (équipement rural, aménagement foncier, gestion de l'eau), de la voirie départementale, de certains ports, ainsi que de la gestion des Espaces naturels sensibles (ENS) pour préserver la biodiversité.

⁸ Atlas de l'environnement (CSEM, 2010b)

⁹ Enquêtes Teruti (Agreste, 2022)

¹⁰ BD HAIE (IGN, 2024)

¹¹ Registre parcellaire 2021 (RPG) (IGN, 2021)

¹² Recensement agricole (RA) (Agreste, 2020)

¹³ (Conseil départemental du Morbihan, 2024a)

Il partage certaines compétences, notamment culturelles, sportives, touristiques et de promotion des langues régionales, avec d'autres collectivités. Bien que la gestion de la transition écologique ne soit pas directement de son ressort, le Département peut s'y engager, comme par le biais des mobilités ou de la gestion des ENS.

1.1.2.2 Les ENS, des espaces sous la responsabilité du Département

Le schéma départemental des espaces naturels sensibles et de la biodiversité (SDENSB)¹⁴ pour 2024-2035 définit un site ENS comme « un patrimoine naturel caractéristique du territoire qui nécessite d'être préservé pour garantir son maintien pour les générations futures. Il présente un fort intérêt écologique, géologique, fonctionnel, et/ou un paysage remarquable pouvant être fragile ou menacé. »

La compétence d'une collectivité départementale sur ses sites ENS relève de plusieurs domaines. Il revient au Département d'identifier les sites naturels qui présentent un intérêt écologique, paysager ou pour le public, et de faire les démarches pour en acquérir les terrains, par l'achat, ou par d'autres moyens (expropriation, donation, etc.)¹³. Une fois acquis, le Département est chargé de la protection, de la gestion, de l'entretien et de la restauration des sites ENS. Cela inclut la mise en œuvre de plans de gestion pour préserver les habitats naturels, les espèces protégées et les paysages. Il peut également installer des équipements pour accueillir le public en cohérence avec les exigences de conservation du patrimoine naturel. Le Département peut organiser l'ouverture des sites ENS au public, si besoin en aménageant des sentiers de randonnée, des aires d'observation ou des panneaux d'information. L'objectif est de sensibiliser le public à la protection de la nature tout en assurant la préservation des sites.¹⁵

La Département du Morbihan est à l'heure actuelle propriétaire de 103 sites ENS qui représentent une surface totale de 3 360 ha¹⁵. La ligne directrice de la gestion opérée est la conservation du patrimoine fragilisé, et en particulier la lutte contre l'effondrement de la biodiversité. 6 grands types de milieux naturels ont été identifiés au sein du territoire morbihannais comme remarquables et à prioriser dans la définition des sites ENS : les marais et prés salés, les dunes et falaises, les cours d'eau et zones humides, les landes et végétations associées, les forêts et boisements, les prairies permanentes et le bocage (Figure 4). Les ENS ne sont pas répartis de manière homogène sur le territoire : pour plus des 3/4 ils se concentrent sur le littoral. Le type de milieu prédominant reste forestier pour la majorité des ENS¹⁰.



Figure 4 - Mosaique d'espaces naturels typiques du territoire. De gauche à droite, de haut en bas : marais salé, prairie de fond de vallée bocagère, lande, littoral rocheux – Photographies ODEM

Parmi les objectifs nommés dans le SDENSB, le 3^e axe « Agir » décrit la volonté de favoriser « l'expérimentation d'actions pour améliorer les fonctionnalités des milieux, y compris celle du captage du

¹⁴ (Conseil départemental du Morbihan, 2024c)

¹⁵ (Conseil départemental du Morbihan, 2024b)

carbone et pour optimiser la résilience des écosystèmes face au changement climatique »¹⁴. La prise en compte de la fonction puits de carbone remplie par ces espaces fait bien partie intégrante des ambitions de gestion du Département.

1.1.2.3 La collectivité départementale, un acteur de la planification écologique à son échelle

Dans le cas du Département du Morbihan, un BEGES a été réalisé en 2023 et fait état d'un flux net d'émissions liées aux activités de la collectivité d'environ 68 510 t CO₂e¹⁶ pour l'année 2022 (Voir Annexe 1). Depuis la loi Energie climat du 8 novembre 2019, ce bilan doit inclure un plan de transition qui décrit les objectifs, moyens et actions envisagés pour réduire les émissions de GES, ainsi que les actions déjà entreprises lors du précédent bilan. La collectivité départementale a décidé, afin de faciliter la construction de ce plan de transition, de s'engager dans l'élaboration d'une Stratégie départementale bas carbone (SDBC). A l'image de la SNBC, cette stratégie est censée décrire la feuille de route du Département pour conduire sa politique d'atténuation du changement climatique, à ceci près que le Département ne peut engager des actions que dans ce qui relève de son champ de compétence, cela n'inclut donc pas l'ensemble du territoire morbihannais.

Le présent travail s'articule en parallèle de la constitution de ces documents et a pour but de synthétiser, contextualiser et mettre à jour les connaissances à l'échelle du département sur les flux et les stocks de carbone dans les espaces naturels et semi-naturels du Morbihan. Ce travail doit permettre d'alimenter le volet atténuation par stockage de carbone de la stratégie départementale bas carbone du Morbihan, et de donner des pistes pour la construction du même volet dans le plan de transition, avec une réflexion adaptée et pertinente avec les enjeux précis et les opportunités du territoire.

1.2 Les puits de carbone, des écosystèmes-clé dans la lutte contre le changement climatiques

1.2.1 La fonction puits de carbone, une fonction écosystémique complexe

Les puits de carbone sont des systèmes capables de capter et séquestrer du carbone de l'atmosphère, ils permettent ainsi de constituer des réservoirs de carbone à plus ou moins long terme¹⁷. Le carbone peut se retrouver sous des états différents dans des réservoirs tels que l'atmosphère, les sols, la biomasse végétale et animale, les océans, les réserves de carbone fossile ou les roches carbonatées (*Figure 5*). Les flux de carbone correspondent aux échanges de carbone entre ces réservoirs et l'ensemble de ces flux constitue un cycle du carbone (*Figure 5*). Le cycle mondial est divisé en 2 cycles, l'un court et superficiel, l'autre, plus long, qui s'effectue plutôt à l'échelle des temps géologiques hors perturbation anthropique¹⁷. L'objet de ce mémoire portera uniquement sur les puits de carbone organique, à savoir les écosystèmes naturels remplissant la fonction de puits de carbone. Ils s'inscrivent dans le cycle biogéochimique superficiel du carbone, qui ne représente qu'une fraction minuscule du carbone présent sur Terre, environ 0,001%¹⁷. Les flux de GES qui régissent ce cycle puisent leur origine dans des processus physiques et biologiques constitutifs du fonctionnement normal d'un écosystème tels que la photosynthèse, la respiration, la décomposition, la nitrification et dénitrification, la fermentation entérique et la combustion (IPCC, 2019).

¹⁶ BEGES de la collectivité départementale du Morbihan (Richard, 2023)

¹⁷ MOOC Stocker du carbone dans les écosystèmes : des enjeux aux solutions pour les territoires (ADEME, 2023b)

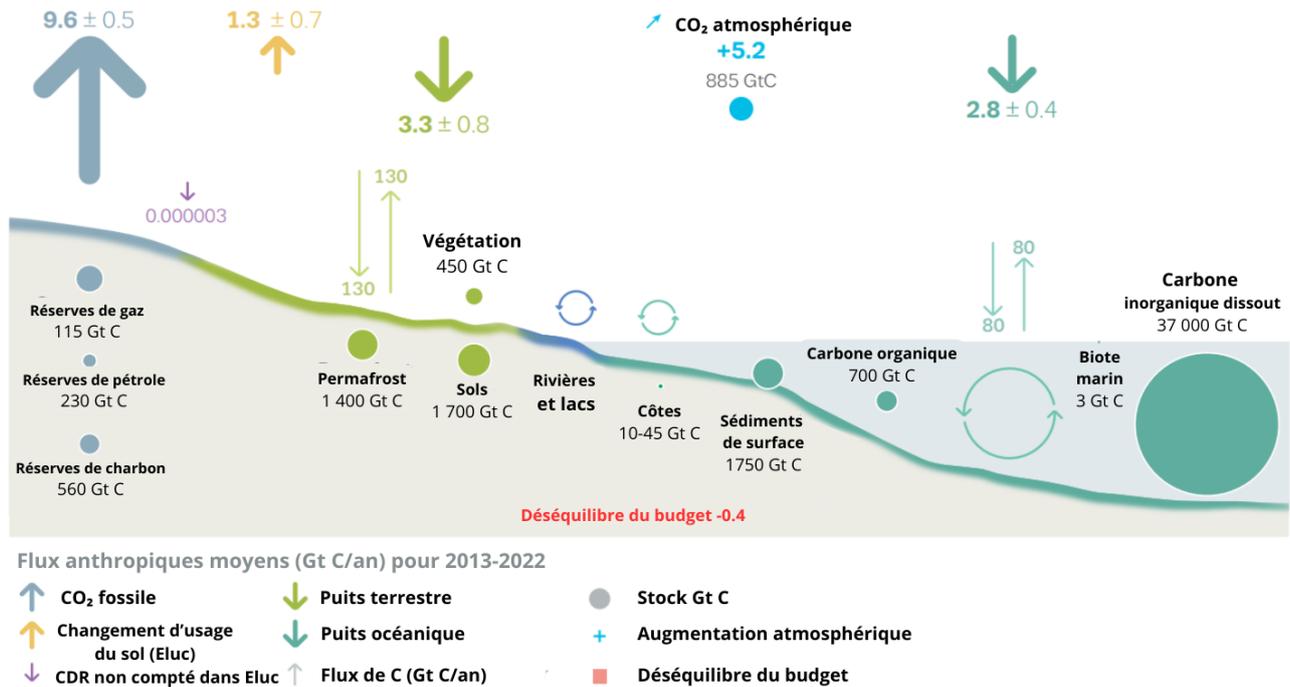


Figure 5 - Cycle global du carbone, flux mondiaux moyens (2013-2020) (Source : Friedlingstein et al. 2023) (NB : CDR (Carbon Dioxide Removal) fait référence à des techniques additionnelles de géo-ingénierie encore anecdotiques et parfois controversées de captage du carbone atmosphérique, e.g. fertilisation océanique)

Un stock de carbone correspond à la quantité totale de carbone présente dans un réservoir donné. Pour un réservoir donné, les flux nets de carbone peuvent être de l'ordre du stockage (augmentation du stock) ou du déstockage (diminution du stock). Par convention, l'unité de mesure d'un stock de carbone est exprimée en tonne de carbone (t C), tandis que pour un flux de carbone ou de GES en général, on parlera plutôt en tonne équivalent CO₂ (t CO₂e). A noter que ces deux unités ne sont pas équivalentes. En effet, 1 t C = 44/12 t CO₂e. Toujours par convention et sauf indication contraire, les flux exprimés avec un signe positif représentent une émission de GES d'un réservoir vers l'atmosphère, et donc inversement, des flux exprimés avec un signe négatif représentent une captation de GES atmosphérique par un puits de carbone. (Pellerin et al., 2020)

La capacité de stockage de carbone résulte d'une différence entre les flux entrants et sortants de carbone. Quand les flux de carbone entrants sont plus importants que les flux sortants, le carbone s'accumule et un stock se constitue. Selon la nature du stock, le carbone y réside plus ou moins durablement. Dans le cas d'un réservoir sous forme de biomasse ou de litière, les flux entrants sont ceux issus de la photosynthèse, et les flux sortants peuvent être la combustion, ou la minéralisation de la matière organique par l'activité de dégradation microbienne aérobie (IPCC, 2019). Ainsi lorsqu'il est question d'un stock de carbone à un instant t, il s'agit surtout du bilan net des dynamiques entrantes et sortantes déjà à l'œuvre, et cette donnée est amenée à varier au cours du temps selon différents facteurs plus ou moins bien connus (Pellerin et al., 2020). De fait, bien qu'elles soient souvent modélisées comme telles, les dynamiques de stockage ne sont, dans la réalité, pas linéaires.

Il convient également de rappeler l'importance de la variable temporelle dans les considérations sur les stocks de carbone. L'existence d'un réservoir de carbone important à un instant t n'est pas un état de fait acquis sur le temps long. En effet, un stock élevé peut très bien être dans une dynamique de stagnation voir de décroissance et donc émettre du carbone. Dans le cas où il reste constant pour l'année en question, le puits sera

ainsi considéré comme nul. D'ailleurs une dynamique de croissance rapide d'un stock est, dans la plupart des cas, vouée à diminuer progressivement et peut même s'annuler du fait de phénomènes qui pourraient s'apparenter à une forme de saturation, mais cela dépend du processus à l'origine du stockage (Pellerin et al., 2020). De plus, un stock de carbone est en général beaucoup plus lent à se constituer qu'à disparaître. Dans le cas du réservoir des sols par exemple, où les dynamiques de variation de la teneur en carbone dépendent, pour simplifier, d'une différence entre le stock réel et le stock à l'équilibre, l'adoption d'une pratique dite stockante n'a d'effet bénéfique pérenne sur le stock de carbone que dans le cas où elle est maintenue. Un abandon de la pratique induirait ainsi un changement du stock à l'équilibre, moins élevé que le précédent, et donc un flux sortant (Pellerin et al., 2020).

En outre, la notion de réservoir de carbone est évidemment une modélisation théorique et, faisant référence à des écosystèmes vivants, dépend d'une grande quantité de facteurs biotiques et abiotiques complexes. Ceux-ci ne sont pas encore tous très bien compris et leur nature peut varier au cours du temps. De nombreuses études restent encore à mener, en particulier pour le réservoir des sols ou encore celui formé par des écosystèmes dits de carbone bleu¹⁸.

La photosynthèse est la dynamique principale pour la constitution du réservoir de la biomasse végétale. C'est le vecteur de séquestration du carbone le plus important. Environ la moitié de la production primaire brute, est respirée par les plantes et retourne à l'atmosphère, le reste constitue la production primaire nette, soit la production totale de biomasse et de matière organique morte. Le changement net de stock de carbone est appelé production nette de l'écosystème. La majorité de la biomasse produite est transférée dans les réservoirs de matière organique morte qui sont composés du bois mort et de la litière. Une partie se décompose rapidement, retournant du carbone à l'atmosphère, tandis qu'une autre partie est retenue pour des durées variables. La matière organique morte se transforme en matière organique du sol. Les pratiques de gestion des terres influencent les stocks de carbone organique des sols en affectant les taux d'apport et de perte de matière organique (Pellerin et al., 2020). (cf. §§ 1.2.2.3)

De manière générale, les principales dynamiques de déstockage peuvent être liées à :

- Une modification des conditions physico-chimiques dans les sols qui favorise l'activité aérobie de minéralisation microbienne (e.g. retournement de prairie, assèchement de zone humide)
- Une combustion du stock de carbone (e.g. feu de forêt, feu d'humus)
- Une destruction ou perte stricte du stock (e.g. artificialisation, érosion)
- Un changement du stock à l'équilibre (e.g. afforestation)
- Un changement du mode de gestion (e.g. abandon de pratique « stockante », coupe rase)

1.2.2 Les réservoirs de carbone, des fonctionnements multiples encore difficiles à appréhender

1.2.2.1 Les réservoirs de carbone mondiaux, fragiles face au changement climatique

Afin d'appréhender la fonction puits de carbone remplie par les écosystèmes terrestres, il est important d'avoir une idée claire de chacun des aspects stocks et flux. Seulement, ces informations ne sont pas connues avec le même degré d'incertitude selon les écosystèmes, ni même selon le réservoir considéré. De même, les chiffres moyens donnés sont généralement le résultat d'une étude menée à un instant t et dans une zone

¹⁸ Evaluation française de écosystèmes et des services écosystémiques (Commissariat général au développement durable, 2019)

géographique précise, ainsi l'extrapolation de ces données à d'autres écosystèmes considérés comme similaires peut être source d'incertitudes supplémentaires.

D'après le rapport sur le budget mondial de carbone de 2022 (Friedlingstein et al., 2023), le réservoir lié à l'atmosphère représente un stock d'environ 885 Gt C, l'ensemble de la biomasse environ 450 à 650 Gt C et les matières organiques du sol près de 1 700 Gt C. L'océan de son côté présenterait le stock le plus important de ce cycle superficiel global avec près de 37 000 Gt C (Figure 5). Les stocks dans les roches de la lithosphère, du cycle long, représenteraient des ordres de grandeur dépassant de 3 à 6 puissances de 10 ceux du cycle superficiel.

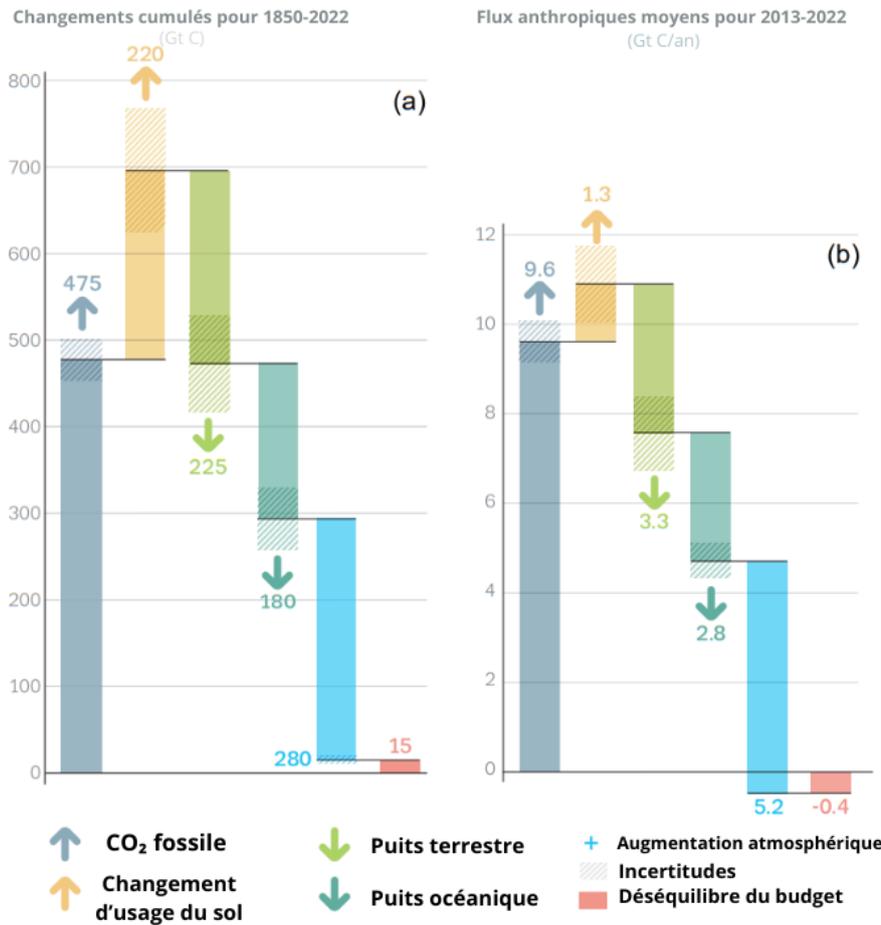


Figure 6 - Flux de carbone anthropiques cumulés sur la période 1850-2020 en Gt C (a) et moyens sur la période 2016-2022 en Gt C/an (b). (NB : les flux ne sont pas en Gt CO₂e.) (Source : Friedlingstein et al., 2023)

Au niveau des flux, les émissions anthropiques mondiales de 2022 atteindraient 40,7 Gt CO₂e/an (soit environ 11,1 Gt C/an) ce qui impliquerait une augmentation de 0,9% par rapport à 2021 (Friedlingstein et al., 2023). D'après les données préliminaires, 2023 suivrait la même tendance, avec une concentration atmosphérique de CO₂ qui atteindrait 419 ppm, soit environ 50% au-dessus du niveau préindustriel, i.e. le taux le plus élevé jamais atteint depuis au moins 2 millions d'années (Calvin et al., 2023). Les puits de carbone océaniques et terrestres en 2022 n'auraient permis de compenser que 68% des émissions d'origine anthropique. La part des émissions non compensée par les puits de carbone est matérialisée par la colonne bleue de la Figure 6 intitulée « augmentation atmosphérique ». A l'échelle mondiale, les émissions de GES liées au secteur UTCATF, en grande majorité dues à la déforestation (Masson-Delmotte et al., 2020), seraient restées relativement stables de 1960 à 1999, puis auraient légèrement diminué d'environ 0,4 Gt CO₂e par décennie jusqu'à atteindre 4,7 ± 2,6 Gt CO₂e/an (soit environ 1,3 Gt C/an) entre 2013 et 2022 (Figure 6). Cependant, les

estimations varient beaucoup selon les modèles utilisés et la prise en compte de la perte de capacité d'absorption supplémentaire des puits de carbone.

Depuis les années 1960 jusqu'à la période récente (2013-2022), le puits de carbone terrestre aurait augmenté de $4,7 \pm 2,4$ à $12,1 \pm 2,9$ Gt CO₂e par an (Figure 6), malgré des variations interannuelles importantes dues à des événements comme *El Niño*. Cette augmentation serait principalement due à la fertilisation par le CO₂ et aux dépôts d'azote, qui stimulent la photosynthèse.

Malgré cela, le changement climatique aurait tout de même un impact négatif global, quantifié sur la période 2013-2022 à une réduction de l'ordre de 20% du puits terrestre (Friedlingstein et al., 2023). La tendance générale resterait positive avec une forte variation interrégionale des réponses au changement climatique, et les modèles ne montrent pas de tendance unanime sur les évolutions futures globales à prévoir (Masson-Delmotte et al., 2020). De plus, des événements climatiques extrêmes, comme les incendies et les sécheresses, auraient drastiquement réduit la capacité de certains puits régionaux, voir même inversé la tendance, e.g. l'Europe centrale serait passée d'une dynamique de puits à source de carbone durant les vagues de chaleur de 2022. L'occurrence de tels événements climatiques extrêmes serait, quant à elle, prévue pour augmenter de plus en plus avec le changement climatique un degré de certitude élevé (Masson-Delmotte et al., 2020).

1.2.2.2 Stocks liés à la biosphère : références par écosystèmes

Les calculs de stocks à large échelle font appel à des stocks de référence unitaire auxquels sont appliqués les surfaces associées. Il existe de nombreuses références proposées par des instances nationales et internationales, mais le nombre d'études les appuyant est très variable selon l'écosystème et le réservoir. Ainsi il existe parfois des moyennes régionales précises pour les stocks assez précises sur un réservoir e.g. celui de la biomasse forestière, mais beaucoup moins sur les stocks de carbone dans les sols à 100 cm. De plus, ces données sont des moyennes effectuées pour une certaine résolution qui peuvent être fortement significativement et statistiquement parfaitement valides, mais leur application à des résolutions plus fine n'implique par leur significativité à ces échelles. Le réservoir du sol notamment est très hétérogène et les spécificités locales sont difficilement représentées par l'application de ces références.

Les données d'entrée de référence pour les stocks utilisées dans ce travail sont presque toutes issues de l'ADEME, à valeur de référence pour l'échelle nationale (Tableau 1). Elles possèdent des déclinaisons

Tableau 1 - Stocks de référence par unité de surface utilisés dans Aldo valables sur le territoire du Morbihan pour différentes occupation du sol (les haies ne sont pas considérées comme une catégorie d'occupation du sol à part entière, ce qui explique l'absence de stock dans les sols pour cette nomenclature).

Stock de référence par unité de surface		Sol (30 cm)	Litière	Biomasse	Total
Niveau 1 (nomenclature "sols")	Niveau 2 (nomenclature "biomasse")	t C/ha	t C/ha	t C/ha	t C/ha
cultures	cultures	50	-	-	50
prairies	prairies zones herbacées	71	-	0	71
prairies	prairies zones arbustives	73	-	7	80
prairies	prairies zones arborées	72	-	48	120
forêts	feuillus	62	9	94	165
forêts	mixtes	62	9	104	175
forêts	conifères	62	9	79	150
forêts	peupleraies	63	9	70	142
zones humides	zones humides	125	-	-	125
vergers	vergers	46	-	16	62
vignes	vignes	39	-	5	44
sols artificiels imperméabilisés	sols artificiels imperméabilisés	30	-	-	30
sols artificiels enherbés	sols artificiels enherbés	71	-	7	78
sols artificiels arborés et buissonnants	sols artificiels arborés et buissonnants	60	-	48	108
haies associées aux espaces agricoles		-	-	116	116

régionales en particulier pour les stocks de carbone associés aux forêts, qui dépendent des sylvo-écorégions. Ces données sont issues de différentes études portant sur les différents écosystèmes (pour les sols : RMQS, pour la biomasse forestière : IGN, pour les pratiques agricoles : INRAe)¹⁹.

Des typologies plus fines existent également, mais ce sont ces données (Tableau 1) qui seront utilisées comme référence pour le territoire du Morbihan dans ce travail. D'autres données de référence pour des écosystèmes précis pourront être citées (e.g. en landes, tourbières) lorsque cela sera estimé pertinent. Il faut garder en tête que les valeurs réelles peuvent être très différentes et varient dans le temps.

Dans le domaine des flux de références, les données sont beaucoup plus dépendantes du contexte et il peut être trompeur d'avancer des chiffres sans détailler leur domaine de validité spécifique. Les flux les plus standards sont ceux liés à des changements d'occupation des sols, dont les principes sont présentés Figure 7. A titre de comparaison, un Français moyen émettrait environ 9,2 t CO₂e/an selon les chiffres du Service des données et des études statistiques en 2022²⁰.

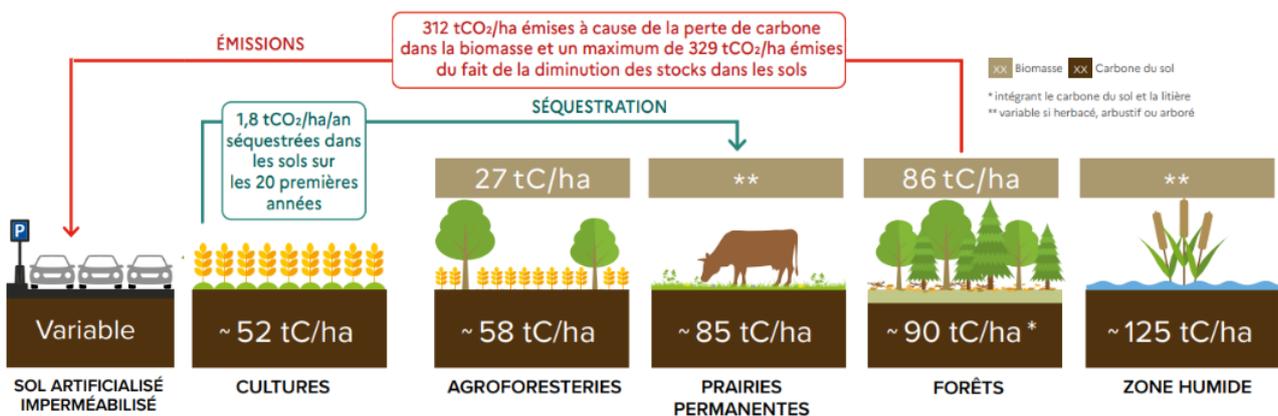


Figure 7 – Effets du changement d'occupation des sols sur les émissions et la séquestration du carbone. Source : (ADEME, 2023a)

1.2.2.3 Le réservoir des sols, des stocks conséquents mais hautement hétérogènes et encore peu étudiés

A l'échelle mondiale, le réservoir de carbone des sols représente, selon les estimations actuelles, entre le double (Friedlingstein et al., 2023) et le triple (Pellerin et al., 2020) du stock contenu dans l'atmosphère, avec des temps de résidence très variables selon la profondeur considérée : de quelques heures à plusieurs millénaires (Pellerin et al., 2020).

L'Initiative internationale "quatre pour mille", lancée par la France lors de la COP 21 en 2015, repose sur l'idée qu'augmenter de 4‰ par an le stock de carbone des sols pourrait théoriquement compenser les émissions anthropiques de CO₂. Ce calcul est très simpliste et a fait l'objet de nombreuses critiques, mais l'objectif était surtout de sensibiliser à l'importance des sols, promouvoir le stockage de carbone dans les sols pour atténuer le changement climatique, préserver les sols et améliorer la sécurité alimentaire. L'efficacité de cette approche dépend de la persistance des pratiques favorisant le stockage de carbone, qui elle-même est limitée par plusieurs facteurs, dont la disponibilité des ressources organiques, la nécessité de stocker également de l'azote (avec des risques d'augmenter les émissions de gaz à effet de serre), et l'impact du changement climatique qui

¹⁹ Notice technique de l'outil ALDO (Perez L. et al., 2018)

²⁰ D'après les données du CITEPA, (Service des données et des études statistiques, 2023)

pourrait accélérer la dégradation du carbone stocké. De plus, des barrières agronomiques, économiques et sociales freinent l'adoption de ces pratiques²¹.

En France, une augmentation de 4% du stock dans l'horizon 0-30 cm, estimé à 3,58 Gt C en 2016 (Pellerin et al., 2020) donc d'environ 53 Mt CO₂e, ne pourrait théoriquement compenser qu'environ 12% des émissions anthropiques françaises de la même année. Ce levier unique est donc loin d'être suffisant pour atteindre la neutralité carbone. Malgré ces limites majeures, l'initiative reste pertinente car le potentiel de stockage de carbone, bien que modeste, pourrait contribuer conjointement à l'atténuation et à l'adaptation au changement climatique, directement et par le biais des différents co-bénéfices associés qui dépassent le critère écologique de la santé des sols, tels que la sécurité alimentaire. L'enjeu actuel est de mieux quantifier ce potentiel et de réduire les incertitudes pour l'intégrer efficacement dans les stratégies globales d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre.

Le sol est constitué d'une grande majorité de minéraux et d'une fraction de matières organiques (MO) qui varie entre 1 et 10%. Les MO sont, pour une faible proportion, composées d'organismes vivants, le reste est inerte. Elles sont issues de l'activité photosynthétique des végétaux des strates supérieures. Le carbone du sol dont il est question représente en moyenne 50% de la masse de ces MO. Dans les considérations autour du puits de carbone des sols, seul le carbone organique (CO) est mesuré et suivi, car c'est lui qui est mobilisé dans les différents processus impliquant la fonction puits de carbone du sol²².

Généralement le terme de réservoir de carbone des sols fait référence aux horizons 0-30 cm, ou 0-100 cm. Souvent l'horizon le plus superficiel est privilégié, car il est plus déterminant au regard des cinétiques abordées, plus étudié et plus facile à suivre. En effet, il existe un gradient important de concentration décroissant du carbone de la surface vers la profondeur, avec en parallèle un gradient de stabilité du carbone croissant avec la profondeur. On estime que les horizons au-delà de 30 cm participent à hauteur de 25% à la séquestration du carbone.²²

Comme expliqué précédemment, l'augmentation du stock de CO dans les sols repose sur 2 principes qui agissent de concert. Le premier est l'augmentation des apports en carbone, ils peuvent être de nature aérienne, correspondant majoritairement à la restitution au sol de la production primaire, ou alors de nature souterraine, par le biais de la biomasse racinaire et de la rhizodéposition. Le second consiste à limiter les pertes en carbone qui peuvent être dues à la dissolution du carbone, l'érosion ou la minéralisation, mais également à l'exportation par l'homme de la matière organique produite sur place. Le carbone peut aussi très bien transiter entre différents compartiments du sol sans pour autant le quitter, par le biais de processus tels que le lessivage, la bioturbation ou la diffusion. Tous les processus qui régissent les dynamiques de variation de la teneur en carbone des sols sont extrêmement complexes et dépendent de nombreux facteurs biotiques et abiotiques. L'hétérogénéité très grande des sols à différentes échelles complexifie la compréhension de ces phénomènes, et donc également leur modélisation²².

La modélisation de l'évolution des stocks de carbone dans les sols fait appel à différentes méthodes possibles, selon les données disponibles, dont en particulier des approches empiriques (très utilisées par le GIEC dans le cadre des méthodes de Tier 1 (cf. §§ 1.3.1)) et des approches mécanistes ou dynamiques. Le principal frein dans le développement de ces modèles est le manque de données de mesures directes pour la validation des modèles. De fait, les modèles à vaste échelle ne sont à l'heure actuelle pas encore assez robustes.

Le premier facteur conditionnant les stocks de CO dans les sols est l'occupation du sol²², en interaction avec les pratiques de gestion et les conditions pédoclimatiques. Il y est fait la distinction de 3 grands types d'occupation des sols : les sols sous grandes cultures, les sols sous prairie permanente, et les sols sous forêt. En moyenne sur le territoire métropolitain, « les stocks dans l'horizon 0-30 cm sont de 51,6 t C/ha sous grande

²¹ (L'Initiative internationale « 4 pour 1000 »- Les sols pour la sécurité alimentaire et le climat, 2021)

²² Etude INRA "Stocker du carbone dans les sols français" - Rapport scientifique - 2020

culture, 84,6 t C/ha sous prairie permanente et de 81,0 t C/ha sous forêt. ». Du fait des surfaces occupées à l'échelle nationale, les sols forestiers représentent le stock de plus important (38%), suivi par les terres arables (26,5%) et enfin les prairies permanentes (22%).

L'évolution des stocks dépend beaucoup de l'historique d'occupation et il est très difficile de décorrélérer l'influence d'un changement d'occupation des sols récent, de l'arrière-effet de leur ancienne affectation. Ces nuances en tête, les tendances à l'échelle nationale donnent un stockage positif moyen pour les sols forestiers, légèrement positif pour les sols sous prairie permanente et négatif pour les sols sous grandes cultures. Cela serait donc en partie dû à la mise en culture d'anciennes prairies depuis la fin du XXe siècle et à la reforestation progressive du territoire qui a lieu depuis le milieu du XIXe siècle. En revanche, l'impact direct d'un changement d'affectation est prouvé clairement, le stock diminue dans le cas d'une transition « forêt (ou prairie) → culture », et il augmente dans le cas inverse. Les effets de l'artificialisation sont le déstockage dans tous les cas²³.

La mesure de la teneur en CO du sol se fait généralement en laboratoire par oxydation humide sur un échantillon de sol prélevé à une profondeur donnée. Elle est généralement exprimée en g/kg de terre fine séchée à l'air. L'obtention du taux de MO se fait en appliquant un coefficient multiplicateur à la teneur en carbone, qui peut être 1,72 ou 2,0 selon les cas, mais aucune valeur n'est parfaitement adaptée car le rapport MO/CO varie en fonction du degré d'humification²⁴.

Le calcul du stock de carbone en t C/ha (ou en kg C/m², avec pour rappel 1 kg C/m² = 10 t C/ha) nécessite de connaître d'autres paramètres spécifiques du sol où a été faite la mesure. La masse de terre fine correspond à la masse de terre totale d'un volume de sol séché à 105 °C à laquelle on a retranché la part d'éléments grossiers (> 2 mm, extraits par tamisage humide)²³. Le rapport de la masse de terre fine sur le volume du sol considéré permet d'obtenir la densité apparente (DA), ou masse volumique, du sol (Pellerin et al., 2020). Le stock de carbone est ainsi donné pour un horizon d'épaisseur p comme suit²¹ :

$$(Équation 1)$$

$$S_p = CO_p \times DA_p \times (1 - EG_p) \times p$$

Où :

- S_p = stock de carbone pour l'horizon d'épaisseur p en t C/ha
- CO_p = teneur en CO pour l'horizon d'épaisseur p en g/kg de terre fine
- DA_p = densité apparente du sol pour l'horizon d'épaisseur p en g/m³
- EG_p = fraction d'éléments grossiers pour l'horizon d'épaisseur p
- p = épaisseur de l'horizon considéré en cm

Le fonctionnement des puits de carbone terrestres est un objet d'étude essentiel pour appréhender les enjeux autour du cycle du carbone et son dérèglement causé par les activités humaines. Les flux entre les réservoirs sont suivis de plus en plus près mais leur variation interannuelle importante souligne la difficulté de construire des modèles de prédiction réalistes. Les réservoirs et les écosystèmes les plus étudiés sont ceux des forêts, mais le réservoir des sols suscite un intérêt croissant par son potentiel de stockage additionnel dépendant de pratiques de gestion sur lesquels on pourrait agir. Au-delà de la simple gestion des terres, les changements d'occupation des sols ont également un impact significatif sur les dynamiques d'évolution des stocks de carbone dans les sols.

²³ Rapport thématique – Accélérer la transition climatique avec un système alimentaire bas carbone, résilient et juste (Haut conseil pour le climat, 2024a)

²⁴ Guide des analyses en pédologie (Baize, 2000)

1.3 La comptabilité de la séquestration carbone, des approches complexes avec encore beaucoup d'incertitudes

1.3.1 Recommandations du GIEC, un cadre international de référence pour l'approche de comptabilité des émissions et absorption de GES liés au secteur de l'UTCATF

Le secteur UTCATF se distingue des autres secteurs d'inventaire de GES par sa capacité à créer des puits de carbone, contribuant ainsi à compenser une partie des émissions de CO₂. Contrairement aux autres secteurs, la comptabilité carbone du secteur UTCATF comprend, en plus des processus d'émissions, des flux qui sont associés directement à des unités géographiques comme les forêts, les cultures, les prairies, les zones humides, etc. Cette approche permet d'inclure divers paramètres, tels que l'occupation des terres, leur utilisation, leur historique et les conditions climatiques, dans le bilan.

Il existe différentes approches pour comptabiliser les flux de GES qui ne sont pas toutes harmonisées. Le GIEC a produit en 2006 un guide pour la réalisation d'inventaires de GES nationaux pour les pays membres qui transmettent leur inventaire annuellement à la Convention cadre des nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC). Le volume 4 de ce rapport décrit les recommandations pour l'inventaire du secteur Agriculture, foresterie et autres affectations des terres (AFOLU), qui correspond dans l'inventaire national français au secteur UTCATF et à une partie du secteur Agriculture (flux liés à la fertilisation azotée, aux amendements basiques et à l'élevage). Cette méthode présentée peut s'appliquer dans le cadre d'un inventaire territorial et est internationalement reconnue comme une référence²⁵.

Dans son actualisation du rapport publiée en 2019, le GIEC recommande la distinction de 6 modes d'usage des sols, au sens d'occupation des sols, nommées catégories d'affectation des terres ²⁶: Forêts (*forest land*) – Terres cultivées (*cropland*) – Prairies (*grassland*) – Zones humides (*wetlands*) – Zones urbanisées (*settlements*) – Autres terres (*other lands*, qui incluent sol nu, roches, glace, et tout ce qui n'entre pas dans les 5 autres catégories)

Chaque catégorie est ensuite divisée en 2 : les territoires conservant la même catégorie d'occupation du sol (e.g. une forêt qui reste une forêt), et les territoires changeant de catégorie d'occupation du sol (e.g. une forêt qui devient une terre cultivée).

Pour déterminer les surfaces concernées par chaque occupation, ainsi que les éventuels changements d'affectation, le GIEC définit 3 approches génériques²⁵ :

- L'approche 1 qui consiste à identifier les surfaces de chaque affectation sans information supplémentaire sur les changements d'occupation.
- L'approche 2 qui consiste à rajouter à l'approche 1 un suivi des conversions entre catégories.
- L'approche 3 qui consiste à compléter l'approche 2 avec un suivi spatialement explicite, en utilisant notamment la télédétection.

Les flux de GES sont ensuite estimés la plupart du temps par des changements nets des stocks de carbone au fil du temps (utilisés pour la plupart des flux de CO₂), ou parfois directement sous forme de flux de gaz vers et depuis l'atmosphère (utilisés pour estimer les émissions de gaz non- CO₂, ici CH₄ et N₂O, et certaines émissions et séquestrations de CO₂). En effet les changements dans les stocks de carbone des écosystèmes se

²⁵ Chap.2 Vol.4 lignes directrices du GIEC (Harald Aalde et al., 2006)

²⁶ Chap.2 Vol.4 ajustement des lignes directrices du GIEC (Stephen Michael Ogle, Werner Alexander Kurz, Carly Green, Andrea Brandon, et al., 2019)

font principalement, mais pas exclusivement, par l'échange de CO₂ entre la surface terrestre et l'atmosphère (cf. §§ 1.2.1). Ainsi, une augmentation des stocks de carbone équivaut à une séquestration nette de CO₂, tandis qu'une diminution des stocks (moins les transferts vers d'autres réservoirs comme les produits du bois) équivaut à une émission nette de CO₂. Pour obtenir les variations de stocks de carbone au sein d'une catégorie d'occupation du sol, il s'agit de sommer les variations de stocks associées à chaque strate de la catégorie²⁵. Les différentes strates qui peuvent être comptabilisées pour chaque catégorie sont au nombre de 6 : la biomasse aérienne, la biomasse souterraine, le bois mort, la litière, les sols et les produits ligneux récoltés.

Pour calculer le changement de stock de carbone dans une strate donnée, 2 méthodes d'estimation sont suggérées : la méthode gain-perte (Équation 1) qui prend en compte tous les processus qui exercent une influence sur l'évolution du stock, et la méthode de différence de stock ((Équation 3) qui peut être utilisée dans le cas de mesures de stocks à deux instants différents²⁵.

(Équation 2)

$$\Delta C = \Delta C_G - \Delta C_P$$

(Équation 3)

$$\Delta C = \frac{(C_{t_2} - C_{t_1})}{(t_2 - t_1)}$$

Où :

- ΔC = variation annuelle de stock de carbone dans le réservoir en t C/an
- ΔC_G = gain annuel de carbone en t C/an
- ΔC_P = perte annuelle de carbone en t C/an
- C_t = stock de carbone dans le réservoir à l'instant t, en t C

Le calcul des émissions de GES qui ne sont pas du CO₂ implique l'utilisation d'un facteur d'émission du gaz, depuis la source d'émission vers l'atmosphère ((Équation 4). Ce facteur dépend de la catégorie de source, pour la majorité d'entre eux, le GIEC donne des valeurs de référence à utiliser dans le cas de méthodes du tier 1 (cf. § suivant). Ces types d'émission peuvent venir de différentes sources comme les sols, la combustion de la biomasse, du bois mort ou de la litière, le bétail et le fumier²⁵.

(Équation 4)

$$E = A \times FE$$

Où :

- E = Emissions sans CO₂, en t CO₂e
- A = Données sur les activités liées à la source d'émissions (e.g. superficie, nombre d'animaux par unité de masse)
- FE = Facteur d'émissions pour un gaz et une catégorie de source spécifiques, en t / unité de A

Pour l'estimation de chaque variation de stock, il existe 3 niveaux de précision possibles dans les calculs²⁵. La hiérarchie de raffinement de la méthode d'estimation est abordée par le concept des Tiers dans le rapport. Passer à un niveau supérieur permet d'augmenter la précision des résultats de l'inventaire mais implique une complexité exacerbée de la méthode à employer et des ressources supplémentaires à mobiliser.

- Le tier 1 regroupe les méthodes les plus accessibles, elles sont de résolution spatiale plutôt grossière, et font appel à des équations avec des valeurs paramétriques par défaut qui peuvent être fournies dans le document, ou trouvables dans des bases de données mondiales comme celles de l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO).
- Le tier 2 regroupe des méthodes avec des facteurs de variations des stocks et d'émission spécifiques à la zone géographique, la résolution est plus élevée. Les catégories d'affectation des sols peuvent être plus détaillées.
- Le tier 3 regroupe des méthodes qui prennent en compte des suivis temporels de plusieurs facteurs avec des échantillonnages sur le terrain et des données spatiales à haute résolution.

Il est conseillé de déterminer en amont des catégories de source dites « clés »²⁷, définies comme des catégories dont la contribution à l'inventaire est significative, du point de vue des incertitudes, des ordres de grandeur des flux en valeur absolu ou des tendances. Il sera ainsi pertinent de déployer plus d'efforts et de moyens dans leur estimation, donc d'employer des méthodes d'estimation du niveau le plus élevé possible, et de se contenter du niveau de méthode « par défaut » pour les autres catégories à comptabiliser. Prenons l'exemple des variations de stock de carbone associés à la strate de la biomasse aérienne dans la catégorie des forêts restant en forêt. Cette catégorie représente une part déterminante des absorptions nettes de CO₂ du pays, donc l'estimation a une importance suffisamment significative dans l'inventaire national français pour justifier l'emploi de méthodes de niveau 2 voire 3, dans la mesure des données disponibles. Le GIEC fournit d'ailleurs des diagrammes décisionnels pour déterminer le niveau approprié de méthode pour tel ou tel type d'affectation des sols, ainsi que des équations pour déterminer la contribution d'une catégorie sur les critères abordés.

Les deux dernières étapes recommandées de l'inventaire consistent à évaluer les incertitudes et la qualité des estimations, de les présenter avec transparence et de les analyser dans le but d'améliorer le plus possible la pertinence des résultats.

L'entièreté de la méthode n'a évidemment pas été détaillée ici, seulement les points importants de la démarche qui serviront à alimenter la réflexion pour la suite du mémoire. Quelques nuances sont à apporter sur cette démarche.

En 2011, la Banque Mondiale soutient la publication d'un rapport sur l'importance de la restauration et de la gestion des zones humides côtières dans l'atténuation du changement climatique²⁸. Dans ce dernier, les auteurs recommandent vivement de mettre à jour les catégories de source ou puits d'émissions de GES issues des lignes directrices proposées par le GIEC en 2006, afin de mieux prendre en compte l'impact des écosystèmes côtiers et marins dans le bilan global, ainsi que les conséquences de leur dégradation. Le GIEC publie ainsi en 2013 une actualisation spécifique à la catégorie des zones humides pour combler certaines lacunes méthodologiques. Cela permet notamment une meilleure intégration des écosystèmes de zones humides côtières par la prise en compte des stocks de carbone dans leurs sols²⁹.

Il convient de rappeler également une ambiguïté générée par un choix méthodologique qui est celui d'opérer une distinction terre gérée et terre non-gérée dans la méthode du GIEC qui vise à inventorier uniquement les flux d'origine anthropique. « Les terres gérées sont les terres subissant interventions et pratiques humaines à des fins productives, écologiques ou sociales ». Toute émission issue d'une terre considérée comme non-gérée est prise comme non-anthropique et donc ignorée. Ainsi les flux issus de forêts considérées, selon les critères établis, comme non-gérées ne sont pas comptabilisés, de même que les émissions

²⁷ Chap.4 Vol.1 lignes directrices du GIEC (Anke Herold et al., 2006)

²⁸ (Crooks, S. et al., 2011)

²⁹ Supplément sur les zones humides aux lignes directrices du GIEC (Guangcheng Chen et al., 2013)

et absorptions liées aux écosystèmes marins. A noter que le rapport de l'Evaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques (EFESE)³⁰ sur la séquestration du carbone par les écosystèmes français, propose tout de même des quantifications du stockage de carbone dans les eaux territoriales, en soulignant que ces flux sont rarement pris en compte car trop peu étudiés.

1.3.2 Méthode OMINEA, une application des recommandations du GIEC dans le cadre de l'inventaire national pour le secteur UTCATF réalisé par le CITEPA

L'estimation des émissions de GES par le CITEPA pour les inventaires annuels nationaux se base sur les recommandations méthodologiques du GIEC de 2006, et prend compte ses actualisations en 2013 et en 2019. Les GES pris en compte par l'inventaire sont : CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆, NF₃. Tous les flux sont donnés en CO₂e. Le CITEPA publie chaque année son rapport OMINEA³¹ dans lequel il détaille notamment les méthodes employées, mais aussi les données utilisées, les informations importantes à connaître pour exploiter ces résultats. Cette méthode est applicable dans le cas de la réalisation d'un bilan carbone type Territoire. C'est l'approche plus précise établie et la seule qui soit internationalement reconnue. Elle est recommandée par l'ADEME notamment dans le cadre de la construction des PCAET³².

La méthodologie employée pour le secteur UTCATF de l'inventaire de 2024 fait appel, pour le suivi de l'utilisation des terres, à une approche de type 3 spatialement explicite pour la France métropolitaine, sur la base d'un maillage régulier et cohérent de 50 m sur l'ensemble du territoire. Tout le territoire métropolitain est considéré comme géré. L'approche est multi-source (utilisation de données de sources différentes selon les années et selon les régions : IGN, OFB, EEA/Copernicus). Les catégories d'utilisation des terres retenues sont détaillées sur 3 niveaux pour faciliter les calculs et exploiter au mieux la précision disponibles par les différentes sources.

Les catégories du secteur UTCATF qui ont été sélectionnées comme catégories clés avec une analyse de tier 1 sont en particulier la catégorie des « forêts restant forêts »², qui représentait 5,1 % des émissions en valeur absolue en 2022, ce qui la classe au 3e rang en niveau d'émissions et en évolution des tendances, sur 62 postes sélectionnés au total. Elle est 4e sur 33 en termes de contributions à l'incertitude obtenue avec une analyse de tier 2. Les 2 premiers postes qui ressortent de l'analyse de tier 2 sur les évolutions pondérées par les incertitudes entre 1990 et 2022 sont issus du secteur UTCATF : respectivement, les puits de CO₂ des « terres converties en forêts » et ceux des produits bois². La différence de sélection des catégories clés avec et sans prise en compte du secteur UTCATF montre l'apport non négligeable de ce secteur aux estimations et surtout aux incertitudes dans l'inventaire GES.

Pour les calculs d'émissions et d'absorption, des méthodes de tier 2 ont été choisies quand cela était possible³¹. Les flux sont estimés en partie à l'échelle de la maille, en partie à l'échelle régionale sur la base d'équations de gain-perte (Équation 2) ou de différence de stock (Équation 3). Ils sont calculés pour 10 strates de réservoirs de carbone par occupation du sol (Tableau 2). Pour le modèle de variation de stock à la maille (cf. Annexe 2), le stock de référence de chaque compartiment est initialisé en 1990. Chaque année la valeur des flux est calculée selon la différence entre la valeur du stock à l'équilibre, définie par une référence liée à l'occupation actuelle du sol, et la valeur du stock actuel. La plupart du temps, ces flux sont calibrés pour durer 20 ans. En cas de changement d'occupation le stock à l'équilibre est modifié, ce qui réajuste la dynamique de flux. De manière générale, les flux de déstockage ont lieu sur une durée plus courte et avec une valeur annuelle plus importante. Ces flux sont limités par des valeurs seuils de gains ou de pertes de flux de référence³¹.

³⁰ Rapport EFESE (Commissariat général au développement durable, 2019)

³¹ Rapport OMINEA - 21^{ème} édition (Citepa, 2024a)

³² Ressources pour les approches d'inventaire GES (ADEME, 2024)

Tableau 2 - Compartiments carbone pris en compte pour les calculs liés aux flux de GES par maille.
Source : Citepa 2024

Grand compartiment	statut	catégorie	type	strate	code	
biomasse	vivante	ligneuse	forêt	aérien	lb_f_a	n
				racinaire	lb_f_r	n
		culture pérenne	aérien	lb_cp_a	n	
			racinaire	lb_cp_r	n	
	herbacée	culture annuelle	aérien & racinaire	lb_ca	n	
		herbe	aérien & racinaire	lb_hh	n	
	morte (DOM)	bois mort		dw	n	
litière			lt	n		
sol		minéraux	s_min	n		
		organiques	s_org	n		

DOM : dead organic matter (matière organique morte)

Toujours suivant les recommandations du GIEC, les sols ont été séparés selon sols minéraux (Équation 3), et sols organiques (Équation 4), qui sont très souvent associés à des zones humides. Pour les sols minéraux, une correction des stocks de référence utilisés est appliquée²⁶ grâce à l'utilisation de facteurs d'ajustement liés à l'utilisation des terres (e.g. cultures annuelles, jachères ...) et au régime de gestion (e.g. pratiques de semis direct ou surpâturage ...), chacun décliné selon la zone climatique. Pour les sols organiques, les sources d'émissions considérées sont issues de drainage et de la remise en eau, et calculées avec des facteurs d'émissions fournis dans la base du Supplément 2013 du GIEC sur les zones humides.

Les écosystèmes de landes sont pris en compte dans la catégorie de niveau 3 « landes clairières et broussailles » (221a), incluse dans la catégorie de niveau 2 « végétation naturelle hors forêt », elle-même appartenant à la catégorie de niveau 1 « végétation naturelle et semi-naturelle ». Selon le rapport OMINEA³¹, les landes rentreraient dans la catégorie du GIEC correspondant aux prairies. Ainsi les données de référence utilisées sont : 4 t C/ha en stock aérien ligneux, 6 t C/ha en stock racinaire de ligneux, 1,0 t C/ha en stock de biomasse type herbe, 77,2 [47,6 ; 94,8] t C/ha/an en stocks dans les sols minéraux. Des flux de stockage et de déstockage sont prévus pour chaque compartiment en cas de changement d'occupation des sols.

Les écosystèmes de tourbière sont les seuls écosystèmes de la catégorie zone humide avec des stocks de référence³¹ : 6,3 t C/ha en stock de biomasse type herbe et 125 t C/ha en stocks de sols minéraux. Les flux de gains maximaux de référence en cas de changement de stock à l'équilibre sont donnés pour des sols organiques de tourbière (3,1 t C/ha/an) et de marais salants (1,22 t C/ha/an), ainsi que des flux homogènes de gains maximaux pour tous les types de zones humides sur les stocks liés aux cultures annuelles et aux herbes. Pour les flux de pertes de référence aucun flux de déstockage lié au drainage de sols organiques de zones humides n'est pris en compte, les seuls prévus sont liés à des changements d'occupation des sols.

Les haies sont considérées comme un compartiment de carbone de type biomasse et pas comme une catégorie d'occupation du sol. La variation du stock de carbone dans les sols sous un linéaire de haie n'est donc pas prise en compte. Les stocks de biomasse retenus varient entre 34 et 52 t C/ha. Les gains ou pertes de carbone viennent uniquement de l'évolution du linéaire³¹.

“Pour les terres agricoles, les flux pris en compte comprennent les flux issus d'un changement d'usage, mais également d'un changement de pratique³¹. Viennent ensuite s'ajouter d'autres flux tels que ceux liés au drainage de sols organiques, ou à la biomasse ligneuse. Dans l'étude publiée par l'INRA « Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? »³³, les auteurs insistent sur la plus-value à prendre en compte les variations de stocks de carbone organique sols en prairie restant prairie. (stockage de carbone lié à la durée de vie de la prairie temporaire et déstockage de carbone et d'azote dû au labour). Le GIEC fournit déjà en 2006 une formule issue d'une méthodologie de Tier 1 pour ce cas précis²⁷ mais elle n'est pas utilisée ici. C'est une limite intéressante à soulever, notamment dans le cas d'un territoire

³³ (Pellerin S. et al., 2013)

avec une forte proportion de la SAU allouée à l'élevage (cf. §§ 1.1.1) et en particulier, 38,5 % de la SAU du Morbihan est utilisée en prairies¹¹.

En résumé, comme notifié dans le rapport³¹, les flux comptabilisés sont liés à : «

- Croissance et mortalité de la biomasse aérienne et racinaire
- Prélèvements de bois
- Feux de forêt (perte de biomasse)
- Variation du stock de carbone dans la matière organique du sol
- Variation du stock de carbone dans le bois mort (notamment en lien avec les tempêtes)
- Variation du stock de carbone dans les produits bois
- Changement d'utilisation des terres (e.g. déboisement pour usage agricole, artificialisation d'une prairie, drainage de zone humide, etc.). Ces variations de stocks concernent alors la biomasse, la litière, le bois mort et les sols.
- Drainage des sols organiques cultivés »

A noter que d'après le HCC dans son dernier rapport annuel, la combustion des sols et notamment les sols organiques ne sont pas pris en compte dans les émissions causées par les incendies ce qui minimiserait beaucoup les émissions liées au secteur UTCATF du fait de l'importance des flux occasionnés : les émissions des feux pourraient être jusqu'à presque 3 fois plus élevées que celles comptabilisées actuellement³⁴. Ce type de feux a effectivement été recensé sur les dernières années : e.g. feux d'humus importants en Gironde en 2022, ou dans une moindre mesure les feux de landes qui ont duré plusieurs jours en Morbihan et dans les Mont d'Arrée la même année).

Ainsi, l'activité des puits de carbone, par sa complexité, est difficile à estimer avec précision. Des méthodes reconnues existent mais elles présentent de nombreuses sources d'incertitudes qu'il faut connaître, et ne sont pas toujours applicables de manière homogène du fait de la difficulté à rassembler les données nécessaires, de leur existence, ou de leur exploitabilité. Ce travail est néanmoins primordial afin de mieux comprendre la situation actuelle et organiser la planification écologique avec pertinence.

³⁴ Rapport annuel : tenir le cap de la décarbonation, protéger la population (Haut conseil pour le climat, 2024b)

2. Evaluation à l'échelle départementale de la fonction puits de carbone : adaptation d'outils existants

2.1 Comptabilité départementale des puits de carbone, enjeux stratégiques de réalisation et principaux freins

La fonction puits de carbone des écosystèmes terrestres est étudiée, calculée, et parfois mesurée, à l'échelle nationale et internationale. Le suivi de son activité permet entre autres l'ajustement du budget carbone mondial (Friedlingstein et al., 2023) dans le cadre de la construction de trajectoires de réduction des émissions de GES visant à la neutralité carbone. La spécificité du domaine des puits de carbone repose sur le fait que l'estimation de son activité ne se base pas forcément sur des données empiriques. A cela s'ajoutent le manque de connaissance sur les processus en jeu, l'hétérogénéité intrinsèque des variables, du point de vue spatial et temporel, leur dépendance, la difficulté et le coût de la mise en place de mesures de terrain sur de grandes surfaces, ainsi que l'inertie temporelle des flux biologiques. Il en résulte donc une quantité d'incertitudes assez conséquente.

L'enjeu de l'établissement d'une stratégie cohérente avec les différentes échelles de la planification écologique mondiale, implique l'utilisation d'une méthode cohérente, elle aussi, avec celles utilisées à des échelles plus élevées, mais dans le même temps, adaptée au contexte local. Des méthodes existent et certaines ont été évoquées précédemment, mais plus l'échelle d'estimation est localisée, moins l'application de données ou de facteurs d'émissions génériques valables à échelle globale n'a de sens du fait de l'hétérogénéité locale. En particulier l'application d'une méthode déjà établie nationalement à l'échelle infrarégionale implique de passer directement, au moins, aux méthodes du Tier 2 (cf. §§ 1.3.1) et l'accessibilité de données statistiques valides et disponibles, de résolution adaptée à cette échelle, n'est pas forcément aisée.

Un diagnostic général de la fonction puits de carbone sur l'ensemble du territoire du département morbihannais nécessite la compilation, si ce n'est, la considération, de nombreuses sources de données différentes. Il convient donc de s'interroger sur la pertinence des différentes sources existantes, leur degré d'incertitude, de cohérence entre elles, leur récence, leur validité scientifique et surtout de leur validité à l'échelle considérée.

La construction *de novo* d'une méthode d'évaluation de la fonction puits de carbone adaptée spécifiquement au contexte morbihannais n'est pas pertinente dans le cas d'un travail de 6 mois. Le choix a donc été fait de réaliser prioritairement un travail prospectif de recherche des différentes possibilités existantes, et de les évaluer avant de statuer sur la méthode à conserver pour le diagnostic final dont les limites peuvent être clairement présentées.

L'obtention d'un résultat complètement exhaustif sur l'ensemble du territoire n'est certes pas un objectif réaliste, cependant la subsistance d'incertitudes raisonnables et connues ne doit pas être un frein à l'établissement de plans d'actions adaptés aux ordres de grandeurs, dynamiques et spécificités du territoire. L'objectif est d'identifier les principales dynamiques territoriales qui régissent la fonction puits de carbone du territoire, d'avoir une idée des ordres de grandeur des stocks, de leur localisation, et de la trajectoire actuelle des flux de GES impliqués dans les puits de carbone. Cela permettra de mettre en lumière les principaux enjeux autour de la fonction puits de carbone pour le département et de dégager des pistes de réflexion sur les leviers d'actions possibles en conséquence.

2.2 Etat des lieux des outils et données existants, prise de recul sur leur adaptation à l'échelle départementale

2.2.1 Estimation des stocks et flux à destination des EPCI : l'outil Aldo développé par l'ADEME

2.2.1.1 Méthode de comptabilité type « clé en main », adaptée pour l'ensemble du territoire métropolitain

L'outil Aldo est un outil en ligne gratuit et libre d'accès fourni par l'ADEME pour les diagnostics de territoire à l'intention première des EPCI afin de faciliter l'intégration de la séquestration carbone dans les diagnostics territoriaux des PCAET¹⁹. Il propose, sur un territoire donné qui peut également être une agrégation de différents EPCI, des ordres de grandeur pour les stocks, estimés par des référentiels liés à une typologie d'occupation du sol, et des ordres de grandeur pour les flux, estimés par des référentiels associés à des dynamiques paysagères (accroissement biologique des végétaux, mortalité, prélèvements) ou de gestion (changement d'occupation des sols, gestion sylvicole et pratiques agricoles, utilisation de la biomasse)¹⁹.

Cependant, même pour l'élaboration des PCAET, Aldo ne permet pas de remplir tous les critères exigés par le décret rendant obligatoire la prise en compte de la séquestration carbone. Il faut donc bien garder en tête qu'il s'agit d'un outil visant à faciliter la prise en compte de la séquestration carbone, mais ce n'est pas une fin en soi. D'ailleurs la méthode évolue continuellement pour améliorer sa qualité d'estimation, une actualisation d'Aldo est d'ailleurs prévue courant 2024, intégrant les nouveautés méthodologiques appliquées par le CITEPA à l'échelle nationale (cf. §§ 1.3.2).

La méthode d'estimation des stocks nécessite d'une part, la collecte de données d'occupation du sol qui utilise 2 niveaux de typologie (cf. *Annexe 4*) : le niveau 1 avec 7 catégories, et le niveau 2 qui en contient 14. Pour rappel, le CITEPA distingue 3 niveaux de typologie pour l'occupation du sol dans son inventaire national (cf. *Annexe 3*). D'autre part, des données de stocks de référence (t C/ha) sont également utilisées pour chacun des 4 réservoirs de carbone pris en compte (Biomasse vivante, biomasse morte, sol et litière). En comparaison, (Tableau 2) le CITEPA utilise 10 réservoirs de carbone dans son inventaire national.

Il s'agit du seul outil à l'échelle infrarégionale qui soit uniforme à l'échelle du territoire métropolitain, il utilise donc des données de référence, pour la plupart, nationales génériques (à l'exception notamment des stocks en forêt qui varient selon la région pédoclimatique¹⁹).

Les stocks de carbone associés aux haies sont assimilés à un stock de réservoir de biomasse affecté à chaque occupation du sol. Le linéaire de haies est croisé et associé par territoire à chaque catégorie d'occupation du sol. Le détail du calcul des stocks dans les produits bois n'est pas développé ici car il ne rentre pas à proprement parler dans le sujet central du travail. Ainsi, les stocks associés à chaque réservoir pour chaque occupation du sol sont obtenus par une multiplication des références de stocks moyens par hectares aux surfaces correspondantes. Les stocks calculés pour les haies, et les stocks calculés pour les produits bois sont ensuite sommés avec les autres pour l'obtention des stocks totaux¹⁹.

L'estimation des flux se fait par 2 approches¹⁹ :

- La première approche estime les flux dans les réservoirs du sol, de la litière et de la biomasse hors forêt liés à des changements d'occupation des sols. La distinction est faite entre des flux dits « instantanés », i.e. qui ne s'étalent que sur 1 an, (e.g. suppression de biomasse ou artificialisation), et les flux plus longs, auquel cas la même durée est appliquée que dans la méthode nationale (20 ans). Cette approche est effectivement basée sur celle adoptée par le CITEPA. Chaque conversion est associée à un flux, unitaire, qui est multiplié par la surface concernée par la conversion.

- La deuxième approche estime les flux liés à la biomasse forestière. Il s'agit du bilan net de l'accroissement biologique des forêts, la mortalité et les prélèvements de bois. Les flux individuels sont calculés par application d'un facteur de référence multiplié par la surface occupée (même logique que (Équation 4)) et le bilan des flux est obtenu selon une équation du format gain-pertes (Équation 2)

Enfin la prise en compte de l'impact de différents modes de gestion agricole est proposée¹⁹ (e.g. couvert intermédiaire, bande enherbées, agroforesterie...), mais les données surfaciques ne sont pas rentrées automatiquement, et à l'échelle départementale elles ne sont pas disponibles de manière homogène, donc pas encore exploitables dans le cas présent. Cela dit, cette approche peut permettre d'identifier d'éventuels leviers à mettre en place sur le volet agricole, à approfondir par d'autres moyens.

En résumé cet outil, au moins au niveau des calculs de flux, confère au puits forestier une importance prédominante. Comme limite importante, on peut également noter que les dynamiques du carbone des sols ne sont pas prises en compte pour le moment, bien qu'elles devraient l'être bientôt lors de l'actualisation de l'outil prévue pour 2024. D'autre part, des flux importants pris en compte dans la méthode nationale ne le sont pas ici, tels que les émissions liées au drainage de sols organiques, aux incendies ou encore les flux issus des sols de zones humides restaurées. Il en est de même pour des flux liés au retournement de prairies comme préconisés par le GIEC, d'autant plus importants sur un territoire comme le Morbihan qui connaît des évolutions de la SAU et des compositions des cheptels (Diminution annuelle de 0,1 % de la SAU des exploitations et diminution totale de 30% du nombre d'exploitations en bovins lait, et porcins-volaille entre 2010 et 2020)³⁵.

2.2.1.2 Références et données d'entrée utilisées, des sources génériques pas forcément toujours adaptées au contexte local

2.2.1.2.1 Occupation du sol : des estimations avec un degré de précision hétérogène

L'application de l'outil Aldo à un territoire strictement départemental n'est pas prévue dans l'utilisation, mais l'agrégation des différents EPCI du Morbihan permet grossièrement d'avoir une estimation équivalente pour le département. L'outil n'est disponible que pour les EPCI officiels en date de 2018. L'agrégation de tous ces EPCI ne coïncide pas exactement avec les limites administratives du département. Il est d'usage, lorsque le choix se présente, et en considérant les incertitudes associées, de préférer minorer les stocks plutôt que de les majorer. Les 2 EPCI : CC du Pays de Redon et CA de la Presqu'île de Guérande Atlantique ont donc été écartés des estimations au titre que la majorité de leur surface se situait en dehors des limites du département du Morbihan (cf. Annexe 7) et leur prise en compte risquait de fausser les résultats. La perte en surface estimée est de l'ordre d'environ 50 000 ha, soit l'équivalent de 8 % de la surface totale du département.

Les références en termes d'occupation du sol utilisées par Aldo sont issues de la base de données de Corine Land Cover (CLC) (sauf pour les forêts et les haies) dont la résolution est de 25 ha. Les données surfaciques de l'occupation « forêt » sont catégorisées par composition (feuillus, mixtes, conifères, peupleraies) et proviennent de la BD forêt V2 de l'IGN (Inventaire forestier 2018). L'estimation du linéaire par occupation du sol pour le réservoir biomasse « haie » se fait à partir de la BD HAIE® de l'IGN. Il est renseigné dans l'interface d'Aldo qu'en cas de données locales plus précises, leur usage est préconisé. Pour bien interpréter les sorties de l'outil, il convient donc d'avoir une idée assez récente de l'occupation du sol dans le département du Morbihan, de manière quantitative et qualitative.

³⁵ D'après les données Agreste et RA, DRAAF (DRAAF Bretagne, 2023)

Les données les plus pertinentes disponibles pour le contexte morbihannais combinant récence (2016-2020) et résolution (1/25 000) sont celles fournies par le Conservatoire national botanique de Brest (CBNB) avec sa Carte des grands types de végétations par télédétection du Morbihan³⁶. Cette couche est disponible au format *Geopackage* et permet un traitement sous SIG des données spatialisées.

La typologie initiale est composée de 28 catégories. Elle a été refondue en une typologie à 9 catégories dont le détail se trouve en Annexe 5. Les regroupements par catégorie ont été réalisés de manière à simplifier la classification initiale et à obtenir des catégories de surfaces cohérentes avec les données officielles, comparables avec les typologies déjà existantes dans la littérature, et employées par les outils utilisés par la suite, notamment Aldo.

Ces données ont été produites en 2020 à partir de techniques semi-automatisées de télédétection, sur la base des ortho-images en infra-rouge couleur de l'IGN de 2016 et de différentes couches SIG. Elles permettent d'avoir une bonne idée générale de l'occupation du sol dans le Morbihan, mais comprennent certains défauts, parmi lesquels une précision de détermination variable selon les écosystèmes. Cette précision a été estimée par la réalisation d'une matrice de confusion avec un coefficient de kappa de 0.81, donc satisfaisant. Ainsi, les estimations pour les milieux de l'occupation du sol « Artificiel » et « Bocage » plutôt correctement prédites et on peut relever comme points notables (sur- ou sous- estimation supérieure à 25%), la catégorie « Prairie » est fortement sur- et sous-détectée, confondue avec d'autres types de milieux ouverts ou leur équivalent humide, on retrouve le même phénomène en plus atténué (avec plutôt une tendance à la sous-détection) pour les écosystèmes type landes ou fourrés. Pour plus de détails, voir Annexe 6 qui résume la précision des estimations par catégorie. Pour le linéaire de haies, la référence locale sélectionnée est la dernière actualisation en date de la BD TOPO® (03/2024).

Ainsi les sources d'incertitude les plus importantes de l'estimation d'Aldo (cf. Annexe 6) sur le territoire morbihannais au regard du critère d'estimation des surfaces d'occupation des sols semblent être :

- Surestimation des surfaces associées aux cultures (+ 45 %) ce qui risque de mener à une surestimation du stock associé à ce réservoir
- Sous-estimation conséquente de la surface liée aux zones humides sur le territoire (- 85 %)
- Sous-estimation de la surface liée aux zones artificielles (- 45 %)
- Imprécision générale sur le surfacique utilisé étant donné que la somme totale des différentes occupations du sol devrait atteindre autour des 630 000 ha (correspondant environ à la surface du département auquel on a retiré les 2 EPCI mentionnés), et non 681 822 ha comme c'est le cas, soit 8 % de plus qu'attendu (cf. Annexe 6) ce qui pose question sur la nature de l'erreur d'estimation.

L'actualisation pour 2024 devrait permettre d'atteindre une résolution de 0,25 ha, pour rappel elle est de 25 ha actuellement avec CLC. Cela pourrait améliorer la qualité des estimations de surface par occupation du sol.

Par ailleurs, la finesse de la typologie d'occupation des sols est assez faible pour un territoire sur lequel on dispose de données d'occupation plus précises. Cette typologie, étant pensée pour convenir à l'ensemble du territoire métropolitain, n'est pas des plus adaptées aux spécificités morbihannaises. En effet, 5 catégories sur 13 ne sont pas pertinentes sur le territoire car vides ou presque (vignes, vergers, prairies en zones arborée, peupleraie, sols artificiels arborés). De plus, des espaces avec des stocks importants comme les landes et fourrés qui représentent environ 12 000 ha ne disposent pas de sous-catégorie comme c'est le cas dans la méthode nationale. Il convient de relever cependant que la surface associée aux forêts, utilisant non pas CLC

³⁶ Cartes des grands types de végétation de Bretagne (Conservatoire botanique national de Brest, 2019)

mais la BD Forêt 2018, est tout à fait cohérente avec les dernières données de l'Agreste⁹. De même, le linéaire bocager employé est relativement proche des données les plus récentes, avec une légère sous-estimation d'environ 20 %.

2.2.1.2.2 Références de stocks et de flux : des références nationales mais peu spécifiques

Au même titre que pour le choix de la typologie utilisée, l'approche nationale est à double tranchant. La méthode est certes applicable sur l'ensemble du territoire, mais les références de stock et de flux utilisées sont des moyennes valables sur des grands espaces géographiques, et donc très peu spécifiques à une échelle locale, caractérisée par une certaine hétérogénéité. Comme spécifié dans les limites de l'outil, les stocks et flux employés peuvent ne pas être statistiquement valides à des échelles infrarégionales. Cela vaut pour les moyennes de stocks et de flux employées sur les massifs forestiers, calculés à l'échelle de la région Bretagne, qui par exemple pour la catégorie de forêts de résineux, combinent « des peuplements de pins sur le littoral et dans les landes (productivité faible à moyenne) et les plantations industrielles de douglas et d'épicéa de Sitka dans l'intérieur de la Bretagne (forte productivité) »³⁷. Pour rester sur les valeurs de référence touchant à la forêt, les données d'accroissement biologique net sont issues de la campagne d'inventaire forestier de l'IGN 2016 – 2020. Comme évoqué précédemment, le puits forestier est en déclin depuis quelques années, avec notamment des épisodes extrêmes en 2022 et 2023 qui ont causé une diminution de l'accroissement biologique à l'échelle nationale^{2,34}. Cela n'est pas forcément valable à l'échelle locale mais laisse tout de même entendre que les dynamiques ne sont pas figées entre années et peuvent être amenées à varier significativement au sein d'un intervalle de 5 ans.

Les stocks de référence pour le carbone dans les sols sont issus du RMQS (Réseau de mesures de la qualité des sols), selon des calculs qui suivent la méthode du CITEPA à l'échelle nationale (zonage pédoclimatique). Pour les flux de référence en cas de changement d'occupation, la méthode s'aligne globalement sur celle du CITEPA, mais ne permet pas encore de prendre en compte les dynamiques du carbone qui sont en cours s'il y a plusieurs changements depuis l'initialisation du stock à l'équilibre. L'actualisation prévue pour 2024 devrait permettre de remédier à cela³⁷.

Les stocks de référence pour les prairies, zones agricoles et zones humides sont cohérentes avec celles employées pour la méthode nationale. Il convient donc de garder à l'idée encore une fois que les données sont des moyennes larges qui n'ont pas nécessairement la même validité à toutes les échelles, ce d'autant plus quand il s'agit du réservoir des sols, très hétérogène.

Ainsi les données de sorties ne peuvent être interprétées qu'en tant qu'ordres de grandeur et non comme des résultats statistiquement interprétables.

2.2.2 Estimation des stocks et flux à la maille communale sur le territoire breton : une approche par le CITEPA et l'OEB

2.2.2.1 Méthode de comptabilité pensée pour la région Bretagne, une approche qui se veut plus spécifique mais qui manque d'actualisation

Le CITEPA et l'Observatoire de l'environnement de Bretagne (OEB) ont publié conjointement un rapport en 2019 intitulé « Développement d'une base de données des émissions et absorptions de gaz à effet de serre par les sols et la forêt en Bretagne »³⁸. Cette approche veut s'inclure dans une démarche de mise à jour des méthodes existantes pour la région Bretagne avec un raffinement des estimations à l'aide de données plus

³⁷ (ADEME, 2023c)

³⁸ Rapport final UTCATF Bretagne (Citepa, 2019)

adaptées. Elle s'inscrit comme une mise à jour du bilan UTCATF de l'outil Ener'GES, avec des innovations méthodologiques, s'inspirant largement des méthodes appliquées par le CITEPA pour l'inventaire national GES au titre de la CCNUCC.

L'intitulé du rapport indique que les principaux flux suivis sont liés aux sols et à la forêt, la démarche ne se veut pas exhaustive, mais plutôt au moins représentative des principales dynamiques quantitativement importantes et propres à la Bretagne. L'accent est donc mis sur l'évaluation des conséquences de l'afforestation, de l'évolution du linéaire bocager et de l'artificialisation³⁷. Cela signifie également que les flux liés à d'autres dynamiques prises en comptes dans la méthode nationale, telles que le stockage et le déstockage dans les sols organiques, l'accroissement biologique de végétaux hors ligneux forestiers, les incendies, les émissions naturelles de zones humides ou encore les émissions dues à des changements de pratique agricole (e.g. recul du labour), ne sont pas comptabilisés.

Il conviendra de noter que le rapport ayant été publié en 2019, la dernière réactualisation des recommandations du GIEC en 2019 était déjà sortie.

La méthode suit dans ses grandes lignes les principes du GIEC : les variations de stock sont calculées en fonction des changements d'utilisation, d'occupation ou de pratique pour les 5 compartiments de carbone (sol, biomasse, bois mort, litière, produits bois). En l'absence de changement observable, le stock de carbone est considéré comme stable et en équilibre. Les calculs sont réalisés pour chaque année de 2000 à 2017. On peut néanmoins relever 2 adaptations majeures de la méthode du GIEC³⁸.

Un premier changement important consiste à limiter les changements d'occupation excessif, ce qui passe par traiter les alternances entre prairies et cultures distinctement. Prairies et cultures sont ainsi considérées sous une même catégorie, dont leur alternance fait partie du système global, et la fréquence des prairies constitue comme une caractéristique de la catégorie avec plusieurs typologies. Par ailleurs, certaines terres, jamais mises en culture mais parfois classées comme écosystèmes naturels ou agricoles, sont également regroupées sous la catégorie de landes pour permettre un suivi et une réflexion spécifiques en raison de leurs caractéristiques particulières qui sont facilement identifiées dans les données d'occupation des sols. L'évolution de la végétation sur ce type de sols est par ailleurs considérée uniquement sous l'angle bocager et de manière désagrégée. L'analyse des évolutions de stock pour ce type précis d'occupation des sols est donc assez complexe.

La seconde adaptation concerne la flexibilité temporelle. La méthodologie GIEC préconise un suivi des terres sur une période de 20 ans, ce qui peut s'avérer difficile en pratique. Les données historiques sur de longues périodes peuvent introduire des biais, et les matrices GIEC sur 20 ans ne capturent pas bien les changements intermédiaires. La méthode adoptée en Bretagne évite ces contraintes en ne s'appuyant pas strictement sur un historique des terres sur 20 ans. Au lieu de cela, elle intègre les changements actuels et passés dans le calcul des stocks de carbone. Cette approche permet une plus grande flexibilité dans l'utilisation des données et facilite l'ajout de nouvelles années d'étude.

Le CITEPA en concertation avec l'OEB prévoient le lancement d'une actualisation de cette méthode en fin d'année 2024, voire début 2025, avec notamment des données de stocks de carbone dans les sols minéraux plus fines (A. Lacroix. *pers. commun*).

Le rapport a donné lieu à la constitution d'une base de données librement consultable et de fichiers sous format vectoriel, téléchargeables et visualisables sur la plateforme TerriSTORY³⁹. Les données finales de stocks et flux sont disponibles à différentes échelles de collectivités, la plus localisée étant la maille communale. Il n'est pas possible d'extraire des données selon le découpage géographique des espaces gérés par la collectivité départementale qui ne correspondent pas à un découpage administratif. Cela implique qu'une interprétation plus précise des dynamiques évoquées est impossible.

2.2.2.2 Références et données d'entrée utilisées, des choix de simplification qui améliorent la précision mais limitent l'exhaustivité

Les données de références utilisées pour les calculs de ce rapport sont globalement cohérentes avec celles employées par le CITEPA dans l'inventaire national, hormis cas particuliers développés plus haut.

Pour la détermination de l'occupation du sol, l'approche utilise 3 sources de données combinées³¹ (CLC, OSO Theia et Costel) qui se complètent selon la disponibilité des informations par année. Ce choix permet de couvrir une période temporelle plus vaste mais augmente considérablement les travaux d'harmonisation, et surtout les biais au niveau de l'interprétation d'un changement d'occupation. La typologie d'occupation du sol retenue pour les calculs contient 6 catégories : *Forêts – Zones agricoles* (dont prairies temporaires et permanentes productives) – *Landes* (végétation naturelle et prairies permanentes peu productives) – *Eau* (eaux intérieures et mer) – *Artificiel* – *Autres terres* (sol nu, roches, plages ...).

Cette reclassification permet donc également de mieux prendre en compte les spécificités du territoire avec l'implication des landes et notamment de la mer, mais fait aussi abstraction des territoires de zones humides, très corrélés avec les sols organiques, connus pour être de très bons réservoirs de carbone (e.g. sols de tourbières), et notamment pour relâcher de grandes quantités de GES en cas de drainage.

Les données de référence associées aux forêts sont les mêmes qu'Aldo¹⁹. Les remarques à faire sont donc similaires, à ceci près que les sources sont plus anciennes car le rapport ne bénéficie pas encore d'actualisation récente. Pour le carbone dans les sols, les données utilisées sont issues du RMQS avec une typologie de 4 catégories de sols, discriminées selon la texture pédologique principale, la zone climatique et l'occupation du sol. Une actualisation avec des données régionales comme issues de la plateforme Sols-de-Bretagne est envisagée.

Les calculs pour les flux associés au bocage se basent sur des données de mètre linéaire de haies, alloué par grande catégorie d'agrosystème défini à l'échelle de la région et par la fréquence de prairies. L'hypothèse est faite, comme pour la méthode nationale, hors changement du linéaire, que les flux s'équilibrent. Différentes études sur le stockage de carbone lié aux haies donnent pourtant des chiffres de stockage à la fois par la biomasse et par le sol (Catherine MORET & Sylvain BETOLAUD, 2023; Xavier Hamon et al., 2009). Pour les changements d'utilisation des terres, toute évolution dans la gestion ou l'état des haies est appliquée de manière uniforme à toutes les zones du territoire. Par exemple, si on suppose que la quantité de haies augmente ou diminue, cette modification est appliquée uniformément à toutes les parcelles agricoles du modèle.

Ainsi les valeurs de référence employées pour construire la base de données sont plutôt robustes à l'échelle nationale, mais les 2 problèmes principaux sont l'incertitude sur leur significativité statistique à l'échelle du département, et leur ancienneté, non négligeable sur des flux qui peuvent varier de manière assez importante entre plusieurs années.

³⁹ (Observatoire de l'environnement de Bretagne (OEB), 2024)

2.3 Interprétation des résultats et remise en contexte

2.3.1 Stocks de carbone du territoire : estimation avec l'aide de l'outil Aldo

2.3.1.1 Justification du choix de l'outil pour l'estimation

L'estimation des stocks de carbone pour le territoire morbihannais a été réalisée via l'outil Aldo. Ce choix a été fait car les sorties de l'outil sont détaillées et permettent une analyse plus poussée, qualitativement et quantitativement, des stocks du territoire. Cela permet de mieux faire ressortir les enjeux en termes de gestion des espaces naturels sur le territoire, ce qui est la finalité du travail. La carte des stocks du CITEPA, dont les stocks ne sont disponibles qu'à l'échelle communale et pas selon les réservoirs, ne permet pas de faire cela, ou du moins de manière beaucoup moins explicite. La spatialisation des stocks par commune ne permet pas de distinguer clairement les apports de tel ou tel espace à ces stocks. Il conviendra donc d'apporter un esprit critique sur les résultats donnés par Aldo et de proposer à la fois des pistes de réflexion et des nuances à garder en tête à la lecture des sorties. Une limite importante de l'outil reste l'absence d'écart-type.

2.3.1.2 Interprétation des résultats : des stocks estimés avec beaucoup d'incertitudes

L'outil Aldo a été appliqué sur une agrégation de 12 EPCI du territoire morbihannais. (Voir la liste en Annexe 9). Les résultats issus des données rentrées automatiquement dans l'interface sont représentés graphiquement dans la Figure 8, et la Figure 9.

Les 2 principaux réservoirs qui ressortent de ces premiers résultats sont les forêts et les cultures qui représenteraient à eux 2 environ 75 % des stocks (Figure 8), ce qui est dû en partie à l'importance du surfacique respectivement représenté. Il en découle également l'importance du réservoir des sols (0-30 cm) sur le stock total (estimé à 57 005 982 t C par Aldo), qui représenterait environ 65 % des stocks de carbone totaux. (Pour rappel, environ 25 % du stock de carbone des sols se trouve dans les horizons 30-100 cm, cf. §§ 1.2.2.3, et ne sont donc pas comptabilisés ici). Cependant, ces résultats sont biaisés en particulier par les paramètres évoqués §§ 2.2.1.2.1. Considérant ces remarques, il est possible d'envisager quelques ajustements afin d'obtenir un aperçu plus fidèle de l'occupation du territoire.

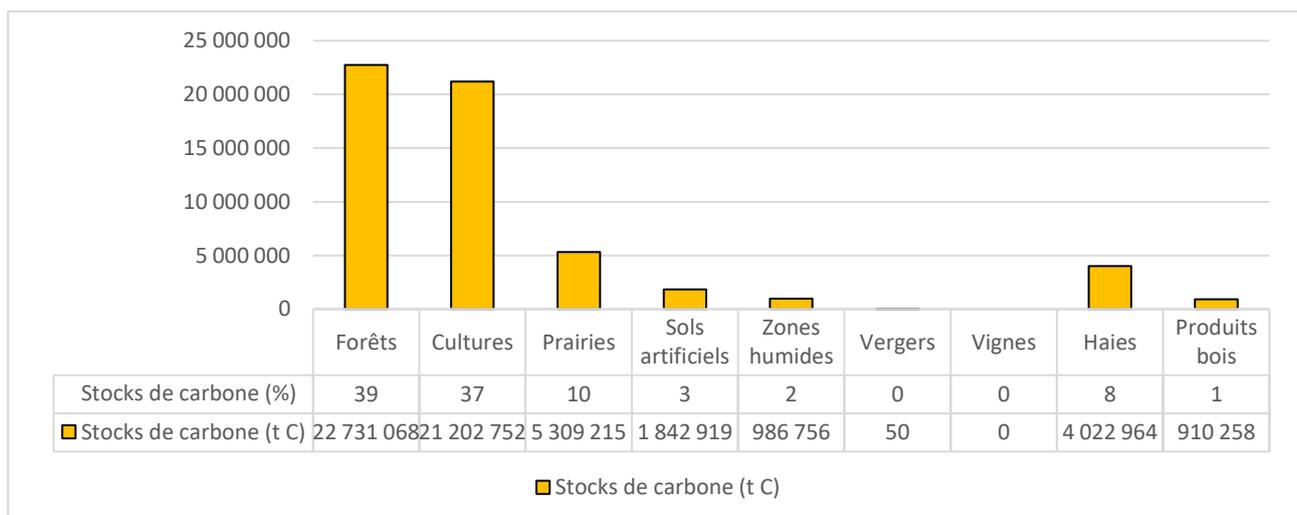


Figure 8 - Ventilation du stock carbone (t C) par occupation du sol (tous réservoirs confondus) sur le territoire morbihannais, d'après Aldo en 2024 – ADEME

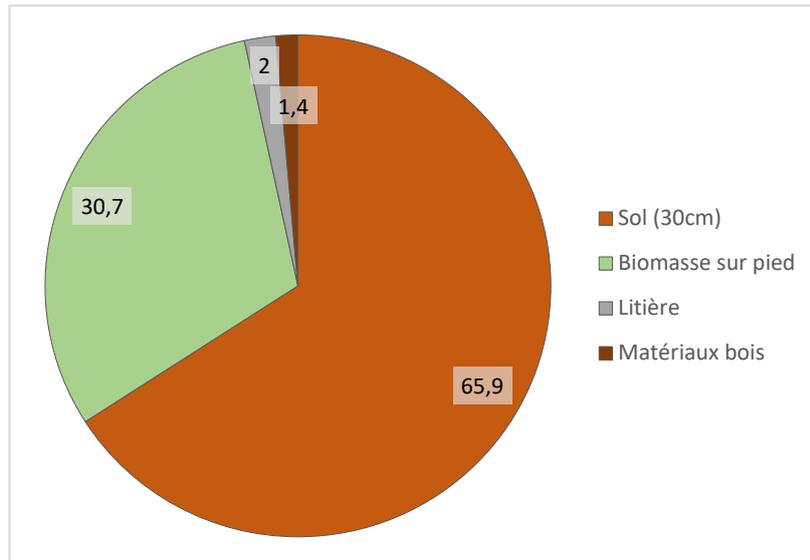


Figure 9 - Répartition du stock de carbone (%) par réservoir sur le territoire morbihannais, toutes occupations du sol confondues, d'après Aldo en 2024 – ADEME

L'ajustement proposé se base sur les remarques §§ 2.2.1.2.1 et utilise les surfaces d'occupation du sol de référence présentées Annexe 6 : Comparaison des surfaces utilisées par Aldo avec les références locales disponibles.

Les changements majeurs de cet ajustement modifient surtout la répartition des stocks de carbone du sol par occupation du sol (Figure 10). Les stocks associés aux cultures diminuent de plus d'1/3, tandis que les stocks de carbone contenus dans les sols de zones humides augmentent d'un facteur 6, les plaçant à la 3^e place en termes d'importance de stock (devant les haies et les prairies), tous réservoirs confondus (Figure 11).

Les stocks de zones humides sont très hétérogènes, la nature du potentiel stock peut varier grandement selon l'écosystème. La valeur de référence prise pour le calcul ici est 125 t C/ha, en comparaison la fédération des conservatoires naturels donne 1 400 t C/ha en stock de référence pour une tourbière avec 2 m de tourbe de profondeur⁴⁰ (sachant que la profondeur de tourbe peut varier de 50 cm à plus de 10 m en France). En se basant sur ces chiffres, le stock de carbone contenu uniquement dans les sols de tourbières pourrait avoisiner les 252 000 t C, soit quasiment 0,5% du stock total du territoire pour seulement 0,03 % de surface. Finalement, pour les zones humides qui représentent moins de 10 % de la surface du territoire, l'enjeu autour de ce stock réside surtout dans sa conservation. En cas de drainage ou autre type de mauvais état de conservation, ces milieux peuvent relarguer beaucoup de carbone, e.g. la Fédération des conservatoires naturels ⁴⁰estime le relargage potentiel lié à la dégradation des tourbières à environ 25 t CO₂e/ha/an. A titre de comparaison, l'ensemble des zones humides du territoire, en prenant la référence d'émission des tourbières, aurait un potentiel de relargage en un an de l'ordre de 23 fois le bilan des émissions de GES du Département de 2023 (Annexe 1) en cas de dégradation ou de drainage.

⁴⁰ (Pôle-relais tourbières, 2019)

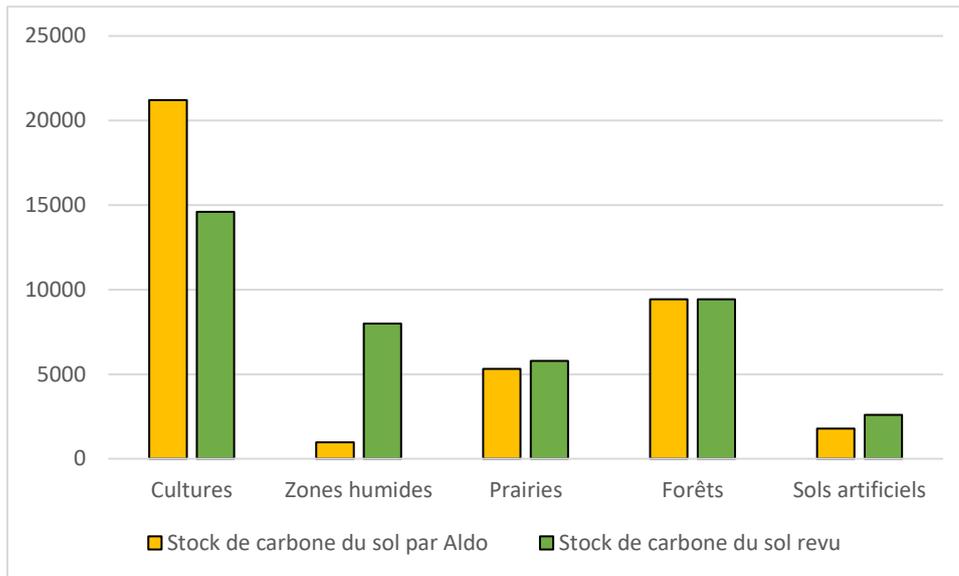
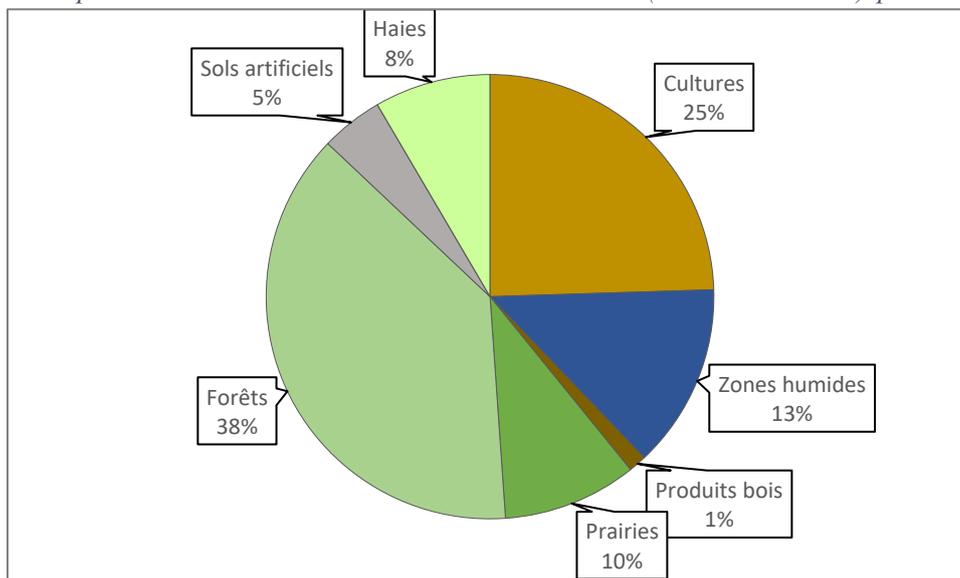


Figure 10 - Révision des stocks de carbone (kt C) par occupation du sol avec les données de la carte des végétations du CBNB estimés pour le **réservoir des sols** (0-30 cm et litière) à partir de l'outil Aldo – ADEME

Le premier réservoir en termes de stock reste celui lié à la forêt, à quasi-égalité entre les stocks compris dans les sols et la litière, et ceux issus de la biomasse aérienne. Les stocks de carbone dans la biomasse sont sujets à la gestion forestière (e.g. modalités et intensité de prélèvements), mais également aux aléas climatiques (e.g. tempêtes ou incendies) et sont donc également susceptibles de varier selon des cinétiques non linéaires.

Figure 11 - Répartition des stocks de carbone morbihannais (% du stock total) par occupation du sol



ajustée d'après les données du Conservatoire botanique de Brest, avec la méthode d'estimation d'Aldo (Par un souci de lisibilité, les vergers et les vignes ont été retirés de la légende.) - ADEME

Le deuxième réservoir est donc celui lié aux cultures (25 % des stocks du territoire), qui est également le stock le plus important si l'on ne considère que le réservoir des sols (Figure 10). L'importance de cette occupation du sol est due au surfacique déterminant sur le territoire morbihannais pour lequel 53 % du territoire est en SAU (NB : cela comprend également les cultures permanentes). Bien que ces informations ne puissent pas être mises en valeur par ces résultats, il convient de rappeler que les sols agricoles en Bretagne (Martin, 2019) ont des teneurs moyennes en CO légèrement plus élevées que dans le reste de la France. Cela implique

également des taux de saturation plus importants (cf. §§ 2.3.2.2), avec un gradient notable typique croissant de nord-est au sud-ouest qui place les sols agricoles morbihannais du côté des sols les plus riches (Walter et al., 1995) (Figure 12).

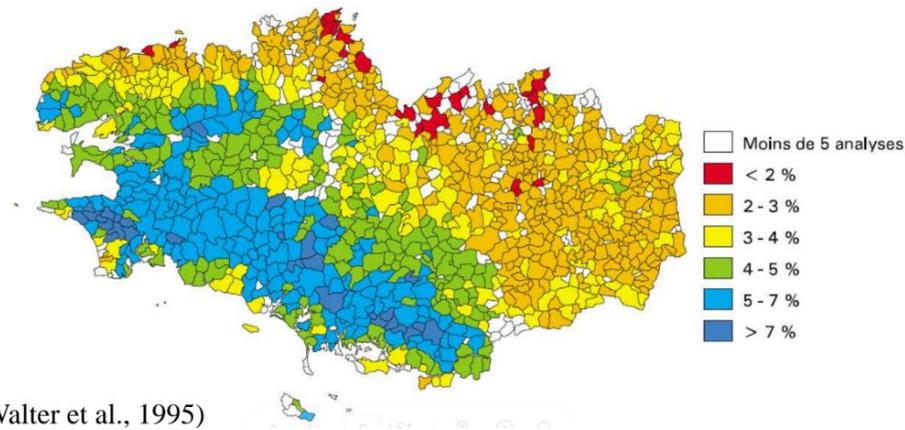


Figure 12 - Médiane communale du taux de matière organique dans les sols en Bretagne (données 1990 – 1994)

Il peut être intéressant de déplorer le manque de prise en compte isolée des stocks de carbone contenus dans les écosystèmes de landes présents sur le territoire, qui représenteraient près de 4 100 ha (Annexe 6 : 3 600 ha de landes sèches et mésophiles et 500 ha de landes humides (non détaillées)). Le CITEPA dans son inventaire régional pour la Bretagne utilise les valeurs de référence de 84 t C/ha dans les sols sous les landes, avec en plus 5 t C/ha pour la biomasse. Selon ces chiffres, les écosystèmes de landes contiendraient environ 365 000 t C dans le Morbihan, soit 0,6 % des stocks de carbone totaux pour 0,6 % de la surface du territoire. Des stocks qui sont particulièrement sensibles dans la mesure où ces écosystèmes sont sujets à des incendies quasiment annuellement. A titre d'exemple, entre 2012 et 2022, environ 750 ha de landes auraient été touchés par des incendies dans le Morbihan (Annexe 8). Cela représenterait des émissions de carbone de pouvant varier d'environ 15 000 t CO₂e pour la fourchette basse, à près de 330 000 t CO₂e dans le pire des cas (selon la nature des compartiments carbone touchés, la situation la plus extrême étant un feu d'humus comme il y en a eu en 2022. Les taux d'émissions peuvent alors atteindre jusqu'à 150 t C/ha (B. Clément, *pers. commun.*), soit 550 t CO₂e/ha).

Enfin, les stocks de carbone enfouis constitués par les écosystèmes de type « carbone bleu », tels que les vasières, les herbiers marins, les marais salés ou encore la colonne d'eau ne sont pas comptabilisés ici par manque de donnée, mais constituent des stocks certainement considérables³⁰, et ce notamment pour un territoire avec une telle façade océanique comme le Morbihan.

L'estimation des stocks de carbone sur un territoire départemental est sujette à des incertitudes importantes. Cela est dû en partie à l'application de valeurs moyennes à des territoires pouvant être très hétérogènes, mais également aux imprécisions liées à la classification des espaces par typologie d'occupation du sol. Deux tiers des stocks de carbone du Morbihan se trouvent dans les sols (30 premiers cm), sous les cultures, les forêts, les zones humides et les prairies. Les cultures constituent un stock de carbone important du fait de la surface occupée. Le carbone contenu dans la biomasse du département, correspondant à environ un tiers des stocks, est issu des forêts et du bocage en moindre proportion.

2.3.2 Flux de carbone : utilisation des données issues de l'approche CITEPA et OEB

2.3.2.1 Justification du choix de la méthode utilisée

L'estimation des flux proposée par Aldo est moins pertinente que celle du bilan UTCATF proposé par le CITEPA pour la région Bretagne en 2018. En effet c'est une méthode qui utilise une typologie d'espaces plus adaptée au contexte locale. De même, l'approche de détermination des changements d'occupation est une approche 3 spatialement explicite (cf. §§ 1.3.1), comme recommandé par le GIEC. Elle permet d'avoir des données de flux régionalisées, corrélées avec des dynamiques paysagères qui sont de bonnes pistes de réflexion pour interpréter les résultats du bilan des flux. Par ailleurs, les résultats en termes de flux d'Aldo majorent largement l'impact de l'accroissement forestier. Les données produites par le CITEPA suivent la méthode d'Aldo pour la forêt, avec certains autres flux supplémentaires pris en compte. Cette méthode, bien qu'encore lacunaire pour l'échelle morbihannaise, est la plus complète disponible à ce jour. Même si les données de flux sont valables uniquement pour l'année 2018, elles permettent tout de même de distinguer des tendances locales dans une perspective de réflexion sur les dynamiques régissant les puits de carbone du territoire.

2.3.2.2 Interprétation des résultats : un stockage général qui ralentit, avec des tendances inégalement réparties sur le territoire

Les résultats du bilan net des flux comptabilisés par le CITEPA sur le territoire breton seront commentés ici à la maille départementale (Figure 14), et à la maille communale (Figure 13). Pour le moment, la totalité des données n'est disponible que pour l'année 2018, téléchargeables sur la plateforme TerriSTORY³⁹. En l'absence de donnée équivalente plus récente, l'analyse se basera néanmoins dessus. A l'exception de l'artificialisation, dont les flux de déstockage sont considérés comme très rapides, ayant lieu dans l'année pour la méthode ici présente (cf. §§ 2.2.2.1), ou durant 5 ans pour la méthode nationale (cf. §§ 1.3.2), les flux dont il est question sont le produit de dynamiques qui ont lieu sur des dizaines d'années. Pour améliorer la pertinence des remarques, il serait donc intéressant de comparer ces flux moyens annuels à la fois entre périodes, e.g. sur les périodes 2005-2015 et 2015-2024, et à la fois entre années individuellement. Les flux bruts et nets d'autres années ne sont disponibles que pour l'année 2015⁴¹, qui correspond à la moyenne des flux pour la période 2005-2015 (Figure 14). Les cartes correspondant aux dynamiques brutes explicatives du bilan net par commune ayant permis d'obtenir la Figure 13 sont disponibles en Annexe 10.

A l'échelle du département, la dynamique absolument prédominante en termes d'ordre de grandeur est la séquestration liée à l'accroissement biologique forestier (Figure 14), qui est lui-même le bilan net des flux bruts liés à la croissance biologique (stockage), la mortalité (déstockage) et les prélèvements (déstockage). La seule différence notable entre la période 2005-2015 et l'année 2018 en termes de flux est la diminution de l'importance du flux de séquestration lié à l'accroissement biologique forestier de l'ordre d'environ 6 %. En l'état actuel, il est difficile de dire si cette diminution est significative, il faudrait compléter l'analyse avec des données plus récentes pour voir si la tendance se confirme. Cela dit, une diminution du puits forestier à l'échelle locale sur cette période serait tout à fait cohérente avec les tendances de l'évolution du secteur UTCATF à l'échelle nationale sur la dernière décennie^{2,3}.

⁴¹ (Robert, C., 2019)

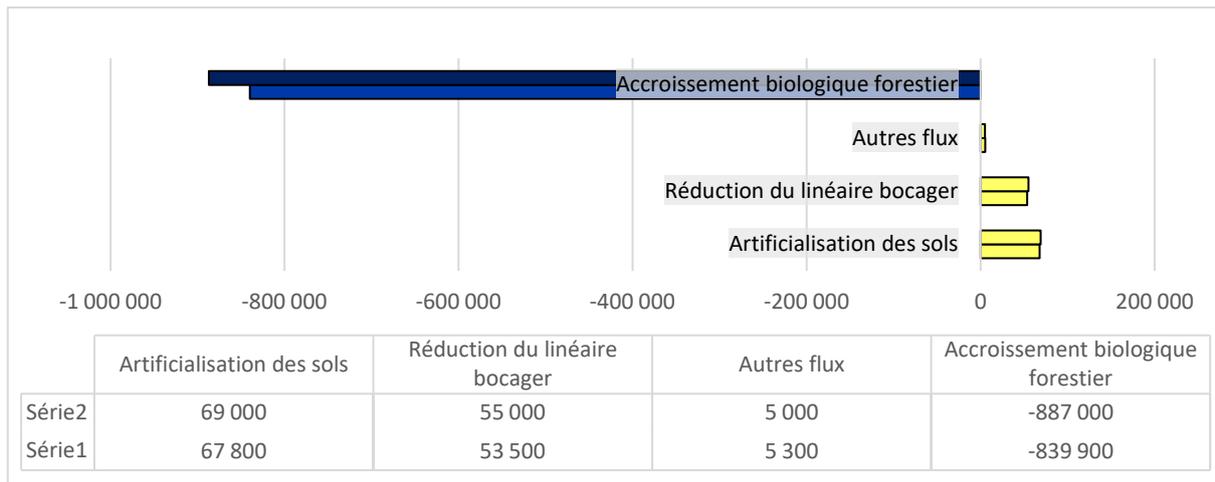


Figure 14 - Principaux flux de carbone liés aux sols et à la forêt sur la période 2005-2015 (Série 2, au-dessus) et en 2018 (Série 1, en dessous) sur l'ensemble du territoire morbihannais (en t CO₂e/an) – données CITEPA

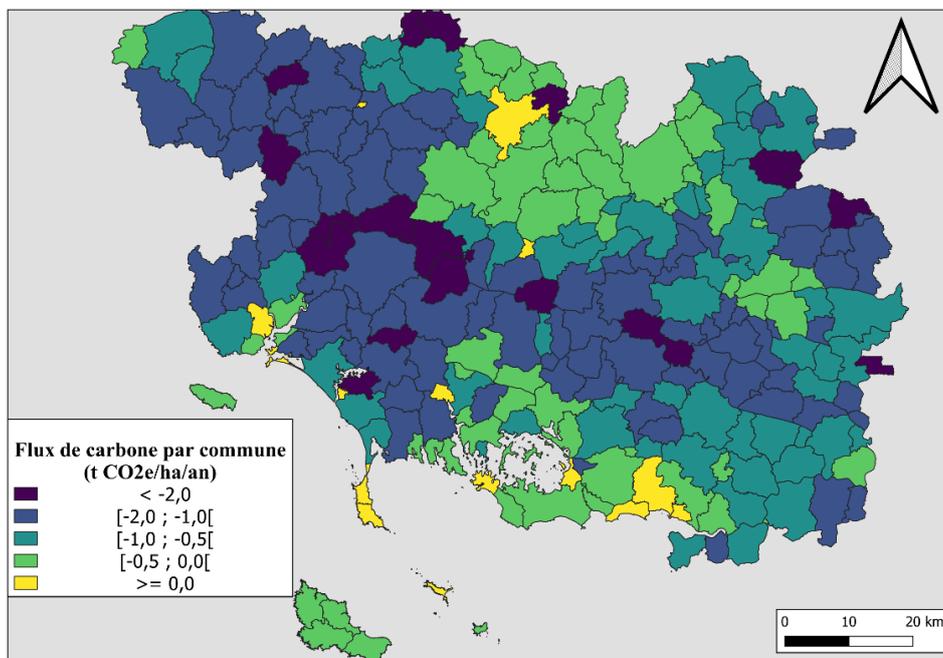


Figure 13 - Bilan net des principaux flux de carbone (t CO₂e/ha/an) : croissance forestière, artificialisation, évolution du linéaire bocager et changement d'occupation du sol, calculé pour chaque commune du Morbihan en 2018 (Pour rappel les flux négatifs désignent un retrait de CO₂ à l'atmosphère) – données CITEPA

La Figure 14 est une simplification de la réalité car elle ne représente pas tous les flux à prendre en compte dans le secteur UTCATF, il n'y a pas que l'activité du puits forestier qui intervient dans la séquestration carbone du secteur. Parmi les principaux puits attendus sur le territoire, on pourrait compter les prairies permanentes, les zones humides, les landes, ou encore les écosystèmes marins et intertidaux type carbone bleu. Parallèlement, d'autres flux de déstockage notables ne figurent pas dans le bilan, tels que les flux liés aux incendies de forêt et de landes, aux retournements de prairie, ou au drainage de zones humides. Cela pourrait expliquer la régionalisation apparente de flux de stockages très faibles, voire de déstockages, dans les zones avec une densité forestière moins importante telles que les zones côtières avec des communes situées sur Belle-Ile en mer, connue pour ses écosystèmes de landes, ou alors le golfe avec ses grandes surfaces de vasières

intertidales, ces espaces sont en vert clair sur la Figure 13. De plus, la présence d'une surface forestière importante sur une commune peut cacher des flux de déstockage importants dans ce genre de représentation.

La valeur des stocks de carbone par commune étant disponible pour chaque année sur la période 2000-2017, une analyse diachronique succincte des données de stocks de carbone à l'échelle communale via R studio a pu être possible. Cette approche vise à mettre en évidence des tendances spatiales dans l'évolution des stocks conjecturée (Le Noë et al., 2023). Dans ce but, les stocks de carbone par commune ont été récupérés pour les années 2000, 2008 et 2017, de sorte à pouvoir comparer les tendances d'évolution entre 2 périodes les plus vastes possibles : 2000-2008 et 2008-2017. La tendance de variation des stocks est quantifiée par le rapport des stocks de l'année la plus ancienne sur ceux de l'année la plus récente. Un taux d'évolution moyen supérieur à 1 signifie que le stock a augmenté, et inversement, e.g. un taux d'évolution de 0,95 signifie que le stock de la commune a diminué de 5 % sur la période considérée.

Ainsi la tendance de variation de l'ensemble des stocks par commune sur la période 2000-2017 est de l'ordre de + 3 %. Les variables de stocks par commune sont appariées 2 à 2 entre les périodes considérées, on peut donc utiliser le test de Wilcoxon des rangs signés pour comparer les moyennes de chaque groupe. La très faible p-value de 2.2×10^{-16} indique que les taux d'évolutions moyens sont significativement différents entre la période 2000-2008 (+ 2,5 %) et la période 2008-2017 (+ 0,1%) (voir Figure 15). Il y a donc une diminution générale de la vitesse de stockage sur l'ensemble de la période 2000-2017.

Cette tendance se constate facilement à la vision des 2 cartes (Figure 15) avec la même légende. Il est flagrant sur la carte faite pour la période 2000-2008 qu'à l'exception de quelques rares communes (seulement 0,5 % ont un taux d'évolution inférieur strict à 0,99), la dynamique générale est à l'augmentation nette du stock de carbone. Or sur la période 2008-2017, le panorama est bien plus contrasté. En effet, 20 % des communes ont atteint un taux d'évolution inférieur strict à 0,99, soit une augmentation entre les deux périodes d'un facteur 40 du nombre de communes en diminution de stocks. Cela peut s'expliquer par une prise en compte plus importante des flux liés aux changements d'occupation des sols sur la dernière décennie due à une plus grande fiabilité des données plus récentes. Cependant, le CITEPA dans son rapport précise bien qu'en cas de doute, les changements d'occupation des sols ont été minorés afin de minimiser les éventuels effets d'artefact liés à ce problème³⁸. Au niveau de l'évolution des dynamiques paysagères existantes qui pourraient nuancer ces variations, la Figure 14 ne laisse pas entrevoir de tendance particulièrement marquante. Cela n'exclut cependant pas que les facteurs de variation les plus importants ne soient simplement pas couverts sur l'échelle temporelle des données disponibles. Il est néanmoins pertinent de soulever que l'arasement bocager est en très léger recul et que les flux liés à l'artificialisation des sols ne diminuent pas significativement entre les 2 périodes. Les chiffres disponibles sur la vitesse d'artificialisation dans le Morbihan fournis par la DREAL Bretagne en 2017 au cours de la dernière décennie font même plutôt état d'une accélération de l'artificialisation de + 0,90 % par an entre 2011 et 2014⁴². La persistance de la pression d'artificialisation pourrait ainsi être une piste d'explication.

⁴² (DREAL Bretagne, 2017)

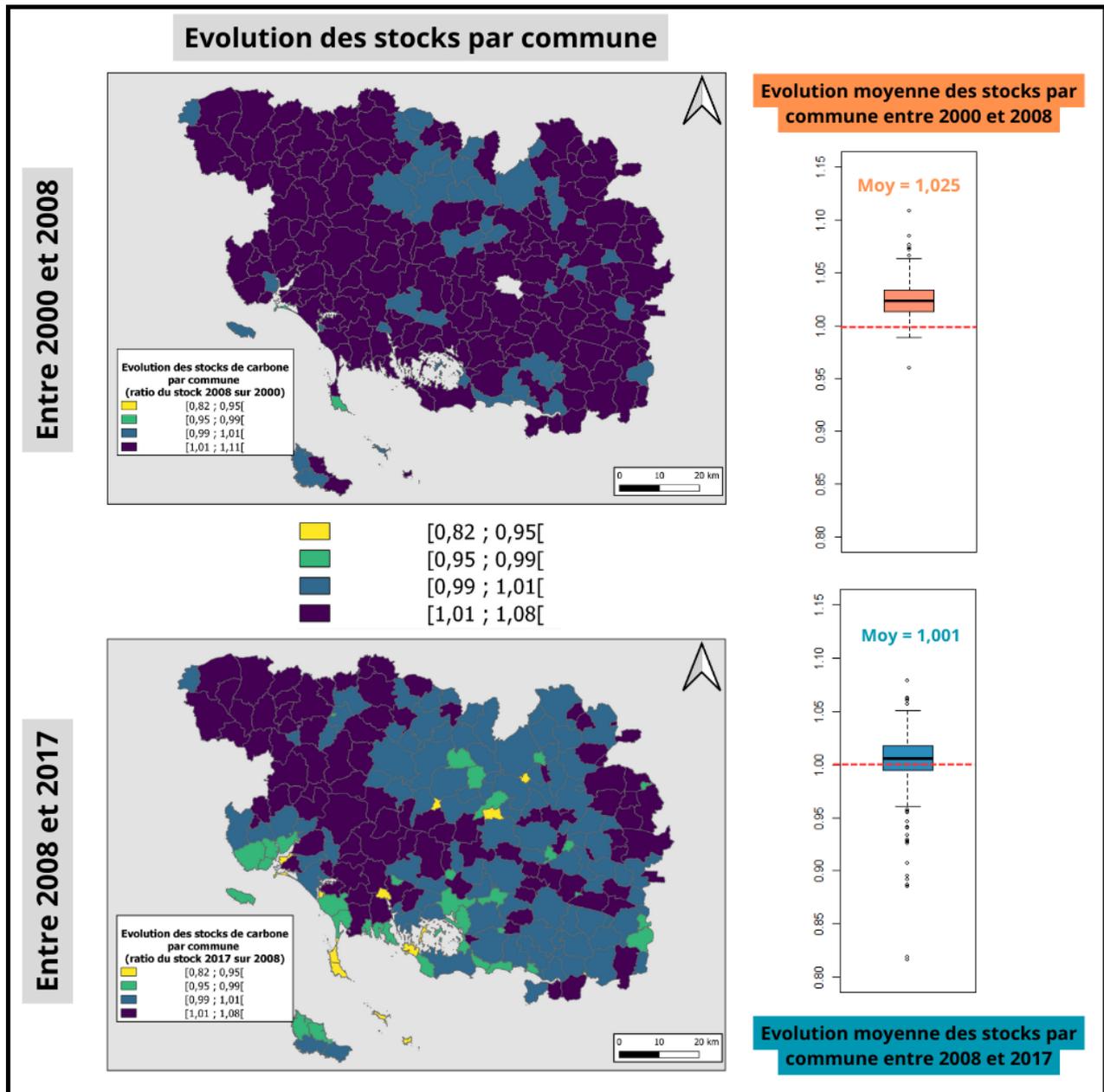


Figure 15 - Evolution des stocks de carbone par commune du Morbihan entre 2 périodes : 2000-2008 et 2008-2017 (Un taux d'évolution supérieur à 1 correspond à une augmentation du stock entre 2 dates et donc à un stockage moyen sur la commune, inversement un taux inférieur à 1 correspond à un déstockage. Une évolution moyenne de 1,025 signifie que les stocks de carbone par commune ont en moyenne augmenté de 2,5 % sur la période.) – données CITEPA

Il semble que des groupes de communes se dessinent avec des zones géographiques qui suivent des tendances similaires en particulier sur la période 2008-2017. En effet les taux d'évolution sont inégalement répartis sur le territoire. Des modèles linéaires simples ont été utilisés pour tester la relation entre les taux d'évolution de stocks sur la période 2008-2017 et les différentes dynamiques paysagères. Pour l'interprétation des relations, il convient de se pencher sur les coefficients de corrélation (coef) associés à chaque dynamique explicative (ils qualifient la nature de la relation à la variable), ainsi que sur leur p-value (pour rappel, les p-values faibles (inférieures à 0,05) indiquent que les résultats observés sont très probablement significatifs et ne sont pas dus au hasard).

Cela a permis de montrer que la présence qu'une croissance nette du stock est corrélée très positivement avec une dynamique forestière importante sur la commune (coef = 0,08 avec p-value = 2,802e-05). Le taux d'artificialisation en 2018, corrélé négativement avec l'évolution du stock par commune, est la variable avec la p-value la plus significative (coef = - 0,01 avec p-value = 7,148e-06). Enfin la dynamique bocagère n'est pas une variable déterminante pour l'évolution des stocks par commune sur la période 2008-2017 (p-value = 0,6635). Le fait que la dynamique bocagère ne soit pas un facteur clé de l'évolution des stocks sur cette période pourrait être dû à la présence d'une surface de forêt en moyenne importante sur les communes avec du bocage, ce qui prendrait le pas sur les flux occasionnés par la dynamique bocagère. Ces résultats ne sont pas surprenants, les dynamiques qui ressortent sont celles qui génèrent les flux annuels de carbone les plus importants. Ces corrélations n'impliquent pas forcément causalité, il pourrait ainsi être intéressant de creuser la relation entre la répartition spatiale de ces dynamiques et l'évolution des stocks par commune.

Compte tenu des disparités observées dans les dynamiques paysagères et leur influence variable sur l'évolution des stocks, il semble pertinent d'examiner plus en détail ces variations par le biais d'une analyse par clusters. Le clustering est une méthode de machine-learning qui permet l'identification d'individus similaires en groupes homogènes pour l'exploitation de données. Dans le cas présent, des clusters de communes ont ainsi été créés de sorte à minimiser à la fois l'inertie intra-classe et le nombre de classes, sur la base de l'interaction des 3 dynamiques paysagères sur chaque commune. Un individu extrême, la commune de Port-Louis, a été retiré de l'analyse. Il tirait l'inertie intra-classe vers le haut avec son taux d'artificialisation de 17 %, alors que la médiane est à 0,51 % et le 3^e quartile à 1,12 %. L'algorithme itératif du K-means a été utilisé pour réaliser le clustering avec un nombre optimal de 4 classes, déterminé par la méthode du coude. La répartition spatiale des communes des différents clusters est illustrée par la carte de la Figure 16, à chaque cluster de communes est associé une couleur.

L'analyse des variances par une ANOVA significative (p-value très faible de 5.28e-16) sur les taux d'évolution moyens de la période 2008-2017 par cluster justifie l'utilisation d'un test post-hoc HSD de Tukey. Cette méthode statistique permet d'identifier les paires de moyenne significativement différentes dans un ensemble de groupes. Les p-value inférieures au seuil de signification de 0,05 ressortent pour les couples 4-1, 4-2 et 4-3. Ce résultat montre la présence de 2 groupes de clusters. Les communes du cluster 4 se distinguent par la moyenne de leur taux d'évolution (0,95), significativement différente des autres clusters, pour lesquelles le taux d'évolution est compris entre 1,00 et 1,02 (en bas à gauche Figure 16).

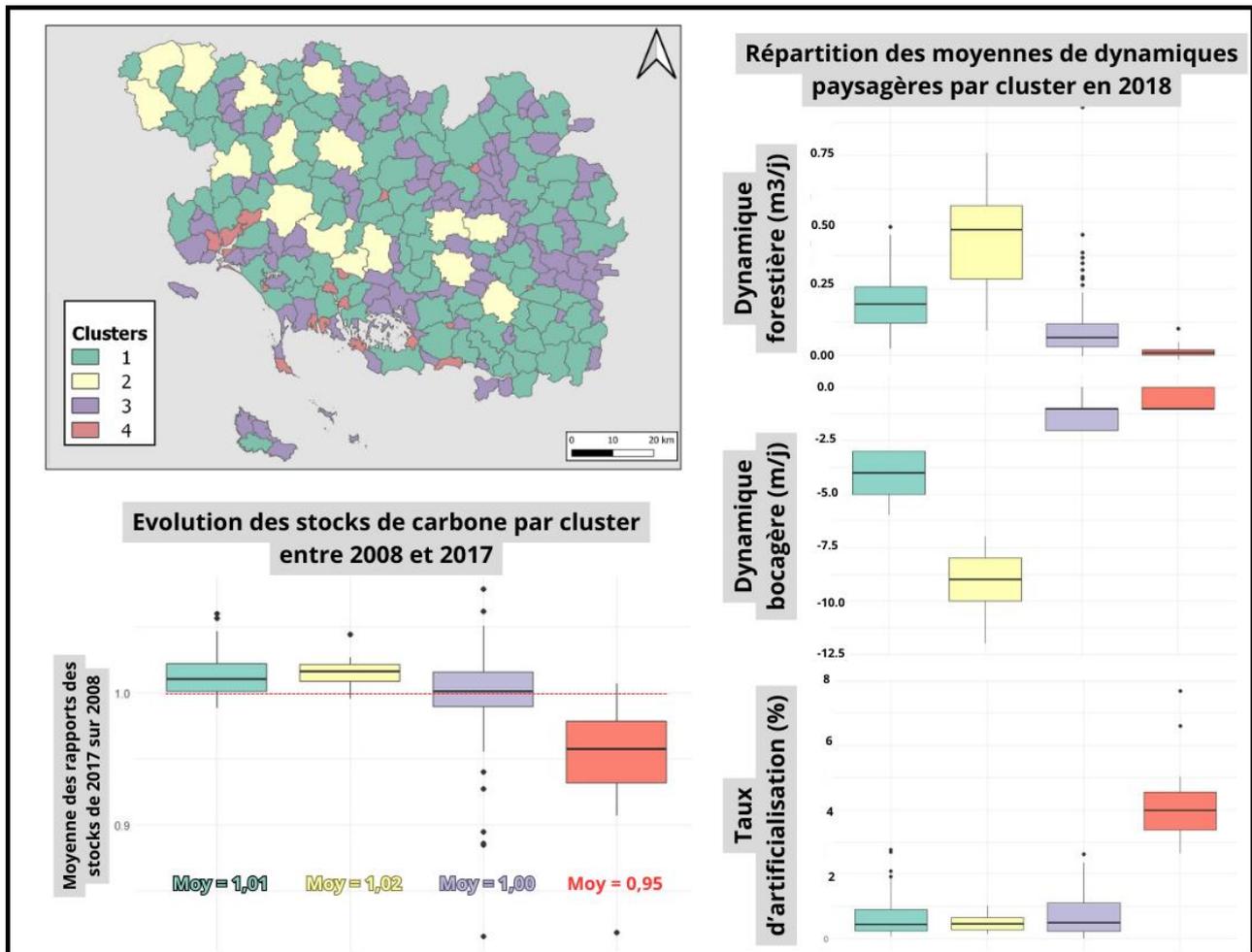


Figure 16 - Evolution des stocks de carbone, dynamique paysagère et répartition des communes morbihannaises divisées en 4 groupes de communes. Les groupes sont identifiés par un code couleur et ont été créés selon les similarités des communes par rapport aux différentes dynamiques paysagères qui les caractérisent (forestière, bocagère et artificialisation) – données CITEPA

Les communes du cluster 4, qui en moyenne connaissent toutes une décroissance de leur stock de carbone, sont caractérisées par des taux d'artificialisation (moyenne de 4 %) nettement supérieurs aux autres communes, et des dynamiques bocagères et forestières quasi-nulles (colonne droite Figure 16). Ce sont des communes comme Arzon, Lorient, Quiberon, Auray, Gâvres, Locminé avec une part importante de surfaces urbanisées. La fonction puits de carbone sur ces espaces est donc effectivement assez limitée par la faible présence d'écosystèmes puits de carbone, mais également par la pression d'artificialisation et de fréquentation exercée sur le reste des espaces naturels et semi-naturels.

L'hypothèse formulée précédemment sur l'éventuelle corrélation spatiale entre une dynamique bocagère importante et des surfaces forestières est confirmée par les dynamiques moyennes des communes du cluster 2. Elles ont en moyenne la dynamique de perte bocagère la plus importante, mais le flux de déstockage occasionné est largement compensé par la dynamique forestière (colonne droite Figure 16), ce qui donne le taux d'évolution moyen le plus élevé de tous les clusters (en bas à gauche Figure 16). Ces communes, toutes à dominante rurale, ont une dynamique d'artificialisation assez basse.

Les communes du cluster 1 ont un profil similaire à celles du cluster 2 mais avec des dynamiques forestières en moyenne 2 fois moins importantes (colonne droite Figure 16), ce qui peut expliquer un flux de stockage un peu moins important. Certaines, comme la commune de Bangor à Belle-Ile en Mer, ou celle de

Monterblanc qui est traversée par le Massif des landes de Lanvaux, contiennent une partie importante de landes ou de landes en cours de fermeture, qui ne sont pas comptabilisées en tant que forêt ou végétation ligneuse, mais plutôt en tant que milieux ouverts (cf. §§ 2.2.2.1). Ces milieux ont en moyenne des dynamiques de stockage de carbone importante mais cela n'apparaît pas ici. On peut également citer la commune d'Erdeven, dont une cinquantaine d'hectares de massif forestier-landicole ont brûlé en août 2022. Ce genre d'évènement n'est pas comptabilisé dans la méthode et pourtant occasionne un déstockage massif à l'échelle d'une commune.

Les communes du cluster 3 font partie du groupe le plus hétérogène. Avec 110 individus, elles représentent quasiment la moitié des communes du département. Ces communes sont situées sur à peu près tous les types de paysage du département : landes de Groix, massif forestier de Paimpont-Brocéliande sur la commune de Concoret, dunes de Plouharnel, marais de Séné et de Pénestin,... Cet aspect hétéroclite pourrait expliquer la moyenne du taux d'évolution des stocks de 1,00. En effet la répartition des valeurs du boxplot (en bas à gauche Figure 16) est très symétrique autour de 1, avec quelques individus extrêmes. Les dynamiques paysagères prises en compte dans cette étude ont toutes des moyennes assez faibles pour ce groupe de communes (colonne de droite Figure 16). De fait, il semble que cette sélection de dynamiques ne soit pas pertinente, d'une part pour expliquer les variations au sein de ce groupe, et d'autre part pour représenter la réalité des flux qui les traverse. Il est probable que la prise en compte d'autres flux liés aux écosystèmes présents sur ces communes tels que la séquestration par les landes, les marais salés, les zones humides, ou encore les flux liés aux activités agricoles, permettrait de faire ressortir des dynamiques différentes que la stagnation en moyenne observée ici.

Finalement, l'estimation des flux ne doit pas être considérée comme exhaustive, elle permet d'avoir une idée des ordres de grandeurs associés à de grandes dynamiques paysagères et non au secteur UTCATF dans son ensemble ou à l'activité des puits de carbone de tout le territoire. Une analyse d'évolution à maille fine est très limitée ici et ne permet de tirer des conclusions que sur l'impact des dynamiques prise en compte, mais sur des espaces qui ne sont pas forcément concernés de manière homogène par celles-ci.

Dans une perspective de réflexion sur les politiques publiques visant à préserver la fonction puits de carbone, la distinction des dynamiques territoriales influençant le stockage ou le déstockage de carbone est essentielle. Les dynamiques dont il est question peuvent être impliquées directement ou indirectement dans des décisions de politiques territoriales qui seront en partie discutées §§ 3.1, avec d'autres dynamiques qu'il n'a pas été possible de prendre en compte ici, mais qui peuvent également être l'objet de mesures visant directement ou non la fonction puits de carbone.

Ainsi, les stocks de carbone par commune du département augmentent en moyenne sur les vingt dernières années, mais cette augmentation est plus faible sur la dernière décennie. Sur l'ensemble du territoire du département, l'absorption de carbone par la forêt morbihannaise est le flux le plus important en valeur absolue, mais il semble qu'il connaisse aussi un récent affaiblissement. Cela reste néanmoins à confirmer avec des données plus récentes. Ce flux d'absorption s'oppose au déstockage lié à des dynamiques paysagères inégalement réparties sur le territoire, comme l'artificialisation des sols, la réduction du linéaire bocager et d'autres flux liés à des changements d'occupation des sols. Cependant, l'ensemble des flux et des espaces comptabilisés n'est pas suffisamment exhaustif pour rendre compte de la réalité du territoire, ou pour expliquer les tendances observées.

2.4 Pistes d'approfondissement et de réflexion pour l'estimation de la fonction puits de carbone du territoire morbihannais

Le diagnostic réalisé ici de la fonction puits de carbone sur le territoire du département a été largement limité par la disponibilité des données, leur récence, l'échelle d'application des outils utilisables, par la connaissance actuelle du fonctionnement des puits de carbone naturels, ainsi que par la connaissance du territoire et des dynamiques paysagères et écologiques qui le régissent. Cela peut s'avérer suffisant pour construire un état des lieux général, identifier des éventuelles politiques territoriales essentielles à mettre en place. Cependant, l'ampleur des incertitudes et le choix assumé de non-exhaustivité peuvent s'avérer contraignants dans l'optique d'évaluer plus précisément l'impact de telle ou telle pratique, telle ou telle mesure, ou encore de réaliser un inventaire GES de territoire sur lequel baser une planification écologique avec objectif de neutralité carbone.

Au sujet de l'estimation des stocks, des adaptations méthodologiques pourraient permettre de minimiser les incertitudes, notamment l'adaptation de la typologie au contexte morbihannais (e.g. proposition de typologie en Annexe 5, et correspondance avec les catégories de la carte des végétations du CBNB), ainsi que l'utilisation de données d'occupation des sols plus spécifiques au territoire (e.g. issues de la carte des végétations du CBNB), pour les stocks dans les forêts, ou encore le réservoir sol (e.g. utilisation des données sur les sols disponibles sur la plateforme Sols de Bretagne fourni par l'UMR SAS de l'Institut Agro Rennes, recommandée par le CITEPA dans son actualisation de l'inventaire GES pour la Bretagne).

L'actualisation prochaine prévue courant 2024 de l'outil Aldo devrait probablement remédier à certains soucis méthodologiques déjà évoqués précédemment. De même, l'OEB compte également travailler sur une nouvelle actualisation de l'inventaire UTACTF pour la Bretagne avec le soutien du CITEPA. Il serait donc intéressant de suivre l'évolution de ces méthodes quand elles seront publiées et de comparer les résultats, plus récents, plus adaptés et plus pertinents sur le territoire que ceux disponibles à l'heure actuelle.

En l'état actuel des connaissances, certains ajustements pourraient déjà être mis en place pour améliorer les estimations. Au vu du pourcentage déterminant que représente le réservoir des cultures par rapport au stock de carbone total du territoire (cf. §§ 2.3.1), la prise en compte des pratiques agricoles comme pouvant influencer les tendances d'évolution des stocks de carbone dans les sols est une piste importante à creuser. Elle n'a pas pu être mise en place ici par manque de donnée. Bien que cela puisse être laborieux, il serait avisé de mettre en place une collecte d'informations la plus exhaustive possible sur les surfaces du territoire sur lesquelles a été adopté une certaine typologie de pratiques considérées comme « stockantes » par l'INRA dans son rapport « 4 pour 1000 stocker du carbone dans les sols français »²¹. L'outil Aldo¹⁸ propose déjà des coefficients de potentiel additionnel de stockage (en t C/ha) pour les pratiques suivantes issues de l'étude INRA "Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ?"³³ : « - Intégration ou allongement de prairies temporaires dans les rotations de cultures - Intensification modérée des prairies peu productives (hors alpages et estives) - Agroforesterie en grandes cultures - Agroforesterie en prairies - Couverts intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN) en grandes cultures - Haies sur cultures (60 mètres linéaires (ml) par ha) - Haies sur prairies (100 ml par ha) - Bandes enherbées - Couverts intercalaires en vignes - Couverts intercalaires en vergers - »

En parallèle, il convient de rappeler que les sols bretons, et en particulier morbihannais, sont à un degré de saturation de matières organiques plus élevé que la moyenne nationale (Chen et al., 2019), ce qui implique que le potentiel de stockage additionnel est plus limité. Le rapport de l'INRA (Pellerin et al., 2020) indique d'ailleurs que les sols agricoles métropolitains en grandes cultures seraient émetteurs nets d'environ 170 kg C/ha/an, soit environ 0,62 t CO₂e/ha/an en moyenne, des flux qui s'expliqueraient en partie par des retournements de prairie anciens. Si on appliquait ce facteur d'émission à la surface de terres considérées en

« cultures » dans la typologie du CBNB, les émissions naturelles liées aux sols agricoles se placeraient en premier poste d'émission selon les chiffres présentés à la Figure 14, devant les flux dus à l'artificialisation des sols en 2018. Rien ne dit que les moyennes nationales soient statistiquement valides sur le territoire morbihannais, mais cela justifie bien l'intérêt de suivre plus précisément ce qui se passe sur ces terres, et le levier que peuvent représenter les sols agricoles en termes d'atténuation du changement climatique.

Au même titre, en plus de ceux liés à la différence de linéaire, la prise en compte d'autres flux liés à la présence de haies sur le territoire pourrait améliorer les estimations de ce réservoir. L'impact direct de la présence de haies sur le stock de carbone dans le sol est difficile à quantifier, cependant son influence pour générer des dynamiques de stockage a été montrée, (Xavier Hamon et al., 2009) avec un potentiel de stockage de carbone dans le sol par l'implantation de haies de 0,1 t C/ha/an. Le rapport de l'ADEME qui étudie les leviers techniques agricoles d'atténuation des GES pour la région Bretagne⁴³ calcule un potentiel de stockage de 0,2 t C/ha/an dans le sol et de 1 t CO₂e/ha/an dans la biomasse. Ces chiffres sont valables pour des haies implantées à une densité de 100 ml/ha. L'implémentation de ces facteurs de stockage pourrait être envisagée sur un territoire bocager comme le Morbihan, afin de mieux en quantifier les effets, mais aussi de valoriser ce patrimoine.

Les écosystèmes de landes, bien représentés sur le territoire sont encore assez peu étudiés. Quelques études ont été faites sur les landes bretonnes et en particulier une thèse sur la lande dans la région de Paimpont portant sur le cycle de la matière organique (Forgeard F., 1977, p. 182-183). La production annuelle moyenne a été calculée en lande sèche à Bruyère sur 10 ans et vaut environ 1 t/ha/an, soit environ 0,5 t C/ha/an. Elle vaut environ 0,6 t C/ha/an en lande mésophile et 2,4 t C/ha/an en lande haute à Ajoncs. L'apport au sol et la chute de litière pour ces types de landes atteindraient un état d'équilibre au bout de quelques années, mais la quantification de ce phénomène n'a pas été possible. Ces données très locales peuvent donner des ordres de grandeur pour évaluer les dynamiques dans ces écosystèmes.

Concernant à la fois les landes et les forêts, l'établissement d'un suivi systématique des incendies du point de vue des émissions générées sur le territoire pourrait s'avérer pertinent. Dans un premier temps, certains incendies sont d'une ampleur telle qu'ils pourraient exercer une influence significative sur le bilan GES du territoire à l'échelle d'une année (cf. §§ 2.3.1.2), ne pas les prendre en compte serait un réel manque d'exhaustivité. Dans un second temps l'occurrence de tels événements impactant des surfaces supérieures à 20 ha risque de s'avérer significative dans les prochaines années (Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc), 2023). L'augmentation de la surface d'écosystèmes touchés risque ainsi également d'affecter à terme la fonction puits de carbone à échelle locale. Pour faciliter cette prise en compte, le GIEC fournit des facteurs d'émissions par défaut pour des feux dans différents types de végétation²⁷.

Les écosystèmes de carbone bleu sont difficiles à comptabiliser dans des bilans GES de territoire. Ils n'appartiennent pas forcément à proprement parler au territoire terrestre qui est pris en compte, et la connaissance de leur fonctionnement demeure encore largement lacunaire. Leur rôle n'en est pas moins déterminant sur le cycle du carbone global, et les flux anthropiques ne s'arrêtent pas aux limites administratives des territoires. De fait, la recherche s'y intéresse de plus en plus et des valeurs de stockage générales sont proposées dans le rapport EFESÉ³⁰ qui considère que ces milieux pourraient stocker jusqu'à 7 t CO₂e/ha/an. Les premiers résultats des études portant sur les écosystèmes carbone bleu menées par l'université de la Rochelle avec le laboratoire LIENSs indiquent que les prés salés de leur territoire pourraient stocker environ 8,8 t CO₂e/ha/an (Amann et al., 2023). Au-delà des ordres de grandeur des flux concernés sur ces espaces qui

⁴³ Leviers techniques pour l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole de la Bretagne (ADEME, 2021)

sont encore difficiles à estimer pour tous les écosystèmes, ces milieux ont une valeur inestimable par leur rareté et leur spécificité. Aborder leur importance certaine dans l'atténuation contre le changement climatique peut permettre de les mettre en valeur sous un autre angle.

Etant également très sensibles aux aléas climatiques et jouant un rôle clé dans l'atténuation face au changement climatique, notamment par leur fonction puits de carbone reconnue, les zones humides subissent encore aujourd'hui énormément de pertes en termes de surface. Elles peuvent également être victimes de dégradations qui altèrent durablement leurs fonctions écosystémiques par le drainage, la pollution, ou la perturbation par des Espèces exotiques envahissantes (EEE) comme le baccharis ou la jussie. Dans ces circonstances, les zones humides, avec leurs stocks de carbone conséquents dans les sols, peuvent passer de puits à source de carbone. La présence d'une zone humide sur une carte ne suffit donc pas pour attester d'un flux positif ou négatif de carbone, ni de son importance. Ces notions sont importantes à considérer, mais encore difficiles à quantifier d'une part, et comptabiliser sur de vastes échelles d'autre part, car elles nécessitent une connaissance fine du terrain.

L'estimation des stocks de carbone sur un territoire départemental, comme le Morbihan, présente des incertitudes importantes. Le réservoir de carbone le plus important est dans les sols sous les cultures, les forêts, les zones humides et les prairies. La biomasse forestière et bocagère contribue également de manière significative aux stocks de carbone. Bien que ces stocks, en moyenne, augmentent sur les vingt dernières années, cette hausse ralentit et l'absorption des forêts semble avoir une légère tendance à la diminution. Les dynamiques paysagères telles que l'artificialisation des sols et la réduction du linéaire bocager génèrent une partie du déstockage du carbone.

Le diagnostic de la fonction de puits de carbone du département reste limité par la qualité des données disponibles, notamment celles relatives aux pratiques agricoles. Des ajustements méthodologiques, comme l'adaptation de la typologie des sols et l'utilisation de données spécifiques au territoire, pourraient améliorer la précision des estimations. L'actualisation de l'outil Aldo et celle des données produites par le CITEPA prévues pour 2024, devraient apporter certaines corrections aux problèmes méthodologiques existants. Le suivi des pratiques agricoles et des écosystèmes particuliers, comme les haies, les landes, et les zones humides, est essentiel pour évaluer leur impact sur les stocks de carbone et leur potentiel d'atténuation du changement climatique. Cependant, l'état de connaissance actuel, notamment sur les écosystèmes moins étudiés comme les espaces de "carbone bleu", limite une estimation exhaustive et précise du bilan carbone du territoire.

3. Discussion et propositions

3.1 Leviers d'action du secteur UTCATF sur le territoire, des leviers de gestion avec des bénéfices complémentaires

3 grands axes de travail relatifs aux puits de carbone ont été identifiés pour la stratégie bas carbone, par ordre de priorité : Préservation des stocks et dynamiques de stockage (P), Restauration des capacités et potentiels de stockage (R), Amélioration des connaissances et augmentation du potentiel de stockage (A). Les propositions de mesures à prendre peuvent faire appel à différentes compétences du Département (*Tableau 3*), son action peut parfois être indirecte et il n'est pas forcément le seul acteur concerné et d'autres acteurs peuvent entrer en collaboration.

Tableau 3 - Synthèse de propositions de mesures à mettre en place ou déjà existantes et à appliquer dans le cadre du volet « absorption » de la stratégie bas carbone du Département. Les compétences du Département évoquées sont les plus déterminantes, mais dans certains cas les mesures proposées peuvent également faire appel à des compétences transversales non renseignées dans le tableau. P, R et A désignent respectivement les axes de travail sur la Préservation, la Restauration et l'Amélioration. (CC = changement climatique, D = Directe, I = Indirecte) Inspiré de la Figure SPM.8 AR6 IPCC Mitigation of Climate Change

Co-bénéfices:	
	Biodiversité
	Sécurité alimentaire
	Qualité du paysage
	Atténuation du CC
	Adaptation au CC

Espaces concernés	Axes de travail	Catégories de mesures	Compétences du Département					Co-bénéfices principaux	Autres acteurs (non exhaustif)
			(Gestion des :)	ENS & biodiversité	Infrastructures et mobilités	Aménagement foncier rural	Collèges		
M1 : Forêts	P&R&A	Terres et risques	D&I	I	D&I				ONF, Propriétaires privés, EPCI, SDIS
M2 : Espaces agricoles	P&A	Terres		I	D&I	I	I		Chambre d'agriculture, région, EPCI
M3 : Milieux humides	P&R&A	Terres	D&I	I	I		I		DDTM, Agence de l'eau, PNR, Chambre d'agriculture, ONF
M4 : Zones artificialisées	R&A	Terres		D	I	D			Région, EPCI
M5 : Landes	P&A	Terres et risques	D&I						Communes, DDTM, DRAAF, EPCI, SDIS
M6 : Continuités écologiques	R	Terres	D&I		I		D&I		Communes, EPCI, région
M7 : Tous les espaces naturels et semi-naturels	P	Risques	D&I	D&I	I		I		Communes, EPCI

- **M1 : Forêts**

Gestion des terres :

. *Axe P* : Comme indiqué dans le dossier thématique sur la Forêt comme alliée face au climat publié par le Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires en juillet 2024, la préservation des stocks de carbone forestier est « le premier impératif » du secteur⁴⁴. Elle compte d'ailleurs parmi les objectifs proposés pour le futur plan Forêt et Landes du Département en cours d'élaboration. Les mesures à favoriser pour les forêts appartenant à la collectivité (ENS, parcs arborés et sites de compensation), et à encourager pour le reste des forêts du département, sont donc des pratiques de gestion qui vont dans le sens de la limitation des

⁴⁴ (Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires, 2024)

pertes de carbone du sol et de l'augmentation du potentiel de résilience des peuplements au changement climatique³⁴.

Ainsi, il vaudra mieux éviter au maximum les coupes rases ainsi que le travail du sol, le labour en plein et le tassement. Pour des raisons de biodiversité et de carbone, il est également préférable de ne pas prélever l'arbre entier, mais plutôt de laisser les feuillages et les souches au sol avec préservation du bois mort et réalisation d'îlots de vieillissement ou de trames de vieux bois.⁴⁵

Enfin l'effet de mesures de gestion sylvicole telles que la durée de révolution, sur le stockage de carbone dans les sols et le stockage par la biomasse, ainsi que leur équilibre avec les enjeux de rentabilité économique de la production de bois sont très dépendants de la station forestière⁴⁴. Presque chaque situation est un cas particulier et il s'agit surtout de trouver un compromis satisfaisant les différents enjeux sur l'échelle locale. La diversification des stratégies à l'échelle du territoire permettra de limiter les risques de perte trop importants. Sur un territoire où les dépérissements ne sont pas trop importants, laisser quelques surfaces en libre évolution peut être également intéressant afin de favoriser les mécanismes naturels d'adaptation des forêts. La meilleure manière de réduire la vulnérabilité est l'adoption de bonnes pratiques visant à augmenter la résilience des peuplements, dont le maintien d'un certain niveau de diversité à différentes échelles est primordial⁴⁴.

Au sujet des débouchés de l'industrie du bois, l'Académie des sciences préconise que "*les produits bois à longue durée de vie et à fort potentiel de substitution (comme les charpentes, les panneaux ou isolants à base de bois dans la construction ou encore les produits pour l'ameublement, NDR)*"⁴⁴ soient privilégiés au bois-énergie, lui-même plutôt réservé aux coproduits. L'idée serait plutôt d'allonger le plus possible la durée de vie du produit bois et de favoriser un effet de substitution énergétique ou de matériaux intéressants sur le critère du bilan carbone^{4,34}.

. *Axe R* : Les peuplements éventuellement affectés ou dégradés doivent être reboisés suivant les bonnes pratiques de gestion. A noter que sur des sols avec des stocks importants de carbone comme c'est le cas de certaines forêts landicoles en particulier, privilégier la régénération naturelle peut permettre de limiter les pertes de carbone du sol liées à une intervention. L'application de la méthode « reconstitution de peuplements forestiers dégradés » du Label Bas-Carbone (LBC) pour le reboisement des parcelles sinistrées ou de friches agricoles est recommandée. Selon les calculs du Label, elle peut entraîner une augmentation de la séquestration de carbone intéressante sur 30 ans⁴⁴.

. *Axe A* : Enfin le boisement peut être envisagé au cas par cas sur des friches (e.g. repérables via l'outil Cartofriche du Cerema)⁴⁶ ou des zones de déprise agricole, en prêtant bien attention à la concurrence sur les usages des sols. Les recommandations de modalités de boisement sont les mêmes que celles pour la restauration de peuplement, à savoir l'application de la méthode du LBC et l'emploi des bonnes pratiques de gestion.

Gestion des risques :

. *Axe P* : Selon la DRAAF Bretagne, plus d'1/3 du territoire morbihannais serait en situation de risque incendie « Fort »⁴⁷. Le risque concerne surtout les forêts de pins maritimes et particulièrement les landes sèches (cf. § M5). Comme évoqué §§ 2.4 une augmentation du risque avec le changement climatique est à prévoir. Selon les recommandations de la DRAAF pour la gestion du risque incendie⁴⁵, la surveillance des sites à risque,

⁴⁵ Expertise sur la forêt et les usages du bois (ADEME, 2023a)

⁴⁶ (Cerema, 2021)

⁴⁷ Plan interdépartemental de protection des forêts et landes contre l'incendie en Bretagne 2024-2033 (DRAAF Bretagne, 2024)

la communication sur les sites fréquentés ainsi que le travail de coordination avec les collectivités locales devront être renforcés sur tout le territoire, sites ENS compris.

. *Axe A* : Partager et collecter les connaissances sur les incendies de forêts et de landes afin d'établir un suivi systématique des incendies du point de vue des émissions générées sur le territoire pourrait s'avérer pertinent afin de mieux les prévenir, mais aussi mieux les comptabiliser dans les éventuels bilans GES futurs.

Le suivi de l'état sanitaire des peuplements, de l'évolution des parcelles sinistrées après restauration, ainsi que des diagnostics de vulnérabilité pourront être réalisés afin d'adapter les peuplements futurs au changement climatique et aux évolutions des conditions pédoclimatiques du territoire.

- **M2 : Espaces agricoles**

Gestion des terres :

. *Axe P* : Les stocks dans les sols des terres agricoles du Morbihan sont plus élevés que dans la moyenne du territoire métropolitain (Walter et al., 1995). Le risque de déstockage est donc d'autant plus grand. Les pratiques contribuant à préserver ce stock sont à favoriser le plus possible : e.g. en grandes cultures et prairies temporaires : utilisation de couvert intercalaires et intermédiaires afin de limiter la surface et la durée de présence de sols nus, allongement de la durée des prairies temporaires dans les rotations, utilisation du semis direct quand cela est possible, et e.g. en prairie permanente : intensification modérée et réduction de la fauche pour le pâturage (Pellerin et al., 2020). De manière indirecte, le soutien à l'agriculture biologique et l'utilisation d'amendements potentiellement moins polluants peuvent avoir des retombées positives, notamment sur l'état de conservation des zones humides et la qualité de l'eau.

. *Axe A* : L'augmentation des stocks de carbone dans les sols par le biais des pratiques agricoles est également un levier significatif soulevé par le HCC²². Dans son étude à l'échelle de la Bretagne sur les leviers techniques pour l'atténuation des émissions de GES du secteur agricole, l'ADEME met en évidence 2 leviers avec le potentiel d'atténuation régional le plus important : le développement de l'agroforesterie intra-parcellaire et l'implantation de haies agricoles⁴³.

Ne possédant pas de compétence directe sur le secteur agricole, le Département peut néanmoins s'impliquer dans ce domaine par le biais d'actions locales grâce à des conventions avec l'échelon régional. Il collabore déjà sur des projets régionaux comme Breizh Bocage, par un appui financier ponctuel à des projets de reconstitution de haies. Cette implication peut encore être approfondie. En effet, la mise en place des plantations intra-parcellaires agroforestières peut également être accompagnée par les conseils départementaux et les chambres d'agriculture de la région comme c'est le cas dans le Finistère⁴⁸. Le soutien des collectivités départementales peut inclure l'appui technique et le soutien financier, par le biais de subventionnements notamment. Cela permet de couvrir les dépenses d'achat des fournitures de plantation telles que les plants, le paillage, les protections, etc. L'appui technique serait renforcé par les chambres d'agriculture.

D'autre part, le Département peut également mettre place des actions indirectes qui soutiennent l'adoption et le maintien de pratiques agricoles locales en faveur de l'augmentation et de la préservation des stocks de carbone dans les sols, notamment par le biais de ses achats via la commande publique sur la restauration des collèges. D'autres aides indirectes fournies par le Département, telles que celles liées au volet lutte contre les pollutions diffuses des contrats territoriaux de bassin versant, avec le soutien à l'agriculture biologique ou le maintien de bande enherbées, favorisent la fonction puits de carbone du territoire. Enfin, la compétence en lien avec l'aménagement foncier rural peut également être un levier indirect du maintien de prairies permanentes ou de trames bocagères par exemple.

⁴⁸ (Chambre d'agriculture de Bretagne, 2024)

- **M3 : Milieux humides**

Gestion des terres :

. *Axe P* : En accord avec le Plan national milieux humides 2022-2026⁴⁹, et les objectifs du SDENSB¹⁴, toutes les mesures visant à préserver les zones humides par l'acquisition et l'adoption de bonnes pratiques de gestion sont à poursuivre. Les actions en faveur de la conservation de la biodiversité sur les sites sont complémentaires aux objectifs de préservation de la fonction puits de carbone. Les démarches d'acquisition de zones humides dans les zones de préemption déjà identifiées dans la politique ENS sont donc à prioriser et à renforcer du fait de ce double enjeu important.

Les principales sources de déstockage dans les zones humides sont liées à des dégradations de leurs fonctions écosystémiques comme évoqué §§ 2.4. Il est nécessaire de travailler conjointement avec les autres acteurs du territoire pour s'assurer de la bonne prise en compte de ces enjeux sur les territoires agricoles et forestiers privés, et sensibiliser au maximum sur les conséquences du drainage, du curage de drains, du tassement, de l'importation d'EEE, et d'autres types de dégradations possibles. Cela peut se faire à la fois sur les territoires des ENS, mais également sur les zones acquises au titre des mesures compensatoires.

. *Axe R* : Les projets de restauration de zones humides dégradées possèdent un fort potentiel d'atténuation et sont à concrétiser autant que possible, adaptés à l'état de conservation constaté. La démarche de restauration est déjà engagée dans le cadre du SDENSB¹⁴, mais elle peut être plus ambitieuse sur les espaces déjà acquis. En complémentarité avec les objectifs de préservation de la ressource en eau liées aux compétences sur la politique de l'eau et les milieux aquatiques, la restauration des cours d'eau et zones humides peut permettre d'améliorer le fonctionnement des milieux humides en aval et ainsi favoriser indirectement la fonction puits de carbone de ces espaces.

. *Axe A* : Améliorer la connaissance sur les zones humides du territoire par le déploiement d'une cartographie précise, homogène et prenant en compte leur état de conservation ainsi qu'une estimation de l'état de la fonction puits de carbone pourrait faciliter la priorisation et la quantification des actions de restauration à envisager.

Ces mesures concernent également les zones humides côtières dites de carbone bleu dont la fonction puits de carbone est peu documentée localement. Il conviendra de favoriser leur préservation, limiter l'impact des activités anthropiques, et de restaurer leur état si besoin. La politique d'acquisition des ENS pourrait ainsi favoriser également ces écosystèmes.

- **M4 : Zones artificialisées**

Gestion des terres :

. *Axe R* : Les espaces pour lesquels l'absence de naturalité n'est pas nécessaire à leur fonction première sont un levier intéressant dans le cadre de l'atteinte de l'objectif du Zéro artificialisation nette (ZAN). Leur désimperméabilisation, selon le degré de végétalisation mis en place, permettrait entre autres bénéfiques, d'accroître légèrement le stock de matière organiques du sol et donc de récupérer pour certaines surfaces un potentiel de stockage de carbone. Parmi ces espaces envisageables, certains espaces publics possédés par le Département pourraient être concernés comme les cours de collèges, les parkings d'ENS, ou les délaissés routiers. Bien que les surfaces représentées ne soient pas toutes déterminantes à l'échelle du territoire morbihannais, ces actions, au-delà de l'aspect stockage de carbone, restent bénéfiques sur le point de vue de

⁴⁹ (Ministère de la transition écologique, 2022)

la biodiversité en espace urbain, de l'infiltration de l'eau, ou encore du cadre de vie et peuvent aller dans le sens d'une forme d'exemplarité de la collectivité.

. *Axe A* : Avant d'engager des travaux de revégétalisation, il est nécessaire de connaître et d'identifier les espaces susceptibles de bénéficier de telles mesures. A l'heure actuelle, les informations sur le nombre et la localisation des délaissés routiers ne sont pas homogènes et restent mal connues. De fait, un recensement de l'ensemble des surfaces artificialisées du Département pouvant répondre à ces critères est à engager afin d'identifier les potentialités de désimperméabilisation et revégétalisation.

- **M5 : Landes et landes boisées**

Gestion des terres :

. *Axe P* : Les mesures de conservation de l'écosystème des landes tels que l'entretien, le débroussaillage et la lutte contre les invasives n'auraient pas d'impact significatif sur les stocks de carbone dans les sols acides des landes du territoire (B. Clément, *pers. commun.*). Cependant, les dynamiques naturelles de fermeture de ces milieux entraînent des conséquences sur les autres réservoirs de carbone. En effet, la fermeture des milieux ouverts landicoles, induisant le développement d'une végétation ligneuse et l'apparition d'une couche de litière, aurait plutôt un impact positif sur les réservoirs de biomasse et de litière du sol, alors que l'impact sur la biodiversité est plutôt négatif⁵⁰. Ainsi le critère strict du stock de carbone ne saurait être le seul à être considéré dans la prise de décision sur la gestion de ces milieux. En effet, une augmentation du stock de carbone total pourrait être synonyme de dégradation de l'écosystème landes, un milieu emblématique de Bretagne, riche en biodiversité et de plus en plus fragmenté. En dehors de cela, les modes de gestion des landes ont un impact important sur leur composition floristique et faunistique⁵⁰, mais leurs conséquences directes sur le cycle du carbone ne sont encore que très peu étudiées.

Gestion des risques :

. *Axe P* : La gestion du risque incendie est un facteur essentiel pour la préservation des stocks de carbone constitués par les écosystèmes de landes qui y sont très exposés. Suivant les consignes de la DRAAF de 2023⁴⁶ comme évoqués § M1, entretenir et gérer les landes à risques ainsi que s'assurer de l'aménagement des équipements de défense de la forêt contre les incendies (DFCI) pour les zones concernées seront des actions à poursuivre sur les ENS, mais également à soutenir sur tout le département en travaillant de concert avec l'ensemble des acteurs concernés.

. *Axe A* : Au même titre que pour les forêts, les informations disponibles sur les incendies de landes sont être collectées et rassemblées afin d'établir un suivi systématique des incendies du point de vue des émissions générées sur le territoire. Le partage et la mise en commun de ces informations auprès des différents acteurs concernés est essentiel afin de faciliter la coopération pour gérer ce risque au mieux. (cf. § M1)

- **M6 : Continuités écologiques**

Gestion des terres :

. *Axe R* : Par le biais des différentes compétences du Département mobilisables, renforcer les continuités écologiques de la Trame verte et bleue (TVB) est un levier important de résilience des territoires face au changement climatique. Les actions déjà mises en place n'ont pas pour but de restaurer la fonction puits de carbone, mais les travaux concernés faisant appel à de la renaturation et de la revégétalisation, l'augmentation

⁵⁰ (Observatoire de l'environnement en Bretagne, 2023)

du potentiel de stockage en est donc souvent une conséquence indirecte. Elles pourraient donc être renforcées dans ce but précis. Cela peut passer par la densification du réseau bocager, la restauration de ripisylves, la renaturation et la restauration de la connectivité de cours d'eau, le maintien de prairies de bas-fond. Il arrive que les objectifs ne convergent pas de manière évidente, e.g. dans le cas de restauration de continuité terrestre qui inclut la destruction d'un ouvrage et la submersion de marais salés. La résilience de l'écosystème et la préservation de la biodiversité sont des paramètres tout aussi importants à considérer dans la prise de décision.

La replantation de haies, quand elle est préférable à de la régénération naturelle, peut être soutenue et encouragée par le Département comme évoqué § M2. Il est intéressant de noter que d'autres Départements (collectivité de l'Aude (J-M. Mesplé *pers. commun.*) et collectivité des Pyrénées orientales (A. Fanlou *pers. commun.*)) ont par exemple mis en place une pépinière départementale afin de fournir le matériel végétal à des travaux de replantation communaux à la hauteur d'environ 20 000 plants/an, mais cela peut également servir dans le cadre de plantations de haies agroforestières. (cf. §M2)

- **M7 : Tous les espaces naturels et semi-naturels**

. *Axe P* : En accord avec l'objectif 31 du SRADDET⁵¹ Bretagne de zéro consommation nette de terres agricoles et naturelles à l'horizon 2040, le Département doit limiter le plus possible l'imperméabilisation de nouvelles surfaces naturelles, en particulier les écosystèmes avec des sols riches en carbone comme les sols organiques de zones humides, sols acides des landes, les zones humides côtières. Cet objectif doit être pris en compte dans le cadre de tous ses travaux d'aménagements qui nécessitent l'application de la démarche « Eviter Réduire Compenser » (ERC), pour lesquels l'évitement doit être absolument privilégié devant la réduction et la compensation. D'autres leviers indirects liés au soutien financier pourraient être appliqués comme l'éco-conditionnalité des aides du Département dispensées, le développement d'aides à la réhabilitation de bâtiments désaffectés, ou encore la baisse des aides liées à des projets impliquant de l'artificialisation directe.

. *Axe R* : Lors de l'application de la démarche ERC et dans le cas où l'évitement est impossible, il pourrait être intéressant d'envisager des mesures de désimperméabilisation systématiques en guise de compensation minimale. Il convient de rappeler qu'à surface équivalente, la désartificialisation d'un sol ne suffit pas à neutraliser les émissions de GES occasionnés par un projet d'artificialisation, notamment en raison de l'effet immédiat du déstockage par rapport à la lenteur des cinétiques de stockage de carbone dans le sol (cf. §§ 1.2.2.3).

3.2 Approfondissement de l'évaluation de la fonction puits de carbone du territoire, proposition d'une méthode de constitution d'un indicateur carbone pour les ENS

La démarche d'évaluation de la fonction puits de carbone à l'échelle du territoire départemental ne permet pas de faire ressortir les enjeux précis pour chaque ENS. De fait, il pourrait être intéressant d'évaluer les stocks de carbone en fonction des écosystèmes présents sur chaque ENS, ainsi que les éventuels facteurs de risque de déstockage associés. Cela permettrait par exemple d'obtenir un indicateur carbone pour chaque ENS afin d'adapter la prise de décision sur des mesures de gestion de ces espaces, dans la perspective d'actions issues de l'axe de travail « Préservation » (P) identifié § 3.1 : préserver la fonction puits de carbone sur le territoire et éviter un déstockage supplémentaire.

⁵¹ (Région Bretagne, 2024)

Les références de stocks à utiliser devraient être le plus locales possibles. La méthode de calcul reposerait sur le même principe que celle de l'outil Aldo, à savoir la multiplication d'une valeur de stock unitaire par la surface associée, mais avec une typologie d'occupation des sols plus précise et adaptée aux écosystèmes représentés sur les ENS du Département. Cette typologie pourrait s'inspirer de celle proposée en Annexe 5, en utilisant la cartographie des végétations de Bretagne produite par le CBNB comme données d'entrée pour l'occupation du sol.

Le facteur d'incertitude le plus grand étant le stock de carbone des sols à 30 cm, deux méthodes pourraient être envisagées (Figure 17) :

- La première par application d'une référence de stock liée à l'occupation du sol (méthode générale et option envisagée par la collectivité de Pyrénées orientales (A. Fanlou *pers. commun.*)). Elle a l'avantage d'être simple et transparente à mettre en place, mais n'est pas spécifique au territoire et ne fera pas ressortir des informations importantes comme le gradient NE-SW de MO breton (cf. §§ 2.3.1.1).
- La seconde par calcul basé sur des données locales, e.g. issues de la plateforme Sols de Bretagne qui fournit, de manière homogène sur la région, des données spatialisées sous système d'information géographique (SIG) sur les caractéristiques et composition des sols, disponibles par horizon et à la meilleure résolution existante.

L'équation utilisée pour le calcul des stocks de carbone dans les sols est (Équation 1) présentée §§ 1.2.2.3. Les données à récupérer seraient donc la teneur en carbone, et la teneur en éléments grossiers. La densité apparente (DA) n'est pas une donnée facile à estimer sans mesure directe sur le terrain. Elle pourrait cependant être estimée avec l'aide de la fonction de pédo-transfert (FPT) ajustée de Keller et al. 2010 (Cousin et al., 2018):

(Équation 5)

$$DA = k_1 + k_2.T_{argile} + k_3.T_{sable} - k_4.T_{argile}^2 - k_5.T_{sable}^2 - k_6.T_{limon}.T_{MO} - k_7.T_{sable}.T_{MO}$$

Où T_{sable} , T_{argile} , T_{limon} , et T_{MO} représentent la teneur respective en sable, argile, limon et matières organiques, et les k_i désignent les constantes du modèle, telles que : $k_1 = 1.437$, $k_2 = 0.007690$, $k_3 = 0.003881$, $k_4 = 0.0001494$, $k_5 = 0.00001991$, $k_6 = 0.0008799$, $k_7 = 0.001211$.

Ces données sont également récupérables à la même résolution sur la plateforme Sols de Bretagne. La valeur de T_{MO} s'obtiendrait en appliquant le coefficient de 2,0 évoqué §§ 1.2.2.3 à la teneur en carbone. Les stocks seraient calculés à l'aide des (Équation 5) et (Équation 1), à partir des moyennes des teneurs pour chaque profondeur par unité géographique d'occupation du sol, à sommer afin d'obtenir une valeur de stock total à 30 cm unique par type de végétation pour chaque ENS.

Cette méthode devrait être évaluée par la comparaison avec des données de terrain sur le carbone dans les sols afin de connaître la performance du modèle sur les données du territoire. Il existe des mesures de teneur de carbone dans les sols prises à 40 cm récentes sur l'ENS d'Er Varquez à Erdeven, mais ni la teneur en éléments grossiers, ni la granulométrie, ni la DA n'ont été relevées ou mesurées de manière homogène. Afin de pouvoir comparer les valeurs prédites et mesurées avec pertinence, il faudrait donc approfondir la campagne de mesures de terrain, sur l'horizon 30 cm, et avec des relevés homogènes, prenant en compte les paramètres requis pour le calcul du stock de carbone (cf. (Équation 1)).

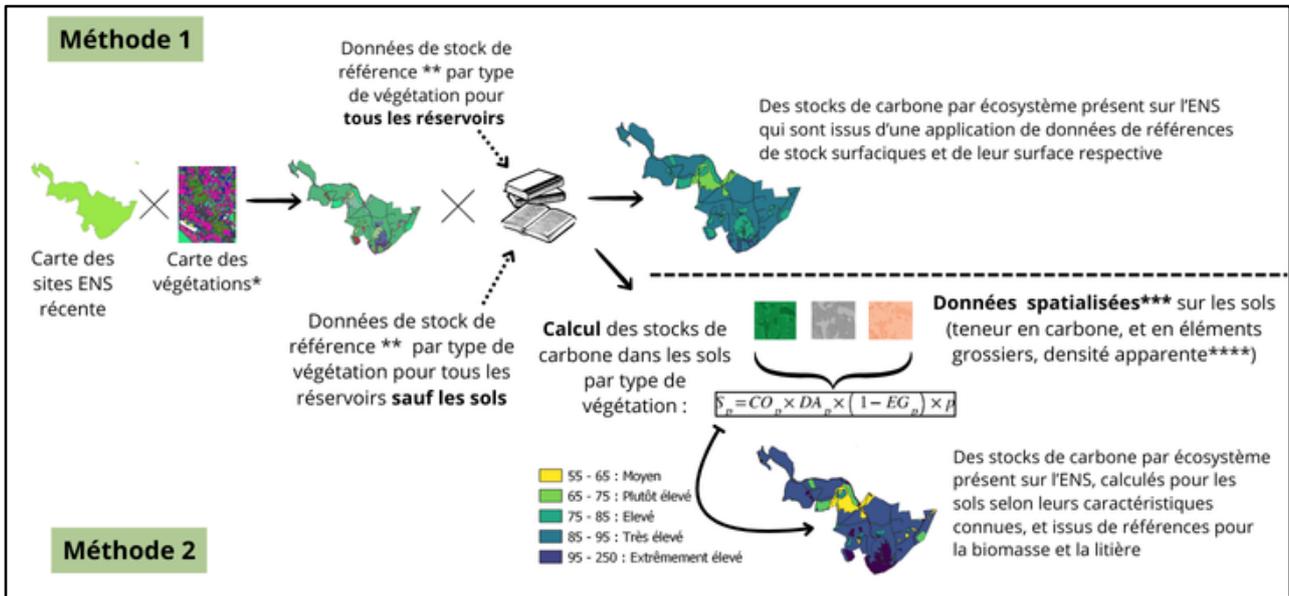


Figure 17 – Schéma d'illustration des deux méthodes proposées pour l'estimation des stocks de carbone pour les ENS, exemple de l'ENS d'Er Varquez. * produite par le Conservatoire national botanique de Brest, ** données de référence fournies par l'ADEME ou autre spécifique à un écosystème local si les données sont estimées pertinentes, *** données issues de la plateforme Sols de Bretagne produite par l'UMR SAS, **** la densité apparente pourra être estimée par une fonction de pédo-transfert à partir des données caractéristiques des sols.

Une fois les stocks obtenus, ils seraient classés selon une typologie qualitative en 5 classes e.g. d'après leur valeur : de très faible à très élevé. Ces stocks seraient ensuite interprétés selon leur coïncidence avec des facteurs de risque identifiés. Ils pourraient être liés d'une part à la présence de milieu à fort risque de relargage (e.g. zone humide, lande sèche, forêt de résineux). Ils pourraient être complétés d'autre part avec des facteurs de risque disponibles de manière homogène sur le territoire (e.g. risque incendie, pression d'artificialisation, fréquentation du site). L'utilisation d'autres facteurs significatifs reste limitante du fait du peu de données homogènes sur l'ensemble des ENS disponibles à ce jour.

Ensuite l'estimation des flux de carbone sur chaque ENS, plus complexes à appréhender, ne pourrait se faire qu'au cas par cas, e.g. lorsqu'un risque est identifié par la méthode précédente. Elle nécessiterait la collecte d'informations sur l'historique d'occupation du sol (e.g. en utilisant des orthophotographies, ou des archives ...). L'information serait simplifiée selon une typologie : prairie permanente, forêt, zone agricole, zone humide, zone artificialisée. L'historique d'occupation pourrait donner la tendance d'évolution des stocks du sol : stockage ou déstockage, suivant la logique détaillée §§ 1.2.2.3 e.g. déstockage dans le cas d'une zone humide remplacée par une zone agricole. L'évaluation à dire d'expert de l'état de conservation pour les zones humides présentes pourrait permettre d'affiner les tendances prédites sur les ENS, en considérant pour rappel qu'une zone humide dégradée présente un fort risque de déstockage de carbone.

Enfin si la connaissance de l'évolution des stocks de carbone dans le sol, la litière et la biomasse paraissent pertinente au vu des différents indicateurs évalués, un suivi temporel pourrait être mis en place, avec des mesures de teneur de carbone et des autres paramètres nécessaires au calcul du stock (cf. (Équation 1)), ainsi des suivis de l'évolution de la végétation par exemple.

3.3 Limites de l'étude, spécificité et freins méthodologiques

L'absence de méthode générale d'estimation des stocks et flux de carbone à l'échelle départementale a contraint l'étude à une adaptation de méthodes existantes qui n'étaient pas conçues dans ce but. L'évaluation des incertitudes liées à cette adaptation a nécessité un travail approfondi d'étude des méthodes utilisées et recommandées à différentes échelles, afin d'avoir des éléments de référence et de comparaison. Les résultats finaux obtenus sont limités en termes de précision, d'exhaustivité, de spécificité et de représentativité du territoire, ainsi que d'actualité sur les dynamiques observées. L'interprétation risque ainsi d'en être également biaisée et il convient de garder des précautions sur les chiffres précis, et de plutôt considérer les ordres de grandeur comme potentiellement plus fiables. De plus, bien que les sources d'imprécisions majeures aient pu être soulignées dans ce travail, on peut déplorer le manque de données permettant l'évaluation plus précise des incertitudes comme les écarts-types associés aux moyennes de stocks et de flux. Enfin, il conviendra de garder à l'esprit que si l'étude devait être réitérée les années suivantes, les outils d'évaluation étant amenés à évoluer vers plus de précision et d'exhaustivité, les résultats obtenus n'auront pas la même valeur interprétative, et leur comparaison devra être réalisée avec les précautions qui s'imposent.

Les résultats de la présente étude sur l'estimation de la fonction puits de carbone, en dépit de leurs incertitudes, ont néanmoins permis de faire ressortir des grands enjeux de travail pour la collectivité au sujet de ses puits de carbone. Les propositions de mesures évoquées §§ 3.1 en découlent et constituent une amorce de réflexion quant aux possibilités de travail qui existent pour une collectivité départementale. Leur concrétisation future dépendra de nombreux paramètres, et en particulier des priorités politiques et des contraintes financières, matérielles et humaines de la collectivité. Ces paramètres sont par ailleurs voués à évoluer avec les différentes feuilles de route successives. Bien que la pérennité de l'application des préconisations soit un facteur important pour s'assurer de l'effet espéré sur les stocks de carbone du territoire, elle n'est donc pas assurée.

Le choix de la démarche à adopter pour l'estimation a été soutenu par la prise de contact personnelle auprès d'autres collectivités départementales montrant la volonté de creuser le sujet des puits de carbone. Cela a principalement fait ressortir que ce travail était la plupart du temps délégué à des bureaux d'étude. La majorité des approches employées consistait en l'application de l'outil Aldo au territoire départemental sans approfondissement particulier. Quelques collectivités cependant envisageaient de poursuivre le travail sur les ENS ou espaces du Département en particulier. La collectivité de la Drôme (Nicolas Durst *pers. commun.*) a appliqué sur ses ENS les stocks et flux de référence utilisés par Aldo à une typologie d'occupation du sol basée sur CLC. Certaines valeurs de flux de référence ont été tirées d'autres sources bibliographiques. Cette méthode a également été utilisée par la collectivité de Loire Atlantique (C. Blaise *pers. commun.*) et envisagée par la collectivité des Pyrénées orientales (A. Fanlou *pers. commun.*). Dans ces méthodes, aucun suivi temporel n'est encore prévu et les changements d'occupation du sol ne sont pas pris en compte.

Ces approches permettent d'avoir une idée générale de la répartition des stocks et des flux pour les ENS, mais dans une perspective de prise en compte des enjeux de stockage de carbone pour les mesures de gestion précises de ces espaces, elles peuvent manquer de spécificité et masquer de fortes hétérogénéités locales. De même, certains espaces comme les zones humides risquent d'être ignorés des mesures de gestion car aucun flux ne leur est associé. L'approche consiste plutôt en une photographie figée à un instant t qu'à une estimation des potentielles évolutions des stocks sur lesquelles des actions pourrait être engagées.

La démarche proposée §§ 3.2 se différencie de ces approches dans la mesure où elle préconise une typologie utilisable plus spécifique au territoire avec des données d'occupation du sol plus précises que CLC.

Plutôt que de tenter d'obtenir des résultats chiffrés avec des forts taux d'incertitude, il s'agirait d'une approche d'interprétation qualitative sur les teneurs en carbone par écosystème avec les facteurs de risque disponibles. Ces données pourraient s'avérer suffisantes dans le but de déterminer des mesures dites « sans regret » à mettre en place, dont le but serait de préserver les stocks de carbone. Enfin son application serait propre à chaque ENS. En effet, ils ont des spécificités à prendre en compte pouvant influencer fortement les stocks et leur dynamique, et donc avoir un impact sur les modalités de gestion à appliquer. Elle vise à mettre en évidence les risques associés aux stocks de carbone évalués pour chaque ENS dans le but de faciliter la prise de décision du gestionnaire.

L'application de l'approfondissement de l'étude sur l'échelle des ENS évoquée §§ 3.2 a été envisagée mais n'a pas pu être réalisée par des problèmes d'accès aux données sur les sols du département. De plus, les données disponibles pour l'ENS d'Er Varquez n'étaient en outre ni qualitativement (données non homogènes, et absence de paramètres comme la teneur en éléments grossiers), ni quantitativement interprétables (données trop peu nombreuses, seulement 15 exploitables). L'exploration de pistes de solutions afin de résoudre les différents problèmes évoqués par le biais de recherches bibliographiques supplémentaires et de prise de contact avec des personnes ressource extérieures, en plus de difficultés de mise à disposition des logiciels de travail, ont présenté des freins à l'avancement du présent travail.

Conclusion

La comptabilité des stocks et des flux de carbone liés au secteur UTCATF est une approche complexe. En effet il s'agit de l'un des secteurs d'émission et d'absorption avec le plus d'incertitudes du fait de sa dépendance à de multiples facteurs mal connus et difficiles à modéliser. Des recommandations avec des typologies de méthodes à décliner existent mais leur application stricte est limitée par les moyens et les données disponibles pour le territoire concerné. Il n'existe pas d'outil spécifique à l'échelon départemental pour la comptabilité des stocks et flux de carbone liés au secteur UTCATF. De ce fait, dans le cadre de cette étude les outils et données employés ont été appliqués au département du Morbihan, bien qu'ils ne soient pas parfaitement adaptés à celui-ci, mais les limites ont été exposées de la manière la plus transparente possible. Ainsi le manque de données précises, récentes, et de méthodologies robustes et adaptées, complique les estimations des flux d'absorption et de l'impact des changements d'utilisation des terres sur les émissions de carbone du département. Cela rend difficile une quantification fiable et représentative du territoire. L'actualisation des résultats à la suite de la mise à jour prévue pour 2024 des outils utilisés est donc une étape importante du suivi des flux liés au secteur sur le territoire. Cela permettrait de confirmer les tendances observées et de lever certaines incertitudes.

L'étude a fait ressortir des imprécisions au niveau de l'estimation des stocks par l'utilisation de l'outil Aldo, qui n'est pas conçu spécifiquement pour un échelon départemental mais plutôt pour un EPCI. Dans sa version actuelle, le réservoir de carbone des sols de zones humides serait largement sous-estimé. Les stocks de carbone principaux mis en évidence par occupation du sol sont ceux des forêts, des cultures, des zones humides, des prairies et du bocage. Les écosystèmes de landes, bien qu'emblématiques du territoire et connus pour leurs sols riches en carbone, ne sont pas mis en évidence pour des questions de choix de méthode. La situation est similaire pour les écosystèmes dits de carbone bleu que les méthodes actuelles ne permettent pas encore de prendre en compte.

L'estimation des flux de carbone réalisée grâce aux données mises à disposition par le CITEPA et l'OEB pour 2019 manque d'exhaustivité et présente des contraintes importantes sur l'interprétation liée à la résolution de maille des résultats. Néanmoins, les tendances rendues observables par la méthode employée sont une croissance globale des stocks de carbone par commune sur le territoire depuis l'année 2000, avec une diminution nette de sa vitesse sur la dernière décennie. Les données disponibles ne permettent pas de l'expliquer clairement, mais il semblerait que l'accroissement biologique forestier soit en déclin sur les dernières années (i.e. les forêts continuent à croître, mais moins vite qu'auparavant). La dernière donnée datant de 2018, donc de plus de 5 ans, il en faudrait de plus récentes pour confirmer cette tendance, d'autant plus que la baisse du puits de carbone forestier en France est observée et se maintient depuis 2017. Le flux de carbone le plus important en valeur absolue sur le département reste bien l'absorption liée au puits forestier. En parallèle, les communes dont le stock de carbone total est en diminution sur la dernière décennie sont celles qui connaissent la pression d'artificialisation la plus importante et la surface de forêt la plus faible. Cependant, le manque de flux pris en compte ne permet pas de statuer sur les causalités directes, ni sur la fiabilité du résultat de bilan net des flux.

Ainsi, alors que les tendances actuelles au niveau national et international sur les puits de carbone apparaissent inquiétantes, et avec toutes les précautions de mise, l'évolution des puits de carbone morbihannais sur la dernière décennie ne semble pas particulièrement rassurante. Au vu des incertitudes persistantes sur les stocks et leurs dynamiques présentes, les priorités en termes de gestion des terres qui en émergent sont d'abord la préservation des stocks présents. Il conviendra de veiller à minimiser le plus possible le risque de déstockage qui est fort probablement sous-évalué. Dans le Morbihan, ce risque porte surtout sur l'artificialisation des espaces naturels et semi-naturels, et les incendies dans les forêts et les landes. Par défaut, on pourra considérer que les écosystèmes avec les stocks de carbone les plus importants sont ceux qui présentent le risque de

relargage le plus fort. Dans la littérature, les mesures visant à restaurer le potentiel de stockage ou augmenter les stocks de carbone, et avec les leviers les plus importants, font surtout appel au potentiel de stockage additionnel des sols agricoles et à la restauration des zones humides.

Le Département, en tant que gestionnaire direct de ses sites au titre des ENS, dispose de leviers d'actions importants sur ceux-ci. Il est d'ailleurs envisageable d'approfondir le travail d'identification des risques sur les écosystèmes des ENS plus précisément, afin d'adapter au mieux leur gestion et donc de prioriser les actions notamment sur les écosystèmes les plus à même de relarguer du carbone. Cette approche pourrait être menée au cas par cas, et nécessiterait des suivis temporels des impacts des mesures. Au-delà du périmètre des ENS, d'autres mesures plus transversales pourront être mises en place pour impacter plus largement le territoire. La préservation de l'ensemble des écosystèmes puits de carbone du territoire est un enjeu concernant les acteurs à différents niveaux. L'innovation et la coopération seront essentielles pour faire émerger des modèles d'occupation du territoire plus soutenables et compatibles avec les différentes problématiques sociétales actuelles.

Enfin, il convient de rappeler qu'il ne suffit pas d'absorber plus de carbone pour neutraliser nos émissions de GES. En accord avec la logique de la doctrine maintenant bien connue du « Eviter-Réduire-Compenser » (ERC), il sera toujours préférable de limiter les émissions plutôt que de chercher à les compenser. En effet les échelles de temps sont bien différentes, les dynamiques également, et la qualité des estimations aussi. Dans les bilans de flux réalisés aujourd'hui, il est largement plus aisé de quantifier les GES émis par nos soins, plutôt que de prédire la quantité qui sera hypothétiquement stockée par des écosystèmes hautement complexes, considérant la non-linéarité des processus qui en découlent. Il est à craindre que l'erreur résultante soit la surestimation de l'absorption et c'est un risque qu'il est préférable de ne pas prendre. Ainsi, favoriser la résilience et l'adaptation des puits de carbone au changement climatique est un enjeu d'autant plus important que leur vulnérabilité limite leur potentiel d'atténuation. Afin de rendre possible l'atteinte de la neutralité carbone, toutes ces incertitudes devraient être impérativement prises en compte dans les calculs de réduction des émissions de GES, qui devront probablement être encore plus ambitieux que prévu.

Bibliographie

- Académie des sciences. (2023). Les forêts françaises face au changement climatique—Rapport du Comité des sciences de l'environnement et points de vue d'Académiciens de l'Académie d'Agriculture de France (p. 52). <https://www.academie-sciences.fr/fr/Rapports-ouvrages-avis-et-recommandations-de-l-Academie/forets-francaises-face-au-changement-climatique.html>
- ADEME. (2021). Leviers techniques pour l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole de la Bretagne (p. 8). <https://bibliothec.ademe.fr/ged/6510/leviers-techniques-attenuation-ges-agricole-bretagne.pdf>
- ADEME. (2023a). Forêts et usages du bois dans l'atténuation du changement climatique (p. 39). https://cibe.fr/wp-content/uploads/2021/04/2021-04-ADEME_EXPERTISES_Foret-climat-PRINT-BAT5.pdf
- ADEME. (2023b). MOOC - Stocker du carbone dans les écosystèmes : Des enjeux aux solutions pour les territoires. fun-mooc.fr. <https://www.fun-mooc.fr/fr/cours/stocker-du-carbone-dans-les-ecosystemes/>
- ADEME. (2023c, août 2). ALDO : Qu'est-ce que c'est ? | Documentation ALDO. <https://docs.datagir.ademe.fr/documentation-aldo/>
- ADEME. (2024). Autres approches (Territoire, Inventaire GES, ...)—Ressources—Bilans GES. <https://bilans-ges.ademe.fr/ressources/autres-approches>
- Agreste. (2020). Recensement agricole [Jeu de données]. <https://stats.agriculture.gouv.fr/cartostat/#c=report&chapter=p07&report=r01&selgeo1=dep2020.56>
- Agreste. (2022). Enquêtes Teruti 2018-2019-2020. https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd2212/cd2022-12_teruti_2019.pdf
- Amann, B., Chaumillon, E., Schmidt, S., Olivier, L., Jupin, J., Perello, M.-C., & Walsh, J. P. (2023). Multi-annual and multi-decadal evolution of sediment accretion in a saltmarsh of the French Atlantic coast : Implications for carbon sequestration. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 293, 108467. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108467>
- Anke Herold, Suvi Monni, Erda Lin, & C. P. (Mick) Meyer. (2006). Chapitre 4 : Choix méthodologique et identification des catégories de source clés. In *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre: Vol. Volume 1 : Orientations générales et établissement des rapports*.
- Baize, D. (2000). *Guide des analyses en pédologie* (INRA).
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Péan, C. (2023). IPCC, 2023 : Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (First). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

- Catherine MORET & Sylvain BETOLAUD. (2023). Référentiels—Données de référence de biomasse et de stock de carbone dans le compartiment aérien des haies—Etude RESP'HAIES (AFAC-A, Éd.). https://afac-agroforesteries.fr/wp-content/uploads/2023/01/mep_fiche_referentiel_cubage_V2.pdf
- Cerema. (2021). Cartofriches. https://cartofriches.cerema.fr/cartofriches/_w_8b4b8708/_w_6ae54d0b/_w_16d4580f/?bbox=-4.647216796875,46.5626373208684,-1.1260986328125,48.9008379023409
- Chambre d'agriculture de Bretagne. (2024, septembre 20). Un accompagnement pour planter, gérer, valoriser les arbres de votre exploitation ou de votre territoire. <https://bretagne.chambres-agriculture.fr/mes-actus/toutes-les-actus-agricoles-bretonnes/detail-de-lactualite/actualites/un-accompagnement-pour-planter-gerer-valoriser-les-arbres-de-votre-exploitation-ou-de-votre-territ/>
- Chen, S., Arrouays, D., Angers, D. A., Chenu, C., Barré, P., Martin, M. P., Saby, N. P. A., & Walter, C. (2019). National estimation of soil organic carbon storage potential for arable soils : A data-driven approach coupled with carbon-landscape zones. *Science of The Total Environment*, 666, 355-367. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.249>
- Citepa. (2019). Rapport final—Développement d'une base de données des émissions et absorptions de gaz à effet de serre par les sols et la forêt en Bretagne (p. 68). https://bretagne-environnement.fr/sites/default/files/imports/Rapport_UTCATF_Bretagne.pdf
- Citepa. (2024a). Rapport OMINEA - 21ème édition (p. 1236). https://www.citepa.org/wp-content/uploads/publications/ominea/OMINEA_2024.pdf
- Citepa. (2024b). Rapport Secten—Emissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques 1990-2023. https://ressources.citepa.org/Comm_Divers/Secten/Citepa_Secten%202024.pdf
- Commissariat général au développement durable. (2019). EFESE - La séquestration de carbone par les écosystèmes en France (La Documentation Française).
- Conseil départemental du Morbihan. (2024a). Les compétences. <https://www.morbihan.fr/departement-du-morbihan/le-fonctionnement/missions-et-organisation/les-competences>
- Conseil départemental du Morbihan. (2024b). Les espaces naturels sensibles du Morbihan. <https://www.morbihan.fr/les-services/environnement/espaces-naturels-sensibles/les-espaces-naturels>
- Conseil départemental du Morbihan. (2024c). Schéma départemental des espaces naturels sensibles et de la biodiversité. https://www.morbihan.fr/fileadmin/Les_services/Environnement/Les_espaces_naturels_sensibles/Le_s_espaces_naturels_du_Morbihan/Morbihan_Synthese-du-schema-ens-2024.pdf
- Conservatoire botanique national de Brest. (2019). Carte des grands types de végétation de Bretagne. <https://www.cbnbrest.fr/observatoire-milieus/cartes-de-repartition/cgtv/carte-des-grands-types-de-vegetation-de-bretagne>
- Cousin, I., Ly, A., Duparc, P. B., Champolivier, L., & Bernicot, M.-H. (2018). Evaluating pedotransfer functions for the estimation of soil bulk density on cultivated fields. 21. International Soil Tillage Research Organization (ISTRO). <https://hal.science/hal-02737264>

- Crooks, S., D. Herr, & J. Tamelander, D. Laffoley, and J. Vandever. (2011). *Mitigating Climate Change through Restoration and Management of Coastal Wetlands and Near-shore Marine Ecosystems : Challenges and Opportunities*. (World Bank, Éd.). Environment Department Paper. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/847171468313810664/pdf/605780REPLACEMENT10of0Coastal0Wetlands.pdf>
- CSEM. (2010a). Atlas de l'environnement du Morbihan—La géographie physique. https://csem.morbihan.fr/dossiers/atlas_env/cadrage/geographie.php
- CSEM. (2010b). Atlas de l'environnement du Morbihan—Les milieux naturels. https://csem.morbihan.fr/dossiers/atlas_env/etat/milieux_naturels.php
- DRAAF Bretagne. (2023, août 22). [Mémento 2023] Caractéristiques des exploitations. DRAAF Bretagne. <https://draaf.bretagne.agriculture.gouv.fr/memento-2023-caracteristiques-des-exploitations-a3153.html>
- DRAAF Bretagne. (2024). Plan interdépartemental de protection des forêts et landes contre l'incendie en Bretagne 2024-2033 (p. 49). <https://draaf.bretagne.agriculture.gouv.fr/defense-des-forets-et-landes-contre-l-incendie-dfci-a292.html>
- DREAL Bretagne. (2017). Artificialisation des sols en Bretagne 2011-2014. https://www.bretagne.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/artif_11_14_vf.pdf
- Forgeard F. (1977). *L'écosystème lande dans la région de Paimpont. Etude du cycle de la matière organique et des éléments minéraux*. Université de Rennes.
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., ... Zheng, B. (2023). Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*, 15(12), 5301-5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>
- Guangcheng Chen, Gail L. Chmura, Stephen Crooks, James G. Kairo, Baowen Liao, & Guanghui Lin. (2013). Chapter 4 : Coastal Wetlands. In 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories : Wetlands (p. 55). https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/pdf/Wetlands_separate_files/WS_Chp4_Coastal_Wetlands.pdf
- Hallégouet, B., & Poncet, F. (1980). Evolution des zones humides littorales en Bretagne. Ministère de l'environnement. 811.
- Harald Aalde, Patrick Gonzalez, Michael Gytarsky, Thelma Krug, Werner A. Kurz, Rodel D. Lasco, Daniel L. Martino, Brian G. McConkey, Stephen Ogle, Keith Paustian, John Raison, N.H., Ravindranath, Dieter Schoene, Pete Smith, Zoltan Somogyi, & Andre van Amstel et Louis Verchot. (2006). Chapitre 2 : Méthodologies génériques applicables à diverses catégories d'affectation des terres. In GIEC (Éd.), *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre: Vol. Volume 4 : Agriculture, foresterie et autres affectations des terres* (p. 71). https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch02_Generic%20Methods.pdf

- Haut conseil pour le climat. (2022). Rapport annuel 2022- Dépasser les constats, mettre en œuvre les solutions. <https://www.hautconseilclimat.fr/publications/rapport-annuel-2022-depasser-les-constats-mettre-en-oeuvre-les-solutions/>
- Haut conseil pour le climat. (2024a). Accélérer la transition climatique avec un système alimentaire bas carbone, résilient et juste—Rapport thématique (p. 168). https://www.hautconseilclimat.fr/wp-content/uploads/2024/01/2024_HCC_Alimentation_Agriculture_25_01_webc_vdef_c.pdf
- Haut conseil pour le climat. (2024b). Rapport annuel 2024 : Tenir le cap de la décarbonation, protéger la population (p. 236). HCC. https://www.hautconseilclimat.fr/wp-content/uploads/2024/06/HCC_RA_2024-web-1.pdf
- IGN. (2021). RPG [Jeu de données]. <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/registre-parcellaire-graphique-rpg-contours-des-parcelles-et-ilots-cultureaux-et-leur-groupe-de-cultures-majoritaire/>
- IGN. (2024). BD Haie [Jeu de données]. <https://geoservices.ign.fr/bdhaie>
- Intergovernmental Panel On Climate Change (Ipcc) (Éd.). (2023). GIEC, AR6, Chapitre 7—Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU). In *Climate Change 2022—Mitigation of Climate Change* (1^{re} éd., p. 747-860). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.009>
- Ke, P., Ciais, P., Sitch, S., Li, W., Bastos, A., Liu, Z., Xu, Y., Gui, X., Bian, J., Goll, D. S., Xi, Y., Li, W., O’Sullivan, M., de Souza, J. G., Friedlingstein, P., & Chevallier, F. (2024). Low latency carbon budget analysis reveals a large decline of the land carbon sink in 2023.
- Le Noë, J., Manzoni, S., Abramoff, R., Bölscher, T., Bruni, E., Cardinael, R., Ciais, P., Chenu, C., Clivot, H., Derrien, D., Ferchaud, F., Garnier, P., Goll, D., Lashermes, G., Martin, M., Rasse, D., Rees, F., Sainte-Marie, J., Salmon, E., ... Guenet, B. (2023). Soil organic carbon models need independent time-series validation for reliable prediction. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00830-5>
- L’Initiative internationale « 4 pour 1000 »- Les sols pour la sécurité alimentaire et le climat. (2021, novembre 26). <https://4p1000.org/>
- Martin, M. (2019). La carte nationale des stocks de carbone des sols intégrée dans la carte mondiale de la FAO (Version V1) [Jeu de données]. Recherche Data Gouv. <https://doi.org/10.15454/JCONRJ>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Buendía, E. C., Shukla, P. R., Slade, R., & Connors, S. (2020). Résumé à l’intention des décideurs—Rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres (p. 39). IPCC.
- Ministère de la transition écologique. (2022). Plan national milieux humides 2022-2026 (p. 28). https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/plan_national_milieux_humides.pdf
- Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires. (2024, juillet 9). Forêt : Sauver notre meilleure alliée face au climat. <https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/dossiers-thematiques/milieux/foret>

- Observatoire de l'environnement de Bretagne (OEB). (2024). Transition énergétique, base de données des territoires TerriSTORY. https://bretagne.terristory.fr/?zone=departement&maille=commune&zone_id=56&nom_territoire=Morbihan
- Observatoire de l'environnement en Bretagne. (2023). Pourquoi la conservation des landes en Bretagne nécessite-t-elle un entretien spécifiquement adapté à leur biodiversité ? <https://bretagne-environnement.fr/article/landes-paysage-biodiversite-bretagne>
- Parc naturel régional du Golfe du Morbihan. (2019). Les sentiers côtiers : Un patrimoine fragile—Statuts et chiffres clés. <https://www.parc-golfe-morbihan.bzh/les-sentiers-cotiers-statuts-et-chiffres-cles/>
- Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., & Pardon L. (2013). Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude (p. 92). INRA. <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/4ce01662146c72f5de3ed9130c30c5dd.pdf>
- Pellerin, S., Bamière, L., & Camille Launay, Raphaël Martin, Michele Schiavo, Denis Angers, Laurent Augusto, Jérôme Balesdent, Isabelle Basile-Doelsch, Valentin Bellassen, Rémi Cardinael, Lauric Cécillon, Eric Ceschia, Claire Chenu, Julie Constantin, Joël Darroussin, Philippe Delacote, Nathalie Delame, François Gastal, Daniel Gilbert, Anne-Isabelle Graux, Bertrand Guenet, Sabine Houot, Katja Klumpp, Elodie Letort, Isabelle Litrico, Manuel Martin, Safya Menasseri, Delphine Mézière, Thierry Morvan, Claire Mosnier, Jean Roger-Estrade, Laurent Saint-André, Jorge Sierra, Olivier Théron, Valérie Viaud, Régis Grateau, Sophie Le Perhec, Olivier Réchauchère,. (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 (p. 540). INRA. <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/4pM-Synth%C3%A8se-Novembre2020.pdf>
- Perez L., Buitrago M., & Eglin T. (2018). Notice technique de l'outil ALDO : Estimation des stocks et des flux de carbone des sols, des forêts et des produits bois à l'échelle d'un EPCI (p. 21). <https://www.territoires-climat.ademe.fr/uploads/media/default/0001/01/16c8f3d7a61570edc7a0cef821828f2208e59270.pdf>
- Pôle-relais tourbières. (2019). Infographie : Tourbières & carbone [Image]. <https://reseau-cen-doc.org/Default/doc/SYRACUSE/38519/infographie-tourbieres-carbone>
- Région Bretagne. (2024). Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET)—2024 (p. 265). <https://www.bretagne.bzh/app/uploads/SRADDET-2024.pdf>
- Richard, N. (2023). Bilan des émissions de gaz à effet de serre (BEGES) du département du Morbihan. Conseil départemental du Morbihan.
- Robert, C. (2019). Développement d'une base de données des émissions et absorptions de gaz à effet de serre par les sols et la forêt en Bretagne—Rapport final. Citepa. <https://bretagne-environnement.fr/tableau-de-bord/levolution-des-stocks-de-carbone-lies-lutcatf-en-bretagne>
- Service des données et des études statistiques. (2023, octobre 20). L'empreinte carbone de la France de 1995 à 2022. Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le

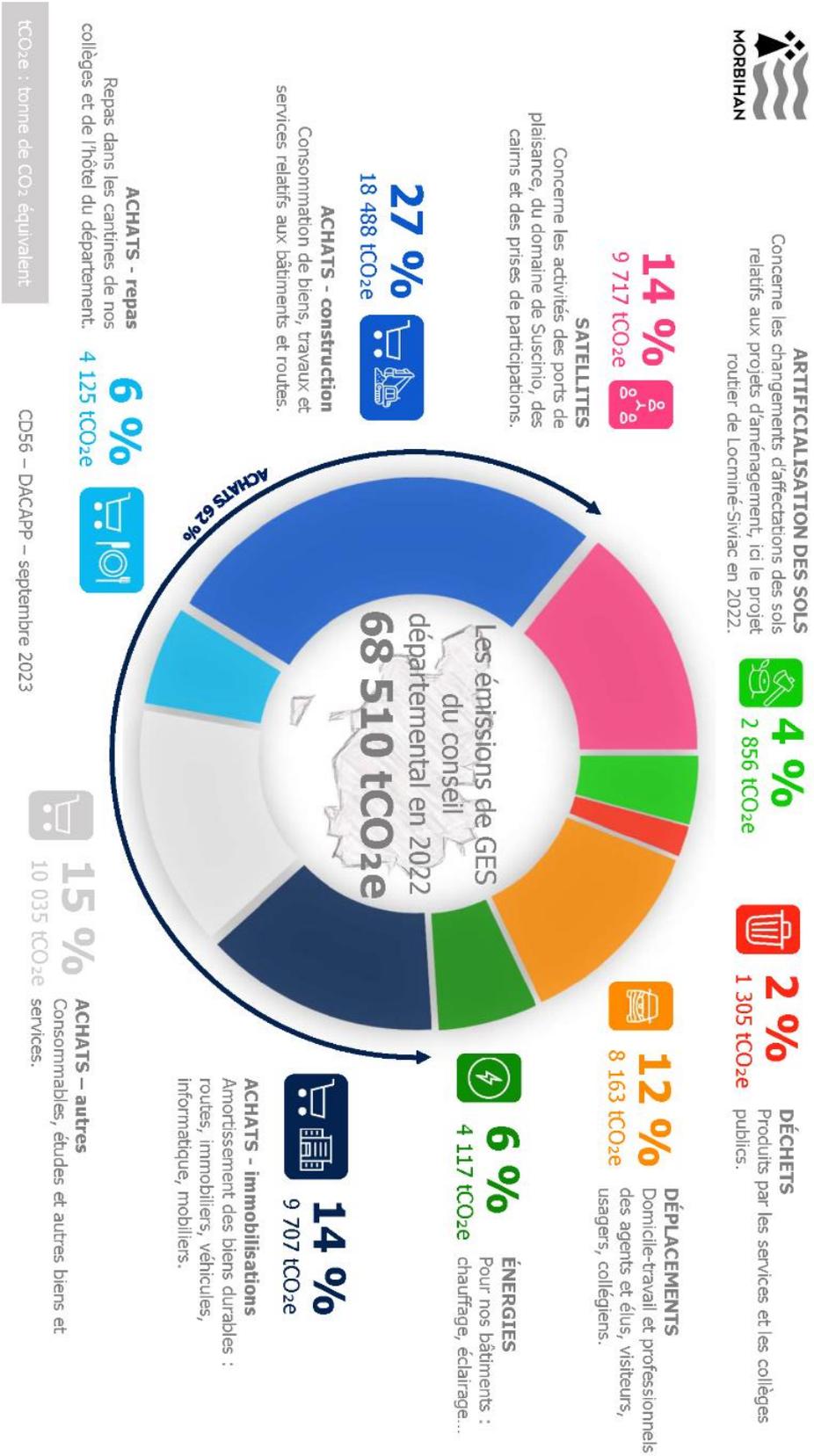
logement, et les transports. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lempreinte-carbone-de-la-france-de-1995-2022>

- Stephen Michael Ogle, Maria José Sanz Sanchez, Marcelo Theoto Rocha, James Douglas, & MacDonald, Hongmin Dong. (2019). Chapter 1 : Introduction. In IPCC (Éd.), 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Vol. Volume 4 : Agriculture, Forestry and Other Land Use (p. 18). https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch01_Introduction.pdf
- Stephen Michael Ogle, Werner Alexander Kurz, Carly Green, Andrea Brandon, Jeffrey Baldock, Grant Domke, Martin Herold, Martial Bernoux, Ngonidzashe Chirinda, Robert de Ligt, Sandro Federici, Emilio Garcia-Apaza, Giacomo Grassi, Thomas Gschwantner, Yasumasa Hirata, Richard Houghton, Joanna Isobel House, Shigehiro Ishizuka, Inge Jonckheere, Haruni Krisnawati, Aleksii Lehtonen, Mwangi James Kinyanjui, Brian McConkey, Erik Næsset, Sini M. Niinistö, Jean Pierre Ometto, Luis Panichelli, Thomas Paul, Hans Petersson, Shanti Reddy, Kristiina Regina, Marcelo Theoto Rocha, Joachim Rock, Maria José Sanz Sanchez, Carlos, Sanquetta, Atsushi Sato, Zoltan Somogyi, Aleksandr Trunov, Gabriel Vazquez-Amabile, Marina Vitullo, Changke Wang, Robert Michael, & Waterworth. (2019). Chapter 2 : Generic methodologies applicable to multiple land-use categories. In 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Vol. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use (p. 96). https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch02_Generic%20Methods.pdf
- Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) | Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires. (2020). <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>
- Walter, C., Bouedo, T., & Aurousseau, P. (1995). Cartographie communale des teneurs en matière organique des sols bretons et analyse de leur évolution temporelle de 1980 à 1995. [Research Report]. Agrocampus Ouest ; ENSA de Rennes ; UMR SAS, 65 rue de Saint-Brieuc, 35000 Rennes. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4203.6642>
- Xavier Hamon, Christian Dupraz, & Fabien Liagre. (2009). L'agroforesterie—Outil de séquestration du carbone en agriculture (p. 18). Association française d'agroforesterie (AFAF). <https://www.agroforesterie.fr/wp-content/uploads/2022/07/agroforesterie-outil-de-sequestration-du-carbone-en-agriculture.pdf>

Annexes

<i>Annexe 1 : Bilan des émissions de gaz à effet de serre de la collectivité départementale du Morbihan en 2022</i> <i>_ Source : (Richard, 2022)</i>	72
<i>Annexe 2 : Routine du modèle de variation de stock par maille utilisé dans la méthode OMINEA 2024 par le CITEPA</i> <i>_ Source : rapport OMINEA 2024</i>	73
<i>Annexe 3 : Typologie des nomenclatures utilisées dans l'inventaire UTCATF national réalisé par le CITEPA</i> <i>_ Source : rapport OMINEA 2024</i>	73
<i>Annexe 4 : Typologie des nomenclatures d'occupation des sols utilisée par Aldo</i> <i>_ Source : (ADEME 2023c)</i>	75
<i>Annexe 5 : Correspondance des typologies d'occupation des sols par le CBNB et fiabilité de l'estimation</i> <i>Source : (CBNB, 2019)</i>	76
<i>Annexe 6 : Comparaison des surfaces utilisées par Aldo avec les références locales disponibles</i> <i>_ Source : ADEME</i>	77
<i>Annexe 7 : Carte des EPCI du territoire morbihannais en 2017</i> <i>_ Source : CSEM</i>	78
<i>Annexe 8 : Surfaces brûlées depuis 1975 dans le Morbihan et nombre de départs de feux associés</i> <i>_ Source : DRAAF Bretagne 2023</i>	79
<i>Annexe 9 : Liste des EPCI (datant de 2018) agrégées et rentrées dans l'outil Aldo pour l'estimation des stocks et flux de carbone sur le territoire du Morbihan</i>	80
<i>Annexe 10 : Cartes de la moyenne des dynamiques paysagères en 2018 par commune considérées dans les estimations de flux du secteur UTCATF par le CITEPA dans l'ordre : dynamique bocagère, forestière et taux d'artificialisation</i> <i>_ Source : CITEPA</i>	80

Annexe 1 : Bilan des émissions de gaz à effet de serre de la collectivité départementale du Morbihan en 2022
_ Source : (Richard, 2023)



Annexe 2 : Routine du modèle de variation de stock par maille utilisé dans la méthode OMINEA 2024 par le CITEPA _ Source : rapport OMINEA 2024

Routine de calcul du modèle de variation de stock par maille :

Initialisation en 1990 : $stock_{1990} = stock_ref_{1990}$

Puis pour chaque année :

Si $stock_ref_n = stock_herite_n$ alors $stock_n = stock_herite_n$

Si $stock_ref_n < stock_herite_n$ alors $stock_n = \max(stock_ref_n, stock_herite_n - pertes_n)$

Si $stock_ref_n > stock_herite_n$ alors $stock_n = \min(stock_ref_n, stock_herite_n + gains_n)$

Et $flux_n = stock_n - stock_{n-1}$

Annexe 3 : Typologie des nomenclatures utilisées dans l'inventaire UTCATF national réalisé par le CITEPA _ Source : rapport OMINEA 2024

Niveau 1 (usage général)	Niveau 2 (usage précis)	Niveau 3 (occupation) - utile pour le calcul	Correspondance catégorie Giec
1 Agricole	10 Agricole à définir	100 Agricole indéfini	Terres cultivées
	11 Cultures annuelles, légumes et fleurs	110 Cultures annuelles, légumes et fleurs indéfinies	
		11bh Blé tendre d'hiver	
		11bp Blé tendre de printemps	
		11dh Blé dur d'hiver	
		11dp Blé dur de printemps	
		11cz Colza	
		11ah Avoine d'hiver	
		11ap Avoine de printemps	
		11lf Légumes ou fleurs	
		11be Betterave industrielle	
		11cf Choux, racines et tubercules fourragers	
		11ci Autres cultures industrielles	
		11ls Légumes secs	
		11mf Mais fourrage	
		11mg Mais grain	
		11oh Orge d'hiver	
		11op Orge de printemps	
		11xc Autres céréales	
		11pf Plantes à fibres	
		11pg Pois protéagineux	
		11pm Pomme de terre	
		11sh Seigle d'hiver	
		11so Sorgho	
		11sp Seigle de printemps	
		11th Triticale d'hiver	
		11to Tournesol	
		11tp Triticale de printemps	
	11xf Autres fourrages annuels		
	11xo Autres oleagineux		
11xp Autres protéagineux			

2	Végétation naturelle et semi-naturelle	12	Cultures permanentes	120	Cultures permanentes indéfinies	Prairies			
				12vi	Vignes				
				12ol	Oliveraies				
				12cq	Fruits à coque				
				12af	Autres arbres fruitiers				
		12cp	Autres cultures permanentes						
		13	Prairies temporelles et jachères	130	Prairies temporaires et jachères indéfinies				
				13pa	Prairies artificielles				
				13pt	Prairies temporaires				
				13jh	Jachères				
		14	Prairies permanentes	14pp	Prairies permanentes				
		2	Végétation naturelle et semi-naturelle	20	Végétation naturelle et semi-naturelle à définir		200	Végétation naturelle et semi-naturelle indéfinie	Terres forestières
							21	Forêt	
				21ff	Forêt feuillus				
21fc	Forêt conifères								
21fm	Forêt mixte								
21fp	Peupleraies								
21mg	Mangroves								
22	Végétation naturelle hors forêt			220	Végétation naturelle hors forêt indéfinie				
				22bq	Bosquet				
				22la	Landes, clairières, broussailles				
				22mq	Maquis, garrigues				
				22pe	Alpages, pelouses naturelles				
3	Artificiel			30	Artificiel à définir	300	Artificiel indéfini	Zones artificialisées	
		31	Artificiel principalement bâti/revêtu	310	Artificiel principalement bâti/revêtu indéfini				
				31ba	Espaces entièrement artificiels (bâti, nus ou revêtus)				
				31bn	Espaces en partie artificiels bâtis, nus ou revêtus -				
		32	Artificiel principalement végétalisé	320	Artificiel principalement végétalisé indéfini				
				32vh	Espaces végétalisés artificiels - herbe et buissonnant				
				32va	Espaces végétalisés artificiels - arborés				
4	Autres	40	Autres à définir	400	Autres indéfini	Autres terres			
		41		410	Zones humides et en eau indéfinies	Terres humides			
			Zones humides et en eau	41ea	Zone en eau naturelle (mer, océan, lac, rivière...)				
				41in	Zone inondée (artificiellement) - bassins, aquaculture, étang de pisciculture, zones de stockage de l'eau				
				41tb	Tourbières				
				41ms	Marais salants				
				41zh	Autres zones humides (roselières...)				
		42	Sols nus, et minéraux	420	Sols nus, minéraux indéfinis	Autres terres			
				42sn	Sols nus, sables, rochers				
				42gl	Glaciers et neiges				

Annexe 4 : Typologie des nomenclatures d'occupation des sols utilisée par Aldo _ Source : (ADEME 2023c)

Nomenclature niveau 1	Nomenclature niveau 2	Descriptif
Forêt	Forêt - mixte	Formations végétales composées de peuplements mixtes (feuillus et résineux mélangés)
Forêt	Forêt - feuillu	Formations végétales composées de peuplements majoritairement feuillus (> 75 %)
Forêt	Forêt - conifère	Formations végétales composées de peuplements majoritairement résineux (> 75 %)
Forêt	Forêt - peupleraie	Peupleraie
Zones humides	Zones humides	Ensemble des marais, tourbières, cours et voies d'eau.
Culture	Cultures	Ensemble des terres arables et de zones hétérogènes essentiellement agricoles
Prairie	Prairie - herbacée	Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole, pelouses et pâturages naturels.
Prairie	Prairie - arbustive	Formations végétales basses et fermées (landes et broussailles).
Prairie	Prairie - arborée	Végétation sclérophylle et persistante, y compris maquis et garrigues.
Vergers	Vergers	Parcelles plantées d'arbres fruitiers, y compris les châtaigneraies, noiseraies et oliveraies.
Vignes	Vignes	Parcelles plantées de vignes.
Haies	Haies	Haies linéaires, arbres alignés et bosquets
Sols artificiels	Sols artificiels - Imperméabilisés	Espaces dont l'imperméabilisation couvre la quasi-totalité du sol : espaces urbains, zones industrielles, commerciales, réseau de transport, mines, décharges et chantiers.
Sols artificiels	Sols artificiels - Enherbés et arbustifs	Espaces urbains dont la végétalisation ou le sol nu couvre des surfaces non négligeables, comme des petits parcs et jardins
Sols artificiels	Sols artificiels - Arborés	Espaces verts urbains.

*Annexe 5 : Correspondance des typologies d'occupation des sols par le CBNB et fiabilité de l'estimation
_ Source : (CBNB, 2019)*

<u>Occupation du sol retenue</u> (9 catégories)	<u>Catégories de la typologie CBNB correspondantes</u> (28 catégories)	<u>Fiabilité de l'estimation surfacique</u>
Agricole	Culture - Vergers	Moyenne
Artificiel	Bâti - Parcs et jardins – Routes - Autres milieux non végétalisés	Bonne
Bocage	Végétation des haies et talus	Bonne
Dune et littoral non artificialisé	Pelouses sèches des dunes mobiles - Pelouses sèches et mésophiles des dunes fixées - Rocher, falaises et sables littoraux	Bonne
Espace marin et intertidal	Champs d'algues marines - Milieu marin et estran végétalisé - Végétation des marais salés	Bonne
Forêt	Coupes forestières - Forêts sèches et mésophiles - Plantations d'arbres à feuilles caduque - Plantations d'arbres à feuilles persistantes	Bonne
Lande et fourré	Landes sèches et mésophiles - Fourrés secs et mésophiles	Moyenne
Prairie	Prairies et pelouses sèches et mésophiles	Moyenne
Zone humide continentale	Forêts humides - Fourrés humides - Landes humides - Plans d'eau, cours d'eau et végétations associées – Roselières - Tourbières et groupements tourbeux associés - Prairies et pelouses humides	Moyenne

Annexe 6 : Comparaison des surfaces utilisées par Aldo avec les références locales disponibles _
Source : ADEME

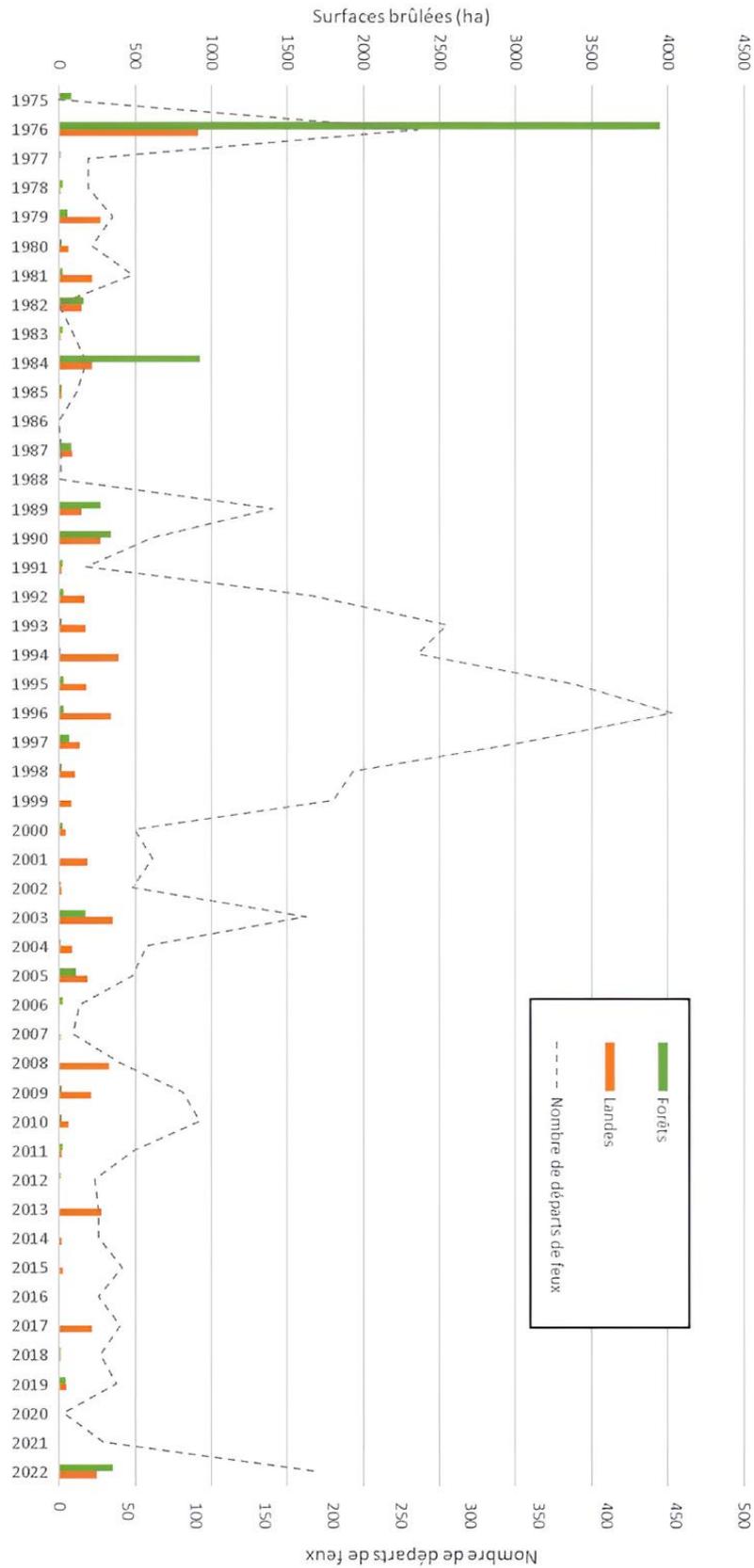
Occupation du sol		Surface renseignée par Aldo (ha)	Surface comparable référence locale (ha)	Ratio (surface Aldo/référence)
Forêts		132 921	130 000	1.02
	<u>Détails des typologies de Forêt :</u>			
	<i>Conifère</i>	25 654	/	/
	<i>Feuille</i>	72 345	/	/
	<i>Mixte</i>	33 788	/	/
	<i>Peupleraie</i>	1 134	/	/
Cultures		420 880	290 000	1.45
Prairies		73 626	/	/
	<u>Détail des typologies de prairies :</u>			
	<i>Prairies zones arborées</i>	0	/	/
	<i>Prairies zones arbustives</i>		(= landes sèches et mésophiles)	
		6 683	3 600	1.86
	<i>Prairies zones herbacées</i>		(= prairies et pelouses sèches et mésophiles)	
		66 943	77 000	0.87
Sols artificiels		46 500	74 000	0.63
	<u>Détail des typologies de sols artificiels :</u>			
	<i>Sols artificiels arborés</i>	31	/	/
	<i>Sols artificiels enherbés et arbustifs</i>		/	/
		9 269		
	<i>Sols artificiels imperméabilisés</i>	37 200	/	/
Zones humides		7 894	64 000	0.12

Vergers		1	0	/
Vignes		0	0	/
Linéaire :				
Haies		34 640 (km)	42 874 (km)	0.81
<u>Surface totale :</u>		681 822	683 300	

Annexe 7 : Carte des EPCI du territoire morbihannais en 2017 _ Source : CSEM



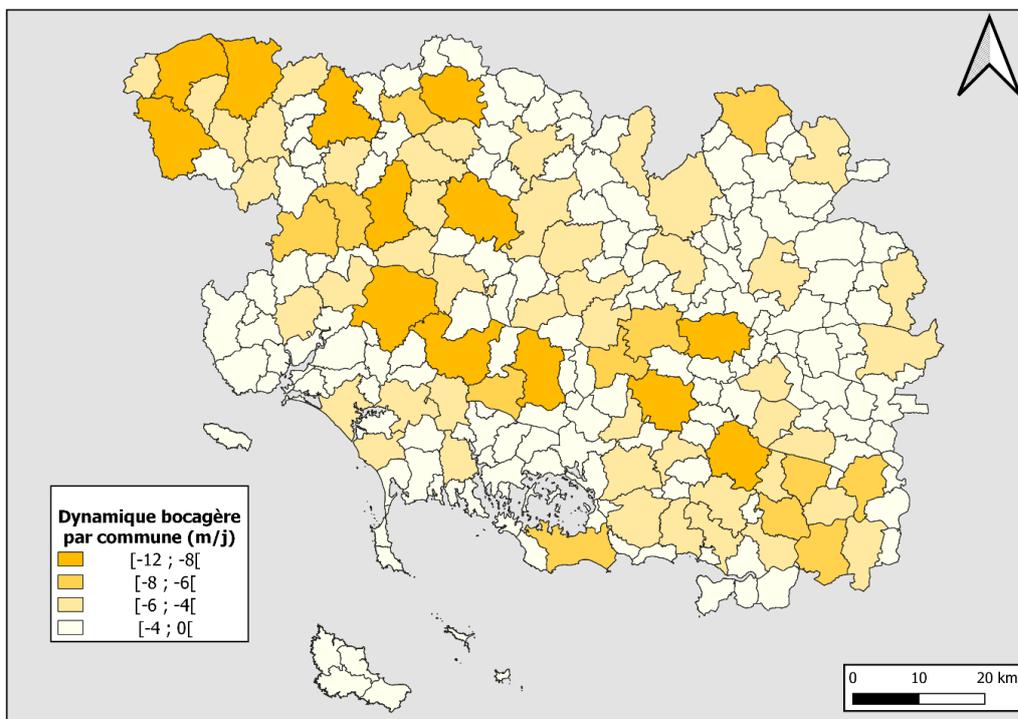
Annexe 8 : Surfaces brûlées depuis 1975 dans le Morbihan et nombre de départs de feux associé _ Source : DRAAF Bretagne 2023

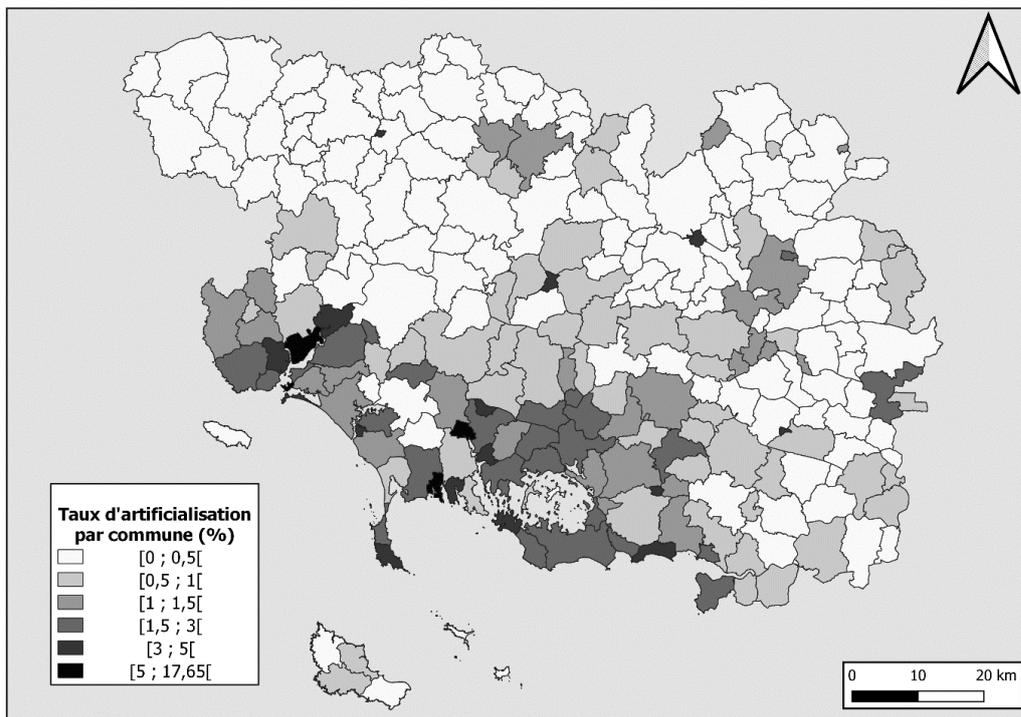
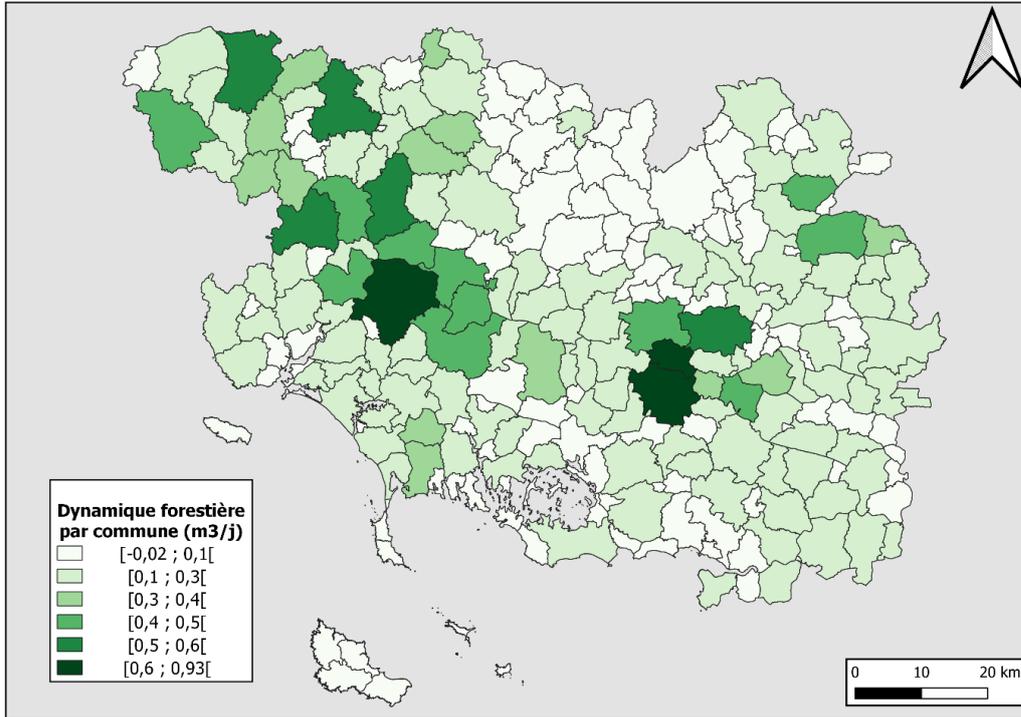


Annexe 9 : Liste des EPCI (datant de 2018) agrégées et rentrées dans l'outil Aldo pour l'estimation des stocks et flux de carbone sur le territoire du Morbihan

- [CC Roi Morvan Communauté \(245614417\)](#)
- [CC de Blavet Bellevue Océan \(245600440\)](#)
- [CC de Belle-Ile-en-Mer \(245600465\)](#)
- [CC Auray Quiberon Terre Atlantique \(200043123\)](#)
- [CC Pontivy Communauté \(245614433\)](#)
- [CC Centre Morbihan Communauté \(200067221\)](#)
- [CA Golfe du Morbihan - Vannes Agglomération \(200067932\)](#)
- [CC Questembert Communauté \(245614383\)](#)
- [CC Ploërmel Communauté \(200066777\)](#)
- [CC de l'Oust à Brocéliande Communauté \(200066785\)](#)
- [CC Arc Sud Bretagne \(200027027\)](#)
- [CA Lorient Agglomération \(200042174\)](#)

Annexe 10 : Cartes de la moyenne des dynamiques paysagères en 2018 par commune considérées dans les estimations de flux du secteur UTCATF par le CITEPA dans l'ordre : dynamique bocagère, forestière et taux d'artificialisation _ Source : CITEPA





Sigles et abréviations

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AFOLU : Agriculture, foresterie et autres utilisations des terres
(*Agriculture, forestry and other land uses*)
BEGES : Bilan des émissions de gaz à effet de serre
CA : Communauté d'agglomérations
CBNB : Conservatoire botanique de Brest
CC : Communauté de communes
CCNUCC : Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CCS : Capture et stockage de carbone (*Carbon capture and storage*)
CDR : Extraction de dioxyde de carbone (*Carbon dioxide removal*)
CEREMA : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CIPAN : Cultures intermédiaires pièges à nitrates
CIVE : Cultures intermédiaires à vocation énergétique
CITEPA : Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique
CLC : Corine Land Cover
CO : Carbone organique
DREAL : Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement
EFESE : Evaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques
ENS : Espace naturel sensible
EPCI : Etablissements publics de coopération intercommunale
ERC : Eviter Réduire Compenser
FAO : Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (*Food and agriculture organization of the United Nations*)
GES : Gaz à effet de serre

GIEC : Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat
HCC : Haut conseil pour le climat
INRAe : Institut national pour la recherche agronomique, l'alimentation et l'environnement
LBC : Label bas-carbone
ML (ml dans le texte) : mètre linéaire
MO : Matière(s) organique(s)
MTES : Ministère de la transition écologique et solidaire
ODEM : Observatoire départemental de l'environnement du Morbihan
OEB : Observatoire de l'environnement de Bretagne
OMINEA : Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France
PCAET : Plan climat-air-énergie territorial
PPM : (ppm dans le texte) partie par million, 1 ppm = 2.124 Gt C
RA : Recensement agricole
RMQS : Réseau de mesures de la qualité des sols
RPG : Registre parcellaire graphique
SAU : Surface agricole utile
SDBC : Stratégie départementale bas carbone
SDENSB : Schéma départemental des espaces naturels sensibles et de la biodiversité
SECTEN : Secteurs économiques et énergie
SIG : Système d'information géographique
SNBC : Stratégie nationale bas carbone
SRADDET : Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires
UTCATF : Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie (équivalent de LULUCF en anglais)
ZAN : Zéro artificialisation nette

