



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

La séquestration de carbone par les écosystèmes en France

T

H

Analyse

É

M

A



Mars 2019

EFESE

L'évaluation française des écosystèmes
et des services écosystémiques



Avant-propos



Le Plan gouvernemental sur le climat prévoit d'atteindre la neutralité carbone au niveau national aussi tôt que possible au cours de la seconde moitié du siècle en mobilisant notamment le potentiel des écosystèmes pour lutter contre le changement climatique. Cet objectif est corroboré par le rapport spécial « 1,5 °C » du Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat publié en octobre dernier qui a mis en évidence le caractère incontournable des puits de carbone pour l'atteinte de l'objectif de 1,5 °C de l'Accord de Paris et souligne l'intérêt, parmi ces puits, des écosystèmes.

En s'appuyant sur un cadre unifié nouveau, la présente évaluation permet d'éclairer le potentiel des écosystèmes français au regard d'un tel objectif. Elle met en évidence que cette contribution peut être élevée mais qu'elle reste incertaine et elle-même vulnérable au changement climatique. À une échelle plus locale, cette évaluation fournit des premiers outils pour que chacun, à son niveau, tienne compte de cet objectif national dans ses propres décisions.

Cette évaluation permet de mobiliser et d'articuler les nombreuses connaissances requises pour aboutir à des valeurs crédibles, légitimes et pertinentes aux yeux des décideurs. Dans ce cadre, elle identifie des besoins prioritaires de connaissances, de données et d'études. J'invite l'ensemble des acteurs investis sur ces sujets à se saisir de cette évaluation et à participer à sa consolidation pour orienter leurs efforts dans un sens utile à l'action publique.

Laurence Monnoyer-Smith
Commissaire générale au développement durable



MESSAGES-CLÉS À L'ATTENTION DES DÉCIDEURS

Remarques préliminaires :

Les messages clés à l'attention des décideurs issus de cette évaluation ont été soumis à l'avis du Conseil scientifique et technique de l'EFESE et ils ont été discutés et approuvés par le Comité national des parties prenantes de l'EFESE le 12 avril 2018.

Rappels sur les messages clés issus des évaluations EFESE :

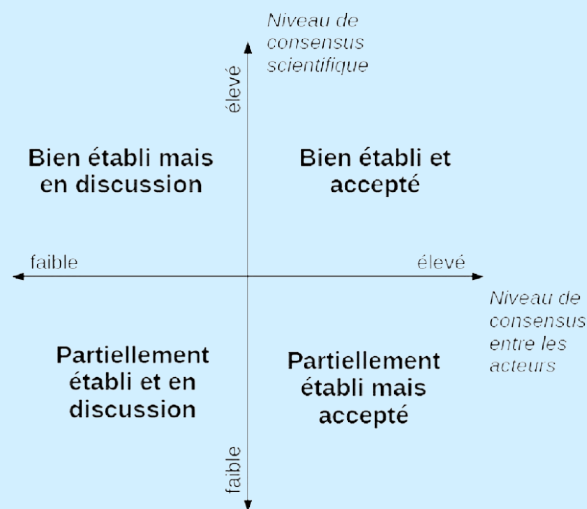
Les messages clés à l'attention des décideurs reflètent le contenu d'une étude la plus pertinente pour les décideurs. Ils sont rédigés conjointement par l'équipe projet du ministère en charge de l'environnement et les auteurs des études. Sont recherchés des messages :

- pertinents pour les décideurs mais non prescriptifs ;
- étayés par le rapport et qui en reflètent le contenu de manière équilibrée ;
- clairs et synthétiques ;
- qualifiés et partagés.

Chaque assertion composant ces messages est qualifiée sur deux dimensions :

- Le niveau de consensus scientifique est renseigné sur deux niveaux (*élevé / faible*). Il est proposé par les auteurs de l'étude et soumis à l'arbitrage du Conseil scientifique et technique.
- Le niveau de consensus entre les acteurs est renseigné sur deux niveaux (*élevé / faible*). Sauf opposition exprimée, il est considéré comme élevé. Il est dégradé aussitôt qu'une partie prenante conteste l'assertion en explicitant les raisons de son désaccord.

Cela donne lieu à quatre qualifications possibles indiquées en marge de chaque message :



La séquestration de carbone par les écosystèmes en France - Messages clés à l'attention des décideurs

Les écosystèmes français contribuent à l'atténuation du changement climatique de multiples manières et notamment en séquestrant le carbone atmosphérique en leur sein dans la biomasse vivante (arbres, etc.), le bois mort, les sols (prairies, pelouses alpines, sols forestiers, tourbières, etc.) et les sédiments (fonds marins, etc.). Lorsqu'un écosystème capte davantage de CO₂ qu'il n'en émet dans l'atmosphère, on dit qu'il est un puits de carbone. Lorsqu'ils sont associés à un faible risque de non-permanence, les flux de carbone depuis l'atmosphère vers les écosystèmes constituent le service écosystémique de séquestration in situ du carbone.

Etat actuel

1. Les écosystèmes français constituent des stocks de carbone très élevés et leur préservation constitue un enjeu fort¹.

- Au niveau mondial, les stocks de carbone contenus dans les sols représentent plus de 3 fois la quantité de carbone de l'atmosphère² ; on estime aussi que la concentration du CO₂ dans l'atmosphère pourrait être jusqu'à 50 % plus élevée en l'absence de processus biologiques dans l'océan³.
- En France, la quantité de carbone susceptible d'être ré-émise dans l'atmosphère suite à une forte déstabilisation du fonctionnement des écosystèmes terrestres pourrait représenter plus de 30 milliards de tonnes de CO_{2eq} soit plus de 60 fois les émissions françaises de 2015⁴.
- En France, actuellement, la mise en culture de prairies permanentes constitue une source de déstockage estimée chaque année à près de 1 % des émissions de 2015⁵.
- En France et à plus long terme, la poursuite des tendances actuelles en matière d'artificialisation à l'horizon 2050 pourrait conduire à un déstockage équivalent à 75 % des émissions de 2015⁶.

^{1, 2} Bien établi et accepté (Chapitre 3.1.1)

³ Bien établi et accepté (Chapitre 3.1.6)

⁴ Partiellement établi mais accepté (Chapitre 3.1.1)

⁵ Partiellement établi mais accepté (Chapitre 3.3.1)

⁶ Partiellement établi mais accepté (Chapitre 3.3.1)

2. Les écosystèmes terrestres français constituent actuellement un puits net de carbone très significatif que l'on estime en métropole à près de 20 % des émissions françaises de 2015¹, et dont seule une partie est considérée comme anthropique et comptabilisée dans les inventaires d'émissions de la France².

- Ce puits est principalement constitué des écosystèmes forestiers de métropole qui, en plus de fournir le bois nécessaire à la transition bas carbone, séquestrent près de 87 millions de tonnes de CO_{2eq} par an, soit l'équivalent de 19 % des émissions annuelles françaises environ³.
- Le puits de carbone constitué par la forêt guyanaise, estimé à près d'une dizaine de millions de tonnes de CO_{2eq} par an⁴ sur la période récente, semble s'être interrompu⁵.
- Au sein des écosystèmes agricoles, les terres cultivées émettraient de l'ordre d'un million de tonnes de CO_{2eq} par an⁶ tandis que les prairies séquestreraient près de 3 millions de tonnes de CO_{2eq} par an⁷.
- Certains milieux humides et aquatiques continentaux peuvent constituer un puits de carbone localement élevé bien que, du fait de la faiblesse des surfaces couvertes, ils séquestrent actuellement moins de 1 % des émissions annuelles françaises⁸.
- Les écosystèmes urbains abritent aussi des espaces verts (parcs, jardins et espaces en herbe aux abords des bâtiments) qui constituent un puits de carbone faible à l'échelle nationale⁹.

¹ Partiellement établi mais accepté (Chapitre 3.1.1)

² Bien établi et accepté (Chapitre 3.1.1)

³ Partiellement établi mais accepté (Chapitre 3.1.2)

^{4, 5} Bien établi et accepté (Chapitre 3.1.2)

^{6, 7} Partiellement établi mais accepté (Chapitre 3.1.3)

⁸ Bien établi et accepté (Chapitre 3.1.5)

⁹ Partiellement établi mais accepté (Chapitre 3.1.4)

3. Les écosystèmes marins français constituent un puits net de carbone, dit « carbone bleu », potentiellement significatif¹, mais peu décrit et principalement physique.

- Les écosystèmes côtiers (mangroves, herbiers, prés salés) présentent des conditions (salinité, productivité, etc.) qui favorisent la séquestration de carbone en leur sein. La séquestration de carbone dans ces écosystèmes peut y atteindre près de 7 tonnes de CO_{2eq} par hectare et par an² mais du fait de la faiblesse des surfaces couvertes, ils séquestrent moins de 1 % des émissions annuelles françaises³.
- Les écosystèmes marins français du large contribuent aussi à la séquestration de carbone à travers l'action combinée d'un phénomène physique, mais aussi, dans une moindre mesure, d'une séquestration de carbone par le phytoplancton et son maintien sous des formes amenées à sédimenter en profondeur. Appelé *pompe biologique*, ce dernier phénomène est encore très mal connu et sa contribution actuelle au puits de carbone bleu est vraisemblablement très faible⁴.

^{1, 2, 3, 4} Partiellement établi mais accepté (Chapitre 3.1.6)

Tendances et perspectives d'évolution

4. Si les écosystèmes français considérés comme des puits anthropiques de carbone se maintenaient à l'horizon 2050, et en l'absence de changement d'usages des terres et des pratiques, un objectif de neutralité carbone qui intégrerait la part comptabilisée de ces puits supposerait une réduction des émissions de gaz à effet de serre (hors UTCATF) de 90 % en 2050 par rapport aux émissions

¹ Partiellement établi mais accepté (Chapitre 3.1.2)

^{2, 3} Partiellement établi mais accepté (Chapitre 3.2.1)

de 1990, ce qui est plus ambitieux que le facteur 4 à cet horizon¹. Par ailleurs, ils ne sont que des puits de carbone transitoires qui seront amenés à se réduire et s'interrompre à un horizon qui reste incertain². Après 2050, ils ne représenteraient qu'un potentiel transitoire, incertain et limité de séquestration additionnelle (peut-être aussi faible que cinq années des émissions françaises de 2015 sous l'hypothèse d'un changement climatique maîtrisé et d'un maintien des usages des sols et des pratiques actuels) qui ne pourra pas compenser les émissions résiduelles indéfiniment³.

5. A long terme, les puits de carbone naturels et anthropiques demeurent très incertains et, en l'absence de stratégie d'adaptation, leur réduction serait d'autant plus marquée que le changement climatique sera fort¹. Sous certains scénarios de changement climatique, certains écosystèmes pourraient même devenir à terme des sources significatives d'émissions de carbone (sols des terres cultivées², etc.). On peut ainsi avancer que la différence de carbone séquestré à long terme dans les écosystèmes agricoles et forestiers entre des scénarii de changement climatique fort et modéré pourrait représenter plus de 5 années des émissions françaises de 2015³. Le « carbone bleu », encore très mal connu, est lui aussi potentiellement vulnérable, notamment à cause de l'acidification et des impacts du changement climatique⁴. L'atténuation du changement climatique par les écosystèmes pourrait ainsi constituer une boucle de rétroaction : plus les efforts internationaux d'atténuation seront ambitieux, plus la séquestration de carbone au sein des écosystèmes sera élevée, et inversement⁵.

¹ Bien établi et accepté (Chapitre 3.2)

² Partiellement établi mais accepté (Chapitre 3.2.3)

³ Partiellement établi mais accepté (Chapitre 3.2.1)

⁴ Partiellement établi mais accepté (Chapitre 3.2.5)

⁵ Partiellement établi mais accepté (Chapitre 3.2.1)

Pistes pour une intégration dans la décision

6. Du fait du risque de non-permanence associé à la séquestration *in situ*, « séquestrer une tonne de carbone dans un écosystème » n'est pas équivalent à « éviter l'émission d'une tonne de carbone de plus dans l'atmosphère à partir de combustibles fossiles »¹. Le niveau d'équivalence entre ces deux options dépend d'une évaluation du risque de non-permanence pour chaque compartiment et de notre attitude face à ce risque². L'évaluation de ce niveau d'équivalence est complexe et reste incertaine³.

^{1, 2} Bien établi et accepté (Chapitre 4.1.2)

³ Bien établi et accepté (Chapitre 5.1)

7. Malgré les incertitudes, il est possible d'identifier des pratiques stimulant le service de séquestration du carbone *in situ*¹. En l'absence de changement climatique marqué, les pratiques séquestrantes en agriculture (agroforesterie et cultures intermédiaires et intercalaires par exemple) pourraient conduire à une séquestration de carbone de l'ordre de 10 tonnes de CO_{2eq} par hectare de grandes cultures à long terme². Il peut aussi s'agir de pratiques qui favorisent le maintien des stocks existants, par exemple en limitant les pressions ou en renforçant la capacité des écosystèmes à s'adapter au changement climatique³.

^{1, 2, 3} Partiellement établi mais accepté (Chapitre 3.3.2)

8. L'évaluation socio-économique de projets et d'investissements susceptibles d'altérer le fonctionnement d'un écosystème, devrait tenir compte de la valeur associée aux variations de court terme des stocks de carbone en place ainsi qu'à ses perspectives de séquestration de carbone à plus long terme¹. La destruction d'un écosystème conduit en effet non seulement à la ré-émission d'une partie des stocks de carbone *in situ* dans l'atmosphère mais aussi à la perte des flux de séquestration futurs. La prise en compte des perspectives de séquestration à long terme dans l'évaluation peut amener à corriger le bilan des émissions de court terme par un facteur allant de -25 % à +50 % pour l'ensemble des écosystèmes agricoles et forestiers². Au total, la prise en compte de ces deux effets conduit à recommander d'imputer à la dégradation d'un écosystème naturel un coût pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines de milliers d'euros par hectare³. Si de tels montants pourraient ne pas être susceptibles d'influencer la réalisation de projets d'aménagement, ils peuvent permettre de comparer des variantes de projets et fortement influencer d'autres arbitrages en matière de gestion des écosystèmes ou d'usage des terres (mise en culture de prairies par exemple)⁴.

^{1, 2} Partiellement établi mais accepté (Chapitre 4.2)

^{3, 4} Partiellement établi mais accepté (Chapitre 4.3)

9. Dès lors qu'elle est envisagée dans le cadre d'un bilan de gaz à effet de serre d'ensemble et de long terme, la séquestration du carbone *in situ* entre en synergie avec de nombreux autres services, dont la plupart des services de régulation (fertilité des sols, protection contre les risques, etc.)¹. Elle peut cependant nécessiter des compromis avec certains services liés à l'atténuation du changement climatique, d'une part, et avec la production de biomasse et de matériaux, d'autre part². Cette dernière situation de compromis est largement atténuée, voire caduque, quand on prend en compte la valeur actuelle des effets de substitution associés aux usages des biens considérés et l'exposition aux risques des écosystèmes³.

^{1, 2} Bien établi et accepté (Chapitre 3.3.3)

³ Bien établi et accepté (Chapitre 3.1.2)

Besoins de connaissances de données et d'études

10. L'évaluation du service de séquestration *in situ* du carbone fait encore l'objet de fortes incertitudes qui compromettent sa prise en compte adaptée dans l'ensemble des décisions pertinentes (politiques et pratiques agricoles et forestières, aménagement du territoire, etc.)¹. A court terme, les principaux besoins d'études concernent (i) la consolidation des valeurs à partir des données et des connaissances existantes, notamment en vue de préciser les moyens d'atteindre

¹ Bien établi et accepté (Chapitre 5.1)

² Partiellement établi mais accepté (Chapitre 5.1)

³ Bien établi et accepté (Chapitre 5.3)

l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050, (ii) l'évaluation des bouquets de services associés et (iii) une réflexion sur les scénarios de changement climatique et leurs impacts les plus probables². Il apparaît aussi nécessaire d'améliorer dès maintenant le suivi de l'utilisation des sols et la compréhension des dynamiques du carbone au sein des écosystèmes, notamment dans les sols et les sédiments marins, et des effets des pratiques sur ces dynamiques. Des progrès en la matière permettraient, à terme, de modéliser précisément les flux de carbone dans les écosystèmes dans le cadre de scénarios intégrés³. Du fait de l'importance des besoins et des travaux nécessaires, la création d'un observatoire du bio-carbone permettrait de piloter le suivi et l'acquisition des données et des connaissances nécessaires dans un cadre intégré⁴.

⁴ Partiellement établi mais accepté (Chapitre 5.3)



RAPPORT D'ÉVALUATION



La séquestration de carbone par les écosystèmes en France

Une évaluation du service de séquestration *in situ* du carbone

Mars 2019

Sommaire

Avant-propos

Messages-clés à l'attention des décideurs

Rapport d'évaluation

Introduction

1 - Première Partie : Contexte

- 1.1 - Le service écosystémique de séquestration in situ du carbone
- 1.2 - La prise en compte du service de séquestration du carbone in situ dans les politiques sectorielles
 - 1.2.1 - Les politiques d'atténuation du changement climatique
 - 1.2.2 - Les politiques de protection et de valorisation de la nature et de la biodiversité

2 - Deuxième partie : Méthode d'évaluation

- 2.1 - Typologie
 - 2.1.1 - Méthode de construction
 - 2.1.2 - Typologie retenue pour cette étude
- 2.2 - Données recherchées
 - 2.2.1 - Les compartiments des écosystèmes
 - 2.2.2 - Les dynamiques du carbone dans les écosystèmes
 - 2.2.3 - L'utilisation de scénarios dans le volet « prospective » de l'évaluation

3 - Troisième partie : Ordres de grandeur à l'échelle nationale

- 3.1 - Volet observation : les stocks et les flux actuels
 - 3.1.1 - Vue d'ensemble
 - 3.1.2 - Les écosystèmes forestiers
 - 3.1.3 - Les écosystèmes agricoles
 - 3.1.4 - Les écosystèmes artificialisés et les terres dégradées
 - 3.1.5 - Les autres écosystèmes naturels terrestres
 - 3.1.6 - Les écosystèmes marins – le « carbone bleu »
- 3.2 - Volet projection : perspectives à long terme
 - 3.2.1 - Vue d'ensemble
 - 3.2.2 - Les écosystèmes forestiers
 - 3.2.3 - Les écosystèmes agricoles
 - 3.2.4 - Les écosystèmes urbains et les autres écosystèmes naturels terrestres
 - 3.2.5 - Les écosystèmes marins – le « carbone bleu »
- 3.3 - Leviers, compromis et synergies à l'échelle nationale
 - 3.3.1 - Effets des changements d'usage des terres
 - 3.3.2 - Effets des pratiques
 - 3.3.3 - Antagonismes et synergies

4 - Quatrième partie : Méthode et valeurs de référence pour l'évaluation socio-économique

- 4.1 - Présentation de la méthode d'élaboration des valeurs
 - 4.1.1 - Valeurs recherchées
 - 4.1.2 - Méthode d'élaboration
- 4.2 - Présentation des valeurs de références
- 4.3 - Utilisation des valeurs de référence dans l'évaluation socio-économique
 - 4.3.1 - Exemple 1
 - 4.3.2 - Exemple 2

5 - Cinquième partie : Limites et besoins de connaissance

5.1 - Limites des valeurs proposées

5.2 - Besoins d'études complémentaires

5.2.1 - Besoins d'études pour consolider les valeurs produites

5.2.2 - Autres besoins d'études complémentaires

5.3 - Principaux besoins de connaissances et de données

Conclusion

Bibliographie

ANNEXES

ANNEXE 1 - Table des sigles

ANNEXE 2 - Glossaire

ANNEXE 3 - Typologie détaillée

ANNEXE 4 - Données collectées

ANNEXE 5 - Valeurs de référence – Méthode et résultats

Index des illustrations

Index des tableaux

Index des encadrés

Contributeurs

Remerciements

Mentions légales

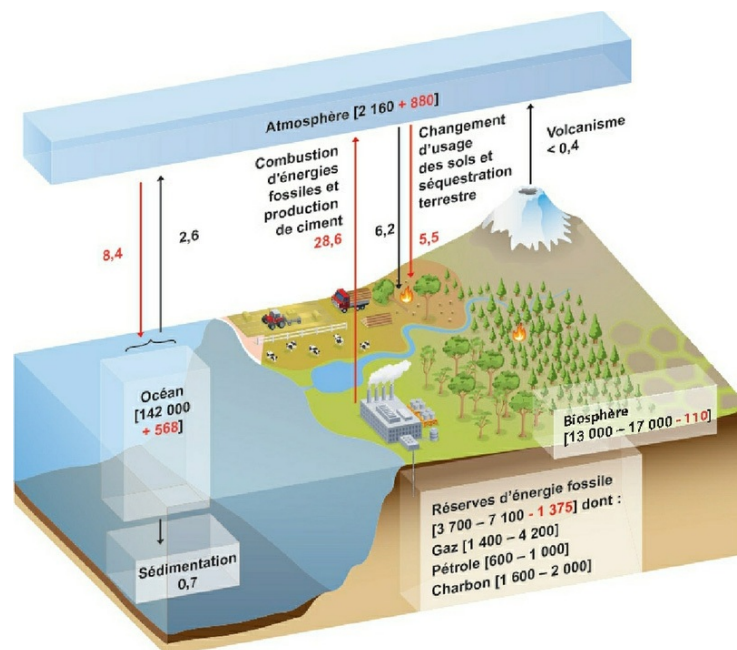
Introduction

Le Plan gouvernemental sur le climat adopté en 2017 prévoit d'atteindre la neutralité carbone au niveau national aussi tôt que possible au cours de la deuxième moitié du siècle en mobilisant notamment le potentiel des écosystèmes pour lutter contre le changement climatique. Les écosystèmes contribuent en effet très significativement à la séquestration du carbone que nous émettons chaque année dans l'atmosphère : chaque année, au niveau mondial, on estime ainsi que plus de la moitié des émissions humaines de dioxyde de carbone (CO₂) sont séquestrées par les écosystèmes marins et terrestres¹ et on estime que les stocks de carbone contenus dans les sols et la végétation représentent plus de 3 fois la quantité de carbone contenue dans l'atmosphère².

La présente évaluation se concentre sur cette partie du rôle des écosystèmes dans la régulation du climat mondial que nous appellerons le service écosystémique de séquestration *in situ* du carbone. Elle s'inscrit dans le cadre du programme national de l'Évaluation Française des Écosystèmes et des Services Écosystémiques (EFSE). Elle poursuit un triple objectif :

1. à l'échelle nationale tout d'abord, proposer et en discussion, en ordres de grandeurs, des valeurs pertinentes pour prendre la mesure des enjeux et sensibiliser largement les citoyens et les décideurs ;
2. proposer des valeurs de référence, biophysiques (caractéristiques des puits) et monétaires (coût de la dégradation des puits de carbone) faciles d'utilisation, afin d'améliorer la prise en compte des écosystèmes et de leurs services dans les décisions à l'échelle des multiples projets et investissements susceptibles de les dégrader ou les restaurer ;
3. enfin, et à partir des limites rencontrées dans l'atteinte des deux objectifs précédents, elle dresse l'inventaire des besoins d'études, de données et de connaissances pour pouvoir mieux intégrer ce service dans l'ensemble des décisions concernées.

Figure 1 : Le cycle mondial du carbone et son évolution depuis la période pré-industrielle



Clé de lecture : ce graphique présente (i) entre crochets la taille des réservoirs à la période pré-industrielle (avant 1750) en noir et leur variation entre 1750 et 2011 en rouge ; (ii) sous forme de flèche, les principaux flux annuels de carbone entre les différents réservoirs ; les flux pré-industriels sont en noir alors que les flux récents sont en rouge. Toutes ces quantités sont exprimées en milliards de tonnes d'équivalent CO₂.

Sources : issu de CGDD, 2017a, d'après le rapport AR5 du GIEC (2013, chapitre 6, p. 471)

¹ Un puits de 18 GtCO₂eq/an pour des émissions humaines de 33 GtCO₂eq/an (voir figure 1).

² Un stock estimé à au moins 13 000 GtCO₂eq contre 3 000 GtCO₂eq pour l'atmosphère (voir figure 1).

I – Première Partie : Contexte

Cette première partie présente le contexte de cette étude. Elle précise le périmètre du service écosystémique de séquestration du carbone *in situ* et son articulation avec les autres contributions des écosystèmes à la régulation du climat mondial. Elle présente ensuite l'état de la prise en compte de ce service dans les politiques d'atténuation du changement climatique et les politiques de protection et de valorisation de la nature et de la biodiversité.

I.1 – Le service écosystémique de séquestration *in situ* du carbone

Les écosystèmes contribuent à la régulation du climat mondial de nombreuses manières, notamment à travers l'effet d'albédo induit par la réflexion directe et indirecte du rayonnement solaire¹, la séquestration de carbone ou la fourniture de matériaux biosourcés (bois, etc.).

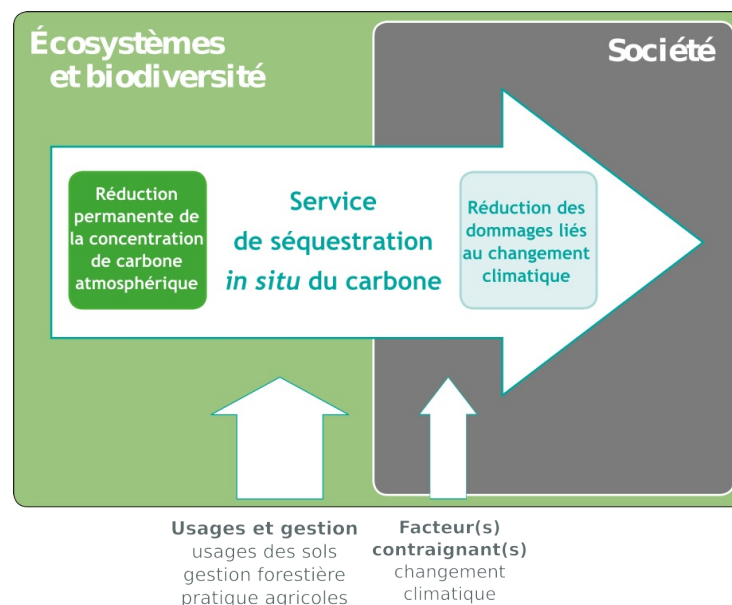
Cette évaluation se concentre sur la séquestration de dioxyde de carbone², principal gaz à effet de serre (GES) anthropique. Plus précisément, cette étude se concentre sur la séquestration *in situ* du carbone par les écosystèmes français, qui constitue un des quatre piliers de la contribution des écosystèmes à l'atténuation du changement climatique à travers leur influence sur le cycle du carbone³.

Dans son cadre conceptuel, l'EFESE caractérise un service écosystémique par la mise en relation d'une fonction écologique, sur le plan biophysique, et d'un avantage, sur le plan socio-économique⁴.

- Sur le plan biophysique, le service repose sur la capacité de l'écosystème à limiter la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, par exemple en y captant du carbone et en le maintenant durablement en son sein dans les sols, les sédiments et la biomasse⁵. Cette séquestration peut être envisagée à différents horizons et présente un risque de non-permanence à long terme qui doit être évalué.
- Sur le plan socio-économique, la séquestration de carbone dans la biosphère s'accompagne d'une réduction des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et donc d'une réduction des dommages liés au changement climatique. Ces dommages sont de natures variées, et portent sur l'ensemble des dimensions du bien-être considérées dans l'EFESE⁶, qu'il s'agisse des besoins économiques, de la santé, de la qualité du cadre de vie, de la protection contre les risques, des relations sociales et de la réduction des inégalités sociales et territoriales. Bien qu'éloignés dans le temps et difficilement monétarisables, la valeur de ces différents avantages est potentiellement très élevée. La réduction de ces dommages profitera aux générations futures mais très probablement aussi aux générations actuelles. En pratique, ce dommage ne sera pas évalué en tant que tel mais à hauteur du coût marginal des efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre consentis à l'échelle nationale (voir encadré 8).

Cette caractérisation du service de séquestration *in situ* du carbone est schématisé sur la figure 2.

Figure 2 : Caractérisation du service écosystémique de séquestration *in situ* du carbone



1.2 – La prise en compte du service de séquestration du carbone *in situ* dans les politiques sectorielles

Ce service écosystémique concerne deux politiques sectorielles spécifiques : les politiques d'atténuation du changement climatique et celles de protection et de valorisation de la nature et de la biodiversité. Nous présentons ici l'état de la prise en compte de ce service dans ces deux politiques sectorielles.

1.2.1 – Les politiques d'atténuation du changement climatique

« La lutte contre le changement climatique passe par la réduction des consommations d'énergies fossiles et la transformation de notre économie et de notre industrie. Mais pour avoir une chance de rester en dessous de 1,5 °C/2 °C de réchauffement, il faut aussi oeuvrer immédiatement à préserver les océans, améliorer la durabilité de la gestion et de l'exploitation des forêts pour préserver et renforcer leur capacité de stockage du carbone et restaurer la biodiversité, indispensable pour le fonctionnement de nos écosystèmes. »

Plan climat du Gouvernement français (2017)

L'atténuation du changement climatique⁷ constitue un objectif de politique publique formulé aux échelles internationale, européenne et nationale⁸. Dans chacun de ces cadres, le service écosystémique de séquestration *in situ* du carbone occupe une place variable.

Au niveau mondial, le cadre principal des négociations et des engagements des États est celui de la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) dont l'objectif principal est de « stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ». Dans l'Accord de Paris, adopté le 12 décembre 2015 et entré en vigueur le 4 novembre 2016, les États se sont engagés à contenir l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2°C par rapport aux niveaux préindustriels et en poursuivant l'action menée pour limiter l'élévation de température à 1.5°C.

Cet accord a par ailleurs confirmé l'importance accordée à la séquestration du carbone par les écosystèmes dans la lutte contre le changement climatique. Dans cet accord, les parties ont convenu de l'objectif de parvenir à un équilibre entre les émissions anthropiques et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre au cours de la seconde moitié du XXI^{ème} siècle⁹ et invitent à prendre des mesures pour conserver et, le cas échéant, renforcer les puits et réservoirs de gaz à effet de serre, dont notamment les forêts¹⁰. Au-delà des forêts et du secteur des terres, la prise en compte des autres écosystèmes susceptibles de jouer un rôle significatif dans le cycle du carbone demeure plus limitée au niveau international, qu'il s'agisse des fonds océaniques¹¹ ou des tourbières par exemple.

Ces objectifs internationaux ambitieux ont conduit les experts à souligner le besoin d'un agenda de recherche ambitieux tourné vers l'identification d'un ensemble large d'innovations, comprenant notamment une meilleure compréhension des puits de carbone naturels terrestres (sols et végétation)¹². Récemment, un rapport spécial du Giec sur l'impact d'un réchauffement global de 1,5 °C au-dessus des niveaux pré-industriels et sur les trajectoires d'émission de gaz à effet de serre correspondantes souligne, dans son résumé pour décideurs, que « toutes les trajectoires qui limitent le réchauffement climatique à 1,5 °C avec un dépassement limité ou absent prévoient de recourir à des technologies d'extraction du dioxyde carbone de l'ordre de 100 à 1000 GtCO_{2eq} au cours du XXI^e siècle »¹³. Les auteurs indiquent par ailleurs que les chemins possibles sont variés¹⁴ mais que les technologies d'extraction du carbone raisonnablement disponibles sont, elles, actuellement limitées¹⁵ : sur quatre scénarios contrastés illustratifs de la diversité des chemins de réduction d'émission de gaz à effet de serre au cours du XXI^e siècle compatibles avec l'objectif de 1,5 °C, tous mobilisent le service de séquestration du carbone *in situ*¹⁶ et deux d'entre eux s'appuient sur un fort déploiement des bioénergies assorti de capture et stockage du carbone¹⁷. Les auteurs soulignent par ailleurs que le déploiement de ces premières options requiert des « systèmes de gouvernance permettant une gestion des terres durable conservant et protégeant les stocks de carbone et les autres fonctions et services écosystémiques »¹⁸.

Au niveau européen, le Cadre Énergie Climat regroupe l'ensemble des textes législatifs relatifs à l'atteinte des objectifs de réduction d'émissions fixés. Le Cadre Énergie Climat 2030, adopté en 2014, fixe un objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans l'UE de 40 % d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 1990, qui a été décliné de la façon suivante :

- la réduction des émissions de gaz à effet de serre des secteurs soumis au marché carbone (SEQUE-Système d'échange de quotas d'émissions) de -43 % d'ici 2030 par rapport à 2005 ;
- la réduction des émissions de gaz à effet de serre des secteurs non soumis au marché carbone dans le cadre d'un partage de l'effort entre États-membres, de -30 % par rapport à 2005 ;
- l'engagement à maintenir ou à développer le puits des secteurs de l'Utilisation des terres, des changements d'affectation des terres et de la forêt (UTCATF) au niveau européen.

Ces trois objectifs ont été traduits en une directive révisée pour le SEQUE, en un règlement pour le partage de l'effort¹⁹ et en un règlement UTCATF²⁰. Des flexibilités ont été introduites permettant aux États-membres d'échanger, dans certaines limites fixées par les règlements, des quotas entre les différents secteurs et entre États membres afin de faciliter l'atteinte des objectifs du Cadre Énergie Climat 2030.

Pour ce qui concerne plus particulièrement le règlement UTCATF, chaque État-membre doit s'assurer que son puits UTCATF est plus élevé qu'une référence, correspondant à i) une référence projetée pour les terres forestières gérées, ii) zéro pour l'afforestation/déforestation et iii) les émissions historiques de la période 2005-2009 pour les terres agricoles (cultures et prairies). Si l'Etat membre est en déficit en appliquant cette comptabilité relative, il doit se conformer en mobilisant des flexibilités et *in fine* réaliser un effort supplémentaire dans les secteurs diffus soumis au partage de l'effort, si les flexibilités ne sont pas suffisantes pour compenser le déficit.

La Commission Européenne a également publié en 2011 une feuille de route pour une économie décarbonée visant une réduction de 80 % à 95 % des émissions de GES d'ici 2050 par rapport à 1990, Cette feuille de route est en cours de révision, et une nouvelle proposition de la part de la Commission est attendue pour le 26 novembre 2018, qui sera ensuite débattue avec les États membres. Dans le cadre de la préparation de cette nouvelle feuille de route, la Commission européenne doit en particulier étudier des scénarios visant la neutralité carbone en 2050.

Au niveau national, la Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) a fixé le cadre de référence en ce qui concerne l'atténuation du changement climatique. En termes d'émissions de gaz à effet de serre, elle fixe les deux objectifs suivants :

- la réduction des émissions de gaz à effet de serre nationales de 40 % d'ici 2030 par rapport au niveau de 1990 ;
- la division par quatre des émissions de gaz à effet de serre nationales d'ici 2050 par rapport à 1990, objectif connu sous le nom du « facteur 4 ».

En 2017, le Plan Climat a renforcé ces objectifs en prévoyant, dans la logique de l'Accord de Paris, d'atteindre la neutralité carbone au niveau national à horizon 2050²¹ en mobilisant notamment le potentiel des écosystèmes et de l'agriculture pour lutter contre le changement climatique²².

La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) constitue un outil majeur pour l'atteinte de ces objectifs et fournit des orientations stratégiques dans l'ensemble des secteurs (transports, bâtiments, agriculture et foresterie, énergies, industries et déchets) pour faciliter la transition bas carbone. Les orientations stratégiques proposées dans la première stratégie nationale adoptée par décret en novembre 2015 pour les écosystèmes agricoles et forestiers sont les suivantes :

- réduire les émissions agricoles de plus de 12 % à l'horizon du 3e budget carbone (2024-2028) par rapport à 2013 et de moitié d'ici 2050 ;
- stocker et préserver le carbone dans les sols et la biomasse ;
- renforcer les effets substitution matériaux et énergie.

La SNBC est actuellement en cours de révision. La stratégie révisée, qui sera adoptée au premier semestre 2019, intégrera la nouvelle ambition de neutralité carbone en 2050. De ce fait, au niveau national, la politique d'atténuation du changement climatique et l'enjeu de la séquestration de carbone par les écosystèmes sont désormais imbriqués, le volume du puits de carbone en 2050 (incluant les écosystèmes et des solutions technologiques) dimensionnant le volume maximum d'émissions résiduelles incompressibles en 2050.

A tous ces niveaux, la prise en compte de ces puits de carbone a cependant soulevé des débats qui se concentrent notamment autour de deux questions :

1. le risque que la prise en compte de ces puits ne viennent réduire le niveau d'ambition des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre par ailleurs. Ces risques sont notamment reflétés dans les discussions autour de la prise en compte du secteur UTCATF dans les cadres de comptabilité des émissions des états²³ ou dans le débat public²⁴ ;
2. la place controversée de la mobilisation accrue de biomasse du fait de ses effets sur la baisse de la séquestration de carbone *in situ*²⁵, de l'altération possible du fonctionnement des écosystèmes, mettant parfois en avant le puits observé au sein de forêts anciennes, et sans toujours tenir compte de l'ensemble des risques et des effets de long terme, ni mettre en regard la contribution indirecte des usages de la biomasse à l'atténuation au changement climatique (voir encadré 4)²⁶.

Dans le cadre de la révision de la SNBC au niveau national, un scénario permettant d'atteindre la neutralité carbone en 2050 a été développé²⁷, dans le cadre d'une large concertation avec les parties prenantes, en visant à définir un point d'équilibre entre les enjeux de mobilisation de la biomasse, à des fins de substitution matériau ou énergétique, ceux de la préservation et de l'augmentation du puits de carbone, y compris les enjeux directement associés de l'adaptation de la forêt au changement climatique et de la préservation de la biodiversité.

A titre d'exemple, s'agissant du secteur forestier, le scénario prévoit que la surface forestière continue de s'accroître et que la récolte de bois augmente progressivement, principalement pour des usages du bois comme matériau. Dans ce scénario, la production de produits bois à longue durée de vie (notamment utilisés dans la construction) triple entre 2015 et 2050, ce qui augmente le puits de carbone *ex situ* dans les produits bois. En aval, une meilleure collecte des produits bois en fin de vie permet d'augmenter fortement la valorisation énergétique de ce type de biomasse, mais avec un effet nettement différé, qui prend toute son ampleur dans la seconde moitié du siècle. *In fine*, grâce à une compensation par le puits *ex situ* des produits bois d'une part et le puits *in situ* des nouvelles forêts d'autre part, le puits de la filière forêt-bois est durablement maintenu, malgré une baisse du puits forestier dans les forêts actuelles liée à l'augmentation de récolte.

1.2.2 – Les politiques de protection et de valorisation de la nature et de la biodiversité

« Nous ne pourrions réussir le défi du climat sans l'appui des écosystèmes
qui sont nos premiers alliés dans cette lutte.
Les deux enjeux sont indissociables ».

Préambule du Plan biodiversité du Gouvernement français (2018)

L'intégration des enjeux d'atténuation du changement climatique dans les politiques de biodiversité se fait selon deux axes :

1. le renforcement des actions menées en faveur de la biodiversité qui contribuent à l'atténuation du changement climatique ;
2. la prise en compte des impacts du climat sur la biodiversité à travers des actions de préservation et d'adaptation destinées à renforcer la résilience des écosystèmes et un plaidoyer pour une action climatique ambitieuse.

Au niveau mondial, l'objectif de préservation des écosystèmes est rappelé dans l'Accord de Paris²⁸ tandis que le quinzième objectif d'Aichi adopté dans le cadre de la Convention sur la diversité biologique demande à ce que : « d'ici à 2020, la résilience des écosystèmes et la contribution de la diversité biologique aux stocks de carbone [soient] améliorées, grâce aux mesures de conservation et restauration, y compris la restauration d'au moins 15 % des écosystèmes dégradés, contribuant ainsi à l'atténuation des changements climatiques et l'adaptation à ceux-ci, ainsi qu'à la lutte contre la désertification ».

Dans ce contexte, les liens entre préservation des écosystèmes et atténuation du changement climatiques sont mis en valeur dans un plaidoyer pour l'action en faveur de la protection et la restauration des écosystèmes. C'est notamment le cas dans les évaluations récentes de la plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) sur la dégradation des terres et sur la région Europe et Asie centrale. Le premier souligne que la lutte contre la dégradation des terres, phénomène qui représenterait des émissions de l'ordre de 4 GtCO₂eq par an niveau mondial²⁹, pourrait significativement contribuer à l'atténuation du changement climatique³⁰ tout en offrant des synergies avec l'intégralité des Objectifs de développement durable (ODD)³¹. Pour illustrer l'importance de cette contribution, la seconde évoque une valeur monétaire médiane de la régulation du climat mondial par les écosystèmes de la région de 464 \$ par hectare et par an en moyenne³². Dans un autre cadre, l'argumentaire du carbone bleu développé par les Nations Unies vise à plaider pour une meilleure préservation des écosystèmes côtiers au nom de leur rôle dans l'atténuation du changement climatique.

Au niveau européen, la Stratégie de l'Union européenne pour la biodiversité (2011) demande à ce que « d'ici à 2020, les écosystèmes et leurs services [soient] préservés et améliorés grâce à la mise en place d'une infrastructure verte et au rétablissement d'au moins 15 % des écosystèmes dégradés ». Pour cela, elle prévoit notamment que les États membres « cartographient les écosystèmes et leurs services et en évaluent l'état sur leur territoire d'ici à 2014, évaluent la valeur économique de ces services, et encouragent l'intégration de ces valeurs dans les systèmes de comptabilité et de notification aux niveaux de l'UE et des États membres. » Plus récemment, le Plan d'action pour le milieu naturel, la population et l'économie (2017) de la Commission européenne vise à « accélérer la progression vers l'objectif européen consistant à enrayer la perte de biodiversité et la dégradation des services écosystémiques d'ici à 2020, y compris en ce qui concerne la résilience face au changement climatique et l'atténuation de ses effets. » Si l'atténuation du changement climatique n'apparaît pas ici de manière explicite, elle est bien présente, notamment à travers l'objectif affirmé « d'améliorer les lignes directrices et les connaissances et garantir une meilleure cohérence avec des objectifs socio-économiques plus larges », qui prévoit notamment de « mettre à jour, développer et promouvoir activement des lignes directrices sur l'intégration des services écosystémiques dans la prise de décision » (action 1b).

Au niveau national, la Stratégie nationale pour la biodiversité (SNB) 2011-2020 a été établie en cohérence avec les Objectifs d'Aichi. Ainsi, son objectif 6, en lien avec l'objectif 15 d'Aichi, vise à préserver et restaurer les écosystèmes et leur fonctionnement, notamment « car il conditionne la production de nombreux services utiles à l'Homme : régulation du climat, épuration des eaux usées, pollinisation... ». Cette stratégie souligne par ailleurs l'émergence de questions nouvelles relatives au changement climatique et aux services rendus par les écosystèmes. Plus récemment, le Plan biodiversité du gouvernement français, destiné à accélérer la mise en œuvre de la SNB, met l'accent sur les services écosystémiques concourant à l'adaptation au changement climatique et sur l'enjeu d'arrimer les politiques de préservation de la biodiversité dans le sillage des politiques climatiques.

Plusieurs publications témoignant de liens positifs entre biodiversité et séquestration du carbone rencontrent un écho important. Ces résultats conservent cependant un caractère le plus souvent anecdotique du fait de la faible pertinence de l'indicateur de séquestration sur lequel elles s'appuient, de leur caractère local ou des faibles quantités en jeu. Cette faible pertinence limite leur prise en compte dans les politiques d'atténuation du changement climatique³³. Par ailleurs, la prise en compte de la contribution des écosystèmes à l'atténuation du changement climatique soulève des interrogations et des débats qui se concentrent autour de deux questions :

1. le risque d'une gestion des écosystèmes monofonctionnelle centrée sur la séquestration de carbone au détriment les autres biens et services écosystémiques fait l'objet d'appels à la vigilance ;
2. dans le contexte actuel de réchauffement climatique, la discussion autour du compromis entre préservation des écosystèmes et adaptation active, notamment via le renouvellement des peuplements forestiers, afin d'éviter des dépérissements qui s'accompagneraient de fortes émissions.

1. Bien que peu connus, de tels effets ne sont pas négligeables au niveau mondial. Une étude récente estime ainsi qu'au niveau mondial et entre 2003 et 2012, les variations du couvert forestier sont à l'origine d'un réchauffement biophysique moyen des terres qui représente près de 18 % du signal biogéochimique attribuable aux émissions de CO₂ associés au changement d'usage des terres (Alkama et Cescatti, 2016).

2. Le principal GES est la vapeur d'eau. Le CO₂ est la principale cause *anthropique* de l'effet de serre. Le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O) sont les deux autres principaux GES d'origine anthropique.
3. Ces quatre piliers sont (i) la séquestration *in situ*, (ii) la séquestration *ex situ*, (iii) la substitution matériaux et (iv) la substitution énergie. Il est essentiel de souligner qu'une gestion des écosystèmes avec pour objectif d'atténuer le changement climatique ne se limite pas à la séquestration de carbone *in situ* au sein de ces écosystèmes. Elle doit aussi considérer la fourniture de biomasse (bois, etc.) qui permet (i) de prolonger la séquestration de carbone *ex situ* au sein des produits mais surtout d'offrir des produits de substitution (ii) aux matériaux à forte empreinte carbone (ciment, etc.) et (iii) aux sources d'énergie fossiles ; voir l'encadré 4 de ce rapport sur ce sujet.
4. CGDD, 2017b.
5. Noter que la séquestration de carbone équivalente à une tonne de CO_{2eq} dans la biomasse peut ne pas être *directement* liée à une réduction équivalente d'une tonne de CO_{2eq} dans l'atmosphère. C'est notamment le cas dans les écosystèmes marins, dans lesquels la captation de carbone dans la biomasse peut se traduire par un flux de carbone de l'océan vers l'atmosphère indéterminé (voir l'encadré 5) ou dans certains écosystèmes susceptibles de capter du carbone sous forme de CO₂ mais de le relâcher sous forme de méthane.
6. Voir CGGD (2017b), p.25-26.
7. C'est-à-dire « l'intervention humaine pour réduire les sources ou augmenter les puits de gaz à effet de serre » comme le définit le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC).
8. L'autre volet des politiques climatiques est celui de l'adaptation au changement climatique.
9. CCNUCC, 2015. Accord de Paris, article 4, § 1.
10. CCNUCC, 2015. Accord de Paris, article 5.
11. Voir les travaux de la plateforme Océan et Climat, 2015 sur le sujet.
12. Voir Boucher et coll, PNAS, 2016.
13. Giec., 2018, message C3, traduction des auteurs.
14. Giec, 2018, message C1.1.
15. Giec, 2018, message C3.1.
16. Il s'agit, pour reprendre les termes du Giec des technologies d'extraction du carbone relatives à l'agriculture, la gestion forestière et les autres utilisations des terres (AFOLU), ce qui comprend, par exemple, le boisement, la reforestation, la restauration des terres et la séquestration de carbone dans les sols.
17. Giec, 2018, figure SPM3b.
18. Giec, 2018, message C3.5, traduction des auteurs.
19. reg (UE) n°841/2018
20. reg (UE) n°842/2018
21. Plan Climat, axe 11.
22. Plan Climat, axes 15 à 19.
23. Voir par exemple I4C, 2017, section 2A pour une description des débats récents.
24. Voir par exemple I4CE, 2018.
25. Voir par exemple Cornwall (2017) ou l'article du Monde intitulé « La forêt, nouvel enjeu de la politique climatique de l'Europe » du 24 mars 2017.
26. De telles études alimentant les controverses sont nombreuses. Voir par exemple Böttcher et coll, 2018, pour un exemple d'une étude récemment conduite en Allemagne qui aboutit à un message tranché sur la base d'une évaluation dont la crédibilité scientifique est faible, et néglige notamment les effets du changement climatique sur les perspectives de séquestration du carbone et les effets de substitution liés aux usages du bois.
27. Référence à un doc public sur la SNBC révisée – à mettre à jour courant novembre
28. Ceci apparaît dans le préambule : « Reconnaisant l'importance de la conservation et, le cas échéant, du renforcement des puits et réservoirs des gaz à effet de serre visés dans la Convention, » et « Notant qu'il importe de veiller à l'intégrité de tous les écosystèmes, y compris les océans, et à la protection de la biodiversité, reconnue par certaines cultures comme la Terre nourricière [...] dans l'action menée face aux changements climatiques. » ainsi que dans l'article 7 qui fait mention de la protection des écosystèmes comme un des objectifs de l'adaptation aux effets du changement climatique.
29. IPBS, 2018a, p. 13.
30. IPBES, 2018a, Message A3
31. IPBES, 2018a, figure SPM 2.
32. IPBES, 2018b, message A1. Cette valeur monétaire mêle néanmoins des valeurs issues de méthodes variées et qui se prêtent à des interprétations différentes. Elle permet de démontrer que de nombreux argumentaires mettent en valeur une contribution significative mais elle ne se prête pas à un usage décisionnel qui nécessite de motiver une méthode en se référant au cadre de décision ciblé.
33. C'est par exemple le cas des liens observés entre la présence de la loutre de mer dans les zones côtières pacifiques et la croissance des forêts de laminaire (Wilmers et coll, 2012).

2 – Deuxième partie : Méthode d'évaluation

Cette étude vise à mobiliser au mieux les connaissances et données disponibles pour en permettre le transfert vers la décision. Cette deuxième partie présente la méthode d'évaluation adoptée pour aboutir à des valeurs pertinentes, crédibles et légitimes.

Ce chapitre présente la méthode générale retenue pour l'évaluation du service de séquestration *in situ* du carbone. Comme cela a été présenté en introduction, cette évaluation poursuit un triple objectif :

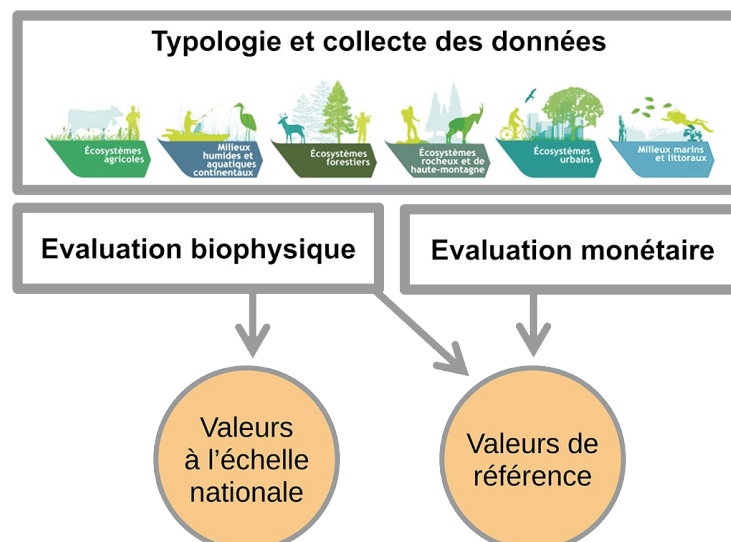
1. la présentation et la mise en discussion de valeurs pertinentes à l'échelle nationale pour prendre conscience des enjeux et sensibiliser largement les citoyens et les décideurs ;
2. la production de valeurs de référence, biophysiques et monétaires, pour l'évaluation des projets et des investissements à l'échelle locale ;
3. l'inventaire des connaissances pertinentes existantes et l'identification de besoins d'études, de données et de connaissances nécessaires pour progresser.

En lien avec les principes de l'EFESE, cette méthode respecte par ailleurs plusieurs principes :

- Couvrir l'ensemble des écosystèmes français (métropole et outre-mer, marin et terrestre) ;
- S'inscrire en cohérence avec les cadres de référence existants :
 - En matière d'évaluation des services écosystémiques¹ ;
 - En matière de comptabilité du carbone dans les écosystèmes² ;
 - En matière d'évaluation socio-économique³
- Rechercher la pertinence des valeurs proposées aux yeux des décideurs à partir d'une réflexion sur ce qui fait service ;
- Rechercher la crédibilité des valeurs proposées aux yeux des décideurs à travers l'inventaire et la mobilisation de l'ensemble des connaissances et des résultats d'évaluation pertinents et disponibles au niveau français
- Privilégier l'opérationnalité en s'efforçant d'évaluer, à partir de méthodes pertinentes, tout ce qui est susceptible de compter y compris là où les connaissances demeurent incomplètes ;
- Proposer un cadre d'évaluation qui offre la possibilité d'une amélioration continue et progressive à partir d'opérations explicites et qui permette d'identifier et de prioriser des besoins de connaissances.

La méthode d'évaluation repose sur la collecte de données ciblée sur le cycle du carbone au sein d'écosystèmes regroupés et organisés selon une typologie adaptée. Cette section présente et justifie successivement la typologie retenue et la nature des données recherchées pour chacun des types. La méthode d'élaboration des valeurs nationales et la méthode de construction des valeurs de référence pour l'évaluation socio-économique à partir des données collectées sont présentées dans les sections 3 et 4 respectivement.

Figure 3 : Méthode d'évaluation



2.1 – Typologie

L'évaluation du service repose sur une représentation spatialisée du territoire en *unités écosystémiques de couverture des sols (UECS ; ci-dessous unités écosystémiques)*⁴. Chaque unité est caractérisée en se référant à une typologie qui croise les types d'écosystèmes, appréhendés à travers la couverture des sols associée (ex : prairie ou grande culture) et des scénarios d'usages de ces écosystèmes (ex : exploitation intensive, labour modéré, etc.)⁵. Cette section présente la méthode de construction de la typologie et la typologie retenue pour cette étude.

2.1.1 – Méthode de construction

La construction de cette typologie vise à répondre à plusieurs exigences :

1. Couvrir l'ensemble des écosystèmes français⁶ ;
2. S'appuyer sur une caractérisation rigoureuse de chaque type ;
3. Pouvoir être cartographiée à l'échelle nationale ;
4. Être articulée avec les typologies utilisées dans le cadre des politiques publiques existantes⁷ ;
5. Pouvoir être améliorée de manière incrémentale.

Du fait de l'importance des usages (pratiques culturales ou sylvicoles par exemple) dans les dynamiques de séquestration du carbone, la typologie élaborée pour cette étude croise des types d'écosystèmes, approximés à travers la couverture des sols associée (ex : prairie, grande culture, culture de bocage ou agroforesterie, forêt de feuillus, ou zone humide par exemple) et des scénarios d'usages de ces écosystèmes, envisagée dans la durée (ex : exploitation intensive, labour modéré, etc.)⁸. Les types d'écosystème considérés pourront par exemple correspondre donc à une prairie fauchée à intervalle régulier, à une forêt soumise à un taux d'exploitation spécifique. Ces croisements permettent de prendre en compte les effets de pratiques ou de modes de gestion sur la séquestration du carbone dans les écosystèmes.

Encadré I

Aspects dynamiques et statiques de la méthode proposée.

Chaque type d'écosystème retenu est envisagé dans une perspective dynamique à usage constant. Si cet aspect dynamique est bien présent, les résultats d'évaluation délivrés à l'échelle nationale seront envisagés à surface et usage constant des différents types d'écosystèmes.

Seront donc prises en compte les dynamiques propres au fonctionnement des écosystèmes : notamment (i) les dynamiques, actuelles et à venir, résultant des usages et changements des terres passés, (ii) les dynamiques futures associées au contexte de changement climatique, hors celles qui se traduiraient par des changements d'usage des terres, et (iii) les dynamiques associées au maintien des usages actuels dans la durée.

Ne seront pas donc prises en compte les dynamiques futures associées aux changements d'affectation des terres ou bien aux modifications d'usage qui ne sont pas intégrés aux scénarios d'usages des types retenus (intensification de la gestion sylvicole par exemple). Une telle typologie n'intègre pas de scénarios de changement d'affectation des terres, mais elle peut être utile pour évaluer les conséquences de tels scénarios.

La typologie retenue pour cette étude est construite de manière itérative à partir d'une typologie initiale. La typologie initiale est dérivée de la typologie de couverture des sols *Corine Land Cover*⁹ réalisée à partir de photo-interprétations d'images satellites. Chaque unité de couverture des sols est considérée comme un type d'écosystème pour lequel tous les usages sont envisagés à proportion des usages actuellement observés. Cette typologie initiale constitue une base à partir de laquelle des distinctions entre usages et / ou caractéristiques biophysiques peuvent être opérées afin de construire une typologie de travail pertinente.

A partir de cette typologie initiale, des distinctions ont été opérées de manière à renforcer la pertinence des résultats proposés. Les distinctions opérées doivent être pertinentes du point de vue de la dynamique du carbone et permettre de tendre vers une typologie telle que les dynamiques vis-à-vis du carbone soient les plus homogènes au sein d'un type et les plus hétérogènes entre types. Le choix de distinguer différents types se fait de manière progressive et itérative.

La typologie retenue pour cette étude s'appuie sur les grands ensemble biogéographiques pour refléter la diversité de fonctionnement des écosystèmes français. Elle distingue ainsi les écosystèmes français de métropole et d'outre-mer et, au sein des écosystèmes métropolitains, 4 régions biogéographiques terrestres définies à l'échelle de l'Union Européenne par la Commission Européenne (les régions océanique, continentale, méditerranéenne et alpine représentées sur la figure 4) et 2 régions maritimes (la région Manche-Mer du Nord – Atlantique et la région méditerranéenne). Ces régions décrivent des ensembles relativement homogènes en termes de climat et d'écologie. La séquestration du carbone dans chaque écosystème est donc, quand cela est possible, appréhendée au sein de ces différents contextes climatiques et écologiques afin de prendre en compte les spécificités du cycle du carbone dans ces régions¹⁰.

Figure 4 : Les régions biogéographiques en Europe



Source : Commission Européenne.

La France couvre des régions biogéographiques variées : atlantique (en bleu), continentale (en vert), méditerranéenne (en jaune) et alpine (en violet).

2.1.2 – Typologie retenue pour cette étude

La typologie retenue pour cette étude compte 98 types, présentés et caractérisés en annexe 3. En ce qui concerne les collectivités d'outre-mer, seuls la forêt guyanaise, les écosystèmes du carbone bleu (mangroves et herbiers) et les écosystèmes marins du large ont fait l'objet d'un travail de collecte de données dans le cadre de cette étude.

Les écosystèmes forestiers

Sur le plan des écosystèmes, la typologie retient des distinctions de la typologie développée par l'IGN pour la version 2 de la Base de Données Forêt (BD Forêt v2)¹¹. Ce choix permet d'assurer la cohérence avec la future cartographie de référence pour le secteur forestier. Elle repose sur la distinction selon les types de peuplements (peuplements de résineux et de feuillus) et les taux de couvert des peuplements¹². Sur le plan des usages, aucune distinction n'est opérée à ce stade.

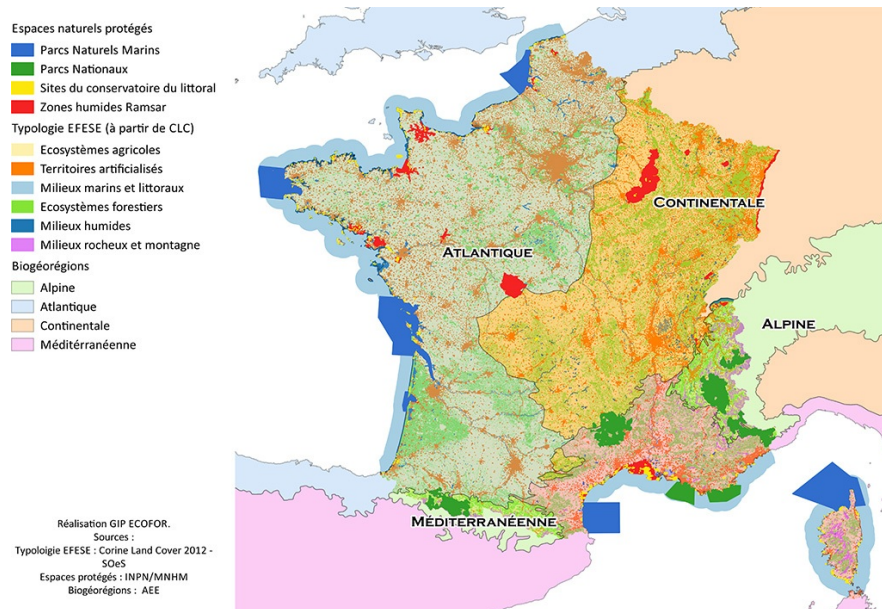
Les écosystèmes agricoles

Sur le plan des écosystèmes, on distingue les principales formations culturales : grandes cultures, cultures pérennes et prairies. Sur le plan des usages, on se focalise, pour les grandes cultures, sur le travail et la couverture du sol qui sont des facteurs déterminants sur lesquels des perspectives d'action existent¹³ et font l'objet d'une attention forte¹⁴. En ce qui concerne les prairies, aucune distinction n'est opérée à ce stade¹⁵. On intègre aussi, au sein de chaque type les données moyennes des éléments boisés intra et inter-parcellaires, compte tenu de leur fort potentiel de séquestration du carbone et de leur inscription dans les politiques publiques (agroforesterie et reconquête des éléments semi-naturels des paysages agricoles tels que les haies).

Les autres écosystèmes naturels terrestres

Sur le plan des écosystèmes, les écosystèmes naturels regroupent l'ensemble des écosystèmes naturels non-inclus dans le périmètre des deux ensembles précédents au sein de 8 catégories : tourbières et autres zones humides continentales, milieux aquatiques continentaux, zones humides littorales, lagunes et lagons, plages, dunes, zones rocheuses et enneigées, et au sein des collectivités d'outre-mer, les mangroves. Sur le plan des usages, la question des usages ayant une influence spécifique est peu documentée à l'exception du drainage des tourbières pour l'irrigation de surfaces cultivées par exemple. Dans ce contexte, il a été choisi de distinguer les écosystèmes relevant de zones protégées au titre de certaines réglementations (voir figure 5). En effet, ces périmètres réglementaires sont associés à un ensemble de règles de gestion et de pratiques. L'hypothèse sous-jacente est que ces règles de gestion influencent la capacité de ces écosystèmes à séquestrer du carbone de manière durable, en évitant par exemple les perturbations ou les dégradations futures des milieux¹⁶. Cette distinction à partir du niveau de protection permet notamment à souligner la fragilité de ces écosystèmes et évaluer les effets bénéfiques des mesures de protection sur leur résilience et, par là-même, leur potentiel de séquestration du carbone à long terme. Lorsque les données permettent de motiver des perspectives de séquestration contrastées, on distingue donc, pour chacun des écosystèmes retenus, ceux appartenant à des zones protégées des autres. Au final, et face à l'absence de données, cette distinction n'a cependant été retenue que pour les tourbières en métropole et les mangroves ultramarines.

Figure 5 : Carte des espaces protégés considérés dans cette étude



Remarque : il s'agit des Parcs nationaux, des aires marines protégées (dont les parcs naturels marins), des zones humides classées au titre de la convention RAMSAR et des zones acquises par le Conservatoire du littoral.

Sources : Réalisée et communiquée par le GIP Ecofor (2017) à partir des données CLC, de l'INPN et de l'AEE.

Les écosystèmes artificialisés et les terres dégradées

Sur le plan des écosystèmes, les écosystèmes artificialisés couvrent les zones bâties et les espaces verts urbains, sur la base des surfaces fournies par Corine Land Cover. Cette typologie regroupe aussi les terres dégradées, c'est-à-dire les espaces ne faisant pas l'objet d'une utilisation économique et sur lesquels la dégradation des sols limite l'établissement d'une couverture végétale. Sur le plan des usages, aucune distinction n'est opérée à ce stade.

Les écosystèmes marins

Sur le plan des écosystèmes, la typologie distingue les écosystèmes côtiers et les écosystèmes marins du large. Au sein des eaux côtières, certains écosystèmes côtiers du carbone bleu sont distingués : il s'agit des zones d'herbiers dans les collectivités d'Outre-mer et d'herbiers de posidonies en Méditerranée. Sur le plan des usages, les usages de l'espace maritime sont encore relativement peu documentés à l'échelle nationale¹⁷. Comme pour les écosystèmes naturels, il a été retenu de distinguer les écosystèmes relevant de zones protégées au titre de certaines réglementations du fait des arguments avancés dans la littérature scientifique¹⁸.

2.2 – Données recherchées

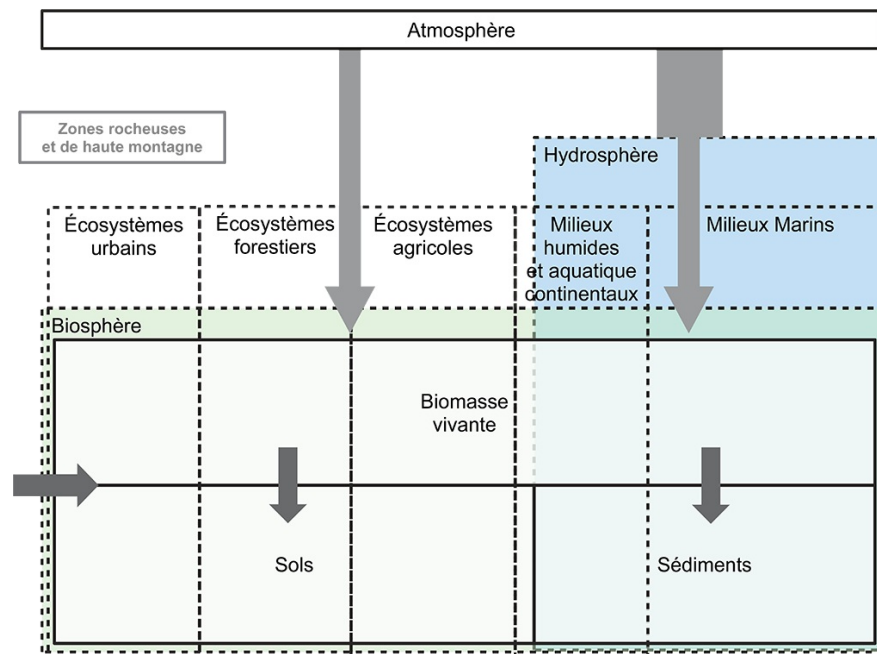
Une spécificité de l'approche d'évaluation retenue consiste à définir en amont les données requises pour conduire l'évaluation plutôt que de partir des données existantes. Cette approche, qui s'intéresse en premier lieu à définir ce qui fait service et ce que l'on a besoin de savoir pour atteindre les trois objectifs de cette évaluation, vise à favoriser la production de résultats pertinents et à éviter le biais consistant à se limiter aux données disponibles. Cette section présente les données recherchées.

2.2.1 – Les compartiments des écosystèmes

Pour chaque type, deux compartiments (ou réservoirs) de carbone sont définis (en plus des produits issus de la biomasse) :

- La biomasse vivante comprend la biomasse vivante, aérienne et souterraine ;
- Les sols (y compris la litière et le bois mort¹⁹) et les sédiments.

Figure 6 : Représentation des compartiments considérés dans cette évaluation



Clé de lecture : Les flèches grises représentent les flux nets de carbone considérés dans cette étude. Les compartiments en pointillés correspondent à des découpages conventionnels.

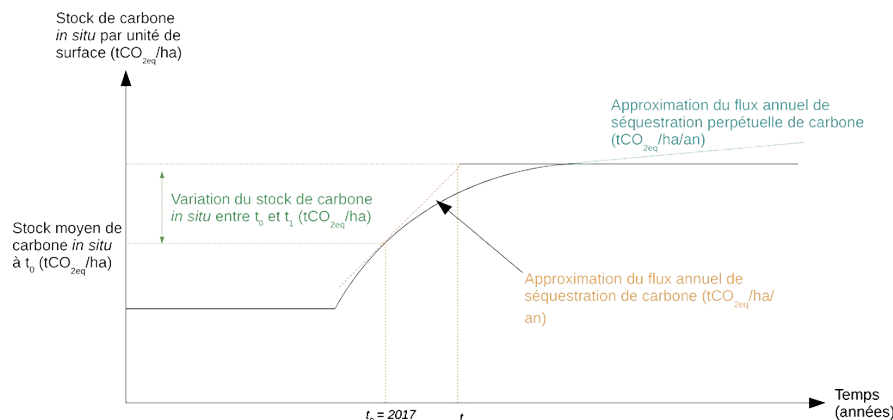
Le compartiment des sols comprend le bois mort et la litière quand cela est pertinent (ce qui est le cas pour les sols forestiers par exemple). Il est soumis à des processus complexes. De manière générale, dans les écosystèmes tempérés, le temps de résidence du carbone organique dans les sols dépend de son état : la matière organique non décomposée résidera moins d'une année dans le sol, la matière organique agrégée à des éléments minéraux comme l'argile pourra résider une dizaine d'années dans le sol, celle intégrée de manière complexe à des agrégats minéraux une centaine d'années. La matière organique atteignant les horizons profonds du sol (>30 centimètres) pourra y résider plusieurs millénaires du fait de son isolement des communautés microbiennes, du manque de substrat nécessaire au développement des micro-organismes du sol²⁰ et de l'absence des éléments nécessaires à sa minéralisation (oxygène notamment). En pratique, la mesure des stocks actuels se limitera aux 30 premiers centimètres qui correspondent aux horizons les plus superficiels²¹.

Dans les écosystèmes aquatiques terrestres et les écosystèmes marins, les sédiments constituent aussi des compartiments plus ou moins stables selon leur profondeur. On estime notamment que les particules qui atteignent une profondeur supérieure à 1000 m sont séquestrées pour une durée qui dépasse le siècle²². Dans cette étude, le compartiment des sédiments comprend en principe la couche sédimentaire située à une profondeur inférieure à 1000 m ainsi que la part de la colonne d'eau située au-delà de 1000 m de profondeur.

2.2.2 – Les dynamiques du carbone dans les écosystèmes

L'évaluation repose sur la collecte d'informations quantitatives ciblées concernant les caractéristiques présentes et l'évolution future de chaque type vis-à-vis du carbone. De manière générale, la séquestration du carbone dans les sols et les sédiments et dans la biomasse aérienne peut être représentée à partir des variables présentées sur la figure 7. Les dynamiques de ces deux compartiments n'ont pas les mêmes temporalités et l'atteinte de leur nouvel état d'équilibre n'est pas forcément synchrone.

Figure 7 : Vision schématique adoptée pour la séquestration de carbone dans un compartiment, suite à une perturbation entraînant un changement d'équilibre



Remarque : La prise en compte d'un flux perpétuel de séquestration ne concerne que le compartiment « sols et sédiments » d'un nombre réduit d'écosystèmes.

Les variables considérées et renseignées pour chaque type d'écosystème dans cette étude sont donc les suivantes :

- i. L'évaluation du service actuel : le volet « observation »
 - le stock de carbone *in situ* actuel : c'est la quantité moyenne de carbone contenue dans le compartiment considéré tel qu'observé aujourd'hui (en tCO_{2eq}/ha).
 - le flux de séquestration actuel : c'est le flux annuel moyen de séquestration de carbone dans le compartiment considéré, tel qu'il est observé actuellement (en tCO_{2eq}/ha/an).
- ». L'évaluation du service écosystémique futur : le volet « prospectif »
 - la variation attendue de stock de carbone *in situ* : c'est le flux de séquestration attendu, à un horizon de temps donné ; il correspond à la différence entre le stock de carbone *in situ* à cet horizon et le stock actuel de carbone *in situ* (en tCO_{2eq}/ha). Deux horizons sont considérés, 2050 et un horizon de plus long terme, adapté pour chaque écosystème, et qui correspond à l'horizon auquel le potentiel maximum de séquestration du type d'écosystème est atteint.
 - Le flux perpétuel de séquestration : c'est le flux de séquestration de carbone dans le compartiment de l'écosystème considéré, flux qui peut être maintenu indéfiniment (en tCO_{2eq}/ha/an). Cette variable ne concerne que le compartiment des sols et sédiments. En effet, les végétaux ont une croissance finie si bien que le flux de séquestration nette dans la biomasse est amené à se tarir à long terme. Plus généralement, la plupart des dynamiques de séquestrations observées actuellement seraient amenées à s'interrompre²³. Selon certaines études, certains écosystèmes permettraient cependant l'accumulation perpétuelle de carbone en leur sein (sols des vieilles forêts²⁴, sédiments des fonds marins²⁵, etc.).

2.2.3 – L'utilisation de scénarios dans le volet « prospective » de l'évaluation

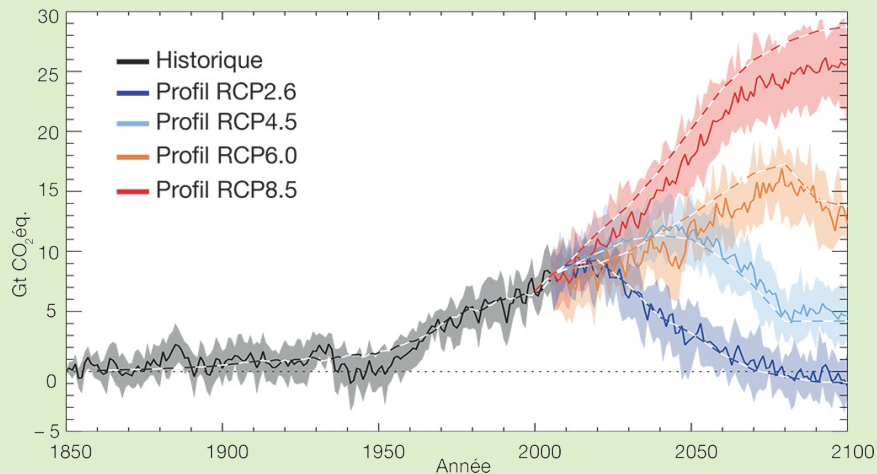
Cette évaluation vise non seulement à renseigner l'état actuel du service écosystémique de séquestration *in situ* du carbone (le flux actuel de séquestration *in situ* notamment), mais aussi ses évolutions futures (*via* la variation de stock de stock de carbone à un horizon donné). Du fait de l'influence potentiellement forte du changement climatique sur le cycle du carbone au sein des écosystèmes, ces évolutions potentielles sont envisagées dans le cadre de 5 scénarios : un scénario « climat constant » qui repose sur la simple prolongation des observations passées et les 4 scénarios RCP du GIEC (voir encadré 2).

Encadré 2

Les scénarios de changement climatique du GIEC

Pour décrire les évolutions possibles du climat, les experts du GIEC définissent des scénarios, appelés RCP pour "Representative Concentration Pathways". Ces trajectoires décrivent différentes évolutions potentielles de la concentration en gaz à effet de serre de l'atmosphère à partir d'hypothèses sur les économies, les sources d'énergie ou encore l'évolution de la population mondiale et les politiques climatiques (figure 6). Ces scénarios n'ont pas de caractère prédictif, mais ils permettent de mieux comprendre les incertitudes associées aux différentes évolutions possibles. Ils sont utilisés pour produire des projections décrivant 4 trajectoires d'évolution des émissions de gaz à effet de serre pour le 21^{ème} siècle. Le RCP2.6 correspond à un scénario visant à maintenir le réchauffement en dessous de 2°C par rapport à l'ère pré-industrielle. A l'inverse, le RCP8.5 est basé sur des émissions de gaz à effet de serre très fortes. Deux scénarios sont intermédiaires : le RCP4.5 et le RCP6.

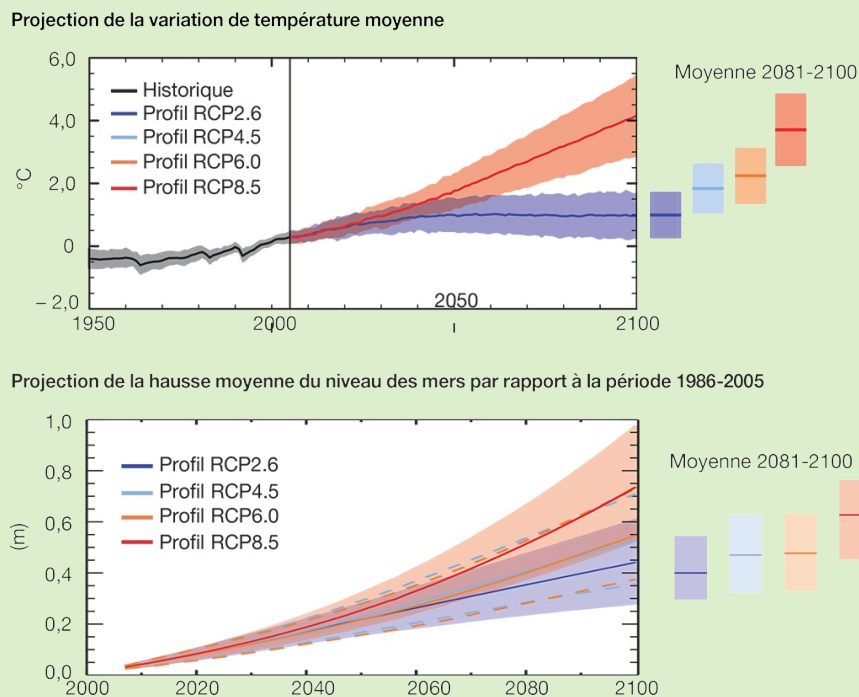
Figure 8 : Projections des émissions liées aux énergies fossiles suivant les quatre scénarios RCP du GIEC



Source : issu de CGDD, 2017a, d'après le rapport AR5 du GIEC.

Ces scénarios globaux sont aussi régionalisés et décrivent les évolutions climatiques avec un ensemble de variables : température, pluviométrie, niveau de la mer, etc. (figure 7).

Figure 9 : Hausse des températures et hausse du niveau de la mer associés aux scénarios RCP du GIEC



Source : issu de CGDD, 2017a, d'après le rapport AR5 du GIEC (Résumé pour les décideurs, page 11).

1. Chevassus-au-Louis et coll., 2009 ; CGDD, 2016 et 2017b.
2. Notamment Giec, 2006 ; Citepa 2017a et 2017b.
3. Il s'agit notamment de la valeur tutélaire du carbone (Quinet et coll., 2009 et Quinet et coll., 2013) et des méthodes de prise en compte du risque et des incertitudes dans l'évaluation socio-économique (Gollier, 2011).
4. Ces unités constituent l'unité de base proposée pour les systèmes de comptabilité des écosystèmes (*Land-cover/ecosystem units (LCEU)* ; United Nations Statistical Division, 2013).
5. Cela rejoint la proposition de la Commission Chevassus-au-Louis de constituer une typologie des « socio-écosystèmes » et d'élaborer des valeurs de référence propres à chacun (Chevassus-au-Louis et coll., p. 345).
6. C'est-à-dire de métropole et d'outre-mer, marins et terrestres, naturels et anthropisés.
7. Par exemple, la typologie retenue pour la comptabilité carbone du secteur UTCATF au niveau national.
8. Cela rejoint la proposition de la Commission Chevassus-au-Louis de constituer une typologie des « socio-écosystèmes » et d'élaborer des valeurs de références propres à chacun (Chevassus-au-Louis et coll., p. 345).
9. Cela permet d'être en cohérence avec les classifications du programme européen MAES. Informations supplémentaires sur Corine Land Cover : <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/donnees-ligne/li/1825.html>
10. les incendies répétés en forêt méditerranéenne par exemple.
11. Informations complémentaires sur la BD Forêt v2 : <http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/spip.php?rubrique53>
12. La distinction entre les types de peuplements est pertinente à la fois du point de vue de la séquestration de carbone dans la biomasse aérienne (Dhôte et coll., 2016) et dans les sols (Jonard et coll., 2017).
13. Pellerin et coll, 2013 ; Power, 2010.
14. Initiative 4/1000 (<http://agriculture.gouv.fr/rejoignez-linitiative-4-pour-1000>),
Projet agroécologique (<http://agriculture.gouv.fr/agriculture-et-foret/projet-agro-ecologique>)
15. On pourrait considérer les types théoriques renseignées dans les enquêtes « pratiques culturales » du ministère chargé de l'agriculture (qui permet de renseigner les surfaces concernées) : les prairies pâturées, les prairies fauchées et les prairies mixtes (c'est-à-dire à la fois pâturées et fauchées). Ces types théoriques ne correspondent pas complètement à la réalité des usages de prairies en France, mais permettent de mettre en évidence des différences du point de vue de la séquestration du carbone (Soussana et coll., 2010, Dolle et coll., 2015).
16. Voir par exemple la preuve indirecte apportée par Jantke et coll., 2016.
17. La cartographie des vocations des différents espaces maritimes fait néanmoins l'objet d'une orientation de la Stratégie Nationale pour la Mer et le Littoral (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2017, Action 6, page 10) en cours de mise en oeuvre.
18. Voir par exemple Roberts et coll, 2017.
19. Ce choix est conforme à la convention retenue dans les inventaires d'émissions du secteur UTCATF (Citepa, 2017a, p. 392).
20. Fontaine et coll., 2007.
21. Le calcul de variation pourra néanmoins considérer la variation du stock total afin de pouvoir rendre compte des variations liées à la formation de sol.
22. Passow et Carlson, 2012.
23. voir par exemple, Smith (2014) pour les prairies.
24. voir par exemple. Pan et coll., 2011.
25. Voir par exemple House et coll., 2006.

3 – Troisième partie : Ordres de grandeur à l'échelle nationale

Cette partie est consacrée à l'évaluation du service écosystémique de séquestration *in situ* du carbone à l'échelle de la France. Tout d'abord, la typologie des écosystèmes est présentée. Ensuite, les principaux éléments de l'évaluation biophysique sont exposés.

Cette partie présente les résultats de l'évaluation à l'échelle nationale. Elle présente les stocks de carbone au sein des écosystèmes et leurs évolutions actuelles (les flux). Elle s'intéresse aussi aux perspectives d'évolution de ces stocks à long terme et aux incertitudes associées. En effet, alors que de nombreuses études et les rapportages existants se concentrent sur les flux actuels de carbone, la valeur de la séquestration du carbone dépend aussi, dans une grande mesure, des perspectives futures d'évolution des stocks de carbone des écosystèmes.

Tableau I :

Principaux ordres de grandeur obtenus à l'échelle nationale

Type	Surfaces (en milliers d'hectares)	Stock actuel (en MtCO _{2eq})	Puits actuel (en MtCO _{2eq} /an)	Puits espéré à long terme (en MtCO _{2eq})	Sensibilité au changement climatique (en MtCO _{2eq})	Puits perpétuel espéré (en MtCO _{2eq} /an)	Niveau du stock actuel (en tCO _{2eq} /ha)	Intensité du puits actuel (en tCO _{2eq} /an/ha)
Terres cultivées	24 004	5 408	- 1,4	- 772	848	0	225	- 0,06
Prairies	8 565	2 738	3	- 284	314	0	320	0,37
Forêt métropolitaine	17 158	10 263	87	3 343	1 314	0	598	5,06
Forêt guyanaise	8 130	9 026	0	0	0	0	1 110	0
Autres écosystèmes naturels	2 724	1 207	1,1	109	63	28	443	0,42
Urbains	2 328	366	0	- 21	23	0	157	0
Marin métropolitain	3 3609	31	0,5	32	24	3	1	0,01
Marin OM	1 169 236	22	0,3	23	17	3	0	0
Total terrestre métropole	54 779	19 982	90	2 375	2 561	28	-	-
Total marin métropole	33 609	31	0,5	32	24	3	-	-
Total terrestre	62 909	29 008	90	2 375	2 561	28	-	-
Total marin	1 202 845	53	1	54	41	5	-	-
Total	1 265 754	29 061	91	2 430	2 602	33	-	-

Clé de lecture : Les chiffres présentés sont obtenus en multipliant les valeurs moyennes collectées au niveau national par les surfaces actuelles de chaque type au niveau national (voir annexes 3 et 4). En ce qui concerne les projections, ces valeurs sont donc à interpréter comme des valeurs soumises à l'hypothèse d'un maintien des usages des sols et des pratiques. La variation de stock espérée à long terme correspond à l'espérance des variations de stocks à long terme estimée en accordant une probabilité égale aux trois scénarii de changement climatique RSP 2.6, 4.5 et 6. La sensibilité au changement climatique reflète les différences de séquestration à long terme entre les scénarios RCP 8.5 et RCP 4.5 sous les hypothèses retenues pour cette étude.

Illustration I : Paysage forestier.



En France métropolitaine, les forêts s'étendent et constituent actuellement le principal stock et puits de gaz à effet de serre.

Copyright : Guillem Battistella

3.1 – Volet observation : les stocks et les flux actuels

3.1.1 – Vue d'ensemble

Les écosystèmes terrestres français représentent actuellement un puits de carbone majoritairement déterminé par les forêts métropolitaines et que l'on peut estimer à près de 90 millions de tonnes de CO₂ équivalent par an ce qui représente 20 % des émissions françaises en 2015¹. En plus des flux actuels, les écosystèmes français abritent déjà une grande quantité de carbone dans des compartiments dont la stabilité reste soumise au bon fonctionnement des écosystèmes associés (biomasse et couche peu profonde des sols et sédiments). Ainsi, ce ne sont pas seulement les flux actuels qui pourraient s'atténuer, mais des quantités massives de carbone qui pourraient être relâchées dans l'atmosphère si ces compartiments venaient à être destabilisés. Au niveau mondial, on estime en effet que le carbone contenu dans les sols représenterait au moins 3 fois la quantité totale de carbone contenu dans l'atmosphère². Au sein des écosystèmes français, on estime la quantité de carbone contenue dans ces compartiments à près de 7,5 milliards de tonnes d'équivalent CO₂, soit près de 15 années des émissions françaises inventoriées en 2015. Dans le contexte actuel de changement climatique et étant donnés les nombreux facteurs de changements à l'oeuvre dans l'évolution des écosystèmes, le devenir du carbone contenu dans les compartiments étudiés pose ainsi question.

3.1.2 – Les écosystèmes forestiers

Les milieux forestiers représentent une surface conséquente à l'échelle de la France métropolitaine avec environ 16,5 millions d'hectares soit près de 30 % de la surface du territoire métropolitain ainsi que près de 8 millions d'hectares de forêt tropicale ultramarine.

Actuellement, les forêts métropolitaines représentent un puits de carbone considérable estimé à environ 87 millions de tonnes de CO_{2eq} par an en métropole associé à l'accroissement de la biomasse aérienne mais aussi à l'augmentation du carbone des sols, pour près du quart du puits annuel. Le puits de carbone constitué par la forêt guyanaise, estimé à près d'une dizaine de millions de tonnes de CO_{2eq} par an sur la période récente, semble s'être interrompu³.

Actuellement, les stocks de carbone contenus dans les milieux forestiers en France sont significatifs mais très hétérogènes du fait des différences de conditions environnementales et notamment pédoclimatiques. Ainsi, dans la région biogéographique continentale, les stocks de carbone en forêt fermée feuillues sont parmi les plus élevés, de l'ordre de 730 tCO_{2eq}/ha alors que celles de la région biogéographique méditerranéenne, notamment constituées de taillis de chêne vert peu productifs⁴, présentent des stocks de carbone bien plus faibles, de l'ordre de 500 tCO_{2eq}/ha.

Pour ces écosystèmes, les valeurs concernant le puits sont issues des estimations de l'IGN des flux de séquestration dans la biomasse à partir de l'inventaire forestier national. Cette estimation est complétée par la prise en compte la séquestration de carbone dans les sols et le bois mort présent en forêt. Les valeurs utilisées pour le flux de séquestration dans les sols proviennent d'études s'appuyant sur les données du réseau Renecofor⁵ dont les résultats sont ajustés à la baisse. En effet, les placettes d'échantillonnage du réseau Renecofor sont situées dans des forêts communales qui ne sont pas représentatives de l'ensemble de la forêt française et sont notamment, en moyenne, plus vieilles que la moyenne des forêts françaises et les valeurs des flux sont potentiellement un peu surestimées. Un coefficient d'ajustement est donc appliqué à partir des discussions en la matière⁶.

Encadré 3

Mise en perspective du puits forestier avec les inventaires nationaux des émissions

Dans le cadre de ses engagements internationaux, la France réalise tous les ans un inventaire national de ses émissions qui comprend une comptabilité des émissions associées à l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie (UTCATF). Ces inventaires sont réalisés par le Citepa⁷ pour le gouvernement français.

En 2015, l'inventaire du secteur UTCATF comptabilisait à hauteur de 39 millions de tonnes de CO₂ équivalent les quantités nettes de carbone séquestrées⁸, principalement du fait des forêts (54 MtCO_{2eq}). Ces évaluations peuvent nous renseigner sur le niveau d'ambition d'un horizon de neutralité carbone qui incluerait ce puits à l'horizon 2050 : si les écosystèmes français considérés comme des puits de carbone anthropiques se maintenaient à l'horizon 2050, et en l'absence de changement d'usages des terres et des pratiques, un objectif de neutralité carbone qui intégrerait la part comptabilisée de ces puits supposerait une réduction des émissions de gaz à effet de serre (hors UTCATF) de 90 % en 2050 par rapport aux émissions de 1990, ce qui est plus ambitieux que le facteur 4 à cet horizon.

Cependant, le puits forestier estimé dans le cadre des inventaires est sensiblement inférieur à celui de cette évaluation qui se rapproche des résultats d'une autre étude récente (voir tableau 2). Cette différence est d'autant plus marquée que la comptabilité du secteur UTCATF prend en compte les effets liés aux changements d'usage des terres, qui ne sont pas intégrés dans le cadre de cette évaluation du puits forestier.

Cette différence de l'ordre de 30 MtCO_{2eq}/an du puits forestier hors évolution des surfaces s'explique en grande partie par les flux de carbone des sols qui constituent un puits net très significatif, estimé à près de 20 MtCO_{2eq}/an dans ce cadre de cette étude. En effet, pour les « forêts restant forêts », le Citepa s'appuie sur les données de l'inventaire forestier national qui ne couvre pas le carbone des sols et suppose, en l'absence de donnée nationale, un puits des sols forestiers nul. Une partie de cette différence s'explique par les hypothèses conservatrices retenues dans le cadre des inventaires d'émission qui conduisent à se concentrer sur les flux de séquestration établis et à négliger les flux plus incertains. En ce sens, on peut aussi remarquer que certains écosystèmes considérés dans le cadre de cette étude sont hors du champ des inventaires nationaux des émissions. C'est notamment le cas de certains écosystèmes du carbone bleu tels que les herbiers de posidonies. La différence restante s'expliquerait par les incertitudes associées aux deux évaluations⁹ et notamment par des différences de surfaces forestières considérées ou de facteurs de conversion liant les données d'inventaire forestier à l'évaluation du carbone stocké dans la biomasse.

Tableau 2 :

Comparaison du puits de carbone forestier actuel en métropole d'après différentes sources

en MtCO _{2eq} /an	Puits forestier total	Puits attribué au flux de séquestration dans les sols et le bois mort	Puits attribué au flux de séquestration dans la biomasse	Puits attribué aux changements d'usage des terres
Cette évaluation	86,8	21,8	65	0
Inra (2017) pour 2013	88	17,6 (bois mort 10,3 ; sols 7,3)	70,4 (feuillus 56 ; résineux 14,4)	
Inventaire du secteur UTCATF pour 2013 ^a	62	0	55	7

a. Citepa, 2015 et 2017.

Encadré 4

La production de bois, un levier d'atténuation du changement climatique¹⁰

Cette évaluation du service de séquestration *in situ* du carbone a été réalisée hors de toute considération d'évolution des usages des sols et des pratiques forestières. Il convient de la remettre en perspective dans le contexte des politiques publiques. Les milieux forestiers et agricoles sont en effet aussi le lieu d'une production de bois dont la mobilisation accrue constitue un enjeu central des politiques publiques actuelles¹¹. Le prélèvement de bois s'accompagne d'une baisse de la séquestration de carbone *in situ* à court terme, mais son utilisation peut contribuer à l'atténuation du changement climatique à plus long terme. Pour le bois d'oeuvre, les usages en cascade permettent de prolonger la séquestration de carbone *ex situ*, et certaines utilisations peuvent se substituer à des matériaux dont l'utilisation s'accompagne de fortes émissions de gaz à effet de serre (substitution matériau). L'utilisation de bois énergie peut permettre d'éviter l'utilisation de combustibles fossiles (substitution énergie).

Il est donc particulièrement important de prendre en compte conjointement le service de séquestration du carbone *in situ*, les effets de substitution et la séquestration *ex situ*, en considérant ces services et la production de bois dans un même bouquet. L'évaluation de la situation de compromis ou de synergie au sein de ce bouquet est très sensible aux caractéristiques de la situation considérée mais aussi à l'attitude de l'évaluateur face à l'incertitude, au risque et à l'escompte des impacts distants dans le temps. Des auteurs insistent ainsi sur le besoin de prendre en compte l'incertitude associée au stockage *in situ*¹², aux conditions d'exploitation et de transformation de la ressource¹³ ou la temporalité de reconstitution du peuplement¹⁴. Cette évaluation dépend aussi des usages alternatifs au bois utilisé dans la situation de référence : si ce bois constitue une consommation additionnelle, son utilisation est source d'une émission à court terme qui pourra n'être que partiellement compensée à plus long terme par la reconstitution du peuplement, alors que s'il vient se substituer à des matériaux fortement émetteurs ou à des combustibles fossiles, les effets de substitution peuvent progressivement plus que compenser ce bilan. À partir d'une revue de la littérature internationale, Sarthre et O'Connor (2010) observent ainsi qu'en moyenne l'utilisation comme matériau d'une tonne de bois sec¹⁵ se traduirait par un évitement d'émissions significatif¹⁶, mais que cette valeur est très variable d'une étude à l'autre. Ces valeurs restent par ailleurs incertaines et sujettes à controverse.

Au niveau français, certaines études font état de l'intérêt d'une mobilisation accrue de biomasse. Elles estiment que l'utilisation d'une tonne de bois comme matériau ou comme source d'énergie source permet d'éviter en moyenne une émission de l'ordre de 1,6 ou 0,5 tCO_{2eq} respectivement (Roux, 2015). Elles évaluent sur cette base que si tous les produits bois étaient remplacés par leurs équivalents les plus courants, alors les émissions de gaz à effet de serre s'accroîtraient de près de 30 millions de tonnes de CO_{2eq} par an (Roux et coll, 2017 ; Gip Ecofor, 2018). Ces études insistent en outre sur le fait qu'une mobilisation de biomasse accrue

permet à moyen terme de stimuler la croissance, de limiter la mortalité naturelle et de réduire les risques et que ses effets à court terme dépendent des techniques sylvicoles mises en œuvre.

Ainsi, bien que l'intensification des prélèvements de bois ait un impact négatif potentiellement fort sur le service de séquestration *in situ* du carbone à court terme, celle-ci peut être souhaitable à plus long terme au regard des enjeux d'atténuation du changement climatique et d'adaptation des forêts à ses effets¹⁷ (CGEDD, 2017 ; Roux et coll, 2017, GIP Ecofor, 2018). Du fait de la spécification de plus en plus précise des conditions de mobilisation et des utilisations attendues du bois mobilisé dans le cadre des différents cadres stratégiques¹⁸, l'évaluation des effets de substitution pourrait être précisée à l'échelle nationale. Enfin, les forêts sont à l'origine de multiples services qui vont bien au-delà de la régulation du climat et de la fourniture de bois. Elles méritent ainsi une analyse élargie et systémique en bouquets de services (voir section 3.3.3).

3.1.3 – Les écosystèmes agricoles

Les milieux agricoles représentent une surface conséquente à l'échelle de la France métropolitaine avec environ 33 millions d'hectares soit près de 60 % du territoire de métropole répartie entre terres cultivées et prairies.

Illustration 2 : Paysage de bocage (Chinon, Indre-et-Loire).



Les éléments boisés des paysages agricoles (haies, bosquets, etc.) peuvent constituer des stocks et des puits de carbone significatifs¹⁹, alors que leur surface continuait à se réduire sur la période récente²⁰.

Les terres cultivées

Actuellement, en France, les terres cultivées apparaissent comme une source d'émission estimée à environ 1 million de tonnes de CO_{2eq} par an.

Ce résultat moyen reste incertain et couvre des réalités très hétérogènes sur le territoire. L'histoire des sols constitue une des premières causes de variabilité. Par exemple, les régions avec des stocks de carbone *in situ* élevés (la Bretagne par exemple) s'orientent de plus en plus vers des grandes cultures et sont actuellement des sources de carbone. Cela est dû au fait qu'historiquement et encore aujourd'hui des prairies ont été converties en grandes cultures entraînant dès lors un destockage de carbone du sol qui se poursuit encore aujourd'hui²¹. Des simulations menées dans le cadre de la contribution de l'Inra à l'EFESE suggèrent, elles, une tendance moyenne nulle à l'échelle nationale. Les auteurs soulignent par ailleurs que le rapport entre le flux annuel de séquestration dans les sols agricoles et les stocks de carbone *in situ* reste éloigné du taux cible de l'initiative « 4 pour mille »²².

Ce résultat à l'échelle nationale peut être mis en perspective avec des résultats d'études similaires réalisées dans des pays frontaliers. Ainsi, en Belgique, Lettens et coll. (2005) montrent, par rapport à 1960, que les sols agricoles ont tendance à émettre du carbone de manière modeste pour les sols de grandes cultures (environ -3,7 tonnes de CO_{2eq} par hectare en 40 ans soit environ -0,1 tonne de CO_{2eq} par hectare et par an) et à stocker du carbone de manière un peu plus élevée (+33 tonnes de CO_{2eq} par hectare en 40 ans soit environ +0,8 tonne de CO_{2eq} par hectare et par an) pour les prairies. À l'échelle du Royaume-Uni, Reynolds et coll. (2013), montrent des changements non significatifs des quantités de carbone contenues dans les sols agricoles (grandes cultures et prairies) sur la période 1978-2007. Les données utilisées dans cette étude semblent donc cohérentes avec celles de ces deux pays voisins, aux conditions pédoclimatiques relativement comparables (appartenance à la zone biogéographique Océanique). Cependant, les incertitudes sur les chiffres utilisés sont grandes et il convient donc de rester prudent sur le caractère actuel des écosystèmes agricoles en tant que puits de carbone.

Les prairies

Actuellement, en France, les prairies apparaissent comme un puits de carbone estimé à environ 3 millions de tonnes de CO_{2eq} par an.

L'estimation de la séquestration de carbone dans les sols des prairies repose sur deux grandes familles de méthodes de mesures : l'approche physique via l'utilisation des « tours à flux » du réseau ICOS²³, et l'approche des inventaires de sols, via le réseau GISSol²⁴ par exemple. Ces deux méthodes donnent des résultats relativement éloignés en termes de flux de séquestration de carbone *in situ*. En effet, les tours à flux intègrent les flux sur l'ensemble du profil du sol à l'échelle de l'hectare ainsi que les flux liés à la biomasse aérienne. Elles donnent des estimations de flux supérieures à celles des méthodes reposant sur les inventaires de sols,

qui sont limitées au compartiment du sol : Sousanna et coll. (2010) rapportent ainsi une estimation pour les prairies issue des tours à flux de l'ordre de 2 tonnes de CO_{2eq} par hectare et par an²⁵, contre une moyenne de 0,18 tonne de CO_{2eq} par hectare et par an pour les études provenant des inventaires de sols²⁶. Cependant, les méthodes d'inventaire des sols reposent sur un plus grand nombre d'échantillon que celles des tours à flux (moins de 10 tours à flux implantées sur des prairies à l'échelle européenne). Dans le cadre de cette étude, les valeurs provenant d'études liées aux inventaires des sols sont privilégiées, car elles permettent de réaliser la distinction voulue entre les compartiments des sols et celui de la biomasse et qu'elles reposent sur un plus grand nombre d'échantillon ce qui réduit l'incertitude associée, notamment lors de l'extrapolation à l'échelle nationale.

3.1.4 – Les écosystèmes artificialisés et les terres dégradées

En ce qui concerne les flux de séquestration, nous supposons des dynamiques de séquestration négligeables. Un calcul mené à partir des données collectées consistant à attribuer un puits équivalent au tiers des valeurs de prairies pour les surfaces artificialisées et à la moyenne des valeurs des prairies et des forêts fermées mixtes de chaque région pour les espaces verts conduit à estimer un puits réduit, de l'ordre de 0,55 million de tonnes de CO_{2eq} par an. Une telle estimation demeure néanmoins fragile du fait des imprécisions de mesure des surfaces artificialisées via CLC et des hypothèses *ad hoc* concernant les flux de carbone au sein des différents compartiments. Ces hypothèses pourraient être levées par des études spécifiques ou *via* l'attribution des données relatives à des prairies fauchées ou des forêts fortement exploitées si de tels types étaient renseignés à terme.

Les zones artificialisées bâties couvrent des espaces imperméabilisés mais aussi, dans une moindre mesure, des espaces, non-imperméabilisés. Bien qu'elle s'appuie sur une caractérisation différente des terres artificialisées que Corine Land Cover, l'enquête Teruti-Lucas permet d'estimer qu'en moyenne à l'échelle de la France métropolitaine, les deux tiers des surfaces artificialisées sont imperméabilisées et que le reste correspond principalement à des surfaces enherbées²⁷. Au niveau national, nous retenons un taux d'imperméabilisation de 67 % pour les surfaces artificialisées, tout en préconisant d'ajuster ce taux à l'échelle locale. Par ailleurs, les observations existantes suggèrent des stocks équivalents entre ces espaces non artificialisés et les espaces naturels similaires²⁸. Mis à part des cas emblématiques²⁹, il n'existe pas d'inventaire unifié des terres dégradées à l'échelle nationale. Cependant, les dynamiques de séquestration de carbone associées sont très certainement négligeables à l'échelle nationale du fait des faibles surfaces couvertes.

3.1.5 – Les autres écosystèmes naturels terrestres

Les autres écosystèmes naturels terrestres (prairies naturelles, zones humides, tourbières, milieux aquatiques terrestres, milieux rocheux) couvrent une surface de 2,6 millions d'hectares en France métropolitaine, ce qui représente 5 % du territoire. Actuellement, en France, ces écosystèmes apparaissent comme un puits de carbone estimé à environ 1 million de tonnes de CO_{2eq} par an, ce qui est modeste au regard des émissions nationales annuelles³⁰. Certains de ces écosystèmes, tels que les tourbières, représentent néanmoins des stocks élevés par unité de surface³¹.

Ce flux est principalement attribuable aux mangroves, pour près de 0,5 million de tonnes de CO_{2eq} par an, aux prairies naturelles, pour près de 0,5 million de tonnes de CO_{2eq} par an, et aux zones humides métropolitaines (tourbières comprises), pour près de 0,2 million de tonnes de CO_{2eq} par an. Faute de données et d'enjeu fort identifié, on considère que la séquestration nette du carbone au sein des milieux aquatiques terrestres (voies d'eau, fleuves, rivières, lacs par exemple) et des milieux montagneux rocheux (roches nues, glaciers, neiges éternelles) est négligeable.

3.1.6 – Les écosystèmes marins – le « carbone bleu »

Les écosystèmes marins, dits du *carbone bleu*, désignent à la fois des écosystèmes marins côtiers particuliers (mangroves, herbiers, marais côtiers, etc.) et les écosystèmes marins du large (pompe biologique)³².

Les écosystèmes côtiers du carbone bleu sont capables de séquestrer du carbone via les phénomènes d'accrétion et de stabilisation des sédiments. Actuellement, les écosystèmes côtiers français relevant du carbone bleu, principalement localisés en Outre-Mer, séquestrent moins de 1 million de tonnes de CO₂ équivalent par an. Au niveau local cependant, ce flux de séquestration peut être élevé et atteindre 7 tonnes de CO_{2eq} par hectare et par an. Ces estimations doivent être interprétées avec prudence. En effet, il existe une forte hétérogénéité géographique du fonctionnement de ces écosystèmes³³ et les estimations à l'échelle nationale se fondent sur l'extrapolation d'un nombre limité de mesures effectuées à l'échelle locale³⁴. De plus, les surfaces des écosystèmes relevant du « carbone bleu » sont très mal connues à l'heure actuelle et de fortes incertitudes demeurent quant à leur exactitude³⁵. Concernant le reste des eaux côtières, les observations existantes³⁶ témoignent d'une grande variabilité spatiale et temporelle des phénomènes sans que des enjeux forts ne soient soulignés. Par ailleurs, du fait aussi de l'absence d'enjeux forts, identifiés et documentés, en matière de séquestration du carbone sur certains autres écosystèmes côtiers (écosystèmes sableux), on considère que la séquestration du carbone *in situ* y est nulle.

Encadré 5

Quid des récifs coralliens ?

Dans cette évaluation, les massifs coralliens ne sont pas pris en compte car leur comportement vis-à-vis de la séquestration du carbone n'est pas comparable à celui des autres écosystèmes. En effet, la formation des récifs mobilise des réactions qui déplacent les équilibres chimiques et réduisent la solubilité du dioxyde de carbone dans l'eau de mer. Une représentation simplifiée de la réaction impliquée est la suivante³⁷ :



Cette équation montre que la formation de calcaire mobilise deux molécules d'ions bicarbonate dissout et s'accompagne de la fixation de l'une de ces molécules et de la ré-émission d'une molécule de CO_2 dans l'atmosphère. Cette équation simplifiée ne reflète pas l'ensemble des phénomènes chimiques à l'oeuvre : il est généralement admis que 60 % du CO_2 ainsi généré est effectivement relargué dans l'atmosphère, avec une grande variabilité selon les lieux³⁸.

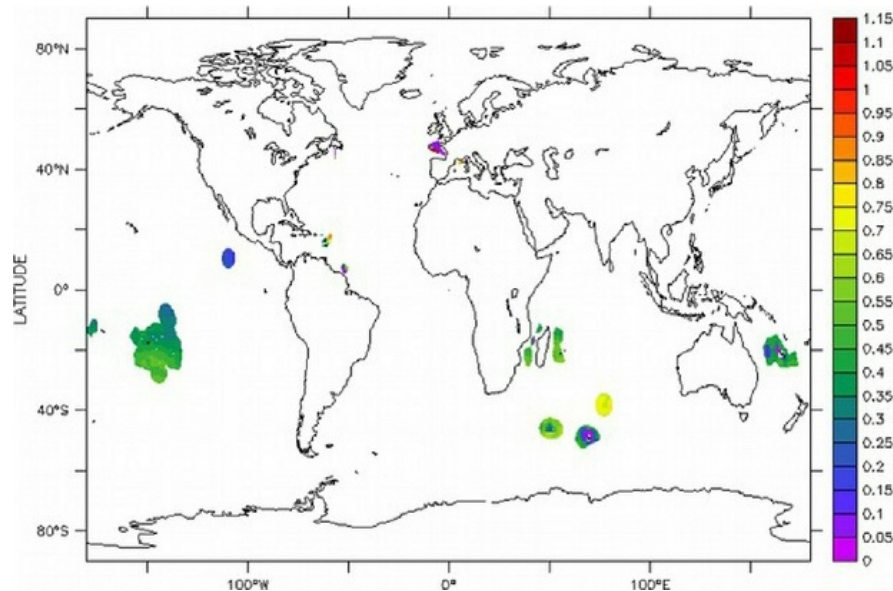
Ainsi, et contrairement à une croyance répandue, la formation des massifs coralliens constitue une source de dioxyde de carbone pour l'atmosphère³⁹. Les évaluations disponibles suggèrent qu'elle pourrait représenter de l'ordre de 200 millions de tonnes de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ par an⁴⁰ au niveau mondial, faisant des récifs coralliens une source modérée (moins de la moitié des émissions françaises actuelles pour l'ensemble des récifs au niveau mondial).

À l'avenir, l'acidification des océans résultant de la hausse du CO_2 atmosphérique pourrait modifier l'équilibre entre bioconstruction et dissolution et, associé aux impacts du changement climatique, menacer dès la seconde moitié du siècle des espèces dépendantes de la calcification telles que des coraux, en zone tropicale, ou des coquillages, dans les hautes latitudes⁴¹.

Les écosystèmes marins du large constituent un puits de carbone : on estime qu'environ 30 % des émissions de gaz à effet de serre ont été séquestrées dans les océans depuis la révolution industrielle dans le monde⁴², chiffre qui se réduit à 25 % si on se limite à la période plus récente⁴³.

Dans ces écosystèmes, le carbone est présent sous diverses formes : le carbone inorganique dissout, qui représente un stock très élevé d'environ 150 000 milliards de tonnes de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ au niveau mondial. Le carbone organique, présent sous forme de biomasse vivante, de particules ou de composés dissouts, et qui représente un stock bien plus modeste estimé à une dizaine de milliards de tonnes de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ⁴⁴. Au sein de la vaste Zone Économique Exclusive (ZEE) française, qui comprend 11 691 000 km^2 , dont seulement 334 604 km^2 liés à la France métropolitaine, le stock de carbone sous forme inorganique dissout est d'environ 3000 milliards de tonnes de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ⁴⁵ ce qui représente environ 2 % du stock global⁴⁶.

Figure 10 : Le carbone d'origine anthropique séquestré dans les eaux territoriales françaises depuis le début de la révolution industrielle.



Source : L. Bopp, communication personnelle (2017).

Le puits de carbone des écosystèmes marins du large est le résultat conjoint d'une pompe physique dite « de solubilité » et d'une pompe biologique. La première découle de processus physico-chimiques de dissolution du carbone dans les eaux de surface et de son enfouissement en profondeur via plusieurs phénomènes. Cet enfouissement est primordial. En effet, l'océan échange en permanence du carbone avec l'atmosphère et c'est la concentration en carbone inorganique des eaux de surface par rapport à celle de l'atmosphère qui détermine l'intensité de ces échanges.

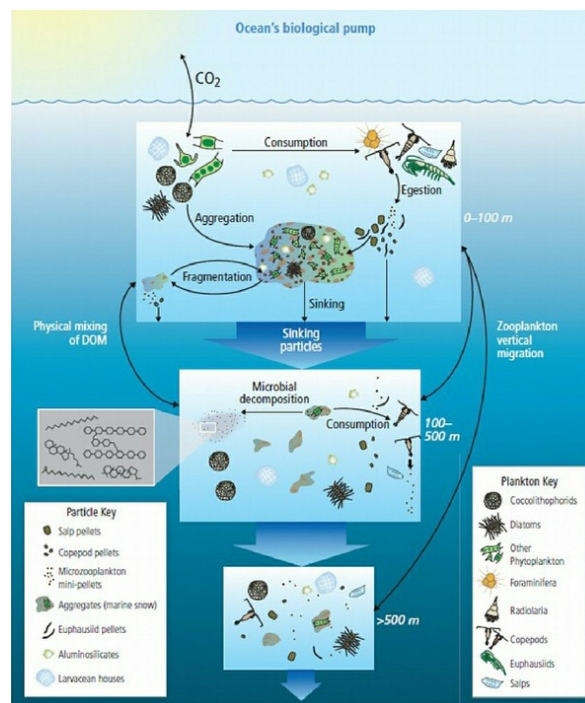
La pompe dite biologique, c'est-à-dire la contribution de la biodiversité à ce puits de carbone océanique, repose sur la photosynthèse, notamment réalisée par le phytoplancton, qui permet la captation de carbone inorganique dissout et son transfert vers les profondeurs par sédimentation sous forme particulaire. Dans l'ensemble, la contribution actuelle des processus biologiques

au puits de carbone océanique actuel est vraisemblablement très faible. En effet, on estime que le carbone organique formé dans la colonne d'eau y est reminéralisé dans sa quasi-intégralité. Seule une petite partie de ce carbone organique est exportée dans les compartiments profonds des écosystèmes marins et isolée de l'atmosphère pour de longues échelles de temps. A titre d'illustration, au niveau mondial, on estime qu'environ 20 % de la production primaire est exportée au-delà de 200 m⁴⁷ et, au sein des écosystèmes marins français, les quantités exportées au-delà de 1000 m représenteraient un flux de près de 30,6 millions de tonnes de CO_{2eq} par an⁴⁸, compensé dans son ensemble par des flux ascendants ailleurs dans le monde. Au final, seule une très faible fraction de ce carbone est stockée au sein des sédiments marins. En plus de constituer des quantités faibles, ce carbone est notamment constitué de calcite dont la contribution à la pompe de carbone est jugée négative (voir encadré 5).

En dépit d'une contribution négligeable au puits de carbone océanique actuel, il convient de noter que le phytoplancton et la biodiversité marine dans son ensemble jouent actuellement un rôle primordial dans le maintien du stock actuel de carbone océanique. On estime en effet que les processus biologiques contribuent de façon majoritaire au transfert de carbone de la surface vers le fond. On estime ainsi que sans cette pompe, dite « biologique », l'accroissement des concentrations de CO₂ dans les eaux de surface se traduiraient par une augmentation du CO₂ atmosphérique massive de l'ordre de 100 à 200ppm⁴⁹, soit 700 à 1500 GtCO_{2eq}⁵⁰.

Bien qu'actuellement négligeable, la contribution de la biodiversité marine à la séquestration additionnelle de carbone atmosphérique est susceptible d'être importante et certains paramètres biophysiques, tels que la profondeur moyenne de sédimentation, pourraient jouer un rôle très significatif dans le comportement des océans vis-à-vis de l'atmosphère (Kwon et coll., 2009).

Figure 11 : Processus déterminant le phénomène de la « pompe biologique »



Cette figure ne montre qu'une partie des phénomènes impliqués.

Source : Pörtner et coll., 2014.

3.2 – Volet projection : perspectives à long terme

3.2.1 – Vue d'ensemble

Les dynamiques à long terme du carbone au sein des écosystèmes français sont très incertaines. Ceci est en partie lié au manque de connaissances et de capacité à modéliser l'ensemble des fonctions écologiques sous-jacentes (pédogénèse, mortalité, etc.). Ces incertitudes sont par ailleurs considérablement amplifiées par le contexte de changement climatique qui conduira de nombreux écosystèmes à faire face à moyen terme à des conditions environnementales inédites (voir encadré 6). Malgré ces incertitudes, plusieurs consensus méritent d'être soulignés.

Tout d'abord, la plupart des écosystèmes français ne sont que des puits de carbone transitoires qui seront amenés à se réduire et s'interrompre à un horizon qui reste incertain. L'horizon de saturation du puits forestier fait en effet l'objet de débats au sein de la communauté scientifique⁵¹, notamment dans le contexte actuel, fortement perturbé par l'accroissement de la concentration de CO₂ de l'atmosphère, l'évolution des apports azotés dans les écosystèmes, et les perspectives de changement climatique. En ordre de grandeur, les chiffres recueillis et les hypothèses réalisées suggèrent que le puits de carbone des écosystèmes français pourrait représenter, sous l'hypothèse d'un maintien des usages des sols actuels et d'un changement climatique maîtrisé⁵², un potentiel

de séquestration additionnelle espéré à long terme de l'ordre de 2,4 milliards de tonnes de CO_{2eq} pour les écosystèmes terrestres soit le niveau de 5 années environ des émissions françaises de 2015⁵³. Ce potentiel, principalement le fait des forêts françaises, reste très incertain et ne tient pas compte des possibilités d'actions favorables à l'accroissement de la séquestration de carbone dans ces espaces. Seuls quelques puits font par ailleurs exception et pourraient se maintenir perpétuellement. Il s'agit des écosystèmes du « carbone bleu », hors du champ des puits de carbone anthropiques, encore très mal connus et qui ne représenteraient actuellement que des flux de séquestration modestes.

Enfin, la plupart des puits de carbone étudiés apparaissent sensibles au changement climatique. Malgré l'effet stimulant de l'augmentation du carbone atmosphérique sur les puits de carbone terrestres, le réchauffement climatique et ses effets peuvent à l'inverse accroître les processus de minéralisation dans les sols et les risques (sécheresses, incendies, etc.). Malgré de fortes incertitudes⁵⁴, des études récentes suggèrent que ces effets négatifs domineraient dans le cas des écosystèmes forestiers⁵⁵ et plus généralement pour l'ensemble des écosystèmes⁵⁶. À partir des données collectées et des hypothèses réalisées, on estime par exemple que la réalisation du scénario climatique RCP 4.5 par rapport au scénario RCP 8.5⁵⁷, permettrait de renforcer d'environ 2,5 milliards de tonnes de CO₂ équivalent la séquestration de carbone à long terme dans les écosystèmes français, ce qui reviendrait à doubler la taille du puits espéré à long terme pour ces mêmes écosystèmes. Par ailleurs, les écosystèmes marins et côtiers sont eux aussi susceptibles d'être très significativement affectés par le changement climatique, avec des risques d'émissions de carbone élevées à l'échelle du siècle⁵⁸. L'atténuation du changement climatique par les écosystèmes constitue ainsi une boucle de rétroaction : plus les efforts internationaux d'atténuation seront ambitieux, plus la contribution des écosystèmes à la séquestration de carbone sera elle aussi élevée, ou inversement.

3.2.2 – Les écosystèmes forestiers

Les écosystèmes forestiers constituent aussi à long terme le plus grand puits de carbone en métropole, estimé à près de 3,3 milliards de tonnes de CO_{2eq}. Il s'agit cependant d'un puits conjoncturel notamment lié à la jeunesse relative des forêts françaises. D'après les experts, ce puits pourrait se maintenir à l'horizon 2050. Il devrait ensuite se réduire, voir s'annuler à long terme sous l'effet de divers facteurs tels que la maturation des arbres (c'est-à-dire leur vieillissement) ou l'effet du changement climatique. Le changement climatique devrait significativement affecter la séquestration du carbone dans les sols et dans la biomasse des arbres, à travers la hausse des températures, les changements de régime de précipitations et les modifications de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes (tempêtes, sécheresses, incendies, etc.). Les éléments disponibles au niveau français suggèrent ainsi que la réalisation d'un scénario RCP4.5 plutôt que RCP8.5 permettrait à long terme d'éviter l'émission d'environ 1,3 milliards de tonnes de CO_{2eq}, soit plus du tiers du puits de carbone espéré à long terme pour ces écosystèmes. Beaucoup d'incertitudes demeurent cependant sur une telle évaluation.

La projection du puits de carbone associé à la biomasse aérienne à l'horizon 2050 s'appuie sur les données issues des simulations présentées dans Roux et coll (2017) de croissance de la biomasse forestière sous différents scénarios de changement climatique. Au-delà de cette date, on fait l'hypothèse que les tendances observées sur la fin de période (2045-2050) se poursuivent jusque 2080⁵⁹ puis le puits est supposé nul. Concernant les sols forestiers, cette étude s'appuie sur les résultats de Meersmans et coll (2016) qui projettent une perte de 10 à 20 tonnes de carbone par hectare, associée à une augmentation de la minéralisation du carbone des sols associée au changement climatique. Cette hypothèse néglige les effets possiblement positifs associés à l'effet positif de la concentration de carbone dans l'atmosphère sur la croissance végétale et ses effets sur le carbone des sols. Elle est cependant cohérente avec les observations récentes qui suggèrent que la stimulation de la minéralisation des sols domine ce premier effet, dit de fertilisation, en forêt⁶⁰.

Au final, il existe une incertitude forte sur ces résultats : les hypothèses réalisées pour la projection du puits forestiers et l'impact du changement climatique sur ce dernier nécessitent encore d'être consolidées.

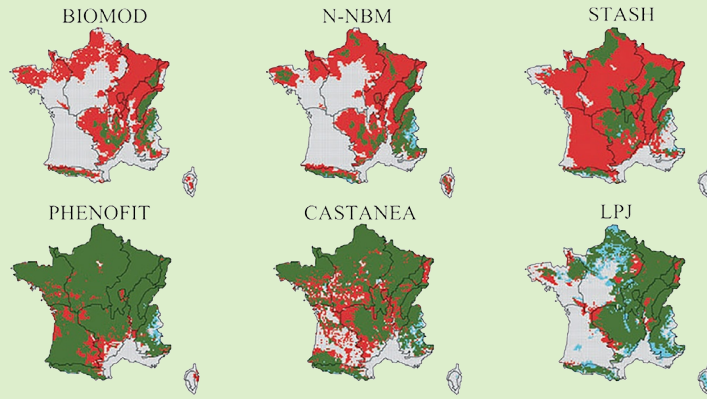
Encadré 6

La projection des aires de répartition des espèces, une illustration des difficultés à évaluer les effets du changement climatique à long terme.

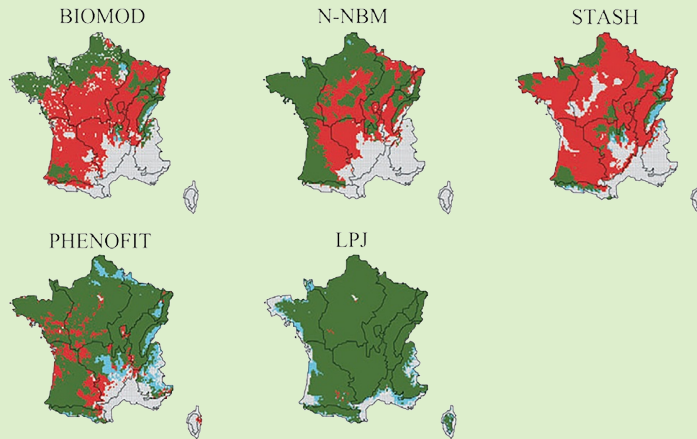
Dans le contexte actuel de changement climatique, on observe déjà des migrations des espèces végétales de l'ordre de 6 km vers le Nord⁶¹ et de 6m en altitude⁶² par décennie et il est reconnu que celui-ci devrait entraîner une modification de l'aire de répartition des espèces d'arbres à long terme⁶³. Cependant, l'anticipation de la forme que prendront ces évolutions reste délicate. La projection des aires de répartition futures des espèces repose par exemple sur deux types de modèles. Les modèles de niches, tout d'abord, supposent que les espèces les plus adaptées aux conditions environnementales futures en un lieu correspondent aux espèces actuellement observées dans des conditions environnementales similaires. Les modèles mécanistes, quant à eux, modélisent l'ensemble des mécanismes permettant à une espèce de s'implanter et d'accomplir son cycle de vie afin de permettre des projections. Ces modèles aboutissent à des projections contrastées, les modèles de niches anticipant des effets du changement climatique plus marqués que les modèles mécanistes. Cependant, l'utilisation combinée des deux types de modèles permet de dégager des conclusions communes.

Figure 12 : Projections à l'horizon 2055 de l'aire de répartition du hêtre et du chêne pédonculé en France métropolitaine selon différents modèles

Hêtre



Chêne pédonculé



Clé de lecture : les noms figurant au-dessus des cartes correspondent aux modèles, de niche ou mécanistes⁶⁴, dont les résultats sont présentés : les zones en vert correspondent aux zones où le modèle prévoit un maintien de l'espèce en 2055 là où il anticipe actuellement sa présence alors que les zones en rouge correspondent aux zones où le modèle anticipe l'absence de l'espèce en 2055 là où le modèle anticipe actuellement sa présence.

Source : Cheaib et coll, 2012.

3.2.3 – Les écosystèmes agricoles

À long terme et d'après les projections, le puits de carbone constitué par les écosystèmes agricoles français apparaît comme très sensible au changement climatique. Les éléments disponibles au niveau français suggèrent que la réalisation du scénario de changement climatique RCP4.5 à la place du RCP8.5 pourrait représenter, à long terme, environ un milliard de tonnes de CO₂ équivalent d'émissions cumulées évitées. Au niveau mondial et européen, les sols agricoles sont mis en évidence comme de potentielles sources d'émissions de carbone dans l'atmosphère à long terme⁶⁵.

En l'absence de changement d'usages des terres et des pratiques, les écosystèmes agricoles apparaissent comme une source de carbone de l'ordre d'un milliard de tonnes de CO₂ équivalent. Cependant, il convient de remarquer que ces résultats supposent un maintien des pratiques à leurs niveaux actuels alors que l'on estime par ailleurs que des changements de pratiques peuvent avoir un effet très significatif sur le flux de séquestration dans les écosystèmes agricoles⁶⁶.

Ces résultats reposent sur l'hypothèse que les flux de séquestration du carbone associés aux écosystèmes agricoles sont constants jusqu'en 2050 puis s'annulent, l'écosystème se trouvant dans un nouvel état d'équilibre à cette date⁶⁷. Par ailleurs, l'impact du changement climatique retenu sur la variation de stock attendue à long terme est issu des projections réalisées par Meersmans et coll. (2016) qui conduisent à anticiper des réductions considérables des stocks de carbone contenus dans les écosystèmes des milieux agricoles, de l'ordre de 40 tonnes de CO_{2eq} par hectare pour les terres cultivées⁶⁸ et de 55 tonnes de CO_{2eq} pour les prairies⁶⁹ à l'horizon 2100 sous le scénario climatique RCP4.5. Sous le scénario RCP8.5, les effets anticipés sont encore plus marqués, avec des émissions de l'ordre de 70 tonnes de CO_{2eq} par hectare pour les terres cultivées⁷⁰ et de 90 tCO_{2eq} pour les prairies⁷¹. Ces estimations négligent les effets possiblement positifs de la concentration de carbone dans l'atmosphère sur la croissance végétale. Elles sont cependant cohérentes avec les observations récentes qui suggèrent que la stimulation de la minéralisation des sols domine, dans l'ensemble, l'effet de fertilisation⁷².

3.2.4 – Les écosystèmes urbains et les autres écosystèmes naturels terrestres

Aucune tendance forte n'est identifiée concernant ces écosystèmes.

3.2.5 – Les écosystèmes marins – le "carbone bleu"

Les écosystèmes côtiers du carbone bleu⁷³ (mangroves, herbiers, marais côtiers, etc.), dont la superficie régresse pour certains⁷⁴, sont très fortement exposés au changement climatique. Les experts soulignent notamment l'incapacité des herbiers à faire face aux conditions de stress associées au changement climatique⁷⁵ et vont jusqu'à avancer une extinction fonctionnelle probable des herbiers de Posidonie de Méditerranée sous les scénarios de changement climatique RCP6 et RCP8.5⁷⁶. Pour les écosystèmes côtiers, la fertilisation liée à l'augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère ne suffirait pas à contrer le stress lié au changement climatique⁷⁷. De la même manière, les mangroves font aussi face à des pressions récurrentes et une forte modification de la distribution de ces écosystèmes est probable⁷⁸. Au niveau mondial, en 2015, la FAO rapportait que le taux de disparition de ces écosystèmes était compris entre 2 et 7 % par an. Pour la France, le Comité français de l'IUCN a récemment publié un rapport sur l'état des mangroves de Mayotte. On y rapporte que les arrière-mangroves (côté terre) sont classées en « danger critique » et les mangroves externes (front pionnier) sont « vulnérables »⁷⁹. Face à ces pressions, la protection de ces écosystèmes devrait notamment permettre d'éviter des émissions de carbone élevées dues à leur dégradation et disparition⁸⁰. Ces écosystèmes constituant non seulement des puits de carbone mais aussi des stocks de carbone élevés⁸¹ que l'on estime, pour la France, à environ 100 millions de tonnes de CO_{2eq}. Les données collectées n'ont cependant pas permis de proposer des dynamiques contrastées selon les scénarios de changement climatique ou d'usage.

Dans son ensemble, et comme cela est déjà observé, le puits de carbone océanique sera amené à s'atténuer du fait de la saturation progressive des eaux marines en CO₂. En ce qui concerne la pompe biologique cependant, ni les tendances récentes, ni les projections existantes ne permettent d'établir de tendance d'évolution de paramètres biologiques susceptibles d'influencer significativement le puits de carbone océanique (tels que la profondeur moyenne de reminéralisation).

3.3 – Leviers, compromis et synergies à l'échelle nationale

Les valeurs précédentes correspondent à un scénario de maintien des usages des sols et des pratiques à l'échelle nationale. Elles nous en disent peu sur les impacts de différentes décisions et méritent à ce titre d'être complétées.

3.3.1 – Effets des changements d'usage des terres

La méthode proposée n'inclut pas les changements d'utilisation des terres dans les valeurs proposées mais elle permet d'en évaluer les effets. Dès lors que l'on dispose de données ou de projection concernant des changements d'usage des terres, il est en effet possible de les associer à des conversions entre types et de mobiliser les valeurs de référence proposées.

En France, on estime dans le cadre de la compabilité des émissions de gaz à effets de serre du secteur UTCATF que les changements d'usage des terres constituent actuellement un flux net vers l'atmosphère d'environ 14 MtCO_{2eq} en 2015⁸² soit près de 35 % des émissions du secteur UTCATF⁸³ et 3 % des émissions nationales la même année. Ces changements d'utilisation des terres couvrent des réalités diverses allant des conversions associées à une séquestration de carbone (par exemple la conversion de terres agricoles et de prairies en forêts) à celles qui constituent des sources d'émissions. A ce jour, les principales sources d'émissions sont :

- l'artificialisation des terres, qui représente, en métropole, des conversions nettes de surface significatives estimées à près de 38 000 hectares par an⁸⁴ et des émissions nettes estimées à près de 10,5 MtCO_{2eq} par an⁸⁵ ;
- la mise en culture de prairies qui représente, en métropole, des conversions nettes de surface significatives actuellement estimées à près de 60 000 hectares par an⁸⁶ et associées à des émissions nettes d'environ 6 MtCO_{2eq} par an⁸⁷ ;
- la déforestation en Guyane qui se poursuit au rythme de près 3 700 ha par an⁸⁸ principalement du fait de la mise en culture et de l'orpaillage. Cela représenterait des émissions de l'ordre de 3 MtCO_{2eq} par an⁸⁹.

La poursuite des tendances actuelles en matière d'artificialisation des terres à l'horizon 2050 représenterait des émissions cumulées de près des trois-quarts des émissions de 2015⁹⁰.

3.3.2 – Effets des pratiques

Au-delà des changements d'usage des terres, les valeurs proposées concernant les tendances futures n'intègrent pas de scénario d'évolution des pratiques. Cependant, la méthode proposée permet d'évaluer l'effet de changement de pratiques sur la séquestration de carbone par les écosystèmes. Dès lors que l'on dispose de données ou de projection concernant certains changements de pratiques, il est en effet possible de les associer à des conversions entre types et de mobiliser les valeurs de référence proposées.

Le développement d'une telle capacité d'évaluation est essentielle à plusieurs titres. Tout d'abord, et comme cette étude le démontre, le service écosystémique seul reste limité et incertain sous l'hypothèse du maintien des pratiques actuelles. Il est donc utile de prendre la mesure du levier que constituent les pratiques stimulant le service de séquestration du carbone *in situ*, que nous qualifierons de séquestrantes. Par ailleurs, l'accord de Paris introduit explicitement l'objectif d'équilibrer, au cours de la deuxième moitié du siècle, les émissions anthropiques de gaz à effet de serre avec les absorptions *anthropiques* par les puits, c'est-à-dire les absorptions résultant de pratiques de gestion, que nous qualifierons de *séquestrantes* dans le cadre de cette étude.

Les pratiques séquestrantes sont celles qui sont associées à une séquestration de carbone additionnelle et susceptible de se maintenir à long terme. Cette dernière condition conduit à écarter certaines options qui consisteraient à renforcer les rythmes de séquestration de carbone actuels au détriment de la pérennité des stocks de carbone en place. Une telle perspective requiert en effet de s'intéresser au mécanisme de stimulation du puits actuel mais aussi à la stabilité des composés organiques formés et aux facteurs de résistance et de résilience des écosystèmes considérés dans le contexte actuel de changement climatique et d'acroissement des risques.

Les principales pratiques séquestrantes identifiées dans la littérature sont présentées dans le tableau 3. Pour les écosystèmes forestiers, les pratiques séquestrantes recensées sont la gestion des rémanents, la gestion forestière⁹¹, la conversion de taillis en futaies⁹², une gestion forestière adaptée, le choix d'essences adaptées, la prévention et la gestion des incendies⁹³, ou de manière plus spéculative la diversité des essences ou la gestion de l'équilibre sylvo-cynégétique⁹⁴. Pour les terres cultivées, elles intègrent un ensemble large de pratiques dont les effets peuvent s'élever à plusieurs dizaines de tonnes de CO₂ équivalent par hectare⁹⁵ : le développement de techniques culturales sans labour, de cultures intermédiaires ou intercalaires, de bandes enherbées, de l'agroforesterie, des haies et la gestion des résidus de culture⁹⁶. Pour les prairies, elles portent sur les pratiques de fertilisation et le taux de chargement en bétail⁹⁷. Pour les écosystèmes naturels terrestres et les écosystèmes marins, les effets de mesures de protection sur la résilience des écosystèmes peuvent être considérés comme des pratiques séquestrantes.

Cependant, le faible niveau de connaissance actuel concernant les mécanismes de stimulation de la séquestration de carbone par les écosystèmes et leurs effets limite considérablement notre capacité à identifier les pratiques susceptibles de stimuler le service de séquestration de carbone *in situ* dans une perspective de gestion. Les effets de certains processus écologiques et des pratiques susceptibles de les stimuler, comme la fertilisation, demeurent controversés. À l'exception des écosystèmes agricoles, le développement d'évaluations des pratiques séquestrantes susceptibles d'être déployées à l'échelle nationale fait encore largement défaut.

Tableau 3 :

Exemples de pratiques séquestrantes

Pratique	Type d'effet	Eléments d'évaluation du potentiel de séquestration additionnel (en moyenne à l'échelle nationale)	Coût unitaire moyen (en €/tCO _{2eq})	Ecosystèmes concernés	Principaux antagonismes, synergies et autres effets indirects associés	Sources
Développer les techniques culturales sans labour (semi direct ou labour occasionnel)	Séquestration nette	~ 4MtCO _{2eq} /an (sur deux décennies environ, pour le labour occasionnel)	10 (4 à 233)	Agricoles	Production agricole (-) Augmentation de besoin d'intrants (herbicides) (-) Diminution des besoins de carburant et de travail (+)	Pellerin et coll, 2013 (action 3)
Introduire davantage de cultures intermédiaires et de bandes enherbées	Séquestration nette	~ 1MtCO _{2eq} /an (sur deux décennies environ)	160 (115 à 260)	Agricoles	Production agricole (-) pour les bandes enherbées	Pellerin et coll, 2013 (action 4)
Introduire davantage de cultures intercalaires dans les cultures pérennes	Séquestration nette	~ 0,5MtCO _{2eq} /an (sur deux décennies environ)	14 (10 à 34)	Agricoles	Production agricole (-)	Pellerin et coll, 2013 (action 4)
Développer l'agroforesterie à faible densité d'arbres et les haies en périphérie des parcelles agricoles	Séquestration nette	~ 3MtCO _{2eq} /an (sur deux décennies environ)	Agroforesterie 14 (13 à 118) Haies 107 (63 à 332)	Agricoles	Bois et effets de substitutions (+) Production agricole (-)	Pellerin et coll, 2013 (action 5)
Optimiser la gestion des prairies pour favoriser le stockage de carbone	Séquestration nette	~ 2,5MtCO _{2eq} /an (sur deux décennies environ)	Négatif	Agricoles	Diminution des besoins d'intrants et de travail (+)	Pellerin et coll, 2013 (action 6) ; Dolle, 2015 ; Soussana, 2004, 2014
Convertir des terres cultivées en prairies permanentes	Séquestration nette	non évalué	n.d.	Agricoles	Production agricole (-)	
Réduire l'artificialisation des terres	Séquestration nette	10MtCO _{2eq} /an (si arrêt de l'artificialisation nette)	n.d.	Forestiers Agricoles Milieux humides	Bois et effets de substitutions (+) Récréation (+) Paysages (+)	Citepa, 2017
Boisement et reboisement	Séquestration nette	~ 5MtCO _{2eq} /an (sur deux décennies)	n.d.	Forestiers	Bois et effets de substitutions (+) Substitution énergie (+)	Deheza et Bellassen, 2010, p.19.
Amélioration sylvicole (conversion de taillis en futaies, etc.)	Séquestration nette	~ 20MtCO _{2eq} /an (sur deux décennies environ)	n.d.	Forestiers	Bois d'oeuvre et effets de substitutions (+)	Deheza et Bellassen, 2010, p.26. Martel, Casset et Gleizes, 2015, p. 124.
Changements d'essence	Séquestration nette	non évalué ; 80tCO _{2eq} /ha (potentiel à long terme évalué sur un exemple de remplacement de pin maritime par une variété plus productive)	n.d.	Forestiers	Possible des antagonismes	Deheza et Bellassen, 2010, p.23.
Développer la sylviculture à couvert continu	Maintien Séquestration nette (à long terme)	non évalué	n.d.	Forestiers	Augmentation des besoins de travail (-)	UK-NEA, 2009
Adapter la gestion forestière	Séquestration nette	non évalué	n.d.	Forestiers	non évalué	Martel, Casset et Gleizes, 2015, p. 60,

						136 et 142.
Augmenter les retours de résidus de culture et de rémanents	Séquestration nette Maintien	<i>non évalué</i>	<i>n.d.</i>	Agricoles Forestiers	Production agricole (-) Bois et effets de substitutions (-)	UK-NEA, 2009
Prévention et gestion des incendies	Maintien	<i>non évalué</i>	<i>n.d.</i>	Forestiers	Protection contre les risques (+) Bois et effets de substitutions (+) De manière générale de nombreuses synergies	
Protection des sols riches en carbone	Maintien	<i>non évalué</i>	<i>n.d.</i>	Haute-montagne Agricole Milieux humides et aquatique continentaux Marins et littoraux	De manière générale de nombreuses synergies	UK-NEA, 2009
Restauration et revégétalisation des terres dégradées	Séquestration	<i>non évalué</i>	<i>n.d.</i>	Terres artificialisés	De manière générale de nombreuses synergies	
Protection et restauration des marais littoraux	Maintien Séquestration nette	<i>non évalué</i>	<i>n.d.</i>	Marins et littoraux	De manière générale de nombreuses synergies	
Restaurer le régime hydrique des milieux humides	Maintien Séquestration nette	<i>non évalué</i>	<i>n.d.</i>	Milieux humides et aquatique continentaux	Qualité de l'eau (+) Bois et effets de substitutions (-) De manière générale de nombreuses synergies	UK-NEA, 2009, p. 545 TEEB DE, 2015, p. 38

a. Réduction de la fertilisation azotée, allongement de la période de pâturage et adaptation du chargement de bétail et allongement de la durée des prairies temporaires.

Clé de lecture : ce tableau présente des pratiques permettant une séquestration nette de carbone susceptible de se maintenir à long terme et des pratiques qui favorisent le maintien des stocks existants. Les pratiques séquestrantes dont les effets sont reflétés dans les données collectées dans le cadre de cette étude sont indiquées en gras. Du fait du cadre restreint de cette étude, ce tableau n'inclut pas les pratiques qui permettent de réduire les émissions de GES des activités agricoles (gestion des intrants, alimentation animales, etc.) bien que celles-ci soient à considérer dans une perspective de gestion (voir section 3.3.3).

3.3.3 – Antagonismes et synergies

Les perspectives précédentes peuvent être hiérarchisées selon leurs effets sur la séquestration de carbone. Cependant, elles peuvent s'accompagner d'autres effets⁹⁸, et affecter des services écosystémiques ou valeurs patrimoniales. Caractériser ces interactions est essentiel pour l'évaluation qui doit, autant que possible, refléter l'ensemble des valeurs en jeu. Dans un contexte de décision donné, il est notamment nécessaire de combiner l'évaluation de ce service avec celle d'autres services écosystémiques, dont en priorité ceux qui varient ensemble par bouquet.

Un premier point porte sur les interactions fortes existantes avec d'autres effets liés à l'atténuation du changement climatique, notamment au sein des écosystèmes agricoles et forestiers. Il s'agit tout d'abord des liens existants avec la production de biomasse. En effet, un accroissement de production de biomasse peut se traduire par une baisse de séquestration *in situ*, notamment en forêt, où la biomasse vivante constitue un stock élevé et où la gestion des rémanents pourraient impacter les stocks de carbone des sols à long terme. Au sein des écosystèmes agricoles par ailleurs, les apports organiques et la gestion des résidus de culture constituent un déterminant clé des évolutions des stocks de carbone des sols. Cependant, certains usages de la biomasse, comme source d'énergie ou comme matériau contribuent à éviter des émissions de gaz à effet de serre et donc aussi à atténuer le changement climatique. Ainsi, l'inscription de ce service dans un bilan de gaz à effet de serre d'ensemble et de long terme est nécessaire pour garantir une prise en compte des effets les plus significatifs d'une décision donnée.

De manière plus indirecte ensuite, certaines études suggèrent par ailleurs que, à des échelles régionales, des évolutions des modes de gestion des écosystèmes pourraient contribuer exacerber ou atténuer le changement climatique à ces échelles. Certaines études suggèrent ainsi que les évolutions survenues en matière de gestion forestière au cours des derniers siècles en Europe, et notamment la conversion de forêts feuillues en forêts de résineux pourrait avoir fait de la forêt européenne un contributeur net au changement climatique⁹⁹. À des échelles spatiales et temporelles plus réduites, une étude conduite en région Aquitaine suggère cependant que les effets de l'intensité des prélèvements sur l'albédo reste d'un ordre de grandeur inférieur à ceux liés aux effets de la gestion mais qu'ils sont maximaux pour les scénarii de prélèvement intensif, dans lesquels la séquestration *in situ* est plus faible et les effets de substitution plus forts¹⁰⁰.

Une revue des interactions établies entre ce service et les autres biens et services du cadre conceptuel de l'EFESE est présentée dans le tableau 4. Elle conduit à observer une synergie avec de nombreux services de régulation et une relation plus complexe avec la production de biens, pouvant donner lieu à une situation de compromis pour des niveaux forts de prélèvement de biomasse dans les écosystèmes forestiers et de grandes cultures ou de chargement en bétail pour les prairies. À ce niveau d'analyse, les interactions avec les services culturels demeurent ambiguës ou indéterminées.

Encadré 7

Antagonismes et synergies entre séquestration du carbone et conservation de la biodiversité

Le service de séquestration *in situ* du carbone peut se révéler antagoniste des enjeux de conservation de la biodiversité patrimoniale, par exemple, lorsque les actions en question consistent en des plantations sur des prairies ou en une gestion intensive de peuplements monospécifiques ou composés d'essence non-indigènes.

Cependant, conservation de la biodiversité et séquestration du carbone au sein de la biosphère peuvent aussi présenter des synergies¹⁰¹. C'est notamment le cas parce que la préservation des écosystèmes et de leur résilience permet de préserver des réservoirs, voire des puits, de carbone. On retrouve ainsi dans le tableau 3 un ensemble d'actions directement compatibles avec la conservation. Sur la question de l'adaptation des écosystèmes au changement climatique, la volonté de préservation de la biodiversité et des paysages identitaires peut conduire à privilégier le renforcement de la résilience des écosystèmes en pariant sur les capacités d'adaptation de la végétation, encore mal connues, et des possibilités d'évolution génétique sous pression de sélection, possiblement assistée par l'homme. Les pistes d'actions proposées en ce sens visent la réduction des pressions qui se cumulent aux effets du changement climatique¹⁰², la restauration et le maintien d'une biodiversité génétique¹⁰³, spécifique, fonctionnelle et des paysages et une sylviculture diversifiée et adaptative.

De manière générale, l'analyse conduite ici permet d'émettre l'hypothèse que les antagonismes entre séquestration *in situ* du carbone au sein des écosystèmes et conservation de la biodiversité peuvent être réduits dès lors que la séquestration du carbone est envisagée dans une optique de long terme prenant en compte les incertitudes et les risques comme cette étude le recommande. Ainsi, les antagonismes présentés précédemment pourraient être atténués par une meilleure compréhension des possibilités d'adaptation des peuplements et de la biodiversité forestière aux conditions climatiques futures et par la mise en place de stratégies diversifiées (limitation des risques) assorties d'un suivi qui permettrait de s'adapter aux évolutions observés (gestion adaptative).

Cependant, les exemples de synergies entre conservation de la biodiversité et séquestration du carbone au sein des écosystèmes demeurent encore ténus et limités à quelques exemples emblématiques dont la pertinence sur le territoire national reste à établir¹⁰⁴.

Tableau 4 :

Interaction du service de séquestration du carbone *in situ* avec les biens, services et dimensions patrimoniales du cadre conceptuel de l'EFESE

Bien ou service	Nature de l'interaction	Conditions d'arbitrage
Biens		
Biomasse et matériaux	Contrainte Compromis si avantages liés aux usages de la biomasse négligés, indéterminé sinon ; synergie <i>via</i> les pratiques stimulant la productivité primaire nette mais incertitudes à long terme.	Paramètre clé : taux et modalités de prélèvement (souches, rémanents), mode de gestion (fertilisation, etc.). Bilan carbone de filière prenant en compte l'exposition aux risques.
Biens destinés à l'alimentation animale	Contrainte En ce qui concerne le chargement en bétail des prairies, on observe une synergie jusqu'à un certain niveau puis un compromis.	Paramètre clé : taux chargement en bétail, mode de gestion (fertilisation). Bilan carbone de la filière prenant en compte l'exposition différenciée aux risques.
Molécules et substances naturelles	Relation indéterminée	
Autres bien	Relation indéterminée	
Services de régulation		
Régulation de l'érosion	Synergie	Protection physique et réduction des pertes par érosion et lessivage (Smith et coll, 2014, p. 847).
Protection contre les risques naturels	Facilitation	Développement de la capacité des sols à réguler les sécheresses et les crues (Smith et coll, 2014, p. 847).
Régulation du cycle de l'eau	Contrainte	Baisse de débits à l'exutoire de bassins versants couverts de forêt en pleine croissance Développement de la capacité des sols à réguler les sécheresses et les crues (Smith et coll, 2014, p. 847).
^a Régulation du climat mondial	Contrainte	Les études suggèrent un effet secondaire entre la séquestration du carbone <i>in situ</i> et les autres phénomènes contribuant à la régulation du climat mondial (albédo, etc.).
Régulation du climat local	Relation indéterminée	
Régulation de la qualité de l'air	Relation indéterminée	
Régulation de la qualité de l'eau	Facilitation	Dans le cas des prairies : la séquestration de la matière organique est associée à une plus forte rétention des nitrates et éventuellement des phosphates.
Qualité du sol et fertilité (composition, structure)	Relation ambiguë	L'augmentation de la matière organique dans les sols, par exemple <i>via</i> le maintien de résidus de culture et de rémanents en forêts, est favorable à la fertilité des sols. Par contre, en forêt, la plantation de certaines espèces à propriétés allélopathiques comme les eucalyptus et certains pins ou épicéas a des effets négatifs sur la minéralisation de la matière organique et la fertilité.
Régulation des conditions de culture et d'élevage	Relation indéterminée	
Régulation des risques de santé	Relation indéterminée	
Régulation des déchets et des sources de pollution	Relation indéterminée	
Réduction des nuisances	Relation indéterminée	
Services culturels		
Récréation avec ou sans	Relation ambiguë	La gestion susceptible de stimuler le puits peut se traduire par une mise en valeur des écosystèmes pour les usages récréatifs (conversion de taillis en futaies, etc.), ou inversement. La régulation des populations d'ongulés sauvages par la chasse faciliterait la régénération naturelle

		des peuplements forestiers et le maintien des puits de long terme.
Information et connaissances	Relation indéterminée	
Aménités paysagères	Relation indéterminée	
Patrimoine naturel		
Biodiversité remarquable	Relation ambiguë	Voir encadré 7.

a. Hors séquestration du carbone *in situ*, c'est-à-dire, via la contribution à la formation de nuages, l'albédo, l'émission de méthane, etc.

Clés de lecture : ce tableau établit les principaux compromis et synergies identifiés entre les biens, services et dimensions patrimoniales du cadre conceptuel de l'EFESE et le service de séquestration du carbone *in situ* lorsqu'il est stimulé via les pratiques séquestrantes identifiées dans la section 3.3.2. Il s'appuie sur l'échelle qualitative suivante¹⁰⁵ :

- synergie (vert foncé) : le développement du service de séquestration *in situ* permet intrinsèquement et mécaniquement de répondre à l'enjeu considéré ;
- facilitation (vert clair) : le développement du service de séquestration *in situ* facilite la réponse à l'enjeu considéré ;
- indépendance ou relation indéterminée (gris) ; le développement du service de séquestration *in situ* et l'enjeu considéré n'ont pas d'interactions significatives ou ces interactions ne sont pas connues ;
- contrainte ou relation ambiguë (jaune clair) : le développement du service de séquestration *in situ* contraint la réponse à l'enjeu considéré ; ou les interactions sont positives et négatives selon les pratiques séquestrantes considérées ;
- antagonisme (orange) : le développement du service de séquestration *in situ* se fait nécessairement en contradiction avec l'enjeu considéré et requiert, à ce titre, un arbitrage.

1. Les émissions françaises sont estimées à 457 millions de tonnes de CO₂ équivalent en 2015, hors secteur UTCATF (Citepa, 2017b).
2. Un stock de près de 2500 PgC contre 830 PgC pour l'atmosphère (GIEC, 2013, AR5, chapitre 6, p. 471).
3. Voir notamment Brienen et coll., 2015.
4. Martel et coll., 2017.
5. Jonard et coll., 2017.
6. Dhôte et coll., 2016 ; Roux et coll., 2017.
7. Centre interprofessionnel technique d'étude de la pollution atmosphérique.
8. Citepa, 2017b, p. 86
9. Pour les « forêts restant forêts », le Citepa estime l'incertitude à 21 %, ce qui représente +/- 10 MtCO_{2eq}/an sur le puits de 47,5 MtCO_{2eq}/an estimé pour l'année 2015 (Citepa, 2017, p. 550).
10. Les auteurs remercient Sylvie Alexandre, Olivier De Guibert, Jean-Luc Peyron, Aude Valade et Estelle Vial pour leurs commentaires sur cet encadré.
11. Le Plan national forêt bois 2016-2026 vise une augmentation progressive du prélèvement annuel de bois pour atteindre un prélèvement additionnel de 12 millions de m³ par an à l'horizon 2026 par rapport au niveau actuel.
12. voir par exemple Bellassen et Luysaert, 2014 ; Valade et coll, 2017 ; Roux et coll, 2017
13. Valade et coll., 2017, projet BiCaFF.
14. Voir par exemple ADEME, 2015
15. Dont le contenu en carbone est équivalent à 1,74 tCO_{2eq} en moyenne.
16. De l'ordre de 3,9 tCO_{2eq} pour cette étude.
17. C'est-à-dire au-delà de 2050 ou même 2100.
18. voir par exemple la Programmation pluriannuelle de l'énergie, la Stratégie nationale de mobilisation de la biomasse et ses déclinaisons régionales.
19. Voir Pellerin et coll., 2013.
20. « En 2014, en France métropolitaine, la surface en haie et alignement d'arbres s'élève à 944 546 hectares (ha) contre 1 003 028 ha en 2006, soit une perte de 58 482 ha. Cela représente une diminution de près de 6 %. » (CGDD, 2018).
21. Tibi et Thérond, 2017.
22. Tibi et Thérond, 2017, p. 71.
23. Réseau ICOS <https://www.icos-ri.eu/>
24. Réseau GIS Sol <https://www.gissol.fr/>
25. Conversion d'une valeur de 57 +/- 34 gC/m² par an (Soussana et coll, 2010)
26. Conversion d'une valeur de 5 +/- 30 gC/m² par an ; à noter que la variabilité de cette valeur moyenne est considérable : elle atteint 6 fois cette valeur (Soussana et coll, 2010).
27. Agreste, 2015, p. 2-3.
28. Prairie fauchée ou forêt de la même zone pédo-climatique pour, respectivement, les espaces enherbés ou arborés (voir Citepa, 2017a, p. 692).

28. Prairie fauchée ou forêt de la même zone pédo-climatique pour, respectivement, les espaces enherbés ou arborés (voir Citepa, 2017a, p. 692).
29. On peut par exemple citer les terres dégradées à la suite des activités d'orpaillages illégal en Guyane qui font l'objet d'un suivi.
30. 457 millions de tonnes de CO₂ équivalent en 2015 (Citepa 2017b).
31. Joosten H., 2009.
32. Il existe une ambiguïté dans la littérature à ce sujet. Dans certains cadres, en effet, le carbone bleu ne désigne que les écosystèmes côtiers particuliers.
33. Ifremer, 2017.
34. Duarte et coll., 2013, Pendleton et coll., 2012.
35. Par exemple, la surface des herbiers est très difficile à estimer, de par leur variabilité interannuelle forte et leur capacité de migration (Ifremer, 2017). La cartographie des surfaces d'herbier nécessite donc souvent deux étapes, la télédétection puis une étape de validation de terrain (Lafon et coll., 2014 ; Alloncle et coll., 2005).
36. Voir par exemple Marec et al (2014, 2015).
37. Smith et Gattuso, 2009.
38. Smith et Gattuso, 2009.
39. Voir Suzuki et Kawahata, 2004 ; Pascal, 2010 et Howard et coll., 2017.
40. Smith et Gattuso, 2009, p.43 ; 50TgC/an, converti et arrondi par les auteurs.
41. Voir Gattuso et coll, 2015.
42. Océan et Climat, 2015, page 13
43. Global carbon project pour la période 2005-2015.
44. Océan et Climat, 2015, page 14 ; conversion par les auteurs.
45. Laurent Bopp, communication personnelle.
46. Pour une surface des eaux territoriales françaises qui représente 3 % de la surface totale des océans.
47. Océan et Climat, 2015, page 14
48. 58. Ifremer, Université de Bretagne occidentale et Agence française de la biodiversité (2018), tableau 62. Les études existantes montrent que les flux de séquestration à grande profondeur sont par ailleurs très variables dans l'espace, notamment car les processus de reminéralisation du carbone organique ont lieu de manière hétérogène dans les océans et on estime en effet que les quantités de carbone exportées à ces profondeurs représentent en moyenne 0,18 tonne de CO_{2eq} par hectare et par an en moyenne dans les eaux métropolitaines et 0,04 tonnes de CO_{2eq} par hectare et par an en moyenne Outre-mer (Guidi et coll., 2015, p.7).
49. Sarmiento et Toggweiler, 1984 ; Kwon et coll, 2009.
50. 1ppm = 1GtC environ.
51. Voir par exemple Nabburs et coll (2013) qui rapportent des signes de saturation du puits de carbone forestier européen, tandis que Luysaert et coll (2008) démontrent que des forêts anciennes peuvent de comporter en puits de carbone sur des périodes très longues.
52. Plus précisément, ce chiffre repose sur l'hypothèse d'une probabilité égale des trois scénarii de changement climatique RSP 2.6, 4.5 et 6.
53. C'est-à-dire dans le cadre d'un scénario RCP2.6.
54. Bradford et coll, 2016.
55. Melillo et coll, 2017.
56. Bond-Lamberty et coll, 2018.
57. Voir encadré 2 pour une présentation de ces scénarios.
58. Kwon et coll, 2009.
59. Une analyse de sensibilité pourra considérer une annulation du puits entre 2070 et 2100.
60. Melillo et coll, 2017. En zone tropicale, l'accroissement de la mortalité des arbres associé à des épisodes climatiques difficiles semble désormais aussi dominer cet effet de fertilisation (Brienen et coll, 2015).
61. Parmesan, 2006.
62. Lenoir et coll, 2006.
63. Loustau et coll., 2004.
64. les modèles BIOMOD et N-NBM sont des modèles de niche tandis que PHENOFIT, CASTANEA et LPJ sont mécanistes.
65. Meersmans et coll., 2016, Chang et coll., 2016.
66. Pellerin et coll, 2013.
67. Cette hypothèse a été discutée avec des experts.
68. soit environ 15 % du stock *in situ* actuel.

70. soit environ 30 % du stock *in situ* actuel.
71. soit environ 34 % du stock *in situ* actuel.
72. Bond-Lamberty et coll, 2018.
73. Il existe une ambiguïté dans la littérature à ce sujet. Dans certains cadres, en effet, le carbone bleu ne désigne que les écosystèmes côtiers particuliers.
74. Telesca et coll. (2015) témoigne ainsi d'une régression de près de 10 % des surfaces d'herbier de *Posidonia oceanica* en l'espace de 30 ans sur les côtes méditerranéennes françaises.
75. Elévation du niveau de la mer, acidification, augmentation de l'érosion côtière et des inondations côtières, etc.
76. Duarte et coll., 2013, Pörtner et coll., 2014
77. Pörtner et coll., 2014.
78. Pörtner et coll., 2014.
79. Comité français de l'IUCN, 2017, pp. 34 et 60.
80. Pendleton et coll., 2012, Howard et coll., 2017
81. Duarte et coll., 2013, Howard et coll., 2017
82. Il s'agit de la somme des émissions associées à l'ensemble des conversions de terres.
83. 40,9 MtCO_{2eq} Calculé à partir du tableau 4.I du tableau CRF
84. Calculé à partir du tableau 4.I du tableau CRF de 2017, Citepa, 2017.
85. Calculé à partir du tableau 4 du tableau CRF de 2017, Citepa, 2017 ; ce chiffre comprend 1,3 MtCO_{2eq} liées aux dynamiques d'artificialisation en Guyane, notamment déterminées par l'activité d'orpillage (pour moitié)).
86. Calculé à partir du tableau 4.I du tableau CRF de 2017, Citepa, 2017.
87. Calculé à partir des tableaux 4. B et 4. C du tableau CRF de 2017, Citepa, 2017.
88. Calculé à partir de Citepa, 2017b, tableau 95, p.390.
89. Communication Citepa ; NB : Le site <http://www.gec-guyane.fr/> consulté le 9 février 2017 fait état d'une émission de 1,5 MtCO_{2eq}.
90. 350 MtCO_{2eq} contre 457 MtCO_{2eq} pour 2017 hors secteur UTCATF.
91. Des études au niveau français, montrent que ces modes de gestion semblent conduire à des perspectives différenciées du point de vue de la séquestration de carbone dans la biomasse vivante (Dupouey et coll., 2000, Lousteau et coll., 2004, Martel et coll., 2015, p.124). La prise en compte de ces différences est d'autant plus intéressante que ces structures forestières s'accompagnent d'une biodiversité significativement différente et peuvent donc s'accompagner de bouquets de services significativement différents.
92. UK-NEA, 2009. Nous ne disposons malheureusement à l'heure actuelle d'aucune comparaison scientifique chiffrée entre sylviculture irrégulière et régulière.
93. Pour la forêt Méditerranéenne, la gestion des incendies peut avoir un rôle déterminant sur la biomasse aérienne mais aussi, à plus long terme, sur le contenu en carbone des sols forestiers.
94. Si les populations de grands ongulés n'ont pas d'impact à court terme *a priori* sur la séquestration du carbone *in situ*, l'effet de la pression associée à des populations élevées sur le renouvellement des forêts pourrait se traduire par des impacts à long terme en matière de séquestration du carbone.
95. En reprenant les chiffres et les hypothèses adoptées dans Pellerin et coll, 2013 (maintien d'un flux de séquestration constant jusque entre 2010 et 2030 puis arrêt), la mise en place de cultures intermédiaires représenterait un potentiel de séquestration additionnelle de 36 +/- 19 tCO_{2eq}/ha.
96. Virto et coll, 2012
97. Dolle, 2015 ; Soussana, 2004, 2014
98. Voir, par exemple, la sixième colonne du tableau 3.
99. Naudts et coll, 2016.
100. Loustau, D., et coll., 2006.
101. Voir par exemple, Smith et coll (2014) ou Dupouey (2017) qui soulignent de telles synergies.
102. Notamment la fragmentation des habitats (Dupouey, 2017).
103. Voir par exemple en ce sens, la première version du Plan national d'adaptation au changement climatique.
104. C'est par exemple le cas des liens observés entre la présence de la loutre de mer dans les zones côtières pacifiques et la croissance des forêts de laminaire (Willmers et coll, 2012).
105. Cette échelle est adaptée de l'échelle qualitative de Nilsson et coll (2017) développée pour analyser des interactions entre objectifs de développement durable.

4 – Quatrième partie : Méthode et valeurs de référence pour l'évaluation socio-économique

Après en avoir rappelé les enjeux et la méthode d'élaboration, cette partie présente des valeurs de référence, biophysiques et monétaires, utiles pour évaluer les effets externes de projets et d'investissements susceptibles d'affecter localement des écosystèmes et leur capacité à séquestrer du carbone en leur sein. Ces valeurs constituent un premier outil pour que chacun, à son niveau, puisse prendre la juste mesure de la contribution des écosystèmes aux objectifs nationaux en la matière et en tienne compte dans ses décisions. L'utilisation de telles valeurs est illustrée sur des projets hypothétiques.

Les valeurs de référence reflètent les coûts environnementaux des décisions. Elles visent principalement à informer l'analyse socioéconomique *a priori* des choix publics en fournissant les outils permettant d'intégrer ces coûts dans les décisions économiques et financières¹ des acteurs publics. Elles permettent aussi de favoriser la coordination des acteurs dans un cadre décentralisé où de multiples décisions affectent à la marge le niveau de service. En ce qui concerne le service de séquestration *in situ* du carbone par les écosystèmes, de telles valeurs ont été proposées par la Commission Chevassus-au-Louis (2009) pour les forêts et les prairies métropolitaines. Cette évaluation vise à préciser, à actualiser et à élargir les valeurs relatives au service de séquestration du carbone *in situ* à la plupart des écosystèmes français.

4.1 – Présentation de la méthode d'élaboration des valeurs

4.1.1 – Valeurs recherchées

Pour chaque type, trois valeurs de référence biophysiques distinctes sont recherchées :

1. Le stock de carbone *in situ* de référence (S_i , en tCO_{2eq}/ha) reflète le stock actuel moyen de carbone au sein de l'ensemble des compartiments du type considéré ;
2. La variation de stock *in situ* à long terme de référence (ΔS_i , en tCO_{2eq}/ha) reflète la capacité de l'écosystème à séquestrer du carbone additionnel à long terme. Il correspond au niveau d'une séquestration, certaine, additionnelle et permanente jugée équivalente aux perspectives réelles, qui sont, elles, incertaines ; cette valeur dépend donc de ces incertitudes et de nos attitudes face elles ;
3. Pour certains écosystèmes particuliers, le flux perpétuel de séquestration *in situ* de référence (f_i , en $tCO_{2eq}/ha/an$) reflète la capacité éventuelle de l'écosystème à séquestrer du carbone de manière perpétuelle dans les sols et les sédiments.

Ces valeurs de référence permettent notamment de dériver une valeur monétaire de référence V_i du service de séquestration du carbone *in situ* pour un hectare de l'écosystème du type considéré. Cette valeur V_i est une estimation du coût que représenterait la perte du service de séquestration *in situ* en cas de dégradation de l'écosystème². Elle comprend (i) la valeur des émissions induites par la destruction du stock de carbone en place, qui peut être approchée à partir du stock de carbone *in situ* de référence et (ii) la dégradation du puits de carbone associé, qui peut être évaluée à partir des deux autres valeurs de référence³. Cette valeur dépend linéairement de la valeur tutélaire du carbone⁴ : elle doit donc être corrigée du taux d'augmentation de la valeur tutélaire du carbone entre 2017 et le moment auquel est conduit l'évaluation.

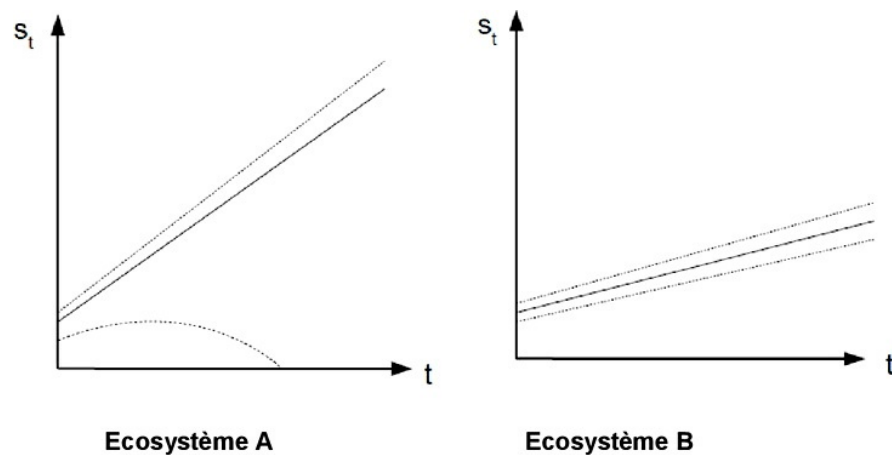
4.1.2 – Méthode d'élaboration

Alors que les deux autres valeurs de référence sont directement dérivées des données collectées, le calcul de la variation de stock *in situ* à long terme de référence est complexe car il intègre les incertitudes fortes associées à ces projections⁵. L'approche proposée vise à refléter le caractère plus ou moins incertain de différentes options de séquestration *in situ* du carbone et place au coeur de l'évaluation économique du service la question de l'équivalence entre séquestration *in situ* (incertaine et non-permanente) et des émissions définitivement évitées.

En effet, dès lors que l'on fait preuve d'aversion au risque, la seule prise en compte des effets de moyenne n'est pas suffisante pour discriminer les scénarios selon leur niveau de risque ou d'incertitude. Si l'on considère par exemple les écosystèmes A et B ci-dessous, la seule prise en compte des niveaux moyens conduirait à privilégier systématiquement le profil de séquestration de l'écosystème A alors qu'à partir d'un certain niveau d'aversion au risque, celui de l'écosystème B deviendrait préférable. Les principes et la méthode

adoptés pour le calcul de ces valeurs sont présentés en [Annexe 5](#). Une fois rendues équivalentes à des émissions évitées certaines et permanentes, ces valeurs peuvent être monétarisées en recourant à la valeur tutélaire du carbone (voir encadré 8).

Figure 13 : Profils fictifs de séquestration de carbone au sein de deux écosystèmes différents et incertitude associée



Clé de lecture : la ligne continue présente un scénario hypothétique d'évolution du stock de carbone moyen, noté S_t , au sein de la biomasse de chaque écosystème et les limites en pointillés indiquent un niveau d'incertitude associé, par exemple un intervalle de confiance à 95 %. Dans cet exemple, l'écosystème A, peu résilient, présente un niveau de séquestration fort mais il est aussi très exposé aux risques en comparaison de l'écosystème B, plus résilient.

Encadré 8

La valeur tutélaire du carbone, interprétations et implications pour l'évaluation du service de séquestration *in situ* du carbone

Dans un souci de cohérence avec les autres cadres d'évaluation, l'évaluation de ce service écosystémique s'appuie sur l'utilisation de la valeur tutélaire du carbone. Dans le cas français, la valeur tutélaire a été élaborée par la commission Quinet (2009) qui a retenu l'option d'une approche coût/efficacité⁶, consistant à évaluer le coût de l'évitement définitif de l'émission d'une tonne de dioxyde de carbone supplémentaire dans l'atmosphère dans un contexte d'objectifs de réduction d'émission donné⁷. Cette valeur a été actualisée en 2013 pour tenir compte des risques et incertitudes. Elle est de 32 €₂₀₁₀/tCO_{2eq} pour l'année 2010. La commission Quinet recommande un taux de croissance annuel moyen de 5,8 % pour atteindre une valeur de 100 €₂₀₁₀/tCO_{2eq} en 2030. Elle recommande ensuite une croissance de cette valeur au rythme du taux d'actualisation risqué, c'est-à-dire 4,5 %⁸. Cette valeur tutélaire fait actuellement l'objet d'une révision pour prendre en compte le renforcement de l'ambition de l'objectif national de réduction des émissions à l'horizon 2050⁹.

Dans une certaine mesure, une telle valeur peut être interprétée comme une valeur implicite accordée par la société à la réduction des dommages associés à la séquestration permanente d'une tonne de carbone. En effet, on peut supposer que, si la valeur des dommages évités était jugée supérieure, les objectifs politiques auraient pu être plus ambitieux, et inversement.

Du fait de sa croissance au rythme du taux d'actualisation après 2030, une conséquence forte de l'utilisation de la valeur tutélaire du carbone est que la séquestration temporaire de carbone n'a pas de valeur. Par ailleurs, l'interprétation de la valeur tutélaire comme le coût marginal d'une réduction *permanente* de l'émission d'une tonne de dioxyde de carbone dans l'atmosphère¹⁰ met l'accent sur la prise en compte des risques de *non-permanence* dans l'évaluation. En effet, la séquestration de carbone au sein des écosystèmes est associée à un fort niveau d'incertitude et à un risque de non-permanence à divers degrés¹¹. De ce fait, la séquestration d'une tonne de carbone par les écosystèmes n'est pas *équivalente* à l'évitement de la combustion d'une tonne de carbone sous forme d'énergie fossile (qui constitue le numéraire) et ne peut donc pas être évaluée à hauteur de la valeur tutélaire.

L'évaluation économique de la valeur de la séquestration du carbone au sein des écosystèmes pour la société doit intégrer ces risques de non-permanence à la fois de manière absolue afin d'éviter un biais, dit d'optimisme, consistant à surévaluer les options incertaines et risquées et qui conduirait *in fine* à une exposition excessive aux risques¹², mais aussi de manière relative en rendant compte des niveaux différenciés de risque de non-permanence de la séquestration de carbone entre compartiments¹³. Cette évaluation vise ainsi à proposer des valeurs de référence qui intègrent, au moins en partie, le risque de non-permanence associé.

4.2 – Présentation des valeurs de références

Les valeurs de référence calculées pour chaque type sont détaillées en Annexe 5. Ces valeurs permettent d'évaluer les émissions liées à la dégradation d'un écosystème. Elles couvrent les émissions de court terme liées à la dégradation des stocks en place mais aussi les variations de perspectives de séquestration de carbone à plus long terme. En effet, la destruction d'un écosystème conduit en effet à la ré-émission d'une partie des stocks de carbone *in situ* dans l'atmosphère mais aussi à la perte des flux de séquestration futurs. La prise en compte de ces perspectives de séquestration à long terme dans l'évaluation peut amener à corriger significativement le bilan des émissions de court terme entre -81 900 €₂₀₁₇/ha et +76 600 €₂₀₁₇/ha¹⁴, ou encore entre -25 % à +50 % pour les écosystèmes agricoles et forestiers. Au total, la prise en compte de ces deux effets conduit à recommander d'imputer à la dégradation d'un écosystème un coût pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines de milliers d'euros.

Une comparaison avec les valeurs de référence proposées par la Commission Chevassus-au-Louis montre que ces valeurs sont plus élevées pour les forêts et moins pour les prairies (voir tableau 5). Ces valeurs sont cependant d'un même ordre de grandeur, ce qui est d'autant plus remarquable qu'elles résultent d'un calcul sensiblement différent.

Tableau 5 :

Comparaison des valeurs monétaires de référence proposées par Chevassus-au-Louis et coll. (2009) et dans le cadre de cette étude.

	Valeurs issues de Chevassus-au-Louis et coll (2009) (en € ₂₀₁₇ /ha/an pour 2017)	Valeurs de référence issues de cette étude (en € ₂₀₁₇ /ha/an pour 2017)
Forêt métropolitaine	940 € ₂₀₁₇ /ha/an (570-940)	1 480 € ₂₀₁₇ /ha/an (250-2 300)
Prairies	650 € ₂₀₁₇ /ha/an (330-650)	670 € ₂₀₁₇ /ha/an (580-850)

a. Hors landes, garrigues et maquis.

Remarque : pour la colonne de gauche, les valeurs de références indiquées pour cette étude correspondent aux valeurs moyennes sur l'ensemble des types et les valeurs entre parenthèses représentent les valeurs minimales et maximales obtenues.

Note explicative : La comparaison des valeurs obtenues ici avec celles proposées par la Commission Chevassus-au-Louis¹⁵ n'est pas directe du fait que la Commission propose une valeur annualisée d'un service qui regroupe séquestration nette et maintien d'une fraction du stock alors que cette étude propose une valeur totale qui intègre l'émission hypothétique des stocks de carbone de référence et la perte des perspectives futures de séquestration additionnelles de carbone. Afin de pouvoir mener la comparaison, nous exprimerons donc la valeur du service obtenue dans le cadre de cette évaluation en équivalent annuités avec un taux d'actualisation de 4,5 %. On trouve ainsi, pour les forêts et les prairies, des valeurs annuelles moyennes sur l'ensemble des types considérés de 1 480 et 670 €₂₀₁₇/ha/an pour des valeurs actuelles nettes moyennes d'environ 34 500 et 15 500 €₂₀₁₇/ha respectivement. Afin de pouvoir opérer la comparaison, les valeurs annuelles proposées par la Commission Chevassus-au-Louis sont par ailleurs exprimées ci-dessus pour l'année 2017 et tiennent donc compte de l'augmentation de la valeur tutélaire du carbone au rythme de 5,8 % entre 2008 et 2017¹⁶, ce qui revient à leur appliquer une augmentation de 66 %. L'ensemble des valeurs monétaires sont par ailleurs exprimées en euros de 2017¹⁷.

4.3 – Utilisation des valeurs de référence dans l'évaluation socio-économique

Les valeurs de référence proposées peuvent être mobilisées pour évaluer les effets de projets susceptibles d'affecter significativement les perspectives de séquestration du carbone par les écosystèmes en leur sein. L'évaluation monétaire est ici seulement envisagée à l'échelle locale pour favoriser la prise en compte du service de séquestration *in situ* dans l'évaluation socioéconomique *ex ante* de projets et d'investissements dont les impacts sont marginaux à l'échelle nationale.

Dès lors que de tels projets peuvent être représentés par des variations de surfaces significatives entre deux types, les valeurs de référence permettent alors d'approcher :

- D'une part, des émissions directes à partir des variations entre les stocks de référence ;
- D'autre part, une variation des perspectives de séquestration de carbone à long terme à partir des variations des valeurs de référence du service de séquestration *in situ* du carbone et de l'interruption d'un éventuel flux perpétuel de séquestration.

Les valeurs monétaires de référence proposées pour chaque type permettent d'évaluer une valeur monétaire pour ces deux variations. Considérons, à titre d'illustration, deux exemples.

4.3.1 – Exemple 1

Considérons un projet d'infrastructure hypothétique qui, en dépit des mesures d'évitement, de réduction et de compensation qui l'accompagnent, conduirait à une dégradation de 200 hectares¹⁸, dont 80 hectares de forêt fermée mixte et 120 hectares de prairies dans la région océanique. Une telle dégradation s'accompagnerait de coûts liés aux émissions à court terme du carbone de la biomasse et des sols, mais aussi, à l'interruption de la photosynthèse et de tous les processus écologiques, conduisant à dégrader la capacité de l'écosystème en question à fournir ce service de séquestration du carbone *in situ* à l'avenir.

Dans le cadre de cette méthode, l'évaluation repose sur la représentation des impacts de ce projet par un changement de type, des écosystèmes initiaux F3_ATL_0 et P_ATL_0 vers un écosystème artificialisé de type UI_ATL_0 dont le taux d'imperméabilisation serait de 100 %. Dans le détail, les effets d'un tel projet seraient alors évalués de la sorte :

- Tout d'abord des émissions de court terme seraient appréhendées par les différences entre les stocks de référence des types F3_O_N et UI_M. Ici, ces effets seraient évalués à hauteur de $(80^{19} \times (593-110)^{20} + 120^{21} \times (303-110)^{22}) \times 51^{23} = 3\,151\,800 \text{ €}_{2017}$;
- Ensuite, la perte du service écosystémique à plus long terme serait appréhendée par la différence entre les niveaux de services des deux types. Ici, ces effets seraient évalués à hauteur de $(80^{24} \times (165-0)^{25} + 120^{26} \times (-35-0)^{27}) \times 51^{28} = 459\,000 \text{ €}_{2017}$.

Le coût lié aux émissions de court terme et à la perte de service à plus long terme serait donc évalué à hauteur de 3 610 800 €. Une telle valeur aurait vocation à être intégrée au calcul socio-économique²⁹. Comme cela sera illustré dans l'exemple suivant, cette valeur peut être calculée plus simplement à partir des valeurs monétaires de référence proposées en annexe 5.

4.3.2 – Exemple 2

Considérons un projet hypothétique de conversion d'une exploitation d'un système de polyculture élevage vers des cultures céréalières et qui s'accompagnerait de la conversion de 20 hectares de prairies en terres cultivées dans l'Est de la France. Si l'on suppose que le projet ne prévoit pas de mode de culture favorable à la séquestration de carbone par ailleurs, ce projet induirait un changement de 20 hectares du type P_CTL_0 vers le type AI_CTL_I. Les effets d'un tel projet sur la séquestration du carbone par les écosystèmes affectés seraient évalués de la sorte :

$$20^{30} * (15\,057 - 10\,531)^{31} = 90\,520 \text{ €}_{2017}$$

Pour se donner un ordre d'idée, une telle valeur annualisée avec un taux d'actualisation de 4,5 % s'élèverait à 195 €₂₀₁₇/ha/an, valeur dont on peut raisonnablement estimer qu'elle est en mesure d'influencer des arbitrages sur ce type de projets³².

Inversement, cette méthode peut aussi être appliquée à la valorisation d'opérations de restauration de terres dégradées (actions de revégétalisation, etc.) ou, plus généralement, à toute conversion conduisant à une amélioration des perspectives de séquestration du carbone et susceptible d'être représentée à travers la typologie retenue.

-
1. Voir par exemple Lemmet et Ducret, 2017, p.95.
 2. C'est-à-dire la conversion du type considéré en le type d'écosystème « terres dégradées » de la typologie retenue.
 3. Cette valeur ne résume pas la valeur de l'écosystème mais celle du seul service de séquestration *in situ*. Pour rappel, l'EFESE écarte, dans son cadre conceptuel, le concept de valeur économique totale d'un écosystème (CGDD, 2017a).
 4. Voir [Annexe 5](#).
 5. En toute rigueur, l'incertitude devrait aussi être prise en compte dans l'évaluation du flux perpétuel de séquestration *in situ* de référence, mais du fait du caractère *in fine* anecdotique de ces perspectives de séquestration, l'atténuation de leur valeur induite par le fait de les escompter à partir de 2100 a été jugé suffisant.
 6. Une approche alternative, dite coûts-avantages, consiste à estimer directement les dommages évités par une réduction marginale d'émissions de CO₂, ce qui reste très délicat. Sur l'intérêt des approches normatives et coûts-efficacité, voir Kervinio et Vergez (2018).
 7. En l'occurrence, au moment de la rédaction du rapport, le « facteur 4 », c'est-à-dire, à l'horizon 2050, la division par quatre des émissions nationales de gaz à effet de serre par rapport à 1990, objectif récemment renforcé par celui de neutralité carbone dès 2050 du Plan climat du Gouvernement français (2017, axe 11). La valeur tutélaire du carbone est en cours de révision pour prendre en compte ce nouvel objectif.
 8. Quinet et coll., 2013.
 9. Voir section [1.2.1](#).
 10. Quinet et coll., 2009.
 11. GIEC, 2014, p. 832
 12. Gollier, 2011.
 13. Du fait par exemple, de résistance et de résilience différenciées face aux perturbations.
 14. Les valeurs négatives correspondent aux écosystèmes les plus susceptibles de se comporter comme des sources de carbone à long terme. Il s'agit des tourbières, mais aussi des prairies ou de la plupart des terres cultivées.
 15. À la page 315, on retrouve une proposition de valeurs de référence de 115 et 414 €₂₀₁₀/ha/an pour les services respectifs de fixation et de stockage du carbone des forêts. Les valeurs concernant les prairies sont proposées à la page 318.
 16. Quinet et coll., 2009.
 17. Cela revient à appliquer une inflation de 7,3 % pour les valeurs exprimées en €₂₀₁₀.
 18. C'est l'ordre de grandeur de l'impact d'un projet de LGV décrit dans Tardieu, Roussel et Salles (2013).
 19. la surface des écosystèmes forestiers impactés (en ha).

20. la différence entre les stocks de carbone *in situ* de référence des deux types (en tCO_{2eq}/ha).
21. la surface des écosystèmes prairiaux impactés (en ha).
22. la différence entre les stocks de carbone *in situ* de référence des deux types (en tCO_{2eq}/ha).
23. la valeur tutélaire du carbone en 2017 (en €₂₀₁₇ / tCO_{2eq}).
24. la surface des écosystèmes forestiers impactés (en ha).
25. la différence entre variation de stock *in situ* à long terme de référence des deux types (en tCO_{2eq}/ha).
26. la surface des écosystèmes prairiaux impactés (en ha).
27. la différence entre variation de stock *in situ* à long terme de référence des deux types (en tCO_{2eq}/ha).
28. la valeur tutélaire du carbone en 2017 (en €₂₀₁₇ / tCO_{2eq}).
29. À noter que la prise en compte des effets sur les services écosystémiques devrait porter sur l'ensemble du projet et des mesures compensatoires mises en oeuvre dans le cadre de l'application de la séquence éviter-réduire-compenser.
30. La surface impactée (en ha).
31. la différence entre les valeurs monétaires de référence du service écosystémique de séquestration *in situ* du carbone des deux types (en €₂₀₁₇/ha).
32. A titre d'ordre de grandeur à l'échelle nationale, les productions de l'exercice 2015 (produits – charges) sont respectivement de 1800 €/ha/an, 2100 €/ha/an, 800 €/ha/an et 1200 €/ha/an pour les filières polyculture-polyélevage, bovins lait, bovin viande et grandes cultures de céréales et d'oléoprotéagineux (Agreste, 2017).

5 – Cinquième partie : Limites et besoins de connaissance

Cette partie présente les principales pistes d'approfondissement possibles dans le cadre méthodologique proposé et identifie des besoins de connaissance spécifiques pour renforcer les capacités d'évaluation du service écosystémique de séquestration du carbone *in situ* aux échelles nationales et locales, de façon à progresser sur les deux premiers objectifs énoncés en Introduction.

Cette évaluation propose une vision d'ensemble à l'échelle nationale et renforce les méthodes d'évaluation existantes à l'échelle des projets. Cependant, elle s'inscrit dans une démarche itérative et progressive qui requiert de préciser ses limites et d'identifier les principaux besoins d'études, de données et de connaissances pour poursuivre le renforcement des capacités d'évaluation de ce service écosystémique à l'échelle nationale.

5.1 – Limites des valeurs proposées

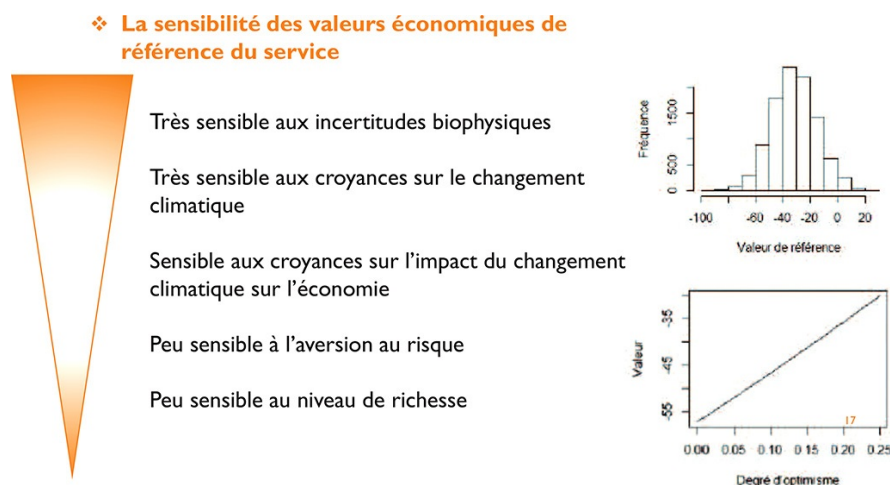
Comme cela a été souligné à diverses reprises, les valeurs proposées reposent sur des hypothèses et des données incertaines. Dans cette section, nous analyserons la sensibilité des résultats aux hypothèses formulées et hiérarchiserons les principales sources d'incertitudes.

En ce qui concerne les ordres de grandeur proposés à l'échelle nationale, tout d'abord, les estimations des surfaces de chacun des types jouent un rôle important lors de l'agrégation des valeurs. D'autre part, dans cette évaluation à l'échelle nationale, le volet « prospective » du travail découle parfois d'hypothèses jugées raisonnables à dire d'expert mais qui peuvent parfois masquer une incertitude profonde, parfois même radicale. C'est notamment le cas concernant le puits de carbone forestier et son évolution dont l'incertitude détermine les recommandations actuelles en matière de gestion optimale du bilan carbone de la filière forêt-bois¹.

En l'absence d'évaluation complète des niveaux d'incertitude, nous proposons ici de hiérarchiser ces sources d'incertitude à partir de l'étude de la sensibilité d'une seule variable d'intérêt : l'équivalent certain de la variation de stock de carbone *in situ* à long terme de référence. Cette valeur s'appuie en effet sur l'ensemble des données et des hypothèses formulées.

Sur l'ensemble des types agricoles de métropole, on remarque tout d'abord que les niveaux d'incertitude identifiées sur les données biophysiques recueillies conduisent à une variation de la séquestration additionnelle de long terme de 2 à 10 fois la valeur de référence². Par ailleurs, les variations sur les hypothèses détaillées en annexe 5 conduisent à une variation de ces valeurs de 1,75 fois la valeur de référence. Pris individuellement, l'intervalle des croyances subjectives retenues sur les différents scénarios de changement climatique est associé à une variation de 1,7 fois la valeur de référence tandis que les hypothèses concernant les évolutions du PIB associées aux différents scénarios de changement climatique conduisent à des variations de 12 % de la valeur proposée. L'aversion relative au risque retenue, si elle fait l'objet d'une préconisation, ne joue pas un rôle déterminant dans cette valeur : pour une variation comprise entre 0 et 3, la valeur varie de 6 %³. Cela conduit à hiérarchiser les sources d'incertitude comme cela est présenté sur la figure 14.

Figure 14 : Hiérarchisation des sources d'incertitude affectant les valeurs de référence proposées



Cette analyse souligne la très forte incertitude liée aux valeurs biophysiques. Cela confirme l'importance de consolider ces valeurs et de les actualiser. Par ailleurs, la valeur de référence estimée à partir de la méthode proposée est très sensible aux croyances liées au changement climatique. Cela motive la recommandation de spécifier des probabilités représentatives des croyances collectives à ce sujet⁴.

Enfin, cette évaluation des incertitudes est elle-même compromise par l'absence d'une évaluation fiable des incertitudes sur chacune des données collectées. C'est par exemple le cas concernant les surfaces des écosystèmes issues des données *Corine land cover*. Le renseignement de ces incertitudes dans leur ensemble serait utile pour prioriser une acquisition de données et de connaissance ciblée sur les incertitudes les plus pénalisantes.

5.2 – Besoins d'études complémentaires

Tout d'abord, il demeure des pistes pour approfondir l'analyse et renforcer les outils proposés en l'état actuel des connaissances et des données disponibles. De telles pistes d'études, qui pourraient être entreprises à court terme, sont présentées dans cette section.

5.2.1 – Besoins d'études pour consolider les valeurs produites

Les résultats d'évaluation présentés précédemment proviennent de l'agrégation des éléments d'évaluation recueillis pour chacun des types d'écosystèmes. De fait, les incertitudes liées aux estimations des surfaces de chacun des types d'écosystème entraînent des différences non négligeables au niveau des résultats agrégés. De plus, certains paramètres sont incertains⁵. La consolidation et l'actualisation des données recueillies, notamment en matière de projections, reste donc nécessaire. Elle peut consister à préciser certaines données clés pour un type d'écosystème donné ou à préciser les principaux leviers de séquestration du carbone par les écosystèmes à travers de nouvelles distinctions entre les types ou le renforcement de la prise en compte des déterminants de premier ordre des flux de carbone au sein d'un type donné. Une telle consolidation permettrait d'aboutir à certains résultats essentiels comme, par exemple, la possibilité d'anticiper avec suffisamment de robustesse la mesure avec laquelle l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 conduit à ré-évaluer l'ambition du facteur 4, selon l'ampleur du puits futur.

Concernant la consolidation des données collectées, les priorités portent sur :

- Des flux dont l'évaluation suggèrent qu'ils sont significatifs, mais qui restent très incertains, comme c'est le cas par exemple pour le carbone des sols.
- Certaines valeurs qui proviennent de valeurs moyennes estimées à l'échelle mondiale comme c'est le cas, par exemple, des écosystèmes du carbone bleu.

Des flux de séquestration ont été considérés comme négligeables au sein des écosystèmes aquatiques terrestres. Or Regnier et coll. (2013), estiment que les écosystèmes aquatiques continentaux séquestreraient des quantités très significatives de l'ordre de 1,8 milliard de tCO_{2eq} par an au niveau mondial. Une consolidation des données consistant à introduire ces flux, ainsi que plus généralement, les flux de carbone organique entre écosystèmes, dits "latéraux", et leurs déterminants constituerait une amélioration notable.

Par ailleurs, l'enrichissement de la typologie retenue permettrait d'assurer une prise en compte des principaux leviers de préservation et de stimulation de la séquestration de carbone par les écosystèmes :

- En matière de pratiques tout d'abord, on constate en effet que seule un faible nombre de pratiques identifiées en section 3.3.2 sont actuellement reflétées dans la typologie retenue, alors que l'intégration de telles distinctions renforcerait assurément l'intérêt des valeurs produites⁶ ; de tels approfondissements seraient particulièrement utiles pour valoriser les services environnementaux.
- Par ailleurs, certains écosystèmes pourraient être distingués selon des caractéristiques d'état de manière à pouvoir prendre en compte des formes de dégradation affectant durablement les perspectives de séquestration du carbone⁷. En l'état actuel des connaissances, il semble en effet possible de valoriser certaines caractéristiques de la biodiversité à travers leur contribution à une meilleure maîtrise du risque de non-permanence de la séquestration de carbone *in situ*⁸ que la méthode d'évaluation développée permettrait de valoriser⁹.
- Enfin, de manière analogue au taux d'imperméabilisation, certaines caractéristiques intensives des types proposés pourraient être utilisées pour paramétrer les valeurs de référence proposées¹⁰. L'introduction de telles caractéristiques serait conditionnée à la facilité de leur mesure sur le terrain et à la disponibilité d'information sur leur niveau moyen à l'échelle nationale.

L'affinement de la typologie ne doit pas viser en priorité à prendre en compte l'ensemble des facteurs de variabilité des flux de séquestration afin d'être au plus proche de la réalité des flux de carbone aux échelles locales. En effet, la multiplication des types peut conduire à une faible lisibilité des valeurs proposées. Par ailleurs, le recours à des valeurs moyennes à l'échelle nationale n'est pas problématique en soi car, à cette échelle, une valeur moyenne précise sur un type bien défini n'induit pas d'erreur systématique et ne se reflète donc pas a priori sur le puits national¹¹. Il semble donc préférable de privilégier une consolidation des valeurs moyennes pour les types retenus, une bonne compréhension des incertitudes sur ces valeurs et de se limiter aux distinctions les plus utiles à l'échelle nationale, notamment celles liées aux leviers d'action.

La quantification des incertitudes sur l'ensemble des données collectées est aussi une piste d'approfondissement essentielle¹². Ce traitement des incertitudes permettrait d'améliorer la confiance dans les résultats de l'étude et d'identifier les sources d'incertitudes majeures en vue de prioriser les besoins d'acquisition de données et de connaissances. Le traitement et la prise en compte des incertitudes a été entamée dans cette étude mais elle ne permet pas de conduire de telles analyses. Une première difficulté rencontrée est liée à l'absence de spécification des incertitudes associées à certaines données. C'est par exemple le cas les surfaces issues Corine land cover. Une deuxième limite résulte de l'absence pure et simple de mesure crédible à l'échelle nationale de paramètres clés.

Enfin, la consolidation des valeurs produites relève aussi de la réalisation d'approfondissements qui dépassent le périmètre d'une telle étude. Il s'agit notamment du calibrage de certains paramètres qui, bien qu'ils ne puissent être objectivés de manière satisfaisante, sous-tendent nécessairement les choix réalisés parfois de manière cruciale. Les analyses de sensibilité conduites soulignent notamment la forte sensibilité des valeurs proposées aux croyances concernant différents scénarii de changement climatique et, dans une moindre mesure, des effets du changement climatique sur les trajectoires de croissance. Ce premier point rejoint les préconisations en matière d'intégration des risques dans l'évaluation socio-économique¹³. Concernant le second sur les croyances sur les scénarii de changement climatique, il n'existe pas de recommandation scientifique en la matière¹⁴. Cependant, argumenter et justifier, à l'échelle nationale, des croyances les plus raisonnables en la matière apparaît nécessaire pour assurer la légitimité des valeurs obtenues¹⁵. La détermination de telle référence est utile afin de renforcer la transparence et la cohérence des hypothèses adoptées en la matière et de permettre la comparabilité des évaluations. Un travail dans ce sens à l'échelle nationale permettrait de clarifier les valeurs à utiliser dans le cadre de telles évaluations. De telles valeurs peuvent être proposées dans une optique normative, au même titre que des valeurs raisonnables d'aversion au risque ou de taux d'actualisation ont été préconisées pour la décision publique¹⁶. De tels travaux permettraient de préciser les valeurs de référence produites pour ce service écosystémique, mais aussi plus largement, pour l'ensemble des choix exposés aux changements climatiques futurs¹⁷.

Encadré 9

Partagez vos connaissances et vos données pour une amélioration continue des capacités à évaluer le service de séquestration *in situ* du carbone en France

Cette étude vise à mobiliser au mieux les connaissances et données disponibles pour en permettre le transfert vers la décision. L'approche adoptée est itérative et progressive et, dans ce cadre, de nouvelles informations peuvent être intégrées à l'évaluation pourvu qu'elles remplissent des conditions de validation scientifique, mais aussi qu'elles soient adaptées à la méthode proposée.

Les contributions peuvent porter sur les points suivants :

1. Proposer de nouvelles informations quantitatives et les sources associées pour la consolidation et l'actualisation des données recueillies pour les types actuels ;
2. Enrichir la typologie en proposant de prendre en compte un nouveau déterminant de la séquestration de carbone *in situ*. Pour cela, deux options sont possibles :
 - proposer et documenter une nouvelle distinction entre deux types¹⁸ ;
 - documenter un paramètre clé de la séquestration du carbone au sein d'un type¹⁹ ;
3. Améliorer la méthode (périmètres et définitions, traitement des incertitudes, etc.).

Le recueil et l'intégration de ces informations permettra d'améliorer progressivement les capacités d'évaluation de ce service en France et d'appuyer la conception d'instruments d'aide à la décision qui mobilisent de telles valeurs.

[Télécharger les données](#)

[Soumettre une contribution en vue d'actualisations ultérieures](#)

5.2.2 – Autres besoins d'études complémentaires

La prise en compte des changements d'usages des sols dans l'évaluation pourrait constituer un travail complémentaire utile. Un développement utile pourrait consister à développer un ensemble de scénarios intégrés, probabilisés et contrastés. Pour chacun de ces scénarii, une matrice de transition entre types²⁰ serait renseignée à plusieurs horizons de temps. Une telle matrice pourrait être renseignée à travers l'élaboration d'un scénario de changement d'usage de terres et des transitions naturelles subies (évolution des domaines bio-géographiques liés au changement climatique, évolution vers les stades forestiers des prairies non-gérées). Les changements d'usages des terres seraient éclairés par la compréhension des tendances actuelles et en prenant en compte les orientations nationales stratégiques en la matière. Une telle matrice permettrait de renforcer la pertinence et la crédibilité des valeurs proposées.

Considérant la nature de l'incertitude associée aux scénarios de changement climatique et aux effets associés²¹, l'évaluation pourrait enrichir le critère de décision sous-jacent. Par exemple, l'évaluation de valeurs d'options associées aux perspectives de séquestration du carbone dans chacun des types considérés pourrait constituer un travail éclairant. En effet, l'incertitude concernant le changement climatique devrait se réduire dans les décennies à venir tandis que certains scénarii de gestion offrent plus ou moins de flexibilité face au climat qui change. Le calcul de telles valeurs pourrait être conduit afin de refléter la valeur des dynamiques les plus flexibles et les plus favorables à une gestion adaptative dans le contexte actuel d'incertitude sur les évolutions à venir du climat mondial et sur la réaction des écosystèmes à ces conditions.

Par ailleurs, l'intégration de ce service au sein de bouquets permettrait de faciliter sa prise en compte dans la décision. Cela passe par une meilleure intégration des pratiques dans la typologie et une meilleure compréhension de l'ensemble des effets associés à ces pratiques.

Enfin, une cartographie du service à l'échelle nationale n'a pas pu être réalisée dans le cadre de cette étude. Un tel travail serait cependant facile car il repose sur la seule cartographie de la typologie proposée. Un tel exercice serait utile à plusieurs titres :

1. mettre en évidence des zones à enjeux forts, du point de vue du maintien des stocks existants ou du potentiel de séquestration additionnel afin de cibler les efforts à l'échelle nationale ;
2. renforcer la précision et la cohérence des surfaces renseignées afin d'éviter les doubles comptes ;
3. fournir une cartographie de référence qui pourrait être utilisée pour arbitrer les types retenus dans le cadre de l'évaluation socio-économique.

Un tel travail pourrait être envisagé dans le cadre de la mise en place d'un système de comptabilité des écosystèmes français.

5.3 – Principaux besoins de connaissances et de données

Cette évaluation s'est heurtée à de nombreux manques de connaissances et de données qui peuvent encore limiter la complétude, la crédibilité scientifique et la pertinence aux yeux des acteurs des valeurs proposées. Ces besoins, qui permettent de préciser certaines orientations des cadres stratégiques en matière de recherche et d'innovation²², sont recensés et présentés dans le tableau 6 au côté des études susceptibles de renforcer la valorisation des connaissances et données existantes. Afin de renforcer son caractère opérationnel, cette liste a été priorisée.

S'agissant des besoins de données, les données les plus utiles sont celles nécessaires à la compréhension des processus écologiques déterminant les dynamiques du carbone au sein des différents types d'écosystèmes et à la validation des modèles susceptibles d'appuyer des projections du puits de carbone sous différentes hypothèses de changement climatique. Il est utile d'explorer les différents moyens d'obtenir de telles données, y compris, potentiellement, les dispositifs de sciences participatives.

S'agissant des connaissances, on peut citer le besoin de mieux comprendre :

1. les mécanismes à l'origine des flux de carbone, notamment dans le compartiment des sols²³ et dans un contexte de changement climatique ;
2. la compréhension de l'influence des régimes de perturbation (incendies, tempêtes, maladies, etc.) sur les dynamiques de séquestration du carbone, notre capacité à les gérer et leur évolution dans les différents scénarios de changement climatique²⁴ ;
3. la modélisation et la prise en compte des phénomènes érosifs et du devenir des sédiments charriés par les cours d'eau ;
4. le devenir du carbone des sols imperméabilisés.

Cette identification des besoins appelle à deux commentaires :

1. Tout d'abord, la diversité des connaissances et des dispositifs de suivi pertinents nous amène à souligner qu'un effort de coordination significatif est nécessaire à la production d'une information utile à la décision. Cela conduit à souligner l'intérêt de la création d'un *observatoire du bio-carbone*, dont le rôle serait d'agrèger les connaissances et les données existantes²⁵ sous un format utile à la décision et d'identifier et prioriser l'acquisition de données et de connaissances. Une telle structure pourrait consolider et compléter les informations collectées dans le cadre de cette étude, coordonner la mise en œuvre des recommandations du tableau 6, et produire et communiquer auprès des décideurs concernés une information adaptée.

2. Par ailleurs, il importe de prendre conscience des limites d'une approche séquentielle consistant à savoir *avant* de décider : les ambitions actuelles en matière d'atténuation du changement climatique requièrent en effet d'opérer une transformation sans précédent²⁶ de l'usage des sols dans un intervalle de temps très court, inférieur à la durée d'une rotation forestière. Face à une telle urgence, il est nécessaire de concevoir l'acquisition de connaissances et de données dans le cadre d'une approche systémique, reposant sur des projets pilotes, ambitieux, diversifiés et pensés de manière à permettre une acquisition de données susceptibles d'en évaluer l'efficacité tout en permettant d'affiner les connaissances et les données nécessaires à l'amélioration de notre compréhension du cycle du carbone et des leviers disponibles à l'échelle nationale.

A plus longue échéance, la constitution d'un modèle d'ensemble des dynamiques du carbone dans les écosystèmes français, maîtrisé et validé scientifiquement, permettrait de calculer l'ensemble des valeurs d'intérêt dans un cadre cohérent susceptible d'être amélioré de manière itérative. Un tel modèle, dont l'intérêt serait notamment de permettre des projections, pourrait être envisagé en lien avec la comptabilité carbone du secteur des terres²⁷.

Tableau 6 :

Principaux besoins de connaissances, de données et d'études identifiés

Nature du travail	Description	Intérêt relatif	Coût	Terme
Etudes et intégration des données et des connaissances existantes				
Revue des connaissances permettant de consolider les informations recueillies dans ce cadre d'évaluation	<p>Chaque revue des connaissances permettrait de préciser les valeurs proposées ou de proposer des distinctions entre types à partir des connaissances existantes ; elle préciserait les manques persistants de connaissance et de données en la matière.</p> <p>Les sujets sur lesquels cela semble possible et pertinent sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • une expertise scientifique collective sur le bilan carbone^b à long terme et le coût de différentes pratiques de gestion forestière à l'échelle nationale^c ; • une meilleure prise en compte des flux de carbone latéraux entre écosystèmes ; • une revue systématique sur les liens entre protection de la biodiversité et perspectives de séquestration du carbone à long terme dans les différents types d'écosystèmes ; • un renforcement des données relatives aux écosystèmes côtiers ; • une évaluation des types ultramarins qui n'ont pas été renseignés dans cette étude. 	++	++	CT
Evaluation et intégration d'interactions clés	<p>L'évaluation des interactions s'appuierait sur la typologie proposée (en la raffinant si nécessaire) et viserait à préciser, pour chaque type des informations relatives à d'autres enjeux fortement associés. Un ajustement des valeurs de référence proposées pourrait être réalisé en conséquence.</p> <p>Il s'agirait en premier lieu des liens entre séquestration <i>in situ</i> et :</p> <ul style="list-style-type: none"> • intensification des prélèvements de biomasse dans les écosystèmes forestiers et agricoles ; • conservation de la biodiversité et séquestration du carbone ; • émissions d'autres gaz à effet de serre (méthane et N₂O). 	++	++	MT
Evaluation des incertitudes	Ce travail consisterait à évaluer, pour chaque valeur moyenne proposée, les incertitudes associées en mobilisant par exemple les méthodes préconisées par le GIEC ^d .	+	+	CT
Proposer des valeurs de référence sur les paramètres clés	Ce travail motiverait, à une échelle qui dépasse celle de cette seule évaluation, des valeurs de références sur des paramètres auxquels les résultats sont très sensibles. Il s'agit en premier lieu de croyances sur les <i>scenarii</i> de changement climatique, mais aussi, dans une moindre mesure, de scénario de croissance associés à chaque scénario RCP.	+	+	CT
Développer des scénarios intégrés de référence à l'échelle de la France	Un tel travail consisterait à élaborer des scénarios intégrant, à l'échelle nationale, développement, utilisation des terres et impacts du changement climatique. Il permettrait de conduire un ensemble cohérent d'évaluations.	+	+	CT
Acquisition de connaissances nouvelles				
Mécanisme d'évolution du carbone des sols	Compréhension des mécanismes, notamment biologiques, conduisant au stockage de carbone dans les sols et développement des capacités de modélisation des processus d'accumulation et de maintien du carbone dans les sols sur des profils qui s'étendent au-delà de l'horizon de 30 cm ^e .	++	++	LT
Carbone bleu océanique	Compréhension et modélisation des dynamiques sédimentaires et leurs déterminants, y compris pour les écosystèmes côtiers (très hétérogènes).	+	++	LT
Résilience des peuplements dans un contexte de changement climatique	Compréhension des mécanismes de la réponse des écosystèmes au changement climatique et aux évolutions des régimes de perturbations, en particulier face aux événements extrêmes. Renforcement des capacités de modélisation en la matière, notamment pour les peuplements forestiers mélangés.	++	+	MT
Comprendre et quantifier les effets de premier ordre des pratiques	Compréhension des effets de la gestion et de l'exploitation forestières, de la pêche et des mesures de conservation en milieu marin, des pratiques agricoles, etc. sur le cycle du carbone et les bouquets de services.	++	+	MT
Renforcer les capacités de modélisation intégrée	Constitution d'un modèle d'ensemble des cycles du carbone à l'échelle nationale au sein des écosystèmes qui intègre les effets des pratiques et qui prenne en compte des dynamiques de changement global en matière d'usage des terres et de climat.	++	++	LT
Acquisition de données nouvelles				
Suivi de long terme du carbone des sols	Développement et pérennisation d'un ou plusieurs réseaux d'observation des sols, représentatifs à l'échelle nationale et établis en cohérence avec les réseaux existants ^f , intégrant notamment un suivi (i) de la biodiversité des sols, (ii) des effets associés aux pratiques et aux changements d'usages, (iii) des écosystèmes artificialisés, sur lesquels les connaissances sont très faibles et (iv) des horizons plus profonds que celui de 30 cm ^g .	++	++	LT
Suivi des flux de carbone latéraux et des processus de sédimentation dans les écosystèmes marins	<p>Suivi des flux de carbone latéraux et du devenir des sédiments.</p> <p>Campagnes océanographiques dédiées au suivi des exports de carbone organique en profondeur, leurs déterminants et leur devenir.</p>	++	++	LT
Suivi des surfaces				

Suivi des surfaces des différents types	Suivi des surfaces des types de couverture des sols et de pratiques, ainsi que les incertitudes associées (information encore indisponible). Ces suivis peuvent mobiliser des observations satellitaires mais aussi des croisements avec des informations de terrain, notamment en ce qui concerne les pratiques.	+	++	MT
---	---	---	----	----

a. Court terme (CT) : progrès possibles à l'horizon 2020 ; moyen terme (MT) : progrès possibles à l'horizon 2025 ; long terme (LT) : progrès significatifs possibles, après 2025.

b. Y compris le carbone des sols (Ademe, 2017)

c. Sur le modèle de l'étude conduite par l'Inra pour les écosystèmes agricoles (Pellerin et coll, 2013)

d. Penman, 2000.

e. Voir une description détaillée des besoins dans Roux et coll, 2017, annexe 3.

f. Lucas, RMQS et Renecofor.

g. Voir par exemple Meurer et coll, 2018, p. 620.

Clé de lecture : les besoins d'études correspondent aux approfondissements et renforcements possibles dans le cadre proposé en l'état des connaissances existantes. Ils s'adressent aux communautés scientifiques, aux bureaux d'études et aux porteurs de politiques publiques. Les besoins de connaissances traitent des lacunes concernant tant la compréhension fondamentale des mécanismes (processus écologiques, etc.) que le développement de capacités de projection et d'évaluation. Ils s'adressent plus particulièrement à la communauté scientifique et à ses financeurs. Les besoins de données correspondent aux données nécessaires pour établir les connaissances et conduire les études identifiées. Ils s'adressent aux services statistiques, aux instituts en charge des réseaux de suivi des écosystèmes et à leur financeurs.

1. Voir par exemple Valade et coll, 2017 ; Roux et coll, 2017.

2. En supposant les différentes sources d'incertitudes indépendantes.

3. la sensibilité des valeurs au niveau de richesse général et à la valeur tutélaire du carbone est quant à elle négligeable.

4. Voir section 5.2.1.

5. Par exemple, l'effet du changement climatique sur la séquestration de carbone dans les sols agricoles est estimé à partir d'une seule référence, celle de Meersmans et coll. (2016), et des croisements avec d'autres études permettraient d'améliorer la robustesse des chiffres retenus.

6. Par exemple, nous disposons des surfaces relatives de prairies soumises à différentes pratiques (l'enquête « pratiques culturales » permet en effet d'évaluer, à l'échelle nationale, les proportions de prairies fauchées, pâturées ou mixtes à hauteur de 17 %, 48 % et 35 % respectivement) mais nous n'avons pas été en mesure de définir des perspectives différenciées en matière de séquestration du carbone selon les pratiques. Les prairies temporaires pourraient aussi faire l'objet d'un type spécifique.

7. C'est par exemple le cas pour une forêt tropicale restaurée par rapport à une forêt tropicale primaire.

8. On peut notamment penser à la redondance fonctionnelle, la biodiversité des sols ou la diversité des essences et génétique des peuplements forestiers. En ce sens, la Commission Chevassus-au-Louis (2009) rapporte déjà une étude qui modélise l'effet du réchauffement climatique selon que le peuplement est monospécifique ou constitué d'essences variées et rapporte une capacité d'adaptation supérieure des peuplements composites qui conduit à terme à un gain de l'ordre de 30 %, en termes de capacité de fixation du carbone, par rapport à un peuplement monospécifique (Bolker et coll., 1995).

9. Voir section 4.1.2 et Annexe 5.

10. Par exemple, le taux de prélèvement pourrait être considéré comme une caractéristique intensive clé des types forestiers, ce qui nécessiterait de caractériser des relations quantitatives entre ce taux de prélèvement et les perspectives de séquestration *in situ* de carbone, sous les quatre scénarii RCP de changement climatique aux horizons retenus dans le cadre de cette évaluation. Le taux de couverture pour les herbiers, le linéaire de haies et le taux de couverture des boisements intraparcellaires pour les terres cultivées et les prairies, les alignements d'arbres pour les zones artificialisées bâties sont d'autres exemples de caractéristiques intensives dont l'intégration dans ce cadre d'évaluation pourrait être explorée.

11. Les surestimations compensant en moyenne les sous-estimations.

12. Cette prise en compte est recommandée par le GIEC pour les inventaires d'émissions (Penman, 2000).

13. voir Gollier, 2011, p.109.

14. De telles discussions sont cependant inévitables dès lors que l'on se réfère à des cadres de décision, y compris entre les experts. En témoignent, Boucher et coll (2016) lorsqu'ils affirment "[Severe warming] scenarios [between 2°C and 4°C] are more likely to happen than the 1,5°C, and require adaptation measures well planned in advance" ou les discussions du séminaire scientifique « Comment optimiser la contribution des forêts et de la filière forêt bois au changement climatique » (ADEME, 2017).

15. Il est utile de faire remarquer qu'il existe des critères de décision qui s'affranchissent de ces informations (voir e.g. Lempert et coll, 2007 ; Hallegatte et coll, 2012). Ces critères sont notamment pertinents lorsque l'incertitude est telle que des croyances raisonnables, même subjectives, ne peuvent être proposées ou qu'aucun modèle n'est en mesure de délivrer de projection crédible. Ils mettent en avant la robustesse d'une décision sur toute une gamme de conditions plausibles ou la proportion des efforts dédiés à éviter des impacts catastrophiques plausibles.

16. Gollier, 2011 et Quinet, 2013.

17. Voir Hallegatte (2009) pour une discussion des secteurs les plus concernés.

18. Pour cela, il est nécessaire de préciser une caractérisation pour chacun des deux types et de renseigner les tableaux de valeur associés aux deux types, des informations facultatives (disponibilité de cartographie des types) et les sources associées.

19. Pour cela, il est nécessaire de préciser (i) le paramètre proposé (définition et unité de mesure), (ii) la relation quantitative moyenne entre ce paramètre et certaines des données présentées en annexe 4 (ii) le niveau moyen de ce paramètre sur l'ensemble des surfaces du type considéré, et les sources associées.

20. Une telle matrice indiquerait une probabilité, à l'échelle nationale, de transition d'un type à un autre à un horizon de temps donné.

21. On peut parler d'incertitude "profonde", du fait de l'absence (i) de modèles susceptibles de prédire correctement les évolutions futures reconnus par la communauté scientifique et (ii) de connaissance des probabilités des variables clés de ces modèles.
22. Par exemple, la priorité C du Plan recherche et innovation 2016-2025 pour la filière forêt-bois.
23. Voir aussi Boucher et coll, PNAS, 2016.
24. Fréjaville et Curt, 2015.
25. Un tel cadre de comptabilité du bio-carbone est proposé comme une composante des systèmes de comptabilité du capital naturel (voir par exemple, Weber, 2014, p.105 et United Nations Statistical Division, 2013, p. 87).
26. Giec, 2018, message C2.
27. Des exemples de modèles intégrés à l'échelle nationale existent dans le monde, par exemple, le Carbon Budget Model "CBMCFS" du Canada.

Conclusion

Cette étude propose un cadre d'ensemble pour une mobilisation efficace des connaissances existantes en appui à la décision. Elle identifie les principaux besoins de recherche pour assurer meilleure prise en compte de la séquestration du carbone par les écosystèmes dans les décisions, notamment en matière d'aménagement. Ce faisant elle contribue à assurer la préservation et la stimulation de ce service par l'ensemble de la société. En proposant des ordres de grandeur nationaux, cette étude permet d'améliorer la perception et la prise en compte des enjeux associés dans une juste mesure. En proposant des valeurs de référence, elle permet d'assurer leur prise en compte dans les évaluations *ex ante* de projets et d'investissements mais aussi, possiblement, d'appuyer le dimensionnement de différents instruments économiques (paiements pour services environnementaux, etc.).

Aux côtés d'autres études concentrées sur les principaux services écosystémiques, elle s'inscrit dans un processus progressif qui vise à compléter et élargir progressivement l'ensemble des valeurs prises en compte dans l'évaluation de projets et d'investissements. Cette étude s'inscrit par ailleurs dans un processus itératif. Ainsi, la structure et la spécification des données requises et la formulation de besoins en la matière demeure sans doute encore à ce stade l'apport principal de l'étude. Elle met notamment en évidence le besoin d'améliorer certaines données et connaissances afin de pallier des lacunes qui limitent encore notre capacité à prendre la mesure des enjeux.

Bibliographie

Textes réglementaires et stratégiques

[Accord de Paris sur le climat](#) ;

[Convention sur la diversité biologique](#) ;

[Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques](#) ;

[Directive UE 1999/13/CE](#) ;

[Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte](#) ;

[Objectifs d'Aïchi](#) ;

[Objectifs de développement durable](#) ;

[Plan d'action de l'Union européenne pour le milieu naturel, la population et l'économie](#) ;

[Plan biodiversité du gouvernement français](#) ;

[Plan climat du Gouvernement français](#) ;

[Plan national d'adaptation au changement climatique \(PNACC\)](#) ;

[Plan national de développement pour l'agroforesterie](#) ;

[Plan recherche et innovation 2016-2025 - Filière forêt-bois](#) ;

[Programmation pluriannuelle de l'énergie](#) ;

[Programme national de la forêt et du bois 2016-2026 \(PNFB\)](#) ;

[Règlement UE n°841/2018 relatif à la prise en compte des émissions et des absorptions de gaz à effet de serre résultant de l'utilisation des terres, du changement d'affectation des terres et de la foresterie dans le cadre d'action en matière de climat et d'énergie à l'horizon 2030](#) ;

[Règlement UE n°842/2018 relatif aux réductions annuelles contraignantes des émissions de gaz à effet de serre par les États membres de 2021 à 2030](#) ;

[Stratégie de l'Union européenne pour la biodiversité \(SEB\)](#) ;

[Stratégie nationale pour la biodiversité 2011-2020 \(SNB\)](#) ;

[Stratégie nationale de mobilisation de la biomasse](#) ;

[Stratégie nationale pour la mer et le littoral \(SNML\)](#) ;

[Stratégie nationale bas carbone \(SNBC\)](#).

Rapports et articles académiques

- Ademe, 2015. Forêt et atténuation du changement climatique, Les avis de l'ADEME. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Paris, France
- Ademe, 2017. Séminaire scientifique « Comment optimiser la contribution des forêts et de la filière bois à l'atténuation du changement climatique ? » du 11 et 12 décembre 2017, Paris. Compte-rendu des échanges.
- Agreste, 2015. [Utilisation du territoire. L'artificialisation des terres de 2006 à 2014 : pour deux tiers sur des espaces agricoles](#). Collection Agreste primeur, numéro 326. Juillet 2015.
- Agreste, 2017. [Réseau d'information comptable agricole. Résultats économiques 2015 des moyennes et grandes exploitations](#). Agreste Nouvelle Aquitaine, Chiffres & Données, juillet 2017, numéro 19, 33p.
- Alkama, R., et Cescatti, A. (2016). Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover. *Science*, 351 (6273), 600-604.
- Alloncle, N., Guillaumont, L., & Levêque, L. (2005). Cartographie des herbiers de zostères. Fiche technique 14 – Projet REBENT.
- Baker, T. R., Phillips, O. L., Malhi, Y., Almeida, S., Arroyo, L., Di Fiore, A.,... & Laurance, W. F. (2004). Increasing biomass in Amazonian forest plots. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 359 (1443), 353-365.
- Bellassen, V., & Luysaert, S. (2014). Carbon sequestration : Managing forests in uncertain times. *Nature*, 506 (7487), 153-155.
- Bolker, B. M., Pacala, S. W., Bazzaz, F. A., Canham, C. D., & Levin, S. A. (1995). Species diversity and ecosystem response to carbon dioxide fertilization : conclusions from a temperate forest model. *Global Change Biology*, 1 (5), 373-381.
- Bond-Lamberty, B., Bailey, V. L., Chen, M., Gough, C. M., & Vargas, R. (2018). Globally rising soil heterotrophic respiration over recent decades. *Nature*, 560 (7716)
- Böttcher, H., Hennenberg, K., Winger, C., 2018. Forest Vision Germany. Description of methodology, assumptions and results. Report from the Öko-Institut e.V., January 2018.

12. Boucher, O., Bellassen, V., Benveniste, H., Ciais, P., Criqui, P., Guivarch, C., Le Treut, H., Mathy, S. & Sférian, R. (2016). Opinion : In the wake of Paris Agreement, scientists must embrace new directions for climate change research. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113 (27), 7287-7290.
13. Bradford, M. A., Wieder, W. R., Bonan, G. B., Fierer, N., Raymond, P. A., & Crowther, T. W. (2016). Managing uncertainty in soil carbon feedbacks to climate change. *Nature Climate Change*, 6 (8), 751.
14. Brienen, R.J.W., Phillips, O.L., Feldpausch, T.R., Gloor, E., Baker, T.R., Lloyd, J., & Martinez, R.V. (2015). Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, 519 (7543), 344-348.
15. Burke, M., Hsiang, S.M., & Miguel, E. (2015). Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*, 527 (7577), 235.
16. Chevassus-au-Louis, B., Salles, J.M., & Pujol, J.L. (2009). Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes. Centre d'analyse stratégique.
17. CGDD, 2018. Environnement & agriculture – Les chiffres clés – Édition 2018. Collection Datalab.
18. CGDD, 2017a. Chiffres clés du climat - France et monde – édition 2017. Collection Datalab Annuel.
19. CGDD, 2017b. EFESE – Cadre conceptuel. Collection Théma Balises.
20. CGDD, 2016. EFESE – Rapport intermédiaire. Collection Théma Analyse. 161 pages.
21. CGEDD, 2017. Rapport de mission de la déléguée interministérielle à la forêt et au bois.
22. Chang, J., Ciais, P., Viovy, N., Vuichard, N., Herrero, M., Havlík, P., & Soussana, J.F. (2016). Effect of climate change, CO₂ trends, nitrogen addition, and land-cover and management intensity changes on the carbon balance of European grasslands. *Global change biology*, 22 (1), 338-350.
23. Chave, J., Olivier, J., Bongers, F., Châtelet, P., Forget, P.M., Van der Meer, P.,... & Charles-Dominique, P. (2008). Above-ground biomass and productivity in a rain forest of eastern South America. *Journal of Tropical Ecology*, 24 (4), 355-366.
24. Chenu, C., Klumpp, K., Bispo, A., Angers, D., Colenne, C., & Metay, A. (2014). Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France. *Innovations Agronomiques*, 37, 23-37.
25. Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., & Jones, C. (2014). Carbon and other biogeochemical cycles. In *Climate change 2013 : the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 465-570). Cambridge University Press.
26. Citepa, 2017a. Organisation et méthode des inventaires nationaux des émissions atmosphériques (OMINEA) en France. 14^{ème} édition. Mai 2017. 838p.
27. Citepa (2017b). Rapport CCNUCC.
28. Colin, A. (2014). Emissions et absorptions de gaz à effet de serre liées au secteur forestier dans le contexte d'un accroissement possible de la récolte aux horizons 2020 et 2030. Contribution de l'IGN aux projections du puits de CO₂ dans la biomasse des forêts gérées de France métropolitaine en, 2020.
29. Cornwall, W. (2017). The burning question. *Science* 355 (6320), 18-21.
30. Deheza, M. et Bellassen, V., 2010. Valorisation carbone de la filière forêt-bois en France. CDC Climat, étude climat n°20, avril 2010.
31. Dennig, F., Budolfson, M. B., Fleurbaey, M., Siebert, A., & Socolow, R. H. (2015). Inequality, climate impacts on the future poor, and carbon prices. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112 (52), 15827-15832.
32. Derrien D, Dignac M-F, Basile-Doelsch I, Barot S, Cécillon L, Chenu C, Chevallier T, Freschet GT, Garnier P, Guenet B, Hedde M, Klumpp K, Lashermes G, Maron P-A, Nunan N, Roumet C, Barré P (2016) Stocker du C dans les sols : Quels mécanismes, quelles pratiques agricoles, quels indicateurs ? *Etude et Gestion des Sols* 23 : 193 – 223.
33. Dhôte J.-F., Leban J.-M., Saint-André L., Derrien D., Zhun M., Loustau D., Achat D., Roux A., Schmitt B. (2016). Leviers forestiers en termes d'atténuation pour lutter contre le changement climatique. Rapport d'étude pour le Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, Paris : Inra-DEPE, 95 p.
34. Dolle, J. B., Faverdin, P., Agabriel, J., Sauvart, D., & Klumpp, K. (2013). Contribution de l'élevage bovin aux émissions de GES et au stockage de carbone selon les systèmes de production. *Fourrages*, 215, 181-191.
35. Dupouey, J. L., Pignard, G., Badeau, V., Thimonier, A., Dhôte, J. F., Nepveu, G.,... & Nys, C. (2000). Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises. *Revue forestière française*, 52, 139-154.
36. Dupouey, J.L., 2017. Fiche 5.4 Gestion des forêts tempérées, changement climatique et biodiversité ; dans *Les mécanismes d'adaptation de la biodiversité aux changements climatiques et leurs limites*, Rapport coordonné par Sandra Lavorel, Jean-Dominique Lebreton et Yvon Le Maho. Académie des sciences, 27 juin 2017.
37. Duarte, C. M., Losada, I. J., Hendriks, I. E., Mazarrasa, I., & Marbà, N. (2013). The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation. *Nature Climate Change*, 3 (11), 961-968.
38. FAO, 2009. Blue Carbon : The Role of Healthy Oceans in Binding Carbon. Rapport de la FAO.
39. Fayad, I., Baghdadi, N., Guitet, S., Bailly, J. S., Hérault, B., Gond, V.,... & Minh, D. H. T. (2016). Aboveground biomass mapping in French Guiana by combining remote sensing, forest inventories and environmental data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 502-514.
40. Ibrahim, F. et coll. "Aboveground biomass mapping in French Guiana by combining remote sensing, forest inventories and environmental data." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 52 (2016) : 502-514
41. Field, C. B., Barros, V. R., Mastrandrea, M. D., Mach, K. J., Abdrabo, M. K., Adger, N.,... & Burkett, V. R. (2014). Summary for policymakers. In *Climate change 2014 : impacts, adaptation, and vulnerability. Part A : global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1-32). Cambridge University Press.
42. Fontaine, S., S. Barot, P. Barré, N. Bdioui, B. Mary, and C. Rumpel. 2007. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature* 450 : 277-281.
43. Fortin, M. (2016). Le bilan de carbone des peuplements de chêne, de hêtre et de charme en Lorraine à l'horizon 2050.
44. Gattuso, J. P., Magnan, A., Billé, R., Cheung, W. W., Howes, E. L., Joos, F.,... & Hoegh-Guldberg, O. (2015). Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO₂ emissions scenarios. *Science*, 349 (6243), aac4722.
45. Giec, (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published : IGES, Japan.

46. Giec (2018) : Summary for Policymakers of the special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Allen, M., Babiker, M., Chen, Y., de Coninck, H., Connors, S., van Diemen, R., Dube, O.P., Ebi, K., Engelbrecht, F., Ferrat M., Ford J., Forster P., Fuss S., Guillen T., Harold, J., Hoegh-Guldberg, O., Hourcade J.-C., Huppmann, D., Jacob, D., Jiang, K., Johansen, T.G., Kainuma, M., de Kleijne, K., Kriegler, E., Ley, D., Liverman, D., Mahowald, N., Masson-Delmotte, V., Matthews, R., Melcher, R., Millar, R., Mintenbeck, K., Morelli, A., Moufouma-Okia, W., Mundaca, L., Nicolai, M., Okereke, C., Pathak, M., Payne, A., Pidcock, R., Pirani, A., Poloczanska, E., Pörtner, H.-O., Revi A., Riahi, K., Roberts, D.C., Rogelj, J., Roy, J., Seneviratne, S., Shukla P. R., Skea, J., Slade, R., Shindell, D., Singh, C., Solecki, W., Steg, L., Taylor M., Tschakert, P., Waisman, H., Warren, R., Zhai, P. and Zickfeld, K, (eds.). October, 2018.
47. Gip Ecofor (2018). EFESE - Evaluation des écosystèmes forestiers français. Collection théma.
48. Guitet, S., Hérault, B., Molto, Q., Brunaux, O., & Couteron, P. (2015). Spatial structure of above-ground biomass limits accuracy of carbon mapping in rainforest but large scale forest inventories can help to overcome. *PLoS one*, 10 (9), e0138456.
49. Gleizes, O., Martel, S. et Casset, L. *Forêt et carbone. Comprendre, agir, valoriser*. IDF. 2016. 158 pages.
50. Guidi, L., Legendre, L., Reygondeau, G., Uitz, J., Stemmann, L., & Henson, S.A. (2015). A new look at ocean carbon remineralization for estimating deepwater sequestration. *Global Biogeochemical Cycles*, 29 (7), 1044-1059.
51. Gollier, C. (2011). Le calcul du risque dans les investissements publics. Centre d'Analyse stratégique, Rapports & documents, (36).
52. Hallegatte, S. (2009). Strategies to adapt to an uncertain climate change, *Global Environmental Change* 19, 240-247
53. Hallegatte, S., Shah, A., Lempert, R., Brown, C., & Gill, S. (2012). Investment decision making deep uncertainty-application to climate change. The World Bank, Policy paper n°6193, September 2012.
54. Hamon, X., Dupraz, C., & Liagre, F. (2009). L'agroforesterie, outil de séquestration du carbone en agriculture.
55. House, K. Z., Schrag, D. P., Harvey, C. F., & Lackner, K. S. (2006). Permanent carbon dioxide storage in deep-sea sediments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103 (33), 12291-12295.
56. Howard, J., Sutton-Grier, A., Herr, D., Kleypas, J., Landis, E., Mcleod, E.,... & Simpson, S. (2017). Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15 (1), 42-50.
57. Hungate, B. A., Barbier, E. B., Ando, A. W., Marks, S. P., Reich, P. B., van Gestel, N., Tilman, D., Knops, J.M. H., Hooper, D. U., Butterfield, B. J. & Cardinale, B. J., The economic value of grassland species for carbon storage. *Sci. Adv.* 3, e1601880 (2017).
58. I4CE, 2017. Objectifs climatiques européens : le stockage de carbone mis à contribution. Point Climat n°47, mai 2017.
59. I4CE, 2018. Objectifs climat européens : le stockage carbone agricole et forestier mis à contribution. Point climat n°57, octobre 2018.
60. Ifremer, Université de Bretagne occidentale et Agence française de la biodiversité (2018). EFESE – les milieux marins et littoraux français. Octobre 2018.
61. IPBES (2018a) : Summary for policymakers of the assessment report on land degradation and restoration of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. R. Scholes, L. Montanarella, A. Brainich, N. Barger, B. ten Brink, M. Cantele, B. Erasmus, J. Fisher, T. Gardner, T. G. Holland, F. Kohler, J. S. Kotiaho, G. Von Maltitz, G. Nangendo, R. Pandit, J. Parrotta, M. D. Potts, S. Prince, M. Sankaran and L. Willemsen (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 44 pages
62. IPBES (2018b) : Summary for policymakers of the regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Europe and Central Asia of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. M. Fischer, M. Rounsevell, A. Torre-Marín Rando, A. Mader, A. Church, M. Elbakidze, V. Elias, T. Hahn, P.A. Harrison, J. Hauck, B. Martín-López, I. Ring, C. Sandström, I. Sousa Pinto, P. Visconti, N.E. Zimmermann and M. Christie (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 48 pages.
63. Jantke, K., Müller, J., Trapp, N. & Blanz, B. (2016). Is climate-smart conservation feasible in Europe ? Spatial relations of protected areas, soil carbon, and land values. *Environmental Science & Policy*. 57 : 40 – 49.
64. Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological applications*, 10 (2), 423-436.
65. Jonard, M., Nicolas, M., Coomes, D. A., Caignet, I., Saenger, A., & Ponette, Q. (2017). Forest soils in France are sequestering substantial amounts of carbon. *Science of the Total Environment*, 574, 616-628.
66. Joosten H., 2009. The Global Peatland CO2 Picture – Peatland status and drainage related emissions in all countries of the world. *Wetlands International*, 35 p.
67. Kervinio, Y., & Vergez, A. (2018). Agir face à la complexité des valeurs de la biodiversité – Joindre les approches normative et « coût-efficacité ». In *Annales des Mines-Responsabilité et environnement* (No. 4, pp. 30-35). FFE.
68. Korner C (2003) Slow in, rapid out – carbon flux studies and Kyoto targets. *Science*, 300, 1242 – 1243.
69. Knohl, A. ; Schulze, E. ; Kolle, O. & Buchmann, N. (2003). Large carbon uptake by an unmanaged 250-year-old deciduous forest in Central Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 118 (3-4), pp. 151 – 167.
70. Kwon, E.Y., Primeau, F., & Sarmiento, J.L. (2009). The impact of remineralization depth on the air – sea carbon balance. *Nature Geoscience*, 2 (9), 630.
71. Lafon, V., Dehouck, A., & Curti, C. (2014). Cartographie de l'herbier à *Zostera noltei* de l'île de ré-masse d'eau FRGC53-par télédétection spatiale. Rapport Geo-Transfert-Adera.
72. Lemmet, S. et Ducret, P., 2017. Pour une stratégie française de la finance verte. Rapport aux ministre d'Etat, ministre de la Transition écologique et solidaire et au ministre de l'Economie et des finances. Décembre 2017.
73. Lempert, R. J., & Collins, M.T. (2007). Managing the risk of uncertain threshold responses : comparison of robust, optimum, and precautionary approaches. *Risk Analysis : An International Journal*, 27 (4), 1009-1026.
74. Lenoir J., Gégout J. C., Marquet P.A., De Ruffray P. & Brisse H., 2008. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 320 (5884), 1768-1771.
75. Lettens, S., Orshoven, J. O. S., Wesemael, B.A.S., Muys, B., & Perrin, D. (2005). Soil organic carbon changes in landscape units of Belgium between 1960 and 2000 with reference to 1990. *Global Change Biology*, 11 (12), 2128-2140.
76. Loustau, D., 2004. Rapport final du projet CARBOFOR. Inra, Bordeaux, 138 pages.

77. Loustau, D., et coll., 2011. The impacts of forest management on the carbon cycle. Dans Papers on impacts of forest management on environmental services. EFI Technical report 57, 2011.
78. Luysaert, S. ; Schulze, E.-D. ; Börner, A. ; Knohl, A. ; Hessenmöller, D. ; Law, B. ; Ciais, P. ; Grace, J. ; Börner, A. & Hessenmoller, D. (2008). Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 455 (7210), pp. 213 – 215. doi : 10.1038/nature07276.
79. Marec P., Cariou T., Latimier M., macé E., Morin P., Vernet M., Bozec Y. (2014) Spatio-temporal dynamics of biogeochemical processes and air-sea CO₂ fluxes in the Western English Channel based on two years of FerryBox deployment. *Journal of Marine Systems*, 140, 26-38.
80. Marec P., Cariou T., Macé E., Morin P., Salt L.A., Vernet M., Taylor B., Paxman K., Bozec Y. (2015) Dynamics of air-sea CO₂ fluxes in the North-West European shelf based on Voluntary Observing Ship (VOS) and satellite observations. *Biogeosciences Discussions*, 12, 5641-5695.
81. Meersmans, J., Arrouays, D., Van Rompaey, A. J., Pagé, C., De Baets, S., & Quine, T.A. (2016). Future C loss in mid-latitude mineral soils : climate change exceeds land use mitigation potential in France. *Scientific reports*, 6.
82. Melillo, J. M., Frey, S. D., DeAngelis, K. M., Werner, W. J., Bernard, M. J., Bowles, F.P.,... & Grandy, A.S. (2017). Long-term pattern and magnitude of soil carbon feedback to the climate system in a warming world. *Science*, 358 (6359), 101-105.
83. Meurer, K. H., Haddaway, N. R., Bolinder, M. A., & Kätterer, T. (2017). Tillage intensity affects total SOC stocks in boreo-temperate regions only in the topsoil — A systematic review using an ESM approach. *Earth-Science Reviews* (*citée dans les données mobilisées*).
84. Mitsch, W. J., Bernal, B., Nahlik, A. M., Mander, Ü., Zhang, L., Anderson, C. J.,... & Brix, H. (2013). Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 28 (4), 583-597.
85. Mulder, V. L., Lacoste, M., Richer-de-Forges, A. C., Martin, M. P., & Arrouays, D. (2016). National versus global modelling the 3D distribution of soil organic carbon in mainland France. *Geoderma*, 263, 16-34.
86. Nabuurs, G. J., Lindner, M., Verkerk, P. J., Gunia, K., Deda, P., Michalak, R., & Grassi, G. (2013). First signs of carbon sink saturation in European forest biomass. *Nature Climate Change*, 3 (9), 792.
87. Naudts, K., Chen, Y., McGrath, M. J., Ryder, J., Valade, A., Otto, J., & Luysaert, S. (2016). Europe's forest management did not mitigate climate warming. *Science*, 351 (6273), 597-600.
88. Nilsson, M., Griggs, D., Visbeck, M., Ringler C. et, McCollum, D., 2017. Introduction - A framework for understanding sustainable development goals interactions ; dans A guide to SDG interactions : from science to implementation, International council for science.
89. Plateforme Océan et climat (2015) *Océan et climat – Fiches scientifiques*, 106 p.
90. OCDE (2015), *Atténuation du changement climatique : Politiques publiques et progrès réalisés*, Éditions OCDE, Paris.
91. Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A.,... & Ciais, P. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333 (6045), 988-993.
92. Parish F., Sirin A., Charman D., Joosten H., Minaeva T. & Silvius M. (eds), 2008. Assessment on peatlands, biodiversity and climate change. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International Wageningen, 179 p.
93. Parmesan, C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 37, 637-669.
94. Passow, U., & Carlson, C. A. (2012). The biological pump in a high CO₂ world. *Marine Ecology Progress Series*, 470, 249-271.
95. Pellerin, S., Bamière, L., Angers, D., Béline, F., Benoit, M., Butault, J. P.,... & Doreau, M. (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. N° hal-01186943.
96. Pendleton, L., Donato, D. C., Murray, B. C., Crooks, S., Jenkins, W. A., Sifleet, S.,... & Megonigal, P. (2012). Estimating global "blue carbon" emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems. *PloS one*, 7 (9), e43542.
97. Penman, J. (2000). Recommendations du GIEC en matière de bonnes pratiques et de gestion des incertitudes pour les inventaires nationaux.
98. Piponiot C et al (2016) A methodological framework to assess the carbon balance of tropical managed forests. *Carbon Balance Manag* 11 (1) : 15
99. Pôle-relai zones humides tropicales, 2017. Plaquette de présentation du Réseau National d'Observation et d'Aide à la Gestion des Mangroves (ROM) et des indicateurs nationaux.
100. Pörtner, H. O., Karl, D.M., Boyd, P.W., Cheung, W., Lluich-Cota, S.E., Nojiri, Y.,... & Armstrong, C. (2014). Ocean systems. In *Climate change 2014 : impacts, adaptation, and vulnerability. Part A : global and sectoral aspects. contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 411-484). Cambridge University Press.
101. Power, A. G. (2010). Ecosystem services and agriculture : tradeoffs and synergies. *Philosophical transactions of the royal society B : biological sciences*, 365 (1554), 2959-2971.
102. Quinet, A., Baumstark, L., Célestin-Urbain, J., Pouliquen, H., Auverlot, D., & Raynard, C. (2009). *La valeur tutélaire du carbone*. Rapport du Conseil d'Analyse Stratégique, 16 (5), 9305
103. Quinet E., et coll. (2013). *Evaluation socioéconomique des investissements publics*. Rapport du Commissariat général à la stratégie et à la prospective
104. Regnier, P., Friedlingstein, P., Ciais, P., Mackenzie, F.T., Gruber, N., Janssens, I.A.,... & Arndt, S. (2013). Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. *Nature geoscience*, 6 (8), 597-607.
105. Reynolds, B., Chamberlain, P. M., Poskitt, J., Woods, C., Scott, W.A., Rowe, E.C.,... & Black, H.I.J. (2013). Countryside survey : national "soil change" 1978 – 2007 for topsoils in great britain — acidity, carbon, and total nitrogen status. *Vadose Zone Journal*, 12 (2).
106. Roberts, C. M., O'Leary, B. C., McCauley, D. J., Cury, P. M., Duarte, C.M., Lubchenco, J.,... & Worm, B. (2017). Marine reserves can mitigate and promote adaptation to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114 (24), 6167-6175.
107. Roßkopf, N., Fell, H., & Zeitz, J. (2015). Organic soils in Germany, their distribution and carbon stocks. *Catena*, 133, 157-170.
108. Roux A., Dhôte J.-F. (Coordinateurs), Achat D., Bastick C., Colin A., Bailly A.,... & Schmitt B. (2017). Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050. Rapport d'étude pour le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, Inra et IGN, 101 p. + 230 p. (annexes).
109. Rutishauser, E., Wagner, F., Herault, B., Nicolini, E. A., & Blanc, L. (2010). Contrasting above-ground biomass balance in a Neotropical rain forest. *Journal of Vegetation Science*, 21 (4), 672-682.

110. Sarmiento, J. L., & Toggweiler, J. R. (1984). A new model for the role of the oceans in determining atmospheric pCO₂. *Nature*, 308 (5960), 621.
111. Sathre, R., & O'Connor, J. (2010). Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental science & policy*, 13 (2), 104-114.
112. Smith, P. (2014). Do grasslands act as a perpetual sink for carbon ?. *Global change biology*, 20 (9), 2708-2711.
113. Smith, S. et Gattuso, J.-P., 2009. Coral reefs. In : Laffoley, D.d'A. & Grimsditch, G. (eds). 2009. The management of natural coastal carbon sinks. IUCN, Gland, Switzerland. 53 pp.
114. Smith, K. R., Woodward, A., Campbell-Lendrum, D., Chadee, D. D., Honda, Y., Liu, Q.,... & Sauerborn, R. (2014). Climate change 2014 : impacts, adaptation, and vulnerability. Part A : global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
115. Soussana, J. F., Loiseau, P., Vuichard, N., Ceschia, E., Balesdent, J., Chevallier, T., & Arrouays, D. (2004). Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil use and management*, 20 (2), 219-230.
116. Soussana, J. F., Tallec, T., & Blanfort, V. (2010). Mitigating the greenhouse gas balance of ruminant production systems through carbon sequestration in grasslands. *Animal*, 4 (03), 334-350.
117. Soussana, J. F., Klumpp, K., & Ehrhardt, F. (2014). The role of grassland in mitigating climate change. *The Future of European Grasslands*, 75.
118. Stahl, C., Fontaine, S., Klumpp, K., Picon-Cochard, C., Grise, M. M., Dezécache, C.,... & Burban, B. (2017). Continuous soil carbon storage of old permanent pastures in Amazonia. *Global change biology*, 23 (8), 3382-3392.
119. Stern, N. H. (2007). *The economics of climate change : the Stern review*. Cambridge University press.
120. Sterner, T., et Persson, U. M. 2008. « An Even Sterner Review : Introducing Relative Prices into the Discounting Debate ». *Review of Environmental Economics and Policy* 2 (1) : 61-76.
<https://doi.org/10.1093/reep/rem024>.
121. Stocker, T. (Ed.). (2014). *Climate change 2013 : the physical science basis : Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
122. Suzuki, A., & Kawahata, H. (2004). Reef water CO₂ system and carbon production of coral reefs : Topographic control of system-level performance. *Global environmental change in the ocean and on land*, 229-248.
123. Tardieu, L., Roussel, S., & Salles, J. M. (2013). Assessing and mapping global climate regulation service loss induced by Terrestrial Transport Infrastructure construction. *Ecosystem Services*, 4, 73-81.
124. TEEB DE (2015). *Natural capital and climate policy – Synergies and conflicts. Summary for decision makers. Original german version 2014*. Technische Universität Berlin, Helmholtz Centre for Environmental Research – UFZ, Leipzig.
125. Telesca, L., Belluscio, A., Criscoli, A., Ardizzone, G., Apostolaki, E.T., Fraschetti, S.,... & Alagna, A. (2015). Seagrass meadows (*Posidonia oceanica*) distribution and trajectories of change. *Scientific reports*, 5.
126. Tibi A., Therond O. (2017). *Evaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFESÉ. Synthèse du rapport d'étude*, Inra (France), 118 pages.
127. United Nations Statistical Division, 2013. *System of Environmental-Economic Accounting : Experimental Ecosystem Accounting – Official publication*.
128. Valade, A., Bellassen, V., Magand, C., & Luyssaert, S. (2017). Sustaining the sequestration efficiency of the European forest sector. *Forest Ecology and Management*, 405, 44-55.
129. Virto, I., Barré, P., Burlot, A., & Chenu, C. (2012). Carbon input differences as the main factor explaining the variability in soil organic C storage in no-tilled compared to inversion tilled agrosystems. *Biogeochemistry*, 108 (1-3), 17-26.
130. Weber, J.-L. (2014). *Ecosystem Natural Capital Accounts : A Quick Start Package*, Montreal, Technical Series No. 77, Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 252 pages.
131. Wilmers, C. C., Estes, J. A., Edwards, M., Laidre, K.L., & Konar, B. (2012). Do trophic cascades affect the storage and flux of atmospheric carbon ? An analysis of sea otters and kelp forests. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10 (8), 409-415.
132. Yongyang, C., Judd, K. L., Lenton, T. M., Lontzek, T.S. et Narita, D.. 2015. Environmental Tipping Points Significantly Affect the Cost-benefit Assessment of Climate Policies. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112 (15) : 4606-11.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1503890112>.



LA SÉQUESTRATION DE CARBONE PAR LES ÉCOSYSTÈMES EN FRANCE

Annexes

ANNEXE I

Table des sigles

Ademe	: Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AEE	: Agence européenne pour l'environnement
CCNUCC	: Convention cadre des Nations Unies pour le changement climatique
CDB	: Convention sur la diversité biologique
Cerema	: centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CGDD	: Commissariat général au développement durable
Citepa	: Centre Interprofessionnel Technique d'Étude de la Pollution
CLC	: Corine land cover
CNPF	: Centre national de la propriété forestière
CNRS	: Centre national de la recherche scientifique
CST	: Conseil scientifique et technique
Cifor	: Centre de recherche forestière internationale
Cirad	: Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
Cired	: Centre international de recherche sur l'environnement et le développement
Citepa	: Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique
Copil	: Comité de pilotage
DAEI	: Direction des affaires européennes et internationales
DEB	: Direction de l'eau et de la biodiversité
DGALN	: Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature
DGEC	: Direction générale de l'énergie et du climat
DGPE	: Direction générale de la performance économique et environnementale des entreprises
DRI	: Direction de la recherche et de l'innovation
Efese	: Évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques
FAO	: Food and agriculture organization
FCBA	: Institut technologique forêt, construction, bois, ameublement
FCEN	: Fédération des Conservatoires d'espaces naturels
GES	: Gaz à effet de serre
Giec	: Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat
Gip Ecofor	: Groupement d'intérêt public écosystèmes forestiers
Greco	: Grandes régions écologiques
I4C	: Institute for climate economics
IEES	: Institut d'Ecologie et des Sciences de l'Environnement
IFN	: Inventaire forestier national
Ifremer	: Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer
IGN	: Institut national de l'information géographique et forestière
INPN	: Inventaire national du patrimoine naturel
Inra	: Institut national de la recherche agronomique
IPBES	: Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques
IPSL	: Institut Pierre-Simon-Laplace
Irstea	: Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
IUEM	: Institut universitaire européen de la mer
LSCE	: Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement
LTECV	: Loi sur la transition énergétique pour une croissance verte
MAA	: Ministère de l'agriculture et de l'alimentation

Maes : Mapping and assessment of ecosystems and their services
MEA : Millenium ecosystem assessment
MTES : Ministère de la Transition écologique et solidaire
OCDE : Organisation de coopération et de développement économique
Onerc : Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique
ONF : Office national des forêts
ONG : Organisation non-gouvernementale
PIB : Produit intérieur brut
RCP : Representative concentration pathways
Sdes : Service de la donnée et des études statistiques (ex. SOeS)
SE : Service écosystémique
Seeidd : Service de l'économie de l'évaluation et de l'intégration du développement durable
SG : secrétariat général
SNB : Stratégie nationale pour la biodiversité
SNBC : Stratégie nationale bas carbone
SNMB : Stratégie nationale de mobilisation de la biomasse
SNTEDD : Stratégie nationale pour la transition écologique vers un développement durable
SSP : Service de la statistique et de la prospective
UBO : Université de Bretagne Occidentale
UICN : Union internationale pour la conservation de la nature
UPMC : Université Pierre et Marie Curie
UTCATF : utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie
ZEE : zone économique exclusive

ANNEXE 2

Glossaire

Remarque préliminaire : certaines définitions sont adaptées à partir des glossaires existants de l'Évaluation Française des Écosystèmes et des Services Écosystémiques (EFESE)¹ et du GIEC². D'autres sont proposées pour les besoins de cette étude.

Avantages [Benefits] : Augmentation d'un indicateur traduisant l'atteinte d'un objectif, la satisfaction d'un besoin ou d'un désir. Les avantages que les sociétés humaines retirent des écosystèmes s'expriment autour des grandes composantes suivantes : la santé, la qualité du cadre de vie, la qualité des relations sociales, les besoins économiques, le besoin de sécurité, tant économique que physique, et la réduction des inégalités sociales et territoriales.

Bien [Good] : Élément tangible. Un bien peut être de consommation, et destiné au consommateur final, ou de production, et concourir à l'élaboration des biens de consommation.

Biodiversité [Biodiversity] : Variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie ; cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces ainsi que celle des écosystèmes.

Biomasse [Biomass] : Masse totale des organismes vivants dans un périmètre ou un volume donné ; les végétaux morts peuvent être inclus en tant que biomasse morte. La combustion de la biomasse est la combustion des organismes végétaux vivants ou morts.

Biosphère [Biosphere] : Partie du système Terre comprenant tous les écosystèmes et organismes vivants présents dans l'atmosphère, sur terre (biosphère terrestre) ou dans les océans (biosphère marine), y compris la matière organique morte qui en provient, telle que la litière, la matière organique des sols et les détritiques des océans.

Bouquet de biens et services écosystémiques [Bundle of ecosystem good and services] : Ensemble de services écosystémiques qui sont régulièrement observés ensemble dans le temps et/ou l'espace.

Carbone bleu [Blue carbon] : processus de séquestration du carbone dans les écosystèmes marins (pompe biologique) et côtiers (mangroves, herbiers, marais côtiers, etc.).

Carbone organique [Organic carbon] : carbone lié dans un composé organique, c'est-à-dire contenant au moins l'élément carbone et un ou plusieurs des éléments suivants : hydrogène, halogènes, oxygène, soufre, phosphore, silicium ou azote, à l'exception de certains carbonates, bicarbonates et oxydes de carbone simples (d'après directive 1999/13/CE). Originellement, le carbone organique désigne le carbone contenu dans une substance formée par les organismes vivants.

Carbone inorganique [Inorganic carbon] : voir *carbone minéral*.

Carbone minéral [Mineral carbon] : Tout carbone non organique. Synonyme : carbone inorganique.

Captation de carbone [Carbon capture] : retrait de composés carbonés, principalement le dioxyde de carbone, de l'atmosphère.

Changement d'affectation des terres [Land use change] : changement apporté par l'Homme dans l'utilisation ou la gestion des terres, qui peut entraîner une modification de la couverture terrestre³.

Compartiment [Compartment] : voir *Réservoir de carbone*.

Couverture des terres [Land cover] : Couverture physique et biologique observée des sols, telles que la végétation ou des ouvrages érigés par l'Homme. Dans cette étude, la couverture des terres telle que rapporté par le système Corine Land Cover (CLC) est utilisée comme première approximation des types d'écosystèmes.

Ecosystème [ecosystem] : Complexe dynamique de populations végétales, animales et de micro-organismes (biocénose), associées à leur milieu non-vivant (biotope) et interagissant en tant qu'unité fonctionnelle.

Équivalent CO₂ [CO₂ equivalent] : Concentration de dioxyde de carbone qui entraînerait le même forçage radiatif qu'un mélange donné de dioxyde de carbone et d'autres facteurs de forçage. Parmi ces facteurs, on peut ne tenir compte que des gaz à effet de serre ou alors à la fois des gaz à effet de serre et des aérosols. Si la concentration en équivalent CO₂ est une mesure permettant de comparer le forçage radiatif d'un mélange de différents gaz à effet de serre à un moment donné, elle n'implique cependant pas d'équivalence en ce qui concerne les réponses correspondantes du changement climatique ou le forçage futur. Il n'existe en général aucune corrélation entre des émissions en équivalent CO₂ et les concentrations en équivalent CO₂ qui en résultent.

Dioxyde de carbone (CO₂) [Carbon dioxide] : Gaz d'origine naturelle ou résultant de la combustion des combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon, etc.) et de la biomasse ainsi que des changements d'affectation des terres (ex : déforestation) et d'autres procédés industriels (ex : production de ciment). C'est le principal gaz à effet de serre anthropique qui influe sur le bilan radiatif de la Terre. C'est aussi le gaz de référence pour la mesure des autres gaz à effet de serre.

Écosystème [Ecosystem] : Complexe dynamique de populations végétales, animales et de micro-organismes (biocénose), associées à leur milieu non-vivant (biotope) et interagissant en tant qu'unité fonctionnelle.

Émission de carbone [Carbon emission] : émission de composés carbonés au sein de l'atmosphère. Ces composés peuvent être des gaz à effet de serre (CH₄, CO₂), mais aussi des aérosols ou des précurseurs de gaz à effet de serre ou d'aérosol carbonés.

Flux de séquestration *in situ* [*In situ sequestration flux*] : Sur une période donnée, le flux de séquestration *in situ* peut être approché par la variation du stock de carbone organique contenu dans le compartiment considéré.

Flux perpétuel de séquestration *in situ* de référence : niveau du flux de carbone séquestré de manière permanente dans un compartiment de l'écosystème considéré qui peut être maintenu perpétuellement pour un hectare d'un type donné.

Incertitude [*Uncertainty*] : Degré de connaissance incomplète pouvant découler d'un manque d'information ou d'un désaccord sur ce qui est connu, voire connaissable. L'incertitude peut avoir des origines diverses et résulter ainsi d'une imprécision dans les données, d'une ambiguïté dans la définition des concepts ou de la terminologie employés ou encore de projections incertaines du comportement humain. L'incertitude peut donc être représentée par des mesures quantitatives (ex. : une fonction de densité de probabilité ou par des énoncés qualitatifs (reflétant par exemple l'opinion d'une équipe d'experts).

Permanence [*Permanence*] : Dans ce cas se réfère à la persistance dans le temps de la séquestration *in situ* du carbone. La permanence peut être assurée par la grande stabilité du carbone séquestré dans un compartiment donné (par exemple, au sein des sédiments marins) ou par des processus écologiques qui compensent les pertes de carbone.

Pompe biologique marine [*Marine biological pump*] : Processus biologique marin qui transporte le carbone, des eaux de surface aux profondeurs océaniques, grâce à la production primaire du phytoplancton qui transforme le carbone inorganique dissout et les nutriments en matière organique par la photosynthèse. Ce cycle naturel est tributaire essentiellement de la lumière et de la teneur des eaux en nutriments (phosphate, nitrate, acide silicique, etc.) et en micronutriments (fer, etc.). Voir aussi *Pompe de solubilité*.

Pompe de solubilité [*Solubility pump*] : Processus physico-chimique marin qui transporte le carbone inorganique dissout, des eaux de surface vers des eaux plus profondes. Ce processus régule l'inventaire du carbone dans l'océan. Les concentrations du dioxyde de carbone dans l'océan et dans l'atmosphère contiguë sont fonction de la solubilité de ce gaz. Voir aussi *Pompe biologique marine*.

Pratique séquestrante [*Sustainable management affecting sources or sinks of greenhouse gases*] : pratique volontaire associée à une séquestration de carbone additionnelle et susceptible de se maintenir à long terme.

Puits de carbone [*Carbon sink*] : Tout processus, activité ou mécanisme qui retire de l'atmosphère un gaz à effet de serre, un aérosol ou un précurseur de gaz à effet de serre ou d'aérosol carbonés. Lorsqu'un écosystème capte davantage de CO₂ qu'il n'en émet dans l'atmosphère, on dit qu'il est un puits de carbone. Les puits *anthropiques* de carbone comprennent les processus industriels de capture et de stockage du carbone ainsi que les puits de carbone associés aux écosystèmes gérés par l'Homme.

Production primaire brute (PPB) [*Gross primary production (GPP)*] : Quantité de carbone fixé par les organismes autotrophes lors du processus de photosynthèse (ex. : certaines plantes et algues).

Réservoir de carbone [*Carbon reservoir*] : composante du système climatique, autre que l'atmosphère, ayant la capacité de stocker, d'accumuler ou de libérer du carbone. Les océans, les sols et les forêts sont des exemples de réservoirs de carbone. On appelle stock la quantité absolue de substance potentiellement nocive contenue dans un réservoir à un moment donné. Synonyme : compartiment.

Rétroaction climatique [*Climate retroaction*] : Interaction selon laquelle une perturbation touchant une variable climatique provoque, dans une seconde, des changements qui influent à leur tour sur la variable initiale. Une rétroaction positive renforce la perturbation initiale, alors qu'une rétroaction négative l'atténue.

Scénario [*Scenario*] : Description fondée sur un ensemble cohérent et homogène d'hypothèses concernant les principales forces motrices (rythme de l'évolution technologique, prix, etc.) et des relations déterminant les évolutions futures d'un ensemble de paramètre d'intérêt. Les scénarios ne sont ni des prédictions ni des prévisions, mais permettent de mieux cerner les conséquences de différentes évolutions ou actions.

Séquestration du carbone [*Carbon capture and storage*] : captation et maintien de carbone en dehors de l'atmosphère. On distingue la séquestration *in situ* lorsque le carbone capté par un écosystème est maintenu en son sein et la séquestration *ex situ* lorsque le carbone est maintenu durablement hors de l'atmosphère mais en dehors de l'écosystème considéré.

Service écosystémique [*Ecosystem service*] : utilisation par l'Homme des fonctions des écosystèmes, à travers des usages et une réglementation qui encadrent cette utilisation.

Service environnemental [*Environmental service*] : action humaine volontaire et additionnelle à la réglementation existante qui améliore l'état de l'environnement au profit d'autres bénéficiaires ou de la société dans son ensemble. Des *pratiques séquestrantes* peuvent être considérées comme des services environnementaux dès lors qu'elles ne s'accompagnent pas d'effets indésirables jugés plus importants.

Source de carbone [*Carbon source*] : Lorsqu'un écosystème capte moins de CO₂ qu'il n'en émet au sein de l'atmosphère à un moment donné, on dit qu'il est une source de carbone.

Stock de carbone [*Carbon stock*] : Quantité de carbone potentiellement mobile contenue dans un compartiment de l'écosystème.

Stock de carbone *in situ* de référence : stock actuel moyen de carbone au sein de l'ensemble des compartiments du type d'écosystème considéré.

Stockage du carbone [*Carbon storage*] : Maintien de carbone dans un réservoir, lorsque celui-ci est amené de l'extérieur. Le Giec parle de piégeage comme l'incorporation d'une substance potentiellement nocive dans un réservoir et le piégeage de substances contenant du carbone, en particulier le dioxyde de carbone, est souvent appelé séquestration (du carbone).

Substitution [*Substitution*] : Fait référence aux émissions de CO₂ évitées lors de l'usage de bois dans le secteur de l'énergie ou des matériaux.

Utilisation des terres [*Land use*] : ensemble des dispositions, activités et apports par type de couverture terrestre (ensemble d'activités humaines). Ce terme est également utilisé pour définir les objectifs sociaux et économiques de l'exploitation des terres (pâturage, exploitation forestière, conservation, etc.)⁴.

Valeur [*Value*] : Norme qui guide les jugements ou les actions. S'agissant de la biodiversité, la valeur peut constituer une mesure de la contribution des écosystèmes au bien-être humain, refléter son importance pour les sociétés humaines comme éléments de patrimoine naturel, ou découler de règles morales collectives régissant les liens entre les sociétés et l'environnement (CGDD, 2017).

Valeur de référence [*Reference value*] : valeur destinée à faciliter la prise en compte cohérente d'un enjeu général par un ensemble d'acteurs. Une valeur de référence peut être qualifiée de *tutélaire* dès lors qu'elle est fixée et utilisée par la puissance publique pour faire prendre en compte et atteindre des objectifs relatifs à des biens relevant de l'action publique.

Valeur monétaire [*Monetary value*] : Valeur exprimée en unités monétaires d'un bien ou service. Cette valeur peut refléter une valeur marchande mais aussi chercher à rendre comparable la valeur de différents éléments, marchands ou non, afin d'éclairer les choix.

Variation de stock *in situ* à long terme de référence : équivalent certain moyen des perspectives de séquestration additionnelle de carbone pour un hectare d'un type donné ; cette variation s'interprète comme le niveau d'une séquestration de carbone additionnelle et permanente pour un hectare d'un type donné de valeur jugée équivalente aux perspectives réelles, et donc nécessairement incertaines, en la matière ; cette valeur dépend notamment de ces incertitudes et de nos attitudes face à elles.

^{1.} CGDD, 2017.

^{2.} GIEC, 2013.

^{3.} Voir aussi le rapport spécial du GIEC portant sur l'utilisation des terres, les changements d'affectation des terres et la foresterie (IPCC, 2000)

^{4.} Voir aussi le rapport spécial du GIEC portant sur l'utilisation des terres, les changements d'affectation des terres et la foresterie (IPCC, 2000)

ANNEXE 3

Typologie détaillée

Cette annexe présente la typologie retenue pour cette étude. Les types sont organisés en cinq ensembles :

- l. Les écosystèmes forestiers ;
- l. Les écosystèmes agricoles ;
- l. Les autres écosystèmes naturels terrestres
- l. Les écosystèmes artificialisés et les terres dégradées
- i. Les écosystèmes marins

À chaque fois, l'esprit de la typologie retenue est brièvement rappelé, l'ensemble des types est présenté et chaque type est caractérisé individuellement.

Les écosystèmes forestiers

Les écosystèmes forestiers regroupent l'ensemble des écosystèmes à dominante arbustive ou arborée (taux de couvert des arbres, arbuste et arbrisseaux supérieur à 10 %) ou amenés à le devenir (espaces incendiés par exemple) et dont l'usage dominant n'est ni agricole (agroforesterie, vignes et certains vergers) ni urbain (parcs et jardins). La typologie proposée distingue 23 types.

Tableau 7 :

Libellés des types d'écosystèmes forestiers. Remarque : les types n'ayant pas pu être évalués dans le cadre de cette étude sont indiqués en gris

		Tous usages
Océanique	Forêt fermée feuillu	F1_ATL_0
	Forêt fermée conifère	F2_ATL_0
	Forêt fermée mixte	F3_ATL_0
	Forêt ouverte	F4_ATL_0
	Landes, garrigues et maquis	F5_ATL_0
Continentale	Forêt fermée feuillu	F1_CTL_0
	Forêt fermée conifère	F2_CTL_0
	Forêt fermée mixte	F3_CTL_0
	Forêt ouverte	F4_CTL_0
	Landes, garrigues et maquis	F5_CTL_0
Méditerranéenne	Forêt fermée feuillu	F1_MED_0
	Forêt fermée conifère	F2_MED_0
	Forêt fermée mixte	F3_MED_0
	Forêt ouverte	F4_MED_0
	Landes, garrigues et maquis	F5_MED_0
Alpine	Forêt fermée feuillu	F1_ALP_0
	Forêt fermée conifère	F2_ALP_0
	Forêt fermée mixte	F3_ALP_0
	Forêt ouverte	F4_ALP_0
	Landes, garrigues et maquis	F5_ALP_0
Outre-mer	Forêt tropicale guyanaise	F6_OM(G)_0
	Forêt tropicale non-guyanaise	F6_OM(NG)_0
	Landes	F4_OM_0

Remarque : les types n'ayant pas pu être évalués dans le cadre de cette étude sont indiqués en gris.

Ecosystèmes

Sur le plan écologique, la typologie met l'accent sur le taux de couvert, la nature des peuplements et les zones biogéographiques.

Forêt fermée de feuillus (F1)

Forêt dont le taux de couvert libre des arbres est supérieur ou égal à 40 % et dont le taux de couvert libre relatif des feuillus, y compris peupliers cultivés est supérieur ou égal à 75 %. Regroupe les peuplements monospécifiques de feuillus et les peuplements de feuillus mélangés. Regroupe aussi les forêts fermées de feuillus sans couvert arboré.

Forêt fermée de conifères (F2)

Forêt dont le taux de couvert libre des arbres est supérieur ou égal à 40 % et dont le taux de couvert libre relatif des conifères est supérieur ou égal à 75 %. Regroupe les peuplements monospécifiques de conifères et les peuplements de conifères mélangés. Regroupe aussi les forêts fermées de conifères sans couvert arboré.

Forêt fermée mixte (F3)

Forêt dont le taux de couvert libre des arbres est supérieur ou égal à 40 % et dans laquelle ni le taux de couvert libre relatif des conifères, ni le taux de couvert libre relatif des feuillus, n'est supérieur à 75 %. Regroupe les peuplements monospécifiques de feuillus et de conifères non différenciables (l'essence principale n'atteint pas 75 % du couvert libre relatif mais dépasse 50 %, et où

aucune des autres essences n'atteint le seuil de recensabilité de 15 % ou bien le regroupement des essences appartenant à un même groupe (feuillu ou conifère) est tel qu'aucun des deux groupes ne dépasse le taux de couvert libre relatif de 75 %) et les peuplements mélangés de feuillus et de conifères. Regroupe aussi les forêts fermées de feuillus et de conifères sans couvert arboré.

Forêts ouvertes (F4)

Forêts pour lesquelles le taux de couvert libre des arbres est compris entre 10 % et 40 %.

Forêts ouvertes sans couvert arboré : Forêt ouverte ayant subi un changement brutal de couverture du sol suite à une perturbation anthropique (coupe rase) ou un incident (tempête, incendie, etc.). Le terrain peut présenter les traces d'une régénération acquise.

Forêt ouverte de feuillus : Forêt ouverte de feuillus ayant un taux de couvert libre relatif des feuillus compris supérieur à 75 %.

Forêt ouverte de conifères : Forêt ouverte de conifères ayant un taux de couvert libre relatif des conifères supérieur à 75 %.

Forêt ouverte de mixte : Forêt ouverte dans laquelle ni le taux de couvert libre relatif des conifères, ni le taux de couvert libre relatif des feuillus n'est supérieur à 75 %.

Lande, garrigues et maquis (F5)

La végétation qui constitue une lande est une végétation spontanée qui comprend une proportion élevée de plantes ligneuses (bruyères, genêts, ajoncs, épineux divers) et semi-ligneuses (fougères, phragmites, etc.) dont la hauteur ne dépasse pas 5 mètres et le couvert est supérieur à 25 %.

Forêt tropicale de Guyane (F6_OM(G))

Pratiques

Sur le plan des pratiques, la typologie n'opère pas de distinction et suppose que le taux annuel de prélèvement de l'accroissement naturel actuel moyen se maintient au niveau actuel.

Les autres écosystèmes naturels terrestres

Les autres écosystèmes naturels terrestres regroupent les écosystèmes terrestres, continentaux et littoraux, non-forestiers et faiblement anthropisés. La typologie retenue distingue 22 types.

Tableau 8 :

Libellés des types d'écosystèmes naturels terrestres

		Tous usages	Protégé	Non-protégé		
Océanique	Pelouses et pâturages naturels	EN1_ATL_0				
Continentale		EN1_CTL_0				
Méditerranéenne		EN1_MED_0				
Alpine		EN1_ALP_0				
Métropole	Zones humides continentales (hors tourbières)	EN2_MET_0				
	Tourbières				EN3_MET_P	EN3_MET_NP
	Milieux aquatiques continentaux	EN4_MET_0				
	Zones humides littorale	EN5_MET_0				
	Lagunes et lagons	EN6_MET_0				
	Plages, dunes, sables	EN7_MET_0				
	Roches nues, glaciers, neiges éternelles	EN8_MET_0				
Outre-mer	Pelouses et pâturages naturels	EN1_OM_0				
	Zones humides continentales (hors tourbières)	EN2_OM_0				
	Tourbières	EN3_OM_0				
	Milieux aquatiques continentaux	EN4_OM_0				
	Zones humides littorale	EN5_OM_0				
	Lagunes et lagons	EN6_OM_0				
	Plages, dunes, sables	EN7_OM_0				
	Roches nues, glaciers, neiges éternelles	EN8_OM_0				
	Mangroves				EN9_OM_P	EN9_OM_NP

Remarque : les types n'ayant pas pu être évalués dans le cadre de cette étude sont indiqués en gris.

Ecosystèmes

Pelouses et pâturages naturels (EN1)

Espaces à dominante herbacée (taux de couvert des arbres, arbuste et arbrisseaux inférieur à 10 %) non-pâturées dans le cadre des activités d'élevage et hors des zones urbaines.

Zones humides continentales (hors tourbières ; EN2)

Zones humides, marais intérieurs (terres basses généralement inondées en hiver et plus ou moins saturées d'eau en toutes saisons).

Tourbières (EN3)

Terrains spongieux humides dont le sol est constitué principalement de mousses et de matières végétales décomposées. Zones humides exploitées ou non dans lesquelles s'accumule la tourbe.

Milieux aquatiques continentaux (EN4)

Cours d'eau naturels ou artificiels qui servent de chenal d'écoulement des eaux. Y compris les canaux. Largeur minimale de prise en compte : 100 mètres. Étendues d'eau, naturelles ou artificielles, de plus de 25 hectares.

Zones humides littorales (EN5)

Marais maritimes : Terres basses avec végétation, situées au-dessus du niveau de marée haute, susceptibles cependant d'être inondées par les eaux de mer. Souvent en voie de colmatage, colonisées petit à petit par des plantes halophiles (vivant en milieu salé).

Marais salants : Salines actives ou en voie d'abandon. Parties des marais maritimes mises en exploitation pour la production de sel par évaporation. Les marais salants se distinguent nettement du reste des marais par leurs parcellaires d'exploitation et leur système de digues.

Zones intertidales : Étendues de vase, de sable ou de rochers généralement sans végétation, comprises entre le niveau des hautes et des basses eaux. Sédiments intertidaux associés.

Lagunes et lagons (EN6)

Étendues d'eau salée ou saumâtre sans végétation, séparées de la mer par des avancées de terre ou autres topographies similaires. Ces surfaces en eau peuvent être mises en communication avec la mer à certains endroits ponctuels, soit de façon permanente, soit de façon périodique à certains moments de l'année.

Plages, dunes et sables (EN7)

Plages, dunes et sables. Les plages, les dunes et les étendues de sable ou de galets du milieu littoral et continental, y compris les lits mineurs des rivières à régime torrentiel.

Roches nues, glaciers et neiges éternelles (EN8)

Roches nues (éboulis, falaises, rochers, affleurements), glaciers et neiges éternelles de haute montagne.

Mangroves (EN9)

Forêts littorales, localisées dans la zone de balancement des marées au sein des baies et des estuaires et dominées par les palétuviers.

Pratiques

Pour certains types d'écosystèmes, des modes de gestion sont différenciés selon qu'ils font l'objet ou non d'une protection spécifique.

Espaces protégés (P)

Les écosystèmes protégés désignent ceux soumis à un régime de protection qui garantit le maintien d'une dynamique naturelle à travers la régulation des usages qui affectent significativement ces dynamiques. Sont considérés comme protégés dans cette étude les écosystèmes relevant des réglementations et périmètres suivants :

- Parcs Nationaux ;
- Aires Marines Protégées (dont Parcs Naturels Marins) ;
- Zones humides classées au titre de la convention RAMSAR ;
- Zones acquises par le Conservatoire du littoral.

Espaces non-protégés (NP)

Les écosystèmes naturels situés en dehors des périmètres considérés ci-dessus.

Les écosystèmes agricoles

Les écosystèmes agricoles regroupent l'ensemble des écosystèmes à vocation agricole. Il regroupe des écosystèmes dont le couvert végétal est principalement herbacé (prairies, grandes cultures) mais aussi des espaces boisés (vignes et certains vergers). La typologie proposée met l'accent sur les pratiques culturelles et distingue 31 types.

Tableau 9 :

Libellés des types d'écosystèmes agricoles définis

		Sans pratiques séquestrantes	Labour occasionnel	Semis direct	Cultures intermédiaires	Cultures intercalaires et enherbement	Tous usages
Océanique	Cultures annuelles	AI_ATL_1	AI_ATL_2	AI_ATL_3	AI_ATL_4		
	Cultures pérennes	A2_ATL_1				A2_ATL_2	
	Prairies						P_ATL_0
Continentele	Cultures annuelles	AI_CTL_1	AI_CTL_2	AI_CTL_3	AI_CTL_4		
	Cultures pérennes	A2_CTL_1				A2_CTL_2	
	Prairies						P_CTL_0
Méditerranéenne	Cultures annuelles	AI_MED_1	AI_MED_2	AI_MED_3	AI_MED_4		
	Cultures pérennes	A2_MED_1				A2_MED_2	
	Prairies						P_MED_0
Alpine	Cultures annuelles	AI_ALP_1	AI_ALP_2	AI_ALP_3	AI_ALP_4		
	Cultures pérennes	A2_ALP_1				A2_ALP_2	
	Prairies						P_ALP_0
Outre-mer	Cultures annuelles	AI_OM_1	AI_OM_2	AI_OM_3	AI_OM_4		
	Cultures pérennes	A2_OM_1				A2_OM_2	
	Prairies						P_OM_0

Remarque : les types n'ayant pas pu être évalués dans le cadre de cette étude sont indiqués en gris.

Les terres cultivées

La présentation des types mêle directement types d'écosystèmes et pratiques.

Cultures annuelles sans pratiques séquestrantes (AI)

Surfaces arables de grandes cultures avec un travail du sol conventionnel (labour) sans cultures intermédiaires.

Cultures annuelles avec labour occasionnel (AI_2)

Surfaces arables de grandes cultures avec un travail du sol occasionnel (agriculture de conservation) sans cultures intermédiaires.

Cultures annuelles en semis direct (AI_3)

Surfaces arables de grandes cultures sans aucun travail du sol (semis direct) sans cultures intermédiaires.

Cultures annuelles avec cultures intermédiaires (AI_4)

Surfaces arables de grandes cultures faisant l'objet de cultures intermédiaires semées entre deux cultures de vente (couverts temporaires de 3 à 6 mois selon la durée de l'interculture).

Cultures pérennes sans mise en place de pratiques culturales additionnelles spécifiques au carbone (A2_1)

Vignobles avec ou sans cultures intercalaires anciennes et vergers et oliveraies enherbés depuis longtemps ou non enherbés. Y compris aussi les chataigneraies et les noiseraies, les oliviers et vignes sur la même parcelle, les arbres fruitiers associés à des surfaces toujours en herbe.

Cultures pérennes avec cultures intercalaires ou enherbement récent (A2_2)

Vignobles avec cultures intercalaires récentes ou sans cultures intercalaires et vergers avec enherbement récent.

Les prairies

Prairies (P)

Prairies agricoles, estives, parcours paturées, steppes, toundras et végétation rare de haute altitude paturées. Y compris les pelouses alpines, les pelouses montagnardes pastorales, les pelouses pastorales des garrigues et maquis paturés.

Les écosystèmes artificialisés et les terres dégradées

Les écosystèmes artificialisés et terres dégradées regroupent l'ensemble des écosystèmes à vocation urbaine ainsi que les écosystèmes artificialisés ou fortement perturbés par l'activité de l'homme présente ou passée. La typologie proposée distingue 15 types.

Tableau 10 :
Libellé des types d'écosystèmes artificialisés

		Tous usages
Océanique	Zones artificialisées bâties	U1_ATL_0
	Espaces verts urbains	U2_ATL_0
	Terres dégradées	U3_ATL_0
Continentale	Zones artificialisées bâties	U1_CTL_0
	Espaces verts urbains	U2_CTL_0
	Terres dégradées	U3_CTL_0
Méditerranéenne	Zones artificialisées bâties	U1_MED_0
	Espaces verts urbains	U2_MED_0
	Terres dégradées	U3_MED_0
Alpine	Zones artificialisées bâties	U1_ALP_0
	Espaces verts urbains	U2_ALP_0
	Terres dégradées	U3_ALP_0
Outre-Mer	Zones artificialisées bâties	U1_OM_0
	Espaces verts urbains	U2_OM_0
	Terres dégradées	U3_OM_0

Zones artificialisées bâties (U1)

Cette catégorie désigne les espaces d'une surface supérieure à 25 ha qui font l'objet d'une utilisation qui s'accompagne de modifications des sols et de leur fonctionnement qui les rendent impropres à l'implantation de la végétation (excavation, imperméabilisation, etc.). Il s'agit :

Tissu urbain continu : Espaces structurés par des bâtiments. Les bâtiments, la voirie et les surfaces artificiellement recouvertes couvrent la quasi-totalité du sol. La végétation non linéaire et le sol nu sont exceptionnels.

Tissu urbain discontinu : Espaces structurés par des bâtiments. Les bâtiments, la voirie et les surfaces artificiellement recouvertes coexistent avec des surfaces végétalisées et du sol nu, qui occupent de manière discontinue des surfaces non négligeables.

Zones industrielles ou commerciales : Zones recouvertes artificiellement (zones cimentées, goudronnées, asphaltées ou stabilisées : terre battue, par exemple), sans végétation occupant la majeure partie du sol. Ces zones comprennent aussi des bâtiments et / ou de la végétation.

Réseaux routiers et ferroviaires et espaces associés : Autoroutes, voies ferrées, y compris les surfaces annexes (gares, quais, remblais) d'une largeur supérieure à 100 m.

Zones portuaires : Infrastructures des zones portuaires, y compris les quais, les chantiers navals et les ports de plaisance.

Aéroports et infrastructures associées : pistes, bâtiments et surfaces associées. Surfaces urbanisées dominées par des bâtiments.

Sites d'extraction de matériaux : Extraction de matériaux à ciel ouvert (sablères, carrières) ou d'autres matériaux (mines à ciel ouvert). Y compris gravières sous eau, à l'exception toutefois des extractions dans le lit des rivières.

Décharges : Décharges et dépôts des mines, des industries ou des collectivités publiques.

Chantiers : Espaces en construction, excavations et sols remaniés.

Ces espaces peuvent être caractérisés par un taux d'imperméabilisation.

Espaces verts urbains (U2)

Espaces verts urbains d'une surface supérieure à 25 ha. Y compris parcs urbains et cimetières avec végétation. Infrastructures des terrains de camping, des terrains de sport, des parcs de loisirs, des golfs, des hippodromes. Y compris les parcs aménagés non inclus dans le tissu urbain.

Ces espaces peuvent être caractérisés par un taux de couverture arboré.

Terres dégradées (U3)

Espaces ne faisant pas l'objet d'une utilisation économique et sur lesquels la végétation ne peut s'établir du fait d'une dégradation des sols. Ces espaces couvrent :

D'anciens sites artificialisés (voir catégorie UI) ne faisant plus l'objet d'une utilisation et n'ayant pas fait l'objet de travaux de restauration (anciennes mines et carrières, anciens sites d'orpaillage illégal en Guyane, etc.) ;

Des terres rendues stériles du fait d'une dégradation chimique (pollution) ou physique (érosion intense) des sols survenue au cours de l'ère industrielle (à partir de 1750).

Les écosystèmes marins

Les écosystèmes marins couvrent les régions métropolitaines et ultramarines de la zone économique exclusive française. La typologie proposée distingue 8 types.

Tableau 11 :

Libellés des types d'écosystèmes marins

		Tous usages	Protégé	Non protégé
Métropole	Eaux côtières (hors zones d'herbiers)	M1_MET_0		
	Zones d'herbiers		M2_MED_P	M2_MED_NP
	Eaux du large	M3_MET_0		
Outre-mer	Eaux côtières (hors zones d'herbiers)	M1_OM_0		
	Zones d'herbiers		M2_OM_P	M2_OM_NP
	Eaux du large	M3_OM_0		

Ecosystèmes

Eaux côtières (hors zones d'herbiers ; M1)

Toutes les eaux côtières, hors les zones d'herbiers. Y compris les estuaires (Parties terminales à l'embouchure des fleuves, subissant l'influence des eaux marines) et les eaux de transition propres aux milieux estuariens ou eaux côtières sous influence estuarienne.

Zones d'herbiers (M2)

Prairies sous-marines composées de plantes à fleurs. Pour les zones d'herbiers, une distinction supplémentaire est faite entre les façades atlantique et méditerranéenne.

Eaux du large (M3)

Eaux océaniques de la ZEE française.

Zones épipélagiques des eaux océaniques (0-200 mètres de profondeur),

Zones méso et bathypélagiques des eaux océaniques (>200 mètres de profondeur),

Sédiments subtidaux associés.

Pratiques

Comme pour certains écosystèmes naturels terrestres, les modes de gestion associés aux zones d'herbier sont différenciés selon qu'ils fassent, ou non, l'objet d'une protection spécifique (voir la section sur les autres écosystèmes naturels terrestres).

ANNEXE 4

Données collectées

Pour chaque élément de la typologie, le tableau ci-dessous reflète l'ensemble des données collectées. Ce tableau repose sur la spécification de quatre variables d'intérêt :

- Certaines variables issues de l'observation de l'état actuel des écosystèmes et de ses tendances d'évolution¹ ;
- Certaines variables issues de projections².

Ces données sont nécessaires pour une évaluation pertinente du service à l'échelle nationale et pour le calcul de valeurs de référence pour l'évaluation socio-économique des projets et investissements à l'échelle locale.

Pour chaque donnée, les sources, les hypothèses et le niveau de confiance associés sont précisés.

Tableau I2 :

Données recherchées pour chaque type (écosystème x scénario de pratique)

Type <i>i</i>	Information recherchée	Compartiment	Scénario	Valeur moyenne	Incertitude	Sources
Situation actuelle (observation)	Stocks de carbone <i>in situ</i> actuel (en tC/ha)	Stock actuel hors niveau moyen des perturbations naturelles ^b (en tC/ha)	Biomasse			
			Sol/sédiments			
	Niveau des perturbations naturelles (en tC/ha)	Biomasse				
		Sol/sédiments				
	Niveau du flux de séquestration actuel (en tC/ha/an)	Biomasse				
		Sol/sédiments				
Perspectives futures (projections)	à l'horizon 2050	Variation espérée des stocks de carbone <i>in situ</i> (en tC/ha, y.c. niveau moyen de perturbations naturelles)	Biomasse	Climat constant		
				RCP 2.6		
				RCP 4.5		
				RCP 6		
				RCP 8,5		
			Sol/sédiments	Climat constant		
				RCP 2.6		
				RCP 4.5		
				RCP 6		
				RCP 8,5		
		Export annuel de carbone sous forme de biomasse sur la période 2010-2050 (en tC/ha/an) ^c				
	à long terme, selon des considérations pertinentes au regard du fonctionnement de l'écosystème (à préciser ^d)	Variation espérée des stocks de carbone <i>in situ</i> (en tC/ha, y.c. niveau moyen de perturbations naturelles)	Biomasse	Climat constant		
				RCP 2.6		
				RCP 4.5		
				RCP 6		
				RCP 8,5		
			Sol/sédiments	Climat constant		
				RCP 2.6		
				RCP 4.5		
				RCP 6		
				RCP 8,5		
	Export annuel moyen continu de carbone sous forme de biomasse à long terme (en tC/ha/an)					
	Flux perpétuel de séquestration de long terme (en tC/ha/an)		Climat constant			
			RCP 2.6			
			RCP 4.5			
			RCP 6			
			RCP 8,5			
Autres informations	Surfaces actuelles (en ha)					
	Sources cartographiques					
	Paramètres clés du point de vue de la séquestration du carbone ^e	Pour chaque information, niveau moyen au niveau national et relation paramétrique avec les données collectées qui en dépendent				
	Perspectives d'amélioration					

Liste des données à intégrer, des dépendances au changement climatique négligées, etc.

- a. Cette variance cumule la variabilité des situations au sein du type considéré, les incertitudes de mesure. Le renseignement d'une distribution explicite sera recherchée, qu'il s'agisse d'une distribution explicite, triangulaire, ou normale. En l'absence de telles informations, les niveaux seront renseignés sur une échelle qualitative à 5 niveaux pour laquelle des correspondances quantitatives seront proposées.
- b. Incendies, etc.
- c. Produits bois, etc.
- d. Idéalement, il s'agit d'une valeur moyenne à l'équilibre ou en « régime permanent », hors processus d'accumulation perpétuel.
- e. Les valeurs pourront être spécifiées de manière conditionnelle à un tel paramètre. Il pourra s'agir par exemple, du linéaire moyen de haies à l'hectare d'un écosystème agricole de grandes cultures.

Tableau 13 :

Valeurs dérivées des données collectées

Valeurs de référence	Stock de carbone <i>in situ</i> de référence (en tCO _{2eq} /ha)	-	S _i	-	
	Variation de stock <i>in situ</i> à long terme de référence (en tCO _{2eq} /ha)	-	ΔS _i	-	
	Flux perpétuel de séquestration <i>in situ</i> de référence (en tCO _{2eq} /ha/an)	-	f _i	-	
	Valeur monétaire du service (en €)	-	V _i	-	

- a. Valeurs calculées à partir des données recueillies.

1. il s'agit du stock actuel moyen au sein de différents compartiments.
2. il s'agit de la variation attendue des stocks de carbone à différents horizons et sous différentes hypothèses de changement climatique.

ANNEXE 5

Valeurs de référence – Méthode et résultats

Remarque préliminaire : le calcul de ces valeurs de référence est conduit en prenant 2017 comme année de référence. Leur utilisation à des dates ultérieures devra intégrer les évolutions de la valeur tutélaire du carbone.

Définitions

Pour chaque type, trois valeurs de référence biophysiques sont recherchées :

1. Le stock de carbone *in situ* de référence (S_i , en tCO_{2eq}/ha), qui reflète le stock actuel moyen de carbone au sein de l'ensemble des compartiments du type considéré ;
2. La variation de stock *in situ* à long terme de référence (ΔS_i , en tCO_{2eq}/ha), qui reflète la capacité de l'écosystème à séquestrer du carbone additionnel à long terme. Il correspond au niveau d'une séquestration, additionnelle et permanente, de valeur équivalente aux perspectives réelles, et donc nécessairement incertaines, en la matière ;
3. Le flux perpétuel de séquestration *in situ* de référence (f_i , en $tCO_{2eq}/ha/an$), qui reflète la capacité éventuelle de l'écosystème à séquestrer du carbone de manière perpétuelle dans les sols et les sédiments.

Méthode de calcul

Le calcul de la variation de stock *in situ* à long terme de référence s'appuie sur les préconisations de la commission Gollier qui distingue les risques non-systémiques dont la prise en compte se limite aux effets de moyenne, et les risques systémiques, dont la prise en compte inclut des effets de moyenne mais aussi une prime de risque. Cette valeur doit prendre en compte le caractère risqué de la séquestration *in situ* du carbone et notre degré d'aversion aux risques systémiques¹. Les risques non-systémiques incluent notamment les perturbations naturelles (incendies, maladies et ravageurs, etc.) dont le niveau de fond est à intégrer aux moyennes collectées². Les risques systémiques désignent des risques dont la réalisation survient surtout dans des scénarios d'évolution négative de l'économie. Ainsi le calcul repose sur la prise en compte du degré de corrélation de ces évolutions avec l'évolution du PIB³ (voir encadré 8). En ce qui concerne la séquestration de carbone au sein des écosystèmes, les principaux risques systémiques identifiés en matière de non-permanence des stocks de carbone sont ceux qui sont corrélés au changement climatique (risques nouveaux et aggravation des risques existants). Ce calcul reposera donc sur la donnée du devenir des stocks de carbone associés à l'écosystème considéré sous chacun des scénarios RCP de changement climatique.

En pratique, pour un hectare d'un écosystème du type i , on distingue ΔS_i le flux de séquestration réel à long terme au sein de cet écosystème. ΔS_i est une variable aléatoire qui représente les perspectives futures de séquestration de carbone au sein de cet écosystème et $E(\Delta S_i)$ en constitue l'espérance.

$E(\Delta S_i) = \pi_{RCP2.6} \Delta S_{RCP2.6} + \pi_{RCP4.5} \Delta S_{RCP4.5} + \pi_{RCP6.0} \Delta S_{RCP6.0} + \pi_{RCP8.5} \Delta S_{RCP8.5}$, où : π_{RCPx} est la probabilité subjective d'occurrence du scénario RCPx.

$E(\Delta S_i)$ reflète les effets de moyenne attendu du changement climatique étant donné des croyances subjectives sur les probabilités d'occurrence des différentes familles de scénarios de changement climatique RCP. Cependant, la seule prise en compte de tels effets de moyenne n'est pas suffisante pour l'évaluation de projets et investissements publics pour laquelle une aversion aux risques systémiques, c'est-à-dire ceux qui ne peuvent pas être mutualisés à l'échelle nationale, est recommandée (Gollier, 2011). Ainsi, la valeur pertinente concernant la séquestration attendue correspond à un niveau de séquestration permanent et certain, ΔS_i , qui soit équivalent à la dynamique incertaine considérée $\overline{\Delta S}_i$. Formellement, $\overline{\Delta S}_i$ constitue l'équivalent certain de la lotterie $(c_i, \Delta S_i)$. Elle est définie par la relation suivante :

$E(U(c_i + p_{2017} \frac{\Delta S_i}{pop})) = E(U(c_i + p_{2017} \frac{\overline{\Delta S}_i}{pop}))$, où c_i désigne le PIB par habitant, pop est la population française, p_{2017} désigne la valeur tutélaire du carbone pour l'année 2017, et U est une fonction d'utilité concave, d'aversion relative au risque constante et égale à 2⁴.

ΔS_i correspond à « l'équivalent certain » de perspectives futures et incertaines de séquestration de carbone par un écosystème donné. Cette valeur dépend d'hypothèses particulières, et en premier lieu des croyances concernant les probabilités d'occurrence des différents scénarii de réchauffement climatique.

En pratique, il convient de relever que cette approche permet d'aboutir à des valeurs au prix d'hypothèses fortes. Dans le rapport de la Commission Gollier, il est bien précisé que la méthode est sujette à caution dès lors que les projets présentent des risques environnementaux ou sanitaires importants car ceux-ci s'apparentent plus souvent à des incertitudes profondes qu'à des risques standards probabilisables avec une loi gaussienne. Il serait ainsi très audacieux de réduire la prise en compte des risques environnementaux ou sanitaires à une simple mesure de leur corrélation avec les fluctuations du PIB/hbt⁵. Ainsi, il est essentiel de bien relever que cette évaluation ne prend en compte qu'en partie le caractère incertain et risqué de ce puits et qu'elle néglige notamment la possibilité d'avènement de crises majeures (tempêtes, sécheresses, maladies et incendies, pouvant s'aggraver mutuellement).

Valeur du service

Le service de séquestration du carbone *in situ* est associé au maintien des stocks en place et aux perspectives futures de séquestration d'un écosystème. Le calcul d'une valeur monétaire V_i associée pour un hectare de l'écosystème du type considéré intègre trois composantes.

La première est celle liée au maintien des stocks en place, valorisée à hauteur du stock de carbone *in situ* de référence :

$p_{t_0} S_i$, où $t_0 = 2017$, et p_{t_0} désigne la valeur tutélaire du carbone à t_0 .

La deuxième est la valeur d'une variation de stock *in situ* à long terme au sein de compartiments à partir de la valeur de référence $\overline{\Delta S}_i$ qui correspond au niveau d'une séquestration, additionnelle et permanente, de long terme de valeur équivalente aux perspectives réelles, et donc nécessairement incertaines, en la matière. Comme le recommande la Commission Quinet (2013), nous supposons une croissance de la valeur tutélaire du carbone au rythme du taux d'actualisation sur la période qui conduit à la saturation des puits⁶, ce qui conduit à une formule simple :

$p_{t_0} \overline{\Delta S}_i$, où $t_0 = 2017$, et p_{t_0} désigne la valeur tutélaire du carbone à t_0 .

La dernière est la valeur associée à la capacité de quelques écosystèmes à séquestrer du carbone de manière perpétuelle dans les sols et les sédiments, dont l'évaluation soulève une difficulté supplémentaire. En effet, le maintien d'une valeur tutélaire du carbone croissant au rythme du taux d'actualisation au-delà de 2050, comme le propose la Commission Quinet, conduirait à accorder une valeur infinie à de tels puits. C'est pourquoi, nous supposons une stabilisation de la valeur tutélaire du carbone à partir de 2100⁷, ce qui permet de proposer un calcul de cette valeur selon la formule suivante :

$\sum_{t=t_0}^{2099} p_{t_0} f_i + \sum_{t=2100}^{\infty} \left(\frac{1}{1+r}\right)^{t-2100}$ qui peut se ré-écrire $(2100-t_0 + \frac{1+r}{r}) p_{t_0} f_i$ avec t_0 qui désigne l'année de référence et r qui désigne le taux d'actualisation.

Au final, et pour $t_0 = 2017$ et $r=0,045$, la valeur monétaire V_i du service de séquestration du carbone *in situ* s'écrit donc :

$V_i = p_{2017} (S_i + \overline{\Delta S}_i + 106 f_i)$ avec, p_{t_0} la valeur tutélaire du carbone en 2017.

Cette valeur V_i reflète la perte du service de séquestration *in situ* en cas de destruction de l'écosystème. Dans la plupart des cas, il s'agit d'évaluer des conversions entre types à travers les différences de valeur de référence.

On remarque cette valeur dépend linéairement de la valeur tutélaire du carbone⁸ ce qui indique qu'il est aisé d'actualiser cette valeur de référence en cas d'actualisation de la valeur tutélaire du carbone ou du choix d'une autre année de référence : il suffit de corriger les valeurs proposées pour 2017 du le taux d'évolution de la valeur tutélaire du carbone entre 2017 et le moment auquel est conduit l'évaluation.

Calibrage

Le calibrage des paramètres retenu pour le calcul de ces valeurs de référence repose, dans la mesure du possible, sur les préconisations existantes pour l'évaluation socio-économique des projets et investissements publics en France. En l'absence de préconisation, le choix des valeurs repose sur une revue de la littérature et une consultation des experts. Une analyse de la sensibilité des résultats à ces valeurs est aussi conduite.

Les valeurs retenues sont récapitulées dans le tableau 14 :

- Le produit intérieur brut (PIB) s'élève à 2 583 G € en 2017 et la population française à 66,95 millions d'habitants au 1er janvier 2017 (Insee) ; soit un PIB par habitant de 38 580 € / habitant ;
- Le taux d'actualisation est de 4,5 % ; la valeur retenue est celle préconisée pour l'évaluation des investissements publics (Quinet, 2013) ;
- La valeur du carbone retenue correspond à la valeur tutélaire du carbone (Quinet, 2009 et Quinet, 2103) ; elle est de 47,5 € en 2017 et croît ensuite au rythme du taux d'actualisation retenu ;
- L'attitude face aux risques non-assurables est celle recommandée par Gollier (2011) : une aversion relative au risque constante et égale à 2 ;
- Les probabilités relatives des différents scénarii de changement climatique RCP 2,6 ; 4,5, 6 et 8,5 sont de (1/3 ; 1/3 ; 1/3 ; 0) respectivement ; l'analyse de sensibilité considère des croyances pessimistes de (0 ; 1/3 ; 1/3 ; 1/3) et optimistes de (2/3 ; 1/6 ; 1/6 ; 0) ;
- L'impact du changement climatique sur le PIB est exprimé à partir de la notion d'équivalence de sentiers de croissance équilibrée⁹. Son calibrage est un exercice délicat. On retient ainsi un niveau de PIB équivalent de (1 ; 0,975 ; 0,95 ; 0,925) dans les scénarii RCP 2,6 ; 4,5, 6 et 8,5 respectivement ; les valeurs retenues pour l'analyse de sensibilité sont comprises entre (1 ; 0,9 ; 0,85 ; 0,8) et (1 ; 1 ; 1 ; 1).

L'évaluation du coût des dommages du changement climatique est un exercice délicat. Alors que les premières évaluations incorporées dans les modèles d'évaluation reposaient sur des fondements empiriques limités, les évaluations les plus récentes (Burke et coll., 2015 ; Dennig et coll., 2015 sur les effets de l'élévation du niveau de la mer) restent soumises à des limites qui les conduisent

à sous-estimer les coûts du changement climatique sur l'économie française et qui limitent leur pertinence pour l'exercice mené ici.

- Tout d'abord, la richesse à prendre en compte correspond à « la richesse collective, intégrant toutes sortes d'externalités » (Gollier, 2011, p.185) or ces estimations restreignent le champ des coûts aux seuls coûts économiques et négligent des pans entiers des coûts du changement climatique en termes de santé, d'inégalités¹⁰, de migrations subies, de conflits, de pertes de services écosystémiques¹¹, etc. Alors que les discussions existantes suggèrent qu'ils ne seront pas négligeables.
- Ensuite, ces estimations reposent sur des extrapolations menées à partir de l'observation de relations statistiques existantes et qui ne sont pas adaptées au caractère inédit et rapide des perturbations engendrées par le changement climatique et de la possibilité d'impacts inédits absents des données mobilisées pour le calibrage des relations.
- Ensuite, ces estimations reposent sur une mesure qui conduit à négliger les impacts de long terme, et donc les effets potentiellement les plus importants, du fait de l'actualisation des coûts. Par exemple, les dommages estimés par Burke et coll (2015) pour la France, bien que potentiellement positifs à court terme, négligent les coûts et les délais d'adaptation et masquent le fait qu'à l'horizon 2100, il y a 20 % de chances que les impacts économiques du changement climatique dépassent 20 % du PIB.
- Ensuite, ces estimations s'appuient sur une forme de calcul qui ne reflète pas les attitudes précautionneuses adaptées à ces contextes de fortes incertitudes et qui conduiraient à attribuer une prime à l'évitement de ces dommages.

Ces estimations, qui constituent néanmoins l'état de l'art sur le sujet, conduisent à estimer des coûts modérés de l'ordre de quelques pourcents dans un scénario RCP 8.5 et pouvant même s'avérer positifs pour la France¹² (tandis que le monde subirait des coûts considérables dans l'ensemble).

Du fait des limites évoquées qui conduisent ces évaluations à sous-estimer les coûts du changement climatique et de la nécessité d'adopter une attitude précautionneuse face aux fortes incertitudes associées à ces changements, il est proposé d'adopter les valeurs suivantes :

- RCP 2,6 : 0 % (référence) ;
- RCP 4,5 : -2,5 % (intervalle : -10 % ; 0 %) ;
- RCP 6 : -5 % (intervalle : -15 % ; 0 %) ;
- RCP 8,5 : -7,5 % (intervalle : -20 % ; 0 %).

Ces valeurs, jugées raisonnables par les experts consultés¹³, sont supérieures aux valeurs obtenues à partir des modèles les plus récents pour les raisons détaillées ci-dessus. Elles sont néanmoins inférieures aux valeurs des coûts des dommages retenues par la Commission Stern (2007) qui, en s'appuyant sur des taux d'actualisation très éloignés de ceux retenus pour cette étude aboutissait à un coût du changement climatique atteignant 20 % du PIB mondial. Les intervalles retenus sont larges et intègrent un ensemble de possibilités allant de l'absence d'impacts à des impacts équivalants à une perte immédiate et persistente de 20 % du PIB dans le scénario de changement climatique le plus marqué, et en écartant néanmoins la possibilité d'impacts positifs du changement climatique.

Tableau 14 :

Paramètres proposés pour le calcul de valeurs de référence et l'analyse de sensibilité

Paramètres de référence :					Croyances proposées							
	Année de référence	Valeur tutélaire du carbone (en € ₂₀₁₇)	Taux d'actualisation	Aversion relative au risque	Probabilité RCP2,6	Probabilité RCP4,5	Probabilité RCP6	Probabilité RCP8,5	PIB RCP2,6	PIB RCP4,5	PIB RCP6	PIB RCP8,5
Valeur	2017	51	0,045	2	0,33	0,33	0,33	0	1	0,975	0,95	0,925
Source	-	Quinet, 2008	Quinet, 2013	Gollier, 2011	-	-	-	-	-	-	-	-
Sensibilité	-	-	-	-	Entre (0,66 ; 0,17 ; 0,17 ; 0) et (0 ; 0,33 ; 0,33 ; 0,33)				Entre (1 ; 1 ; 1 ; 1) et (1 ; 0,9 ; 0,85 ; 0,8)			

Résultats

Les valeurs de référence obtenues pour chacun des types sont présentées ci-dessous. Les valeurs monétaires sont calculées pour l'année 2017. Pour les actualiser, il suffit de corriger ces valeurs du taux de variation de la valeur tutélaire du carbone entre 2017 et le moment auquel est conduit l'évaluation. Par exemple, si le calcul est mené en 2020, alors la valeur proposée pour chaque type doit être multipliée par le facteur p_{2020} / p_{2017} , où p_{2020} représente la valeur tutélaire du carbone en 2020.

Tableau 15 :

Valeurs de référence pour les écosystèmes forestiers

Type	Libellé	Stock de référence (en tCO _{2eq} /ha)	Flux de séquestration de long terme de référence (en tCO _{2eq} /ha)	Valeur basse	Valeur haute	Flux perpétuel de long terme de référence (en tCO _{2eq} /ha/an)	Valeur de référence du SE en 2017 (en € ₂₀₁₇ /ha)
F1_ALP_0	Forêt fermée de feuillus de la région alpine sous tout type de gestion	705	348	342	375	0	53 662
F2_ALP_0	Forêt fermée de conifère de la région alpine sous tout type de gestion	678	157	150	185	0	42 524
F3_ALP_0	Forêt fermée mixte de la région alpine sous tout type de gestion	709	180	173	207	0	45 266
F4_ALP_0	Forêt ouverte de la région alpine sous tout type de gestion	170	45	39	71	0	10 921
F5_ALP_0	Landes, garrigues et maquis de la région alpine sous tout type de gestion	394	0	0	0	0	20 075
F1_ATL_0	Forêt fermée de feuillus de la région océanique sous tout type de gestion	636	252	231	301	0	45 242
F2_ATL_0	Forêt fermée de conifère de la région océanique sous tout type de gestion	557	107	98	139	0	33 857
F3_ATL_0	Forêt fermée mixte de la région océanique sous tout type de gestion	593	165	151	203	0	38 623
F4_ATL_0	Forêt ouverte de la région océanique sous tout type de gestion	144	54	46	82	0	10 094
F5_ATL_0	Landes, garrigues et maquis de la région océanique sous tout type de gestion	288	0	0	0	0	14 674
F1_CTL_0	Forêt fermée de feuillus de la région continentale sous tout type de gestion	727	249	229	295	0	49 693
F2_CTL_0	Forêt fermée de conifère de la région continentale sous tout type de gestion	771	147	138	180	0	46 810
F3_CTL_0	Forêt fermée mixte de la région continentale sous tout type de gestion	760	146	134	182	0	46 189
F4_CTL_0	Forêt ouverte de la région continentale sous tout type de gestion	193	81	72	113	0	13 966
F5_CTL_0	Landes, garrigues et maquis de la région continentale sous tout type de gestion	371	0	0	0	0	18 924
F1_MED_0	Forêt fermée de feuillus de la région méditerranéenne sous tout type de gestion	496	182	181	202	0	34 534
F2_MED_0	Forêt fermée de conifère de la région méditerranéenne sous tout type de gestion	531	256	256	275	0	40 125
F3_MED_0	Forêt fermée mixte de la région méditerranéenne sous tout type de gestion	499	193	190	216	0	35 264
F4_MED_0	Forêt ouverte de la région méditerranéenne sous tout type de gestion	132	- 16	- 20	7	0	5 877
F5_MED_0	Landes, garrigues et maquis de la région méditerranéenne sous tout type de gestion	331	0	0	0	0	16 860
F6_OM-Guyane_0	Forêt tropicale de feuillus de la région ultramarine n (guyanaise) sous tout type de gestion	1110	0	0	0	0	56 562

Remarques : Les valeurs monétaires correspondent à l'année 2017 ($p_{2017}=51 \text{ €}_{2017}/\text{tCO}_{2\text{eq}}$) et augmentent au rythme de la valeur tutélaire du carbone. Pour les actualiser, il suffit de corriger ces valeurs du taux de variation de la valeur tutélaire du carbone entre 2017 et le moment auquel est conduit l'évaluation. Par exemple, si le calcul est menés en 2020, alors la valeur proposée pour chaque type doit être multipliée par le facteur p_{2020} / p_{2017} , où p_{2020} représente la valeur tutélaire du carbone en 2020. La valeur de référence du service écosystémique correspond au coût carbone d'une dégradation totale ; elle intègre donc la valeur du stock en place ainsi que celle des perspectives futures de séquestration.

Tableau I6 :

Valeurs de référence pour les écosystèmes agricoles

Type	Libellé	Stock de référence (en tCO _{2eq} /ha)	Flux de séquestration de long terme de référence (en tCO _{2eq} /ha)	Valeur basse	Valeur haute	Flux perpétuel de long terme de référence (en tCO _{2eq} /ha/an)	Valeur de référence du SE en 2017 (en € ₂₀₁₇ /ha)
A1_ALP_1	Cultures annuelles de la région alpine sans pratique séquestrante	300	- 42	- 49	- 26	0	13 150
A1_ALP_2	Cultures annuelles de la région alpine en labour occasionnel et sans cultures intermédiaires	300	- 30	- 37	- 14	0	13 767
A1_ALP_3	Cultures annuelles de la région alpine en semi direct et sans cultures intermédiaires	300	- 24	- 31	- 8	0	14 075
A1_ALP_4	Cultures annuelles de la région alpine avec cultures intermédiaires	300	- 13	- 20	3	0	14 630
A1_ATL_1	Cultures annuelles de la région océanique sans pratique séquestrante	223	- 42	- 49	- 26	0	9 190
A1_ATL_2	Cultures annuelles de la région océanique en labour occasionnel et sans cultures intermédiaires	223	- 30	- 37	- 14	0	9 807
A1_ATL_3	Cultures annuelles de la région océanique en semi direct et sans cultures intermédiaires	223	- 24	- 31	- 8	0	10 115
A1_ATL_4	Cultures annuelles de la région océanique avec cultures intermédiaires	223	- 13	- 20	3	0	10 670
A1_CTL_1	Cultures annuelles de la région continentale sans pratique séquestrante	249	- 42	- 49	- 26	0	10 531
A1_CTL_2	Cultures annuelles de la région continentale en labour occasionnel et sans cultures intermédiaires	249	- 30	- 37	- 14	0	11 147
A1_CTL_3	Cultures annuelles de la région continentale en semi direct et sans cultures intermédiaires	249	- 24	- 31	- 8	0	11 456
A1_CTL_4	Cultures annuelles de la région continentale en semi direct et sans cultures intermédiaires	249	- 13	- 20	3	0	12 010
A1_MED_1	Cultures annuelles de la région méditerranéenne sans pratique séquestrante	180	- 42	- 49	- 26	0	6 995
A1_MED_2	Cultures annuelles de la région méditerranéenne en labour occasionnel et sans cultures intermédiaires	180	- 30	- 37	- 14	0	7 612
A1_MED_3	Cultures annuelles de la région méditerranéenne en semi direct et sans cultures intermédiaires	180	- 24	- 31	- 8	0	7 920
A1_MED_4	Cultures annuelles de la région méditerranéenne avec cultures intermédiaires	180	- 13	- 20	3	0	8 475
A2_ALP_1	Cultures pérennes de la région alpine sans pratique séquestrante	307	- 25	- 27	- 12	0	14 372
A2_ALP_2	Cultures pérennes de la région alpine avec couvert continu	307	14	12	27	0	16 345
A2_ATL_1	Cultures pérennes de la région océanique sans pratique séquestrante	198	- 25	- 27	- 12	0	8 792
A2_ATL_2	Cultures pérennes de la région océanique avec couvert continu	198	14	12	27	0	10 765
A2_CTL_1	Cultures pérennes de la région continentale sans pratique séquestrante	239	- 25	- 27	- 12	0	10 877
A2_CTL_2	Cultures pérennes de la région continentale avec couvert continu	239	14	12	27	0	12 850
A2_MED_1	Cultures pérennes de la région méditerranéenne sans pratique séquestrante	144	- 25	- 27	- 12	0	6 057

A2_MED_2	Cultures pérennes de la région méditerranéenne avec couvert continu	144	14	12	27	0	8 029
P_ALP_0	Prairies permanentes de la région méditerranéenne sous tout type de gestion	422	- 35	- 40	- 11	0	19 734
P_ATL_0	Prairies permanentes de la région océanique sous tout type de gestion	303	- 35	- 40	- 11	0	13 680
P_CTL_0	Prairies permanentes de la région continentale sous tout type de gestion	330	- 35	- 40	- 11	0	15 057
P_MED_0	Prairies permanentes de la région méditerranéenne sous tout type de gestion	298	- 35	- 40	- 11	0	13 442

Remarques : Les valeurs monétaires correspondent à l'année 2017 ($p_{2017}=51 \text{ €}_{2017}/\text{tCO}_{2\text{eq}}$) et augmentent au rythme de la valeur tutélaire du carbone. Pour les actualiser, il suffit de corriger ces valeurs du taux de variation de la valeur tutélaire du carbone entre 2017 et le moment auquel est conduit l'évaluation. Par exemple, si le calcul est mené en 2020, alors la valeur proposée pour chaque type doit être multipliée par le facteur p_{2020} / p_{2017} , où p_{2020} représente la valeur tutélaire du carbone en 2020. La valeur de référence du service écosystémique correspond au coût carbone d'une dégradation totale ; elle intègre donc la valeur du stock en place ainsi que celle des perspectives futures de séquestration.

Tableau 17 :

Valeurs de référence pour les autres écosystèmes naturels terrestres

Type	Libellé	Stock de référence (en tCO _{2eq} /ha)	Flux de séquestration de long terme de référence (en tCO _{2eq} /ha)	Valeur basse	Valeur haute	Flux perpétuel de long terme de référence (en tCO _{2eq} /ha/an)	Valeur de référence du SE en 2017 (en € ₂₀₁₇ /ha)
EN1_ALP_0	Pelouses et pâturages naturels de la région alpine sous tout type de gestion	412	- 35	- 40	- 11	0	19 242
EN1_ATL_0	Pelouses et pâturages naturels de la région océanique sous tout type de gestion	303	- 35	- 40	- 11	0	13 680
EN1_CTL_0	Pelouses et pâturages naturels de la région continentale sous tout type de gestion	330	- 35	- 40	- 11	0	15 057
EN1_MED_0	Pelouses et pâturages naturels de la région méditerranéenne sous tout type de gestion	332	- 35	- 40	- 11	0	15 149
EN2_MET_0	Zones humides continentales de la région métropolitaine sous tout type de gestion	458	109	104	133	0	28 927
EN3_MET_P	Tourbières préservées ou restaurées de la région métropolitaine	3 214	- 277	- 564	- 134	0,5	152 237
EN3_MET_NP	Tourbières perturbées ou dégradées de la région métropolitaine	3 214	- 1607	- 1 607	- 1 607	0	81 875
EN4_MET_0	Milieux aquatiques continentaux de la région métropolitaine sous tout type de gestion	0	0	0	0	0	0
EN5_MET_0	Zones humides littorales de la région métropolitaine sous tout type de gestion	593	663	663	663	8	106 765
EN6_MET_0	Lagunes et lagons de la région métropolitaine sous tout type de gestion	593	663	663	663	8	106 765
EN7_MET_0	Plages, dunes et zones sableuses sous tout type de gestion	0	0	0	0	0	0
EN8_MET_0	Roches nues, glaciers et neiges éternelles de la région métropolitaine sous tout type de gestion	0	0	0	0	0	0
EN9_OM_0	Mangroves de la région ultramarine sous tout type de gestion	935	496	496	496	6	104 875

Remarques :

- Les valeurs monétaires correspondent à l'année 2017 ($p_{2017}=51 \text{ €}_{2017}/\text{tCO}_{2eq}$) et augmentent au rythme de la valeur tutélaire du carbone. Pour les actualiser, il suffit de corriger ces valeurs du taux de variation de la valeur tutélaire du carbone entre 2017 et le moment auquel est conduit l'évaluation. Par exemple, si le calcul est mené en 2020, alors la valeur proposée pour chaque type doit être multipliée par le facteur p_{2020} / p_{2017} , où p_{2020} représente la valeur tutélaire du carbone en 2020. La valeur de référence du service écosystémique correspond au coût carbone d'une dégradation totale ; elle intègre donc la valeur du stock en place ainsi que celle des perspectives futures de séquestration>.
- Concernant les mangroves, la distinction des perspectives de séquestration du carbone entre mangroves préservées et restaurées et mangroves perturbées ou dégradées n'a pas pu être réalisé dans le cadre de cette étude.

Tableau 18 :

Valeurs de référence pour les écosystèmes marins

Type	Libellé	Stock de référence (en tCO _{2eq} /ha)	Flux de séquestration de long terme de référence (en tCO _{2eq} /ha)	Valeur basse	Valeur haute	Flux perpétuel de long terme de référence (en tCO _{2eq} /ha/an)	Valeur de référence du SE en 2017 (en € ₂₀₁₇ /ha)
M1_MET_0	Eaux côtières (hors herbiers) de la région ultramarine sous tout type de gestion	0	0	0	0	0	0
M2_MED_P	zone d'herbier de la région méditerranéenne préservée ou restaurée	326	331	331	331	3	51 528
M2_MED_NP	Zone d'herbiers de la région méditerranéenne perturbée ou dégradée	326	331	331	331	0	33 483
M3_MET_0	Eaux du large de la région de métropole sous tout type de gestion	0	0	0	0	0	0
M1_OM_0	Eaux côtières (hors herbiers) de la région d'outre-mer sous tout type de gestion	0	0	0	0	0	0
M2_OM_0	Zone d'herbiers de la région ultramarine sous tout type de gestion	326	331	0	0	3	51 528
M3_OM_0	Eaux du large de la région ultramarine sous tout type de gestion	0	0	0	0	0	0

Remarques : Les valeurs monétaires correspondent à l'année 2017 ($p_{2017}=51 \text{ €}_{2017}/\text{tCO}_{2eq}$) et augmentent au rythme de la valeur tutélaire du carbone. Pour les actualiser, il suffit de corriger ces valeurs du taux de variation de la valeur tutélaire du carbone entre 2017 et le moment auquel est conduit l'évaluation. Par exemple, si le calcul est mené en 2020, alors la valeur proposée pour chaque type doit être multipliée par le facteur p_{2020} / p_{2017} , où p_{2020} représente la valeur tutélaire du carbone en 2020. La valeur de référence du service écosystémique correspond au coût carbone d'une dégradation totale ; elle intègre donc la valeur du stock en place ainsi que celle des perspectives futures de séquestration.

Tableau I9 :

Valeurs de référence pour les espaces verts urbains, les terres imperméabilisées et les terres dégradées

Type	Libellé	Stock de référence (en tCO _{2eq} /ha)	Flux de séquestration de long terme de référence (en tCO _{2eq} /ha)	Valeur basse	Valeur haute	Flux perpétuel de long terme de référence (en tCO _{2eq} /ha/an)	Valeur de référence du SE en 2017 (en € ₂₀₁₇ /ha)
U1_ALP_0	Terre imperméabilisée de la région alpine sous tout type de gestion	110	0	0	0	0	5 604
U2_ALP_0	Espace vert urbain de la région alpine sous tout type de gestion	177	0	0	0	0	9 000
U3_ALP_0	Terre dégradée de la région alpine sous tout type de gestion	0	0	0	0	0	0
U1_ATL_0	Terre imperméabilisée de la région océanique sous tout type de gestion	110	0	0	0	0	5 604
U2_ATL_0	Espace vert urbain de la région océanique sous tout type de gestion	177	0	0	0	0	9 000
U3_ATL_0	Terre dégradée de la région océanique sous tout type de gestion	0	0	0	0	0	0
U1_CTL_0	Terre imperméabilisée de la région continentale sous tout type de gestion	110	0	0	0	0	5 604
U2_CTL_0	Espace vert urbain de la région continentale sous tout type de gestion	177	0	0	0	0	9 000
U3_CTL_0	Terre dégradée de la région continentale sous tout type de gestion	0	0	0	0	0	0
U1_MED_0	Terre imperméabilisée de la région méditerranéenne sous tout type de gestion	110	0	0	0	0	5 604
U2_MED_0	Espace vert urbain de la région méditerranéenne sous tout type de gestion	177	0	0	0	0	9 000
U3_MED_0	Terre dégradée de la région méditerranéenne sous tout type de gestion	0	0	0	0	0	0
U1_OM_0	Terre imperméabilisée de la région ultramarine sous tout type de gestion	110	0	0	0	0	5 604
U2_OM_0	Espaces verts urbains de la région ultramarine sous tout type de gestion	422	0	0	0	0	21 515
U3_OM_0	Terres dégradées de la région ultramarine sous tout type de gestion	0	0	0	0	0	0

Remarques :

- Les valeurs proposées correspondent aux valeurs de terres imperméabilisées ; pour obtenir les valeurs correspondant à des surfaces de terres artificialisées, il convient de prendre en compte le taux d'imperméabilisation de ces espaces et de calculer la valeur de référence en prenant la valeur pour les écosystèmes artificialisés dans cette proportion et les valeurs associées aux prairies de la même région en proportion restante ; à défaut d'une telle information, le taux d'imperméabilisation à retenir est de 70 % ;
- Les valeurs monétaires correspondent à l'année 2017 ($p_{2017}=51 \text{ €}_{2017}/\text{tCO}_{2eq}$) et augmentent au rythme de la valeur tutélaire du carbone. Pour les actualiser, il suffit de corriger ces valeurs du taux de variation de la valeur tutélaire du carbone entre 2017 et le moment auquel est conduit l'évaluation. Par exemple, si le calcul est mené en 2020, alors la valeur proposée pour chaque type doit être multipliée par le facteur p_{2020} / p_{2017} , où p_{2020} représente la valeur tutélaire du carbone en 2020.
- La valeur de référence du service écosystémique correspond au coût carbone d'une dégradation totale ; elle intègre donc la valeur du stock en place ainsi que celle des perspectives futures de séquestration.

1. En plus de ces éléments, un critère de décision en situation d'incertitude pourrait prendre en compte les possibilités d'apprentissage et d'adaptation à travers le calcul de valeurs d'options de certaines alternatives. En première approche, ces valeurs, dont l'évaluation requiert des informations spécifiques, ne sont pas reflétées dans les valeurs de référence proposées.
2. Les niveaux de fond des perturbations naturelles pourront être calculés sur la base des risques observés par le passé selon la méthode recommandée par la décision 529/2013 de l'UE Annexe, VII.
3. « Si le projet [...] n'est pas indépendant des autres risques portés par les agents économiques, il faut défalquer une prime de risque de l'espérance de chaque flux (coûts, bénéfices). » (Gollier, 2011, p.66)
4. Il s'agit du niveau recommandé pour l'évaluation socio-économique (Gollier, 2011). Un tel coefficient est déjà relativement élevé et rarement observé au niveau individuel. En effet, un décideur dont l'aversion relative au risque est égale à 2 serait prêt à payer jusqu'à 25 % de sa richesse pour éliminer un risque de gagner ou perdre la moitié de sa richesse avec égales probabilités. Ce consentement à payer atteindrait 38 % pour une aversion relative égale à 4, et 45 % si elle était

égale à 8 (Gollier, 2011, p. 73).

5. Gollier, 2011, p. 185.
6. Dans cette étude, il a été retenu que la saturation des compartiments finis survenait avant 2100.
7. L'hypothèse alternative proposée peut s'interpréter de la manière suivante : à partir de 2100, date à laquelle le facteur 4 est supposé atteint, les émissions sont maintenues à un niveau tel que le coût marginal d'une réduction supplémentaire est constant.
8. Le lecteur averti pourra remarquer que la variation de stock *in situ* à long terme de référence dépend aussi potentiellement de la valeur tutélaire du carbone mais des analyses de sensibilités montrent que cette dépendance est négligeable.
9. C'est la notion de *balanced-growth equivalent* popularisée par la *Stern review* qui permet d'assimiler des trajectoires de PIB par habitant à des pertes immédiates de PIB persistant le long de trajectoires de croissance à un même taux constant. Ces pertes sont exprimées en proportion du PIB dans un scénario RCP2.6. Le calcul de ces trajectoires équivalentes repose sur le choix d'un taux d'actualisation et de préférences qui sont retenues en cohérence avec les préconisations existantes.
10. Dennig et coll, 2015
11. Voir la discussion initiée par Sterner et Persson (2008) et poursuivie par Yongyang et coll. (2015) sur le caractère potentiellement très significatif des coûts liés aux seuls effets environnementaux.
12. Céline Guivarch (Cired), communication personnelle.
13. Céline Guivarch (Cired), communication personnelle.

Index des illustrations

[Figure 1](#) : Le cycle mondial du carbone et son évolution depuis la période pré-industrielle

[Figure 2](#) : Caractérisation du service écosystémique de séquestration *in situ* du carbone

[Figure 3](#) : Méthode d'évaluation

[Figure 4](#) : Les régions biogéographiques en Europe

[Figure 5](#) : Carte des espaces protégés considérés dans cette étude

[Figure 6](#) : Représentation des compartiments considérés dans cette évaluation

[Figure 7](#) : Vision schématique adoptée pour la séquestration de carbone dans un compartiment, suite à une perturbation entraînant un changement d'équilibre

[Figure 8](#) : Projections des émissions liées aux énergies fossiles suivant les quatre scénarios RCP du GIEC

[Figure 9](#) : Hausse des températures et hausse du niveau de la mer associés aux scénarios RCP du GIEC

[Figure 10](#) : Le carbone d'origine anthropique séquestré dans les eaux territoriales françaises depuis le début de la révolution industrielle

[Figure 11](#) : Processus déterminant le phénomène de la « pompe biologique ». Cette figure ne montre qu'une partie des phénomènes impliqués

[Figure 12](#) : Projections à l'horizon 2055 de l'aire de répartition du hêtre et du chêne pédonculé en France métropolitaine selon différents modèles

[Figure 13](#) : Profils fictifs de séquestration de carbone au sein de deux écosystèmes différents et incertitude associée

[Figure 14](#) : Hiérarchisation des sources d'incertitude affectant les valeurs de référence proposées

[Illustration 1](#) : Paysage forestier

[Illustration 2](#) : Paysage de bocage (Chinon, Indre-et-Loire)

Index des tableaux

[Tableau 1](#) : Principaux ordres de grandeur obtenus à l'échelle nationale.

[Tableau 2](#) : Comparaison du puits de carbone forestier actuel en métropole d'après différentes sources.

[Tableau 3](#) : Exemples de pratiques séquestrantes.

[Tableau 4](#) : Interaction du service de séquestration du carbone *in situ* avec les biens, services et dimensions patrimoniales du cadre conceptuel de l'EFESE.

[Tableau 5](#) : Comparaison des valeurs monétaires de référence proposées par Chevassus-au-Louis et coll. (2009) et dans le cadre de cette étude.

[Tableau 6](#) : Principaux besoins de connaissances, de données et d'études identifiés.

[Tableau 7](#) : Libellés des types d'écosystèmes forestiers.

[Tableau 8](#) : Libellés des types d'écosystèmes naturels terrestres.

[Tableau 9](#) : Libellés des types d'écosystèmes agricoles définis.

[Tableau 10](#) : Libellé des types d'écosystèmes artificialisés.

[Tableau 11](#) : Libellés des types d'écosystèmes marins.

[Tableau 12](#) : Données recherchées pour chaque type (écosystème x scénario de pratique).

[Tableau 13](#) : Valeurs dérivées des données collectées.

[Tableau 14](#) : Paramètres proposés pour le calcul de valeurs de référence et l'analyse de sensibilité.

[Tableau 15](#) : Valeurs de référence pour les écosystèmes forestiers.

[Tableau 16](#) : Valeurs de référence pour les écosystèmes agricoles.

[Tableau 17](#) : Valeurs de référence pour les autres écosystèmes naturels terrestres.

[Tableau 18](#) : Valeurs de référence pour les écosystèmes marins.

[Tableau 19](#) : Valeurs de référence pour les espaces verts urbains, les terres imperméabilisées et les terres dégradées.

Index des encadrés

Encadré 1 : Aspects dynamiques et statiques de la méthode proposée.

Encadré 2 : Les scénarios de changement climatique du GIE.

Encadré 3 : Mise en perspective du puits forestier avec les inventaires nationaux des émissions.

Encadré 4 : La production de bois, un levier d'atténuation du changement climatique.

Encadré 5 : Quid des récifs coralliens ?

Encadré 6 : La projection des aires de répartition des espèces, une illustration des difficultés à évaluer les effets du changement climatique à long terme.

Encadré 7 : Antagonismes et synergies entre séquestration du carbone et conservation de la biodiversité.

Encadré 8 : La valeur tutélaire du carbone, interprétations et implications pour l'évaluation du service de séquestration *in situ* du carbone.

Encadré 9 : Partagez vos connaissances et vos données pour une amélioration continue des capacités à évaluer le service de séquestration *in situ* du carbone en France.

Contributeurs

Auteurs principaux :

Yann Kervinio (MTES/CGDD/Seeidd) et Claire Rais Assa (MTES/CGDD/Seeidd¹).

Cette évaluation a bénéficié de l'appui d'un comité de suivi réuni à plusieurs reprises et d'un atelier d'experts réuni le 8 mars 2018. Elle a fait l'objet de plusieurs avis du Conseil scientifique et technique de l'EFESE et les messages clés à l'attention des décideurs qui en sont issus ont été discutés et approuvés le 12 avril 2018 par le Comité national des parties prenantes de l'EFESE.

¹. Au moment de sa contribution à l'étude.

Remerciements

Cette évaluation est le fruit d'un travail collectif.

Pour leurs contributions significatives à cette étude, les auteurs tiennent à remercier :

Laurent Bopp (CNRS IPSL), Antoine Colin (IGN), Céline Guivarch (Cired), Frédérique Janvier (MTES/CGDD/Sdes) et Anne-Laure Mésenge (Cerema ¹).

Pour leurs relectures et leurs commentaires, les auteurs remercient aussi les membres du Comité de suivi de l'étude :

Sylvie Alexandre (Déléguée interministérielle à la forêt et au bois), Valentin Bellassen (Inra), Maud Berel (MTES/DGALN/Deb), Miriam Buitrago (Ademe), Olivier De Guibert (MTES/DGEC), Vincent Dameron (MAA/DGPE), Thomas Eglin (Ademe), Anne-Laure Mésenge (Gip Ecofor), Elisabeth Pagnac-Farbiaz (MTES/DGEC), Linwood Pendleton (IUEM), Isabelle Pion (MAA/DGPE) et Valérie To (MTES/CGDD),

ainsi que les membres du Conseil scientifique et technique de l'EFESE impliqué dans les revues du rapport :

Sébastien Barot (UPMC-IEES), Lilian Blanc (Cirad), Sandra Lavorel (CNRS), Bruno Locatelli (Cirad-Cifor), Jean-Michel Salles (CNRS), Eric Thiébaud (Sorbonne Université) et Nicolas Viovy (LSCE).

Enfin, les auteurs remercient les relecteurs Antonin Vergez (MTES/CGDD/Seeidd) et Vincent Marcus (MTES/CGDD/Seeidd), ainsi que l'ensemble des experts consultés dans le cadre de cette évaluation :

Véronique Antoni (MTES/CGDD/Sdes), Pierre Barré (CNRS/Ceres), Denis Bailly (UBO), Johanna Beganton (UBO), Grégory Bernard (FCEN), Eric Brun (ONERC), Lauric Cécillon (Irstea), Aude Charrier (MTES/DGEC), Claire Chenu (Inra AgroparisTech), Philippe Ciais (IPSL), Florian Claeys (MAA/DGPE), Gilles Croquette (MTES/DGEC), Emilie Crouzat (CNRS ²), Ophélie Darses (MTES/CGDD/Seeidd), Christine Deleuze (ONF), Elise Delgoulet (MTES/SG/DAEI), Jérémy Devaux (MTES/CGDD/Seeidd), Vanina Forget (MAA/SG/SSP), Mathieu Fortin (Inra/Lerfob), Daniel Gilbert (Université de Franche-Comté), Lionel Guidi (CNRS UPMC), Denis Loustau (Inra), Simon Martel (CNPf), Etienne Mathias (Citepa), Rémi Mongruel (Ifremer), Bernard Moutou (MTES/DGALN/DEB), Francis Muller (FCEN), Sylvain Pellerin (Inra), Jean-Luc Peyron (Gip Ecofor), Gilles Rayé (MTES/CGDD/DRI), Colas Robert (Citepa), Laure Soucémariadin (CNRS), Jean-François Soussana (Inra), Olivier Thérond (Inra), Alain Thivolle Cazat (FCBA), Audrey Trevisiol (Ademe), Alice Triquenot (MAA), Aude Valade (IPSL), Estelle Vial (FCBA).

¹. Au moment de sa contribution à l'étude.

². Au moment de sa contribution à l'étude.

Résumé

Cette évaluation du service écosystémique de séquestration du carbone in situ à l'échelle de la France s'inscrit dans le cadre du programme EFESE (Évaluation Française des Écosystèmes et des Services Écosystémiques). Il s'agit de la première évaluation unifiée du cycle du carbone à l'échelle française conduite dans l'optique d'améliorer sa prise en compte dans la décision. La méthode utilisée repose sur une caractérisation de ce service pour différents types d'écosystèmes couvrant l'ensemble du territoire français. Les données collectées permettent de formuler des ordres de grandeur pertinents qui aident à prendre la mesure des enjeux associés à l'échelle nationale. Ces mêmes données sont mobilisées pour proposer des valeurs de référence utiles au niveau local afin d'améliorer la prise en compte de ce service écosystémique dans les décisions susceptibles d'affecter les écosystèmes, notamment pour les évaluations socio-économiques des projets et des investissements publics.



Présentation de l'EFESE

L'évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques (EFESE) est un programme piloté par le Ministère de la Transition écologique et solidaire qui vise à révéler les multiples valeurs de la biodiversité afin de faciliter leur prise en compte dans les décisions publiques et privées en France. Le programme s'appuie sur un cadre conceptuel partagé et une gouvernance nationale qui associe experts, décideurs et parties prenantes. Il a achevé une première phase à la fin de l'année 2018 avec la publication d'évaluations d'ensemble des six grandes catégories d'écosystèmes français. Il démarre, en parallèle, une deuxième phase dont le caractère opérationnel et stratégique sera renforcé afin de développer les outils d'évaluation nécessaires pour engager et accompagner la transition écologique de la société française.

Pour accéder aux rapports et en savoir plus :

<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/EFESE>

Pour rejoindre la communauté de l'EFESE (inscription libre) :

<http://plateforme-efese.developpement-durable.gouv.fr/>



Commissariat général au développement durable
Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable
Sous-direction de l'économie des ressources naturelles et des risques (ERNR)

Tour Séquoia,
92055 La Défense Cedex

Courriel : efese@developpement-durable.gouv.fr

www.ecologique-solidaire.gouv.fr/EFESE

Directrice de la publication : Laurence Monnoyer-Smith

Rédactrice en chef : Laurence Demeulenaere

Citation recommandée :

Commissariat général au développement durable (2019). EFESE – La séquestration du carbone par les écosystèmes français. La Documentation Française (ed.). Collection Théma Analyse, e-publication.

Conditions générales d'utilisation : Licence Ouverte v2.0

Le « Concédant » concède au « Réutilisateur » un droit non exclusif et gratuit de libre « Réutilisation » de l'« Information » objet de la présente licence, à des fins commerciales ou non, dans le monde entier et pour une durée illimitée, dans les conditions exprimées ci-dessous.

Le « Réutilisateur » est libre de réutiliser l'« Information » :

- de la reproduire, la copier,
- de l'adapter, la modifier, l'extraire et la transformer, pour créer des « Informations dérivées », des produits ou des services,
- de la communiquer, la diffuser, la redistribuer, la publier et la transmettre,
- de l'exploiter à titre commercial, par exemple en la combinant avec d'autres informations, ou en l'incluant dans son propre produit ou application.

Sous réserve de mentionner la paternité de l'« Information » : sa source (au moins le nom du « Concédant ») et la date de dernière mise à jour de l'« Information réutilisée ».

Réalisation de ce livre numérique :

© Direction de l'information légale et administrative, Paris 2019.

ISBN : 978-2-11-145968-7