



Stockage du carbone dans les prairies similaires à celles qui sont gérées par les aéroports

Ludvine Amdouni-Boursier (FRB)
Robin Goffaux (FRB)

Décembre 2019

Commanditaires



CONTRIBUTEURS

Citation : Amdouni-Boursier L. & Goffaux R. (2019) *Stockage du carbone dans les prairies similaires à celles qui sont gérées par les aéroports* Paris, France : FRB, 30p

COORDINATION ET RÉDACTION

Coordination : Hélène Soubelet (FRB)

Réalisation de l'étude et rédaction : Ludivine Amdouni-Boursier (FRB), Robin Goffaux (FRB)

Expertise et relecture : Katja Klumpp (Inra)

REMERCIEMENTS

Katja Klumpp (Inra)

Denis Angers (Université Laval - Québec)

Jean-François Silvain (FRB)

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction	4
1.1. Commande et traitement	4
1.2. Démarche et soutien scientifique	4
2. Facteurs déterminants pour le stockage du carbone dans les prairies	6
2.1. Stock et stockage moyen de carbone organique dans les sols des prairies	6
2.2. Stocks de carbone dans les sols et facteurs affectant son stockage à long terme	7
2.2.1. <i>Le climat</i>	7
2.2.2. <i>La texture du sol</i>	8
2.3. Facteurs biotiques et de gestion affectant la matière organique du sol à court terme et moyen terme	8
2.3.1. <i>Pratiques agricoles</i>	9
2.3.2. <i>Biodiversité et stockage du carbone</i>	10
3. Quelles recommandations pour les prairies aéroportuaires ?	13
3.1. Données de la littérature	13
3.2. Évaluation des capacités de stockage de carbone par les prairies	14
Annexe 1	17
Objectif et méthodologie	17
<i>Cadrage de l'étude</i>	17
Équation de recherche	18
<i>Web of Science</i>	18
<i>ScienceDirect</i>	18
<i>Google Scholar</i>	18
Critères de tri	18
Annexe 2	19
Méthodes de quantification des stocks et flux de carbone dans les prairies d'intérêt	19
Les différentes méthodes et leurs incertitudes	19
Mesures du stock de carbone et son changement au cours du temps dans différents compartiments	20
Mesures de la biomasse des prairies comme indicateur de carbone entrant	21
Mesure du carbone organique du sol	21
Interprétation spatiale de la mesure du carbone du sol et méthodes d'interpolation	22
La modélisation pour déterminer le stock de carbone du sol et son évolution au cours du temps	22
Choix de la ou des méthodes les plus adaptées	24
Limites et incertitudes	25
Annexe 3	26
Références bibliographiques	28

1. INTRODUCTION

1.1. COMMANDE ET TRAITEMENT

Ce rapport est une réponse à la demande d'analyse rapide de la littérature scientifique sur la question suivante : « Quel est le stock global de carbone des prairies (similaires à celles qui sont gérées par les aéroports) et quel est leur potentiel de stockage annuel ? ».

Les commanditaires, l'association *HOP! Biodiversité* (désormais *Aéro Biodiversité*) et l'Autorité de contrôle des nuisances aéroportuaires (Acnusa), ont exprimé deux finalités au recueil des éléments issus de la littérature scientifique : d'une part intégrer le bilan carbone annuel des prairies dans le bilan carbone des aéroports et d'autre part sensibiliser sur les intérêts environnementaux de ces prairies pour adapter les mesures de gestion.

Le livrable attendu était une synthèse des connaissances scientifiques existantes incluant les éventuelles données de capacités de stockage de carbone par hectare de prairies comparables à celles qui sont gérées par des aéroports. La bibliographie identifiée (cf. annexe 1) et consultée (cf. références bibliographiques) sur les quinze jours dédiés à cette action n'a pas permis de trouver de valeurs spécifiques aux prairies aéroportuaires. Toutefois des travaux sur des prairies donnent, d'une façon plus générale, de premières indications, mais ils ont nécessité de recourir au dire-d'experts pour évaluer leur applicabilité au cas des prairies aéroportuaires. Ceci a pu être fait dans un second temps, mais de façon relativement restreinte, le temps dédié à l'étude ayant déjà été dépassé.

Une liste de publications complémentaires relative au stockage de carbone par les prairies sous-marines en Méditerranée a été constituée sur demande de *HOP! Biodiversité* et leur a été transmise.

1.2. DÉMARCHE ET SOUTÈNEMENT SCIENTIFIQUE

Un certain nombre d'aéroports sont déjà engagés dans des démarches environnementales et ont débuté des réflexions sur le carbone similaire à celle étudiée ici (Malmö, Brisbane, Toronto, Stuttgart), toutefois aucun travail équivalent à la présente synthèse n'a été identifié chez ces acteurs et aucun résultat des travaux engagés n'était accessible au moment de l'étude.

Le changement climatique et la question des émissions de gaz à effet de serre ont généré des réflexions et travaux sur les mécanismes intervenant dans la régulation des cycles biogéochimiques et notamment sur les possibilités de compensation des émissions *via* le stockage de carbone dans les végétaux et le sol (cf. Figure 1 pour le potentiel des sols français). Plus particulièrement, le rôle des sols et des prairies dans ces flux de carbone est traité dans la littérature scientifique et certains messages généraux semblent souligner l'importance de ces compartiments et notamment que :

- Les prairies se comportent comme des puits de carbone (en moyenne $0,76 \pm 0,11$ tonnes C/ha/an, cf. Soussana *et al.* 2014).
- Une augmentation de 3,5 Gt C dans les sols (par rapport aux 2400 Gt C stockées au niveau mondial dans le sol) peut compenser les émissions liées aux activités humaines (initiative 4p1000 ; <https://www.4p1000.org/>).

Ces premiers éléments légitiment le questionnement sur l'effet éventuel des prairies des sites aéroportuaires sur le stockage de carbone. Toutefois, le changement climatique est susceptible de modifier des conditions environnementales à l'avenir ce qui laisse supposer que ce qui est observé dans les conditions actuelles pourra être différent dans le futur et que les types de prairies actuellement observées sur les sites considérés ici vont peut-être, naturellement, ou par aménagement des gestionnaires, évoluer dans leur composition, leur structure et leur fonctionnement.

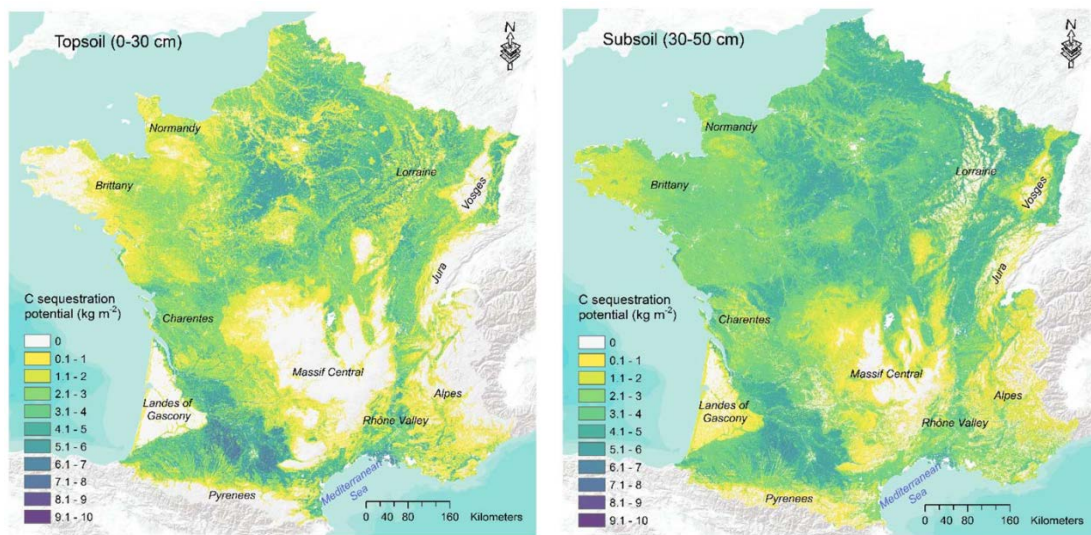


Figure 1. Potentiel de stockage du C additionnelle dans les 0-30 et 30-50cm du sol, dépendant de conditions pédoclimatiques, de l'occupation et gestion du sol (Chen *et al.* 2018)

2. FACTEURS DÉTERMINANTS POUR LE STOCKAGE DU CARBONE DANS LES PRAIRIES

Ce chapitre traite de la question du stock et du bilan carbone des prairies permanentes (ou surfaces toujours en herbe), et dresse i) l'état actuel des connaissances de l'effet des pratiques de gestion des prairies permanentes sur le stock moyen de carbone organique des sols, dans le but d'identifier les pratiques « stockant », « déstockant », ou sans effet significatif, ainsi que ii) la possibilité d'intégrer de telles références dans des bilans carbones des aéroports.

2.1. STOCK ET STOCKAGE MOYEN DE CARBONE ORGANIQUE DANS LES SOLS DES PRAIRIES

Les stocks de carbone des sols français métropolitains pour la couche 0-30 cm varient selon la géographie : à la fois par l'usage des sols, du type de sol et du climat (y compris altitude) (Figure 2). Les stocks les plus élevés (> 100 t/ha) sont observés dans les zones d'altitude (Alpes, Pyrénées, Massif Central, Jura, Vosges) et/ou dans les zones de prairie (Bretagne). Des stocks moyennement élevés (70-100 t/ha) se trouvent souvent dans des grandes régions forestières ou fourragères (Bretagne, Est, Massif central, Normandie). Les stocks moyens observés sous grandes cultures (50-70 t/ha) peuvent s'expliquer par l'historique d'occupation du sol (et/ou le type de sol et le climat). Les stocks de carbone faibles à moyens (30-50 t/ha) sont caractéristiques des sols des grandes plaines de culture intensive ainsi que des sols limoneux, comme par exemple 35 tC/ha en culture de vigne, 50 tC/ha en vergers et grandes cultures, 80 tC/ha pour les prairies et forêts (GIS Sol, 2006).

Ces différents types d'occupation des sols sont contraints par les variables agissant à long terme listées ci-dessus et vont donc influencer le potentiel de chaque zone en terme de stockage.

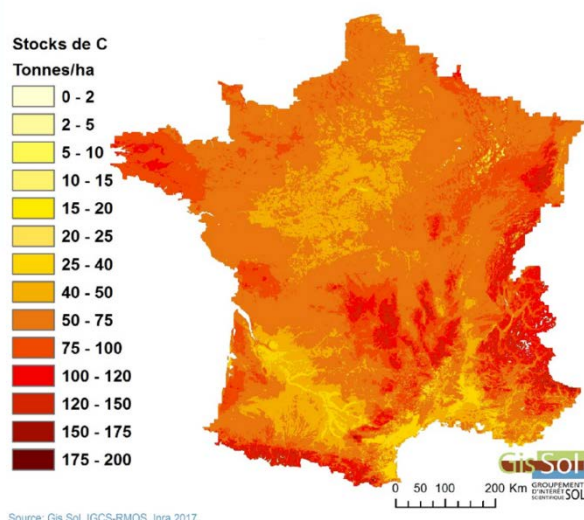
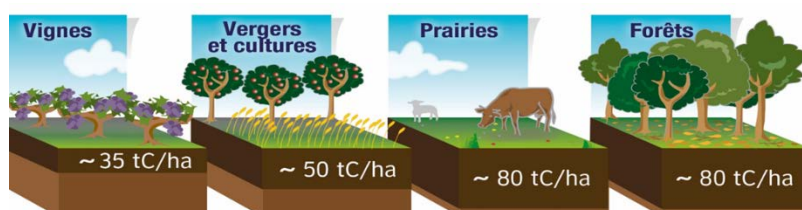


Figure 2 : Cartes des stocks de carbone organique des sols français (tC/ha) sur les 30 premiers centimètres de sol, d'après Mulder et al. (2016) et stock de carbone moyenne selon l'usage historique du sol (Ademe, 2014).



À partir de ces stocks, différents facteurs vont agir sur les mécanismes biotiques et abiotiques conditionnant les flux entrant et sortant de carbone sur un type d'occupation du sol. Les processus abiotiques sont liés à la structure physique du sol, à l'organisation de sa porosité et à sa fraction minérale : inclusion de la matière organique dans les agrégats, association aux minéraux, etc. Les processus biotiques correspondent aux effets des plantes (principale source de carbone, notamment à travers leurs systèmes racinaires), des microorganismes (champignons et bactéries) et des ingénieurs de l'écosystème (vers de terre, termites, fourmis) sur les stocks de carbone organique du sol (Derrien *et al.* 2016).

L'analyse de la littérature recensée dans le cadre de cette étude montre que les prairies permanentes stockent annuellement en moyenne $0,76 \pm 0,11$ t carbone à l'hectare (Figure 3). Ce stock dépend de plusieurs facteurs détaillés plus bas.

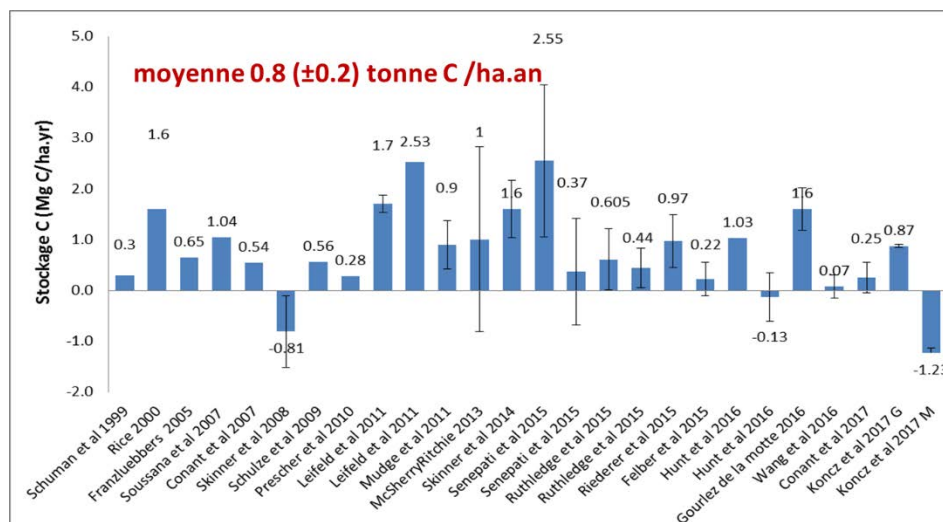


Figure 3. Exemples de la littérature recensée communiquant un stockage de carbone en prairie (*Communication personnelle Katja Klumpp*).

Ce stock peut évoluer positivement ou négativement, mais en tout état de cause, après quelques dizaines d'années de pratiques favorables au stockage, les stocks de carbone n'augmentent plus et leur conservation implique de maintenir les pratiques qui ont permis leur accumulation. Ces pratiques doivent être maintenues de manière continue, car l'abandon ou même l'interruption rapide d'une pratique conduit à un (dé)stockage (rapide) de carbone.

2.2. STOCKS DE CARBONE DANS LES SOLS ET FACTEURS AFFECTANT SON STOCKAGE À LONG TERME

La variation du carbone organique des sols résulte d'interactions complexes entre de multiples variables physiques. Ainsi, à l'échelle du paysage, le climat et les attributs biophysiques inhérents au sol, tels que la texture du sol, sa minéralogie, sa topographie (Maillard *et al.* 2016) et ses propriétés chimiques (pH par exemple) sont des facteurs qui influent sur le stockage du carbone. La concentration en CO_2 atmosphérique (Jones et Donnelly, 2004) intervient également. Ces facteurs abiotiques sont à la base du stockage de carbone d'un sol et expliquent en partie la teneur actuelle en carbone de ces sols.

2.2.1. Le climat

L'analyse bibliographique sur des données climatiques mondiales montre une augmentation du potentiel de stockage de carbone sous les climats humides et tempérés correspondant à des valeurs de précipitations plutôt élevées (> 800 mm/an) et à des températures annuelles moyennes modérées comprises entre 5 et 10 °C (cf. Figure 4). À des températures annuelles moyennes plus élevées ou dans des conditions plus sèches, le potentiel de stockage est plus limité.

Le climat a à la fois une influence directe sur les propriétés physico-chimiques du sol à capter le carbone et une influence indirecte sur la sélection d'un type de végétation qui y est adapté et présentant des capacités de stockage de carbone différentes.

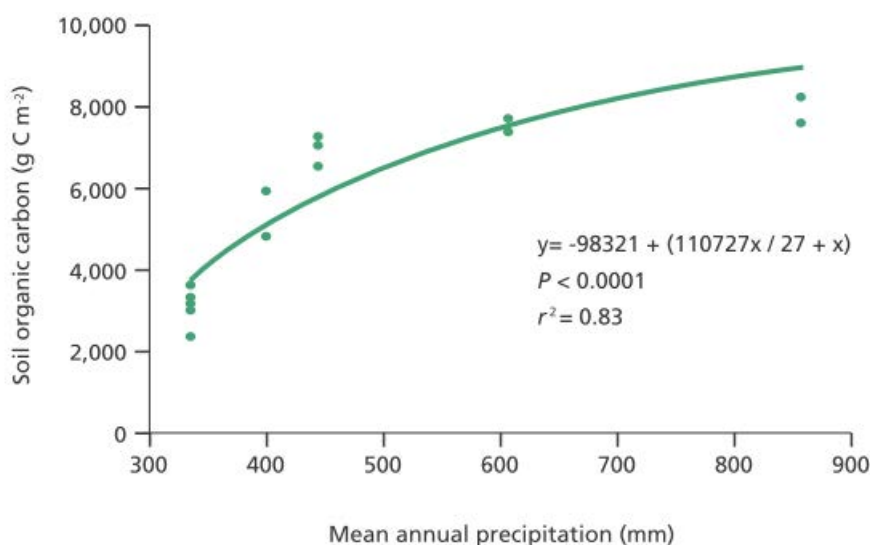


Figure 4. Exemple sur le carbone organique du sol (0-30cm) sur un gradient de précipitations annuel moyen dans le Nord Grandes plaines américaines (FAO, 2019).

2.2.2. La texture du sol

La matière organique forme avec l'argile des agrégats dans le sol qui, d'une part, la protège de la minéralisation par les micro-organismes et, d'autre part, structure le sol et favorise ainsi sa capacité à retenir l'eau. La teneur en argile du sol est donc un indicateur à prendre en compte pour déterminer sa capacité de stockage du carbone sur le long terme. La création de sol, la pédogénèse, est en effet d'environ 10 cm en 2 000 ans.

2.3. FACTEURS BIOTIQUES ET DE GESTION AFFECTANT LA MATIÈRE ORGANIQUE DU SOL À COURT TERME ET MOYEN TERME

Aux côtés des facteurs abiotiques agissant sur le long terme, s'ajoutent les facteurs biotiques et de gestion qui vont faire varier cette capacité de base sur les moyens et courts termes. À l'échelle de la parcelle, les changements dans les pratiques de gestion des terres et la diversité des espèces végétales augmentent l'hétérogénéité du carbone organique du sol.

Les facteurs biotiques affectant la matière organique du sol à court terme et moyen terme sont principalement les pratiques agricoles et le type de végétation. Elles sont étroitement liées, car les premières influent sur la seconde.

En effet, la séquestration de carbone dans les sols de prairie dépend à la fois de la productivité nette de couvert végétal (qui détermine elle-même les flux de carbone entre l'atmosphère, biomasse aérienne/souterrain et le sol) et du temps de résidence moyen du carbone dans les différents compartiments du sol. Une stimulation de la productivité nette du couvert végétal via des pratiques agricoles augmente la matière organique entrant dans le sol et ainsi le stockage du carbone.

Les pratiques agricoles comme le choix des espèces végétales, leur densité de plantation, l'intensité du prélèvement des végétaux, l'amendement, la fertilisation et le travail du sol (etc.) ont un effet sur le (dé)stockage de carbone dans les sols (Derrien *et al.* 2016). Ces pratiques agissent non seulement sur les flux entrant/sortant de matière organique dans le sol, mais également sur la sensibilité de ces matières organiques à la minéralisation, en agissant sur les mécanismes biotiques et abiotiques.

L'hétérogénéité du carbone dans les sols est aussi dictée par la succession des usages des sols (notamment héritage des pratiques agricoles antérieures, Smith *et al.* 2014).

2.3.1. Pratiques agricoles

Un des facteurs principaux expliquant les variations dans les flux de carbone est le type de gestion de prairies et les changements de type de gestion. Derrien *et al.* (2016) ont étudié l'influence de plusieurs pratiques sur le stockage du carbone : le choix des espèces végétales et de leur densité de plantation, l'intensité du prélèvement des végétaux, l'amendement, la fertilisation et le travail du sol (etc.). Ces pratiques agissent non seulement sur les flux de matière organique dans le sol, mais également sur la sensibilité de ces matières organiques à la minéralisation, en agissant sur les mécanismes biotiques et abiotiques.

Globalement, tout ce qui favorise la production végétale primaire et son retour au sol favorisera le stockage de carbone. Il s'agit de maîtriser la fauche, et d'apporter de l'azote organique, idéalement grâce à la présence de légumineuses (ou Fabacées) dans la végétation. Les pratiques n'influencent pas uniquement les entrées, mais aussi les mécanismes de stabilisation et déstabilisation du carbone dans les sols et donc les sorties de carbone (Derrien *et al.* 2016).

Le stockage de carbone dans les prairies peut être augmenté par :

- la gestion/exploitation « modérée » de biomasse (fauche, pâturage), notamment un pâturage à intensité modérée, qui combine défoliation et recyclage de nutriment (déjections animales) ;
- l'implantation d'espèces favorables (légumineuses) ;
- l'irrigation et la fertilisation ;
- la restauration de prairies dégradées favorisent un stockage de carbone (Ghosh et Mahanta 2014).

Plusieurs méta-analyses (voir dans Derrien *et al.* 2016) traitent de l'impact de certaines pratiques agricoles sur les stocks de carbone du sol :

- fertilisation ;
- irrigation ;
- travail du sol ;
- chaulage.

Fertilisation

La fertilisation est la pratique la plus commune pour augmenter la quantité de biomasse aérienne, dépendant de la quantité d'azote et d'eau apportée, mais cela peut aussi affecter la biomasse souterraine dans une moindre proportion (respectivement +32 et +6 % d'augmentation observées dans les travaux de Bartholomée *et al.* 2018). Derrien *et al.* (2016) ont démontré que l'augmentation des apports d'azote entraînait une augmentation des entrées de carbone dans le sol et une absence de changement des flux de sorties (voir aussi Figure 5).

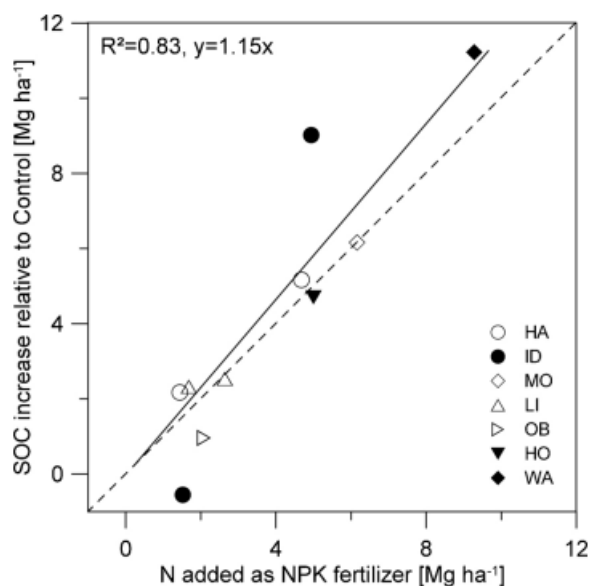


Figure 5. Taux de séquestration moyen en relation avec la fertilisation azotée annuelle (tonne N/ha/an) pour sept dispositifs de prairie long terme (16-54 ans) (Poeplau *et al.* 2018)

Quand la fertilisation minérale est complétée par des amendements organiques, l'augmentation des stocks de carbone est d'autant plus élevée, car les amendements organiques contribuent directement au stock de matière organique des sols. L'intensité de la gestion sur l'écosystème va donc jouer sur le stockage de carbone.

Irrigation

Zhou *et al.* 2016 montrent que la sécheresse et l'irrigation induisent tous les deux de légères hausses comparables du stock de carbone dans le sol, mais *via* des mécanismes différents : la sécheresse conduit à une augmentation du rapport racine/tige et à une diminution de la respiration hétérotrophique du sol, alors que l'irrigation conduit à une augmentation de la respiration du sol, mais aussi à des entrées de biomasse plus élevées.

Travail du sol

Un retournement de prairie engendre des pertes de carbone (*via* une décomposition accélérée de la matière organique). Chenu *et al.* 2014 estiment que l'absence de labour augmenterait le stockage de carbone par une moindre minéralisation des matières organiques due à leur meilleure protection physique dans les agrégats du sol, et à des conditions plus froides et humides dans la couche superficielle du sol.

En conclusion, comme vu ci-dessus, il est souvent considéré que certaines pratiques agricoles permettent donc d'accroître les entrées de matière organique dans le sol, et ont un impact positif sur le stockage de carbone (Derrien *et al.* 2016, Chenu *et al.*, 2014), même si les mécanismes impliqués ne sont pas encore clairement élucidés. Pour un bilan carbone plus poussé, il faudrait aussi considérer le devenir d'une biomasse qui serait exportée de ces prairies, si le carbone de cette biomasse est stocké, ré-émis ou re-rentre dans un autre flux de carbone.

2.3.2. Biodiversité et stockage du carbone

Diversité végétale

Les travaux de l'initiative « 4/1000 » indiquent que les forêts et prairies constituent le principal stock et puit de gaz à effet de serre.

Les facteurs limitant la production primaire de prairies de graminées sont l'azote et l'eau. La présence de légumineuses permet de lever cette limitation sans engendrer d'émissions de gaz à effets de serre

supplémentaires associés à l'apport de fertilisants minéraux azotés (Denis Angers 2019, communication personnelle). Il est également couramment admis que des teneurs élevées en lignine (tissu végétal dense) augmentent les entrées vers le pool intermédiaire de matière organique.

De nombreuses études (voir notamment De Deyn *et al.* 2011) montrent l'effet bénéfique d'une diversité fonctionnelle des prairies. Ainsi, une gestion visant à restaurer/maintenir la diversité botanique dans les prairies peut apporter des bénéfices significatifs pour le stockage de carbone quand cela est combiné avec l'augmentation de l'abondance des espèces de légumineuses.

Des prairies comprenant différents groupes fonctionnels de plantes mésotrophiques (herbes en C3, dicotylédones, et notamment légumineuses) sont favorables à une accumulation de carbone et d'azote de la matière organique du sol et l'amélioration de la structure du sol. Les résultats de De Deyn *et al.* 2009 indiquent que ces flux sont influencés par la présence et la biomasse de certaines espèces de plantes, notamment les fixatrices d'azote (légumineuses) et herbacées. La cooccurrence d'espèces relevant de certains groupes fonctionnels semble donc cruciale pour le stockage de carbone et d'azote dans ces types de milieux. Globalement, il semble que l'augmentation de la diversité des traits fonctionnels des plantes, et notamment par les graminées en C4 et les légumineuses, en prairie conduise à une accélération du stockage de carbone dans ces milieux (Yang *et al.* 2019, Chen *et al.* 2018). Ceci pourrait aussi être vrai même en l'absence de légumineuses (Cong *et al.* 2014). De récents développements visent à évaluer économiquement le service de séquestration de carbone permis par ces espèces

Diversité des macro et micro-organismes du sol

D'une manière générale l'ensemble de la faune du sol, et pas seulement la macro-faune, influence la dynamique de la matière organique des sols. La micro- et la méso-faune contribuent aussi à la décomposition de la litière et des débris végétaux. L'ensemble du réseau trophique du sol participe à la régulation des microorganismes (champignons, bactéries). Par exemple, les protozoaires et nématodes bactériophages tendent à diminuer la densité de microorganismes, mais stimulent aussi leur activité, ce qui tend à augmenter la minéralisation. De ce fait, la diversité des macro et micro-organismes du sol joue également sur les capacités de minéralisation du carbone dans ces sols.

Le passage du sol dans le tube digestif de la macro-faune, et particulièrement les vers de terre, favorise la mise en contact entre des microbes et des matières organiques. De plus, en fonction des organismes, la digestion altère la structure chimique des matières organiques par digestion sélective de composés chimiques, ce qui modifie leur stabilité. En effet, Filser *et al.* 2016 ont démontré le très fort impact des micro et macro-organismes sur les flux de carbone des sols, pouvant augmenter ou réduire ces flux de plusieurs dizaines de pourcents, et, parfois, convertissant des puits de carbone en source et inversement.

Dans les régions tempérées notamment, la stabilisation de la matière organique, et donc le stockage du carbone dans les sols, sur le long terme est contrôlée par les interactions entre les microorganismes (champignons et bactéries), les ingénieurs de l'écosystème (vers de terre, fourmis) et la matrice minérale du sol. Ces ingénieurs agissent en fragmentant la litière, en l'incorporant au profil du sol, en mélangeant par bioturbation le sol au sein du profil et en influençant le transport de matière organique sous forme dissoute (Derrien *et al.* 2016).

Toutefois, la composante microbienne a longtemps été considérée comme une boîte noire uniquement sous l'influence de facteurs abiotiques, excluant le rôle fonctionnel de la diversité et la composition des communautés microbiennes, et de leurs interactions trophiques. Des travaux de recherche sont encore nécessaires, non pas pour prouver que ces communautés jouent un rôle majeur dans les processus de stockage/déstockage de carbone organique dans les sols, mais pour étudier comment cette diversité peut intervenir comme levier pour optimiser la capacité de stockage du carbone organique dans les sols (Derrien *et al.* 2016).

Le fonctionnement de ces organismes du sol est également en lien avec la diversité botanique présente. Ainsi Birkhofer *et al.* 2011 ont démontré que l'activité de la faune du sol augmente avec la richesse spécifique en légumineuses et graminées, et cela d'une façon générale, indépendamment des modes de gestion et des conditions climatiques.

3. QUELLES RECOMMANDATIONS POUR LES PRAIRIES AÉROPORTUAIRES ?

Aucune publication portant précisément sur les prairies aéroportuaires n'a été identifiée dans la recherche bibliographique réalisée dans le cadre de cette étude et donc aucune donnée ou valeur chiffrée réellement spécifique à ce genre de milieu n'est *a priori* disponible.

La consultation des productions scientifiques a donc été orientée pour déterminer si des évaluations sur des prairies équivalentes pouvaient néanmoins servir de référence, tant en termes de valeurs de stockage/émission de carbone que d'intégrations de telles valeurs dans les bilans carbonés des aéroports.

3.1. DONNÉES DE LA LITTÉRATURE

La littérature donne des résultats qui ne vont pas tous dans le même sens. Les évaluations de la séquestration de carbone peuvent différer sur plusieurs points :

- sur la méthodologie employée en termes de type de données collectées et du type de calculs réalisés ;
- sur les compartiments et les types de végétation considérés ;
- sur les conditions agropédoclimatiques et les pratiques de gestion.

La bibliographie consultée montre en effet une grande diversité des méthodes de mesures du stockage de carbone par les sols (cf Annexe 2) et donc de résultats d'évaluations, notamment sous l'effet d'une diversité de variables difficiles à appréhender ou modéliser.

Des informations à dire d'experts ont également été récoltées afin d'approcher ou de proposer des valeurs applicables au cas des prairies aéroportuaires :

- Les stocks de carbone les plus élevés (> 100 t/ha) sont observés dans les zones d'altitude (Alpes, Pyrénées, Massif Central, Jura, Vosges) et/ou dans les zones de prairie (Bretagne). Des stocks moyennement élevés (70-100 t/ha) se trouvent souvent dans des grandes régions forestières ou fourragères (Bretagne, Est, Massif central, Normandie). Le GIS sol (2006) indique quant à lui un stock de 80 tC/ha pour les prairies et les forêts.
- Des prairies comprenant différents groupes fonctionnels de plantes mésotrophiques (herbes en C3, dicotylédones, et légumineuses) sont favorables à une accumulation de carbone et d'azote de la matière organique du sol et l'amélioration de la structure du sol.
- Il ne faut pas négliger le stock souterrain de carbone. Ainsi, des estimations conduisent à dire que les prairies humides contiennent 4 fois plus de biomasse aérienne que de biomasse racinaire, les prairies mésophiles 2,8 fois plus et les prairies naturelles contiennent autant de biomasse aérienne que de biomasse racinaire. Pour une estimation plus juste du stock de carbone dans les sols, il est recommandé d'analyser le stockage de carbone jusque 60cm (FAO, 2019).
- L'analyse de la littérature recensée montre que les prairies permanentes stockent annuellement en moyenne $0,76 \pm 0,12$ t C à l'hectare.
- Les facteurs qui affectent la teneur en matière organique du sol sur le long terme sont le climat, le type de sol, la topographie, les attributs biophysiques inhérents au sol, tels que la texture du sol, sa minéralogie, sa topographie et ses propriétés chimiques (pH par exemple), mais également les usages passés et présents du sol (pratiques de gestion) et le couvert végétal.

- Un certain nombre de pratiques sont connues pour influencer le stockage de carbone dans les prairies, mais les contraintes liées aux sites aéroportuaires amènent de facto à exclure certaines modalités de gestion, au moins sur certaines zones de ces sites (pâturage et enarbrement), notamment en raison du risque de collision.
 - Un retournement de prairie engendre des pertes de carbone (*via* une décomposition accélérée de la matière organique).
 - La fertilisation est la pratique la plus commune pour augmenter la quantité de biomasse aérienne et souterraine. Certains travaux montrent une augmentation respective de 32 et 6 % de la biomasse. De plus, des pratiques qui intègrent la possibilité de restituer au sol les résidus organiques après la fauche contribuent au recyclage des éléments, notamment l'azote et le carbone, et participent à la restauration de la fertilité du sol.
 - Les mesures de gestion visant à restaurer/maintenir la diversité botanique dans les prairies peuvent apporter les bénéfices les plus significatifs pour le stockage de carbone quand cela est combiné avec l'augmentation de l'abondance des espèces de légumineuses. Cependant, et globalement, l'augmentation de la diversité des plantes en prairie amène une accélération du stockage de carbone dans ces milieux, même en l'absence de légumineuses.
 - Le stockage de carbone dans les prairies peut être augmenté par la gestion/exploitation « modérée » de biomasse (fauche, pâturage), notamment un pâturage à intensité modérée, qui combine défoliation et recyclage de nutriment (déjections animales).
- En règle générale, les pratiques de gestion applicables à ces prairies ne pourront qu'amener à maintenir le stock de carbone dans le sol et à éviter son relargage dans l'atmosphère, plutôt qu'à augmenter la quantité de carbone séquestrée dans les sols.

3.2. ÉVALUATION DES CAPACITÉS DE STOCKAGE DE CARBONE PAR LES PRAIRIES

Une évaluation des capacités de stockage de prairies pourrait être réalisée sur la base des références du GIEC (cf Annexes 2 et 3). L'estimation de changement du stock du carbone selon GIEC Tier 1 se base sur un calcul de variation sur 20 ans des stocks de carbone organique du sol (couche de 0 à 30 cm, COS_{ST}) en fonction de l'affectation des terres (F_{LU} ; ici égal à 1 pour les prairies permanentes), des facteurs d'émission dus à la gestion (F_{MG}) et des intrants (F_i), des prairies par l'équation :

$$COS(t) = COS_{ST} \times F_{LU} \times F_{MG}(t) \times F_i(t)$$

$$\text{Stockage C} = (COS(t) - COS_{ST})/20$$

Pour estimer le stock de carbone initial COS_{ST} , la carte de sol du GIS peut être utilisée :

<https://www.gissol.fr/donnees/cartes/la-carte-nationale-des-stocks-de-carbone-des-sols-integree-dans-la-carte-mondiale-de-la-fao-4335>).

Après échange avec *HOP ! Biodiversité*, les facteurs d'émission suivants sont proposés :

Facteur d'émission de la pratique agricole (F_{MG})

Les prairies d'aéroports sont le plus souvent en gestion minimale (le fait de laisser les produits de fauche n'étant pas considéré comme une fumure), ou des prairies non dégradées et gérées de manière durable, soit les coefficients suivants :

- Prairies améliorées (FMG = 1,14) : prairies gérées de manière durable, avec une pression pastorale modérée et auxquelles est apportée au moins une amélioration (fumure, sélection, irrigation, par exemple) – *ce cas de figure pourrait correspondre aux prairies aéroportuaires qui n'ont pas été remaniées depuis longtemps et pour lesquelles on note une forte diversification des espèces végétales présentes.*
- Prairie avec gestion minimale (FMG = 1) : prairies non dégradées et gérées de manière durable mais sans amélioration de gestion majeure – *ce cas de figure pourrait correspondre aux prairies aéroportuaires où les interventions sont mineures.*
- Prairies modérément dégradées (FMG = 0,95) : prairies sur-pâturées ou modérément dégradées, avec une productivité quelque peu réduite (par rapport aux prairies indigènes ou avec gestion minimale) et ne bénéficiant pas de mesures de gestion – *ce cas de figure pourrait correspondre aux prairies aéroportuaires qui ont pu connaître des perturbations et où la diversité végétale présente a été réduite.*
- Prairies fortement dégradées (FMG = 0,7) : perte importante de productivité et de couvert végétal à long terme en raison de graves dégâts mécaniques causés à la végétation et/ou d'une érosion grave des sols – *ce cas de figure pourrait correspondre aux prairies aéroportuaires fréquemment retournées ou décaissées pour travaux, ou les espaces à engazonnement monospécifique.*

Facteur d'émission des intrants (Fi)

Les « intrants » sont ici de plusieurs types : irrigation, diversification de la végétation, fumure... Il s'agit donc plus d'interventions que d'intrants au sens strict. C'est ce terme qui est utilisé dans la suite du chapitre pour faciliter la compréhension.

Les prairies d'aéroport ne reçoivent aucun intrant, sauf parfois le produit de fauche laissé sur place.

- Interventions aucune/modérées (Fi = 1) lorsqu'aucune mesure de gestion supplémentaire n'a été mise en œuvre.
- Interventions importantes (Fi = 1,11) où plusieurs mesures/améliorations de gestion ont été mises en œuvre (cf prairies améliorées).

En croisant les différents types de prairies avec les gradients d'intervention, il est possible de calculer l'évolution potentielle du stock de carbone dans différents cas (tableau 1).

	Types d'interventions (Fi)	Types d'interventions (Fi)	
		Aucune/Modérées	Importantes
Types de prairies (FMG)		1	1,11
Prairies améliorées	1,14	1,14	1,27
Prairies avec gestion minimale	1	1,00	1,11
Prairies modérément dégradées	0,95	0,95	1,05
Prairies fortement dégradées	0,7	0,70	0,78

Tableau 1 : Différents taux d'évolution du stock initial de carbone sur 20 ans de différents types de prairies gérés selon différentes modalités. Ces taux sont obtenus par l'équation : $COS / 20ans = COS_{ST} \times F_{LU} \times F_{MG} \times F_i$, avec ici $F_{LU} = 1$ (cas des prairies permanentes) et les valeurs de F_{MG} et F_i indiquées dans le tableau pour chaque modalité.

Selon cette première approche, on observe que :

- Le stockage de carbone peut globalement augmenter avec l'amélioration de la prairie.
- Sur 20 ans, les prairies « améliorées » et « minimale » stockeront toujours du carbone quelle que soit l'intensité des interventions et inversement, les prairies « fortement dégradées » déstockeront toujours du carbone quelle que soit l'intensité des interventions si les dégradations persistent.
- Une absence de modifications des pratiques perturbatrices entraînera un déstockage de carbone de 5 à 33 % du stock initial selon le type de prairies au bout de 20 ans, sauf pour les « prairies améliorées ».
- Les « prairies modérément » dégradées déstockeront de 10 à 5 % de leur stock initial de carbone sur 20 ans dans le cas, respectivement, d'une absence d'intervention ou d'interventions modérées, et pourront stocker 5 % de carbone en plus au bout de 20 ans si les interventions sont importantes, c'est-à-dire si la gestion de la prairie dans cet objectif est soutenue.

Soit en conclusion :

- En l'état actuel des modalités de gestion des prairies aéroportuaires et en appliquant la méthode de calcul du GIEC (confer Annexes 2 et 3), il apparaît que i) les prairies aéroportuaires à interventions mineures qui n'ont pas été remaniées depuis longtemps ont un stockage faible à neutre du carbone, tandis que ii) les prairies aéroportuaires à perturbations (décaissement) et où faible diversité végétale auront tendance à déstocker du carbone.
- Pour renverser la tendance et donc arriver à une situation de stockage de carbone, il est nécessaire « d'améliorer » ces prairies. Les méthodes classiques d'amélioration (notamment le pâturage modéré, exemple une à deux passages par an) étant limitées par les contraintes de sécurité, la seule option semble être d'augmenter leur biodiversité par des sélections ou des implantations de plantes et des méthodes de gestion adaptées à un couvert végétal diversifié.
- Les prairies ont des stocks importants de carbone dans leurs sols (de 80 à 100 tonnes par hectare), soit l'équivalent des forêts. L'enjeu sur ces espaces est donc principalement d'éviter le déstockage du carbone plutôt que de chercher à en stocker davantage. Toute intervention impactant une prairie (travaux par exemple) devrait donc intégrer son impact sur le déstockage du carbone du sol.
- La dégradation d'une prairie avec gestion minimale vers une prairie fortement dégradée peut entraîner sur 20 ans une perte de 28 % (0,95-0,67) du stock de carbone en absence d'interventions, de 30 % (1,00-0,70) en interventions modérées, et jusqu'à 33 % (1,11-0,78) lorsque les interventions sont importantes.

ANNEXE 1

OBJECTIF ET MÉTHODOLOGIE

Cadrage de l'étude

Questionnement

La réalisation de cette synthèse de connaissances a été confiée à la FRB par *HOP! Biodiversité*, association dont l'objet est l'évaluation, l'amélioration et la promotion de la biodiversité sur les sites aéroportuaires.

La question posée, établie conjointement et formulée dans le document de cadrage validé le 17 décembre 2018, est la suivante : « Quel est le stockage de carbone des prairies (gérées par les aéroports), global et annuel ? » accompagnée de la précision « Divers types de prairies [sont concernées] mais en majorité des prairies de fauche mésophile ». Sa traduction pour ce rapport est : « Quel est le stock global de carbone des prairies (similaires à celles qui sont gérées par les aéroports) et quel est leur potentiel de stockage annuel ? ».

Les enjeux particuliers sous-tendant cette requête sont de :

1. Intégrer, si possible, le bilan carbone annuel des prairies dans le bilan carbone des aéroports : à ce jour, ce stockage est exclu du bilan carbone des aéroports, car aucune méthode de quantification n'est disponible. Or, si des méthodes de gestion permettent de stocker du carbone et que le bilan peut être intégré au bilan global de l'aéroport, cela constitue une forme de valorisation « économique » de la prairie aéroportuaire en plus de sa seule fonction d'« amélioration de la biodiversité ».
2. Faire prendre conscience par différents moyens que l'environnement est un capital et alors que la plupart n'y voient qu'un coût/contrainte et ainsi, à terme, aider à préserver ces prairies.

Réflexions préliminaires sur le cadrage de la commande

- Conformément à la commande et au temps imparti pour la traiter, le travail s'est concentré i) les méthodes d'évaluation, et ii) les facteurs ou les pratiques de gestion qui influencent les flux et bilans de carbone de ces prairies, sur iii) le potentiel des prairies aéroportuaires suivis par *HOP! Biodiversité*, en terme de stockage de C (source ou de puits de carbone).
- La commande initiale a été complétée par une demande relative au stockage de carbone par les prairies sous-marines en méditerranée (carbone bleu). Une liste de publications pouvant répondre à la question a été fournie précédemment à *HOP! Biodiversité*.

Méthodologie retenue

Afin de faire le point sur la question posée, la méthode retenue est celle de la synthèse de connaissance. Ce travail est avant tout une forme d'état des lieux synthétique sur les résultats des travaux et études existant dans la littérature académique ou grise. La synthèse donne au commanditaire un aperçu des connaissances disponibles sur le sujet à la date de la commande. Ce travail comporte quatre étapes :

- Définition d'une équation de recherche (Cf partie 6.3), après identification des termes pertinents pour répondre à la question et assemblés par des opérateurs logiques (booléens).
- Phase de recherche de publication et de tri : différentes bases de données scientifiques (Web of Science, ScienceDirect, PubMed, BASE) ont été consultées et une recherche sur le moteur « *Google Scholar* » a permis d'identifier d'autres articles, ainsi que de la littérature grise. Concernant le tri, différents critères ont été retenus et ont permis de filtrer les articles aux étapes du titre, résumé puis texte intégral (cf partie 6.4).

- Compulsion des références retenues et échanges avec un panel d'experts volontaires, afin qu'ils puissent éventuellement compléter cette liste retenue par nos soins.
- Publication de la synthèse consolidée

ÉQUATION DE RECHERCHE

Web of Science

((grassland OR meadow OR sward OR "grassy field*" OR pasturage OR pasture OR "grazing land*" OR lawn* OR "sod grass" OR "herbaceous plant*" OR "herbaceous weed*" OR grass* OR "meadow fescue" OR "meadow grass*" OR "meadow soil*" OR ley* OR prairie* OR mow*) OR

(seagrass OR seagrass bed* OR "sea-grass bed*" OR "seagrass meadow*" OR "bed* of seagrass" OR "underwater meadow*" OR "sea bed" OR "sea grass bed*"))

AND

("carbon sequestration" OR "carbon storage" OR "carbon-storage" OR "carbon sink" OR "carbon stock" OR carbon OR "source-sink" OR "soil organic carbon" OR "organic carbon" OR "soil carbon storage" OR "soil carbon" OR "carbon balance" OR "carbon input" OR "sink for carbon" OR "greenhouse gas balance" OR "carbon content" OR "organic carbon" OR carbon OR "carbon cycl*")

➔ 2120 résultats 11/2018

ScienceDirect

(meadow OR grassland OR sward OR mowing) AND (carbon)

➔ 2552 résultats 11/2018

Google Scholar

("carbon sequestration" OR sink) AND (meadow Or grassland)

➔ 187 000 résultats 11/2018 -> retention sur les premières pages pertinentes

CRITÈRES DE TRI

Tri titre : stockage carbone prairie ou écosystème terrestre explicite

Tri abstract stockage carbone prairie ou écosystème terrestre explicite

Tri plein texte : zone géographique pertinente ou analogie possible, absence de traitement sur les prairies : fertilisation, pâturage, amendements...

ANNEXE 2

MÉTHODES DE QUANTIFICATION DES STOCKS ET FLUX DE CARBONE DANS LES PRAIRIES D'INTÉRÊT

LES DIFFÉRENTES MÉTHODES ET LEURS INCERTITUDES

Le bilan carbone est une analyse déterminant la séquestration du carbone ; il est calculé en faisant le rapport entre un stock initial et un stock final dans un milieu donné, ou encore la différence entre les flux entrant et sortant (échanges entre compartiments de l'écosystème et de l'atmosphère) (Figure 6).

Un ensemble de méthodes et d'approches pour mesurer ce bilan existent et sont utilisées dans le monde de la recherche, par les agriculteurs ou les gestionnaires agricoles (FAO 2019). Le rapport CGDD 2019 (p 28) liste 3 méthodes d'évaluation du service de séquestration de carbone :

- **La méthode « des stocks »** mesure les changements de stock de carbone *in situ* au cours du temps (inventaire du sol ; delta stock C) : quantité moyenne de carbone contenue dans le compartiment considéré en tC/ha
- **La méthode « des flux » de carbone** évalue les échanges annuels de carbone entre écosystème et atmosphère en tonne C/ha/an
- **La modélisation** simple ou complexe de l'évolution du stock ou des flux de carbone dans les sols (cf GIEC tiers 3 à INRA 2013:8-9)

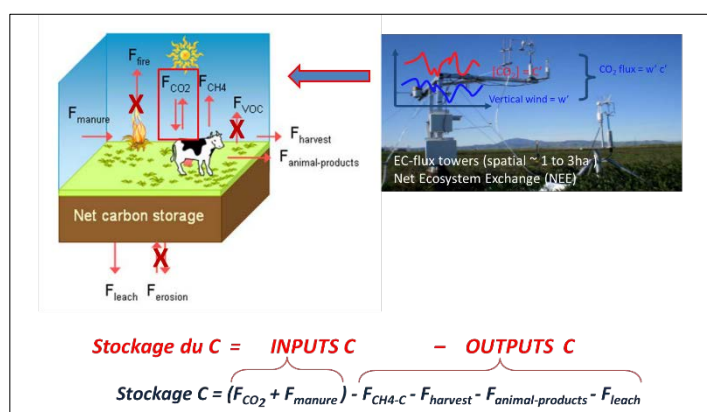


Figure 6. Estimation du bilan carbone sur la base des flux entrant et sortant (échanges entre compartiments de l'écosystème et de l'atmosphère). (Adapté de Soussana *et al.* 2010). C = Carbone ; F = Fonction ; manure = fumier / harvest = récolte / animal product = produits animaux / leach = perte par lixiviation

Toutes ces évaluations du stockage de carbone comprennent des incertitudes liées aux méthodes utilisées (Ma *et al.* 2016), à la quantité de données disponibles et à l'effort d'échantillonnage requis (Liu *et al.* 2018).

Les mesures varient fortement dans le temps et l'espace en fonction de facteurs multiples qui ne sont pas toujours décrits. Les incertitudes sur la mesure sont donc réelles et doivent être prises en compte. Ainsi, les méthodes des stocks ou des flux donnent des résultats relativement éloignés en termes de séquestration de carbone pour des comparaisons de court terme (de 3 à 5 ans).

Par exemple, les tours à flux intègrent le carbone sur l'ensemble du profil du sol à l'échelle de l'hectare ainsi que les flux liés à la biomasse aérienne et souterraine. Elles donnent donc des estimations de séquestration de carbone supérieures à celles des méthodes reposant sur les inventaires de sols qui portent sur l'estimation des variations des stocks de carbone organique du sol, qui ne tiennent majoritairement compte que de la fraction fine du sol (<2 mm), alors que la fraction grossière du sol représente elle-même un important réservoir de carbone.

Soussana *et al.* (2010) rapportent ainsi une estimation pour les prairies, issues des tours à flux, de l'ordre de 0,5 tonne C/ha/an, contre une moyenne de 0,05 tC/ha/an pour les études provenant des inventaires de sols faites sur 25 à 50 ans. Toutefois, il convient de prendre des précautions vis-à-vis de ces deux méthodes, car l'estimation du stock de carbone est un indicateur approximatif de la régulation du climat, qui ne reflète pas les variations de la vitesse du flux de carbone, autre conséquence du changement climatique (Ziegler *et al.*, 2017). Pour une estimation plus complète du service écosystémique de la régulation du climat mondial, il convient de combiner l'estimation du stock de carbone et mesures de flux (Bartholomée *et al.* 2018).

MESURES DU STOCK DE CARBONE ET SON CHANGEMENT AU COURS DU TEMPS DANS DIFFÉRENTS COMPARTIMENTS

Les études mesurent le stock de carbone et son évolution au cours du temps dans 4 compartiments principaux et s'intéressent aux mécanismes qui peuvent influencer la stabilisation/déstabilisation du carbone organique dans les sols : les mécanismes liés au vivant et à la biodiversité (plantes, faune, micro-organismes) et les mécanismes abiotiques (localisation dans la structure physique des sols et hot-spots de dégradation/stabilisation, interactions organo-minérales) (cf Figure 7; Derrien et al 2016, Bartholomée et al. 2018). On distingue :

- La biomasse aérienne
- La biomasse sous-terrine
- Le carbone organique du sol (en 3 compartiments du plus jeune au plus ancienne ; labile, intermédiaire, stable)
- Le carbone inorganique du sol

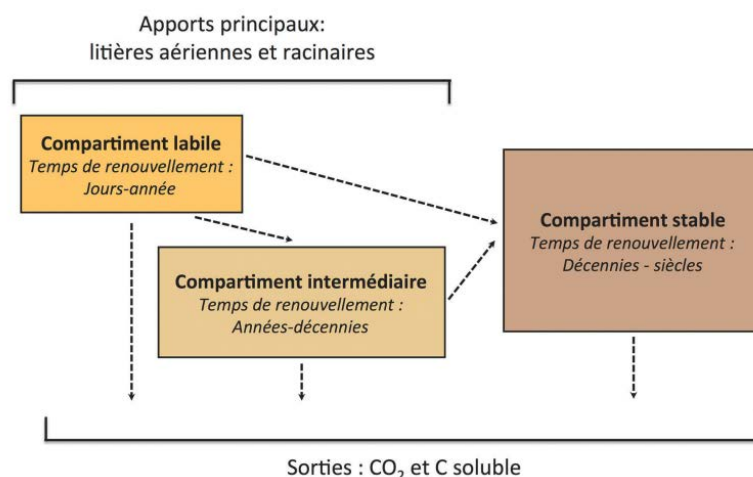


Figure 7 : Vision conceptuelle compartimentant le C du sol en fonction de son temps de renouvellement : compartiments labile, intermédiaire et stable (Derrien *et al.* 2016)

Les apports de litières aériennes (feuilles, branches, etc.), souterraines et les exsudats racinaires varient fortement entre espèces formant le couvert végétal et influencent la cinétique de décomposition des matières organiques des sols sur des échelles de temps allant de l'année à la décennie.

MESURES DE LA BIOMASSE DES PRAIRIES COMME INDICATEUR DE CARBONE ENTRANT

Mesures de la biomasse aérienne

Les méthodes les plus utilisées sont les méthodes destructives. Elle présente l'avantage de pouvoir comparer les résultats entre différents dispositifs utilisant le même type de calcul.

Des méthodes plus récentes existent, comme la spectrométrie (basée sur la mesure de divers indices de végétation), les indices de végétation par différence normalisée ou la hauteur de végétation (Bartholomée *et al.* 2018).

Néanmoins, la mesure du stock de carbone dans la biomasse aérienne des prairies a un intérêt discutable en terme de résultat, car le stock estimé n'existe que pendant l'année de végétation (Bartholomée *et al.* 2018). La principale utilité de cette mesure est de pouvoir estimer les rapports biomasse souterraine/biomasse aérienne afin d'évaluer la quantité potentielle de carbone stockée dans le sol. Le GIEC propose ainsi des valeurs de référence pour estimer la biomasse aérienne par zone climatique (Metz *et al.* 2005).

Mesure de la biomasse souterraine

Les sols des prairies ont une teneur en carbone organique plutôt élevée, car la végétation prairiale est composée d'une grande partie souterraine, notamment le système racinaire, les exsudats, la rhizo-déposition etc. qui contribue au stockage/déstockage de carbone.

On trouve quatre fois plus de racines sous les prairies que sous les cultures de céréales. Les apports sous forme de racines représentent environ un tiers des entrées de biomasse en milieu prairial et la moitié en milieu forestier. En effet, les prairies accumulent le carbone majoritairement sous forme de matières organiques dans les trente premiers centimètres du sol. La part du carbone assimilée à travers la photosynthèse et transférée dans le système racinaire peut varier fortement selon des conditions pédoclimatiques, la diversité du couvert végétal et sa gestion (mode et intensité de l'utilisation) (Poeplau *et al.* 2016).

Pour l'estimation de la biomasse souterraine, les prairies de type steppe/tundra présentent 4 fois plus de biomasse souterraine qu'aérienne, les prairies semi-arides 2,8 fois, et les prairies sub-tropicale/tropicale 1,6 fois. ("Tier 1" IPCC 2006).

MESURE DU CARBONE ORGANIQUE DU SOL

La mesure du carbone organique du sol repose sur la méthode des inventaires de sols, basée sur l'estimation des variations des stocks de carbone, en tenant compte de la fraction fine du sol (<2 mm) (cf via le réseau GISSol). Cependant, il est reconnu que des fragments grossiers de biomasse souterraine à divers degrés de décomposition forment un important réservoir de carbone associé au sol, qui ne doit pas être négligé. Aucune orientation n'est actuellement disponible, mais des travaux sont en cours au sein de la FAO et du GIEC pour prendre en compte la fraction grossière (> 2 mm) de la biomasse souterraine et appliquer, sur les carottes collectées, des procédures complémentaires à celles utilisées pour la fraction fine de sol.

Diverses méthodes analytiques peuvent être utilisées :

- Combustion à sec (Analyseur élémentaire) ;
- Digestion / oxydation par voie humide de composés du carbone organique par des ions dichromate (Cr2O7²⁻) ;

- Combustion par pyrolyse ;
- Spectroscopie (*Visible and Near Infrared Diffuse Reflectance Spectroscopy* (Vis-NIR DRS)) (Nocita *et al.* 2014).

Chacune de ces méthodes présente des avantages, désavantages et coûts différents qui ne sont pas détaillés dans cette étude. La méthode de combustion à sec est la plus répandue.

INTERPRÉTATION SPATIALE DE LA MESURE DU CARBONE DU SOL ET MÉTHODES D'INTERPOLATION

Les propriétés du sol sont caractérisées par une forte hétérogénéité spatiale. Pour comprendre comment les stocks de carbone et les facteurs environnementaux sont liés, la caractérisation de leur variabilité spatiale est donc essentielle. Tout échantillonnage de terrain est une estimation du stock à l'endroit où il a été prélevé et est une description incomplète de la variabilité naturelle.

La cartographie conventionnelle des sols a été développée comme moyen de caractériser les propriétés du sol à partir de classes de sol distinctes et l'utilisation de ces classes conduit à ne travailler que sur des valeurs moyennes spatialisées des propriétés du sol et entraîne donc des ruptures de propriétés artificielles sur les cartes, alors qu'en réalité, le sol est un continuum. En outre, ces techniques prennent beaucoup de temps et généralement ne fournissent pas d'informations complètes et à jour.

Il existe des méthodes dites d'interpolation pour estimer le stock de carbone des points non-échantillonnés pour compléter la cartographie des propriétés des sols. Cette interpolation globale permet de prendre en compte toutes les données disponibles et fournir des prédictions pour l'ensemble de la zone d'intérêt. La FAO (2019) utilise cette méthode et propose des approches permettant d'estimer les propriétés du sol dans des endroits non échantillonnés.

LA MODÉLISATION POUR DÉTERMINER LE STOCK DE CARBONE DU SOL ET SON ÉVOLUTION AU COURS DU TEMPS

Comme décrit plus haut, il existe différentes méthodes directes et indirectes permettant de saisir le stock et les changements de stock de carbone du sol : inventaire de sol, flux de carbone, télédétection, entre autres. Conjointement avec l'échantillonnage physique, la modélisation est parmi des approches les plus courantes.

Des modèles ont été développés depuis les années 1930, sous forme de représentation mathématique simplifiée. Aujourd'hui, les modèles simulant l'évolution du carbone du sol jouent un rôle crucial dans la recherche en fournissant une meilleure compréhension des processus du sol, en permettant d'extrapoler ou interpoler les expériences dans le temps, dans l'espace et en fonction de différentes conditions environnementales, ainsi que des scénarios et hypothèses dépassant le cadre du travail expérimental. Une grande variété de modèles a été développée, se différenciant par leur structure, leurs mécanismes, leur but, leur échelle et leur complexité. L'estimation de la séquestration de carbone dans les sols des prairies repose sur un petit nombre de modèles.

Les grands groupes d'approches sont :

- Les modèles empiriques (simples) représentant les relations observées entre les stocks ou variations de carbone, ou les émissions de carbone et les variables environnementales, telles que la teneur en argile du sol, la température, les précipitations et l'usage des sols
 - par exemple : le modèle de Hénin-Dupuis
- Les modèles fonctionnels (complexes) basés sur des fonctions empiriques robustes ou sur des principes physico-chimiques généraux pour simuler et intégrer différents processus. Un bon

nombre de ces modèles peuvent prévoir et intégrer diverses autres variables comme l'humidité du sol, la température du sol, la production de biomasse végétale, etc. Quelques exemples de modèles (non exhaustif) sans ou avec plante :

- Estimation du carbone des sols :
 - *Rothamsted Carbon* (RothC) (Nemoto *et al.* 2017, Jenkinson *et al.* 1990)
 - *Century* (Parton *et al.* 1987, Parton 1996)
 - EPIC (Williams *et al.*, 1984)
- Simulation du carbone des prairies :
 - ORCHIDEE-GM (Chang *et al.* 2016)
 - PaSim (*Pasture simulation model*, Riedo *et al.* 1998)
 - Apsim (*Agricultural Production Systems sIMulator*, Holzworth *et al.* 2014)

L'organisme de référence, le GIEC, propose 3 niveaux de calcul, de complexité croissante pour estimer la séquestration du carbone dans les prairies, à partir d'un stock initial.

La méthodologie Tiers 1 (IPCC 2006, cf Chapitre 6 Prairie) est la plus simple à utiliser. Elle estime la variation des stocks de carbone organique du sol des prairies (COS) à partir de statistiques et données nationales, en se basant sur le stock de carbone organique du sol dans la couche de 0 à 30 cm (COSST, tC/ha), l'affectation des terres (FLU ; ici égal à 1 pour les prairies permanentes), les facteurs d'émission dus à la gestion (FMG) et les intrants (Fi).

$$\text{COS}(t) = \text{COSST (tC/ha)} \times \text{FLU} \times \text{FMG}(t) \times \text{Fi}(t)$$

Les facteurs d'émissions de la gestion (FMG) sont de 4 ordres :

- Prairies améliorées (1,14) : prairies gérées de manière durable, avec une pression pastorale modérée et auxquelles est apportée au moins une amélioration (fumure, sélection, irrigation, par exemple)
- Prairie avec gestion minimale (1) : prairies non dégradées et gérées de manière durable, mais sans amélioration de gestion majeure
- Prairies modérément dégradées (0,95) : prairies sur-pâturées ou modérément dégradées, avec une productivité quelque peu réduite (par rapport aux prairies indigènes ou avec gestion minimale) et ne bénéficiant pas de mesures de gestion
- Prairies fortement dégradées (0,7) : perte importante de productivité et de couvert végétal à long terme en raison de graves dégâts mécaniques causés à la végétation et/ou d'une érosion grave des sols

Le facteur d'émission des intrants (Fi) sont de deux ordres :

- Intrants modérés (1) : pertinent lorsqu'aucune mesure de gestion supplémentaire n'a été mise en œuvre
- Intrants importants (1,11) : pertinent pour les prairies améliorées lorsqu'une ou plusieurs mesures/améliorations de gestion ont été mises en œuvre (au-delà de ce qui est requis pour que les prairies soient classées comme prairies améliorées)

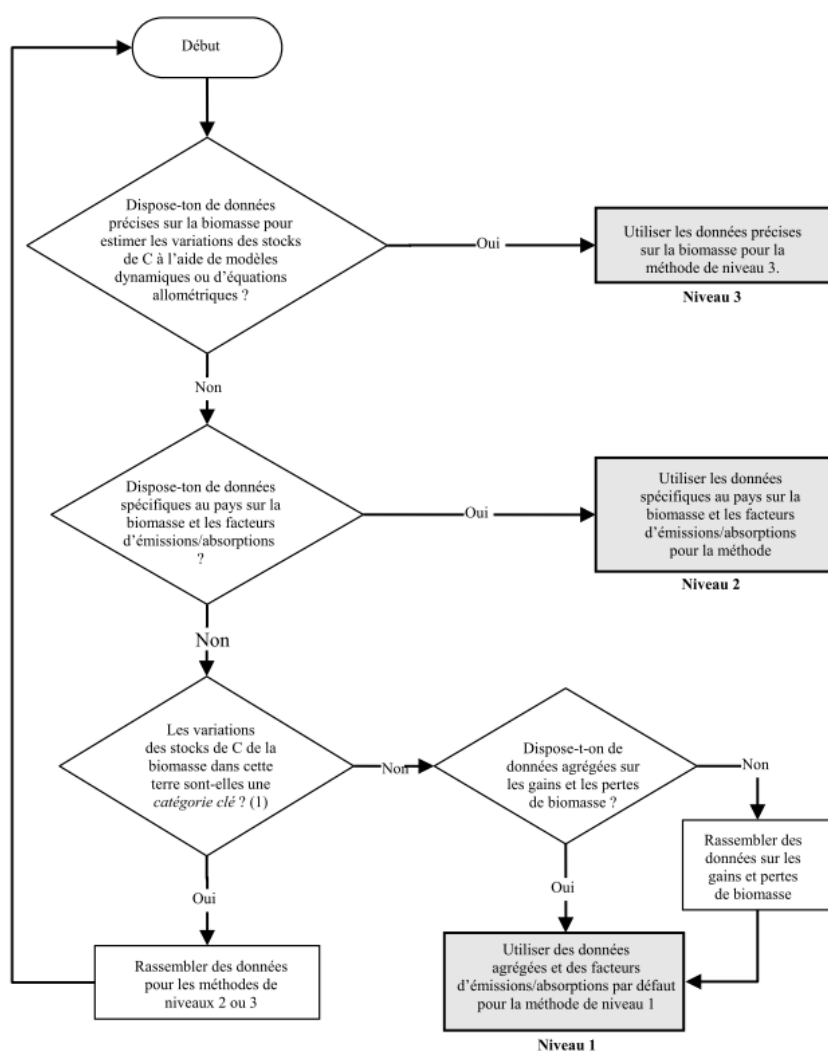
Une difficulté pour l'application de cette méthode en France vient du fait qu'il existe peu d'information sur des critères qualitatifs des prairies ou des phénomènes tels que le sur-pâturage ou la dégradation.

Deux autres méthodologies, Tiers 2 et Tiers 3 peuvent être utilisées pour affiner les estimations à des échelles plus fines. Ainsi, Tiers 2 utilise des « facteurs d'émission » améliorés, détaillés et régionalisés, qui s'appliquent à un stock de carbone du sol mesuré (issus de travaux scientifiques, sans modification des équations proposées dans le Tier 1) ; Tiers 3 utilise des équations ou modèles enfin d'estimer la séquestration du carbone en fonction des variables locales (usage possible de la modélisation, cf Section modèle 2.6) (INRA 2013:8-9). Elles ne sont pas décrites dans cette synthèse.

CHOIX DE LA OU DES MÉTHODES LES PLUS ADAPTÉES

Le GIEC fournit des recommandations pour sélectionner la procédure la plus appropriée pour estimer les variations des stocks de carbone dans la biomasse aérienne/souterraine ou la matière organique du sol sous forme de diagramme décisionnel (Figure 8). En fonction du niveau utilisé et de la disponibilité des données, les prairies pourront être désagrégées par types, régions ou zones climatiques, et systèmes de gestion.

A : Biomasse



B : Carbone du sol

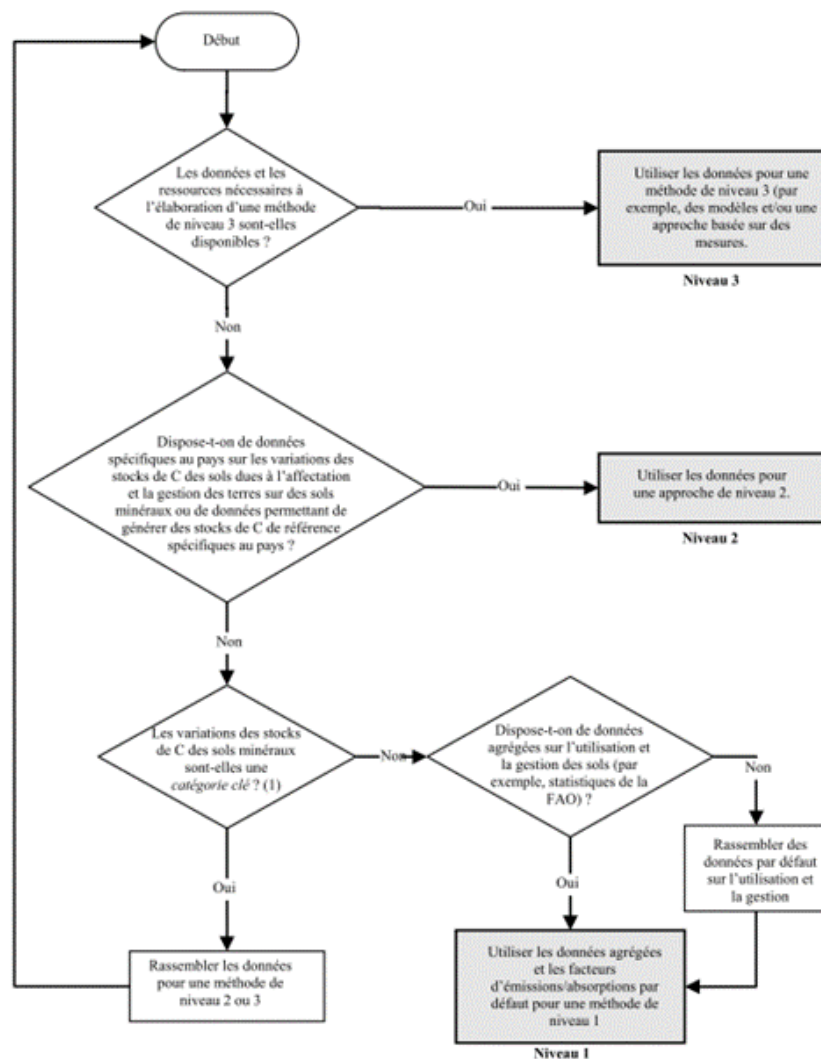


Figure 8: Diagramme décisionnel générique d'identification du niveau approprié d'estimation des variations des stocks de carbone de la biomasse (A) et carbone organique de sol (B). (IPCC. 2006, voir Vol 4 Chapitre 2)

LIMITES ET INCERTITUDES

Selon l'expertise menée par l'INRA (Chenu *et al.* 2014) il existe un risque de surestimation du stockage de carbone en extrapolant les flux annuels moyens sur une période trop longue. En effet, des approches simples de bilan massique diffusent l'idée que les sols des prairies pourraient accumuler sans cesse ou aux vitesses apparentes des mesures de flux. En outre, le sol atteint un équilibre (entre le stockage et le déstockage de carbone), qui explique qu'après un certain nombre d'années (Smith *et al.* 2014), sous gestion et conditions environnementales constantes, le stockage de C est relativement faible par rapport aux taux des (de)stockage de début.

Enfin, le flux annuel de stockage de carbone est dépendant de l'histoire de la parcelle, il faut donc connaître les différents changements d'occupation du sol qui ont eu lieu.

Il existe également des incertitudes dans les mesures de stock de carbone, notamment par rapport à l'échelles spatiale considérée et la profondeur de sol étudiée (Maillard *et al.* 2016). L'incertitude croît linéairement avec l'échelle spatiale et la profondeur du sol à l'échelle mondiale.

ANNEXE 3

EQUATION 2.25 ANNUAL CHANGE IN ORGANIC CARBON STOCKS IN MINERAL SOILS

$$\Delta C_{\text{Mineral}} = \frac{(SOC_0 - SOC_{(0-T)})}{D}$$

$$SOC = \sum_{c,s,i} (SOC_{\text{REF}_{c,s,i}} \cdot F_{LU_{c,s,i}} \cdot F_{MG_{c,s,i}} \cdot F_{I_{c,s,i}} \cdot A_{c,s,i})$$

(Note: T is used in place of D in this equation if T is ≥ 20 years, see note below)

Where:

$\Delta C_{\text{Mineral}}$ = annual change in carbon stocks in mineral soils, tonnes C yr⁻¹

SOC_0 = soil organic carbon stock in the last year of an inventory time period, tonnes C

$SOC_{(0-T)}$ = soil organic carbon stock at the beginning of the inventory time period, tonnes C

SOC_0 and $SOC_{(0-T)}$ are calculated using the SOC equation in the box where the reference carbon stocks and stock change factors are assigned according to the land-use and management activities and corresponding areas at each of the points in time (time = 0 and time = 0-T)

T = number of years over a single inventory time period, yr

D = Time dependence of stock change factors which is the default time period for transition between equilibrium SOC values, yr. Commonly 20 years, but depends on assumptions made in computing the factors F_{LU} , F_{MG} and F_I . If T exceeds D, use the value for T to obtain an annual rate of change over the inventory time period (0-T years).

c = represents the climate zones, s the soil types, and i the set of management systems that are present in a country.

SOC_{REF} = the reference carbon stock, tonnes C ha⁻¹ (Table 2.3)

F_{LU} = stock change factor for land-use systems or sub-system for a particular land-use, dimensionless

[Note: F_{ND} is substituted for F_{LU} in forest soil C calculation to estimate the influence of natural disturbance regimes.

F_{MG} = stock change factor for management regime, dimensionless

F_I = stock change factor for input of organic matter, dimensionless

A = land area of the stratum being estimated, ha. All land in the stratum should have common biophysical conditions (i.e., climate and soil type) and management history over the inventory time period to be treated together for analytical purposes.

TABLE 6.2 RELATIVE STOCK CHANGE FACTORS FOR GRASSLAND MANAGEMENT					
Factor	Level	Climate regime	IPCC default	Error^{1,2}	Definition
Land use (F _{LU})	All	All	1.0	NA	All permanent grassland is assigned a land-use factor of 1.
Management (F _{MG})	Nominally managed (non-degraded)	All	1.0	NA	Represents non-degraded and sustainably managed grassland, but without significant management improvements.
Management (F _{MG})	Moderately degraded grassland	Temperate/Boreal	0.95	± 13%	Represents overgrazed or moderately degraded grassland, with somewhat reduced productivity (relative to the native or nominally managed grassland) and receiving no management inputs.
		Tropical	0.97	± 11%	
		Tropical Montane ³	0.96	± 40%	
Management (F _{MG})	Severely degraded	All	0.7	± 40%	Implies major long-term loss of productivity and vegetation cover, due to severe mechanical damage to the vegetation and/or severe soil erosion.
Management (F _{MG})	Improved grassland	Temperate/Boreal	1.14	± 11%	Represents grassland which is sustainably managed with moderate grazing pressure and that receive at least one improvement (e.g., fertilization, species improvement, irrigation).
		Tropical	1.17	± 9%	
		Tropical Montane ³	1.16	± 40%	
Input (applied only to improved grassland) (F _I)	Medium	All	1.0	NA	Applies to improved grassland where no additional management inputs have been used.
Input (applied only to improved grassland) (F _I)	High	All	1.11	± 7%	Applies to improved grassland where one or more additional management inputs/improvements have been used (beyond that is required to be classified as improved grassland).
¹ ± two standard deviations, expressed as a percent of the mean; where sufficient studies were not available for a statistical analysis a default, based on expert judgement, of ± 40% is used as a measure of the error. NA denotes 'Not Applicable', for factor values that constitute reference values or nominal practices for the input or management classes. ² This error range does not include potential systematic error due to small sample sizes that may not be representative of the true impact for all regions of the world. ³ There were not enough studies to estimate stock change factors for mineral soils in the tropical montane climate region. As an approximation, the average stock change between the temperate and tropical regions was used to approximate the stock change for the tropical montane climate. Note: See Annex 6A.1 for estimation of default stock change factors for mineral soil C emissions/removals for Grassland.					

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME (2014). Carbone organique des sols – l'énergie de l'agro-écologie, une solution pour le climat. @ADEME Editions, juin 2014. ISBN : 978-2-358-447-6.
- Bartholomée, O., Grigulis, K., Colace, M.-P., Arnoldi, C., & Lavorel, S. (2018). Methodological uncertainties in estimating carbon storage in temperate forests and grasslands. *Ecological Indicators* 95:331-42.
- Birkhofer, K., Diekötter, T., Boch, S., Fischer, M., Müller, J., Socher, S., & Wolters, V. (2011). Soil fauna feeding activity in temperate grassland soils increases with legume and grass species richness. *Soil Biol. Biochem.* 43, 2200-2207.
- CGDD (2019). EFESE - La séquestration du carbone par les écosystèmes français. La Documentation Française (ed.) Collection THéma Analyse, e-publication.
- Chang, J., Ciais, P., Viovy, N., Vuichard, N., Herrero, M., Havlik, P., Wang, X., Sultan, B., & 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):338-50.
- Chen, S., Martin, M.P., Saby, N.P.A., Walter, C., Angers, D.A. & Arrouays, D. (2018). Fine resolution map of top- and subsoil carbon sequestration potentiel in France. *Science of The Total Environment*, Volume 630, 15 July 2018, Pages 389-400.
- Chenu, C., Klumpp, K., & Bispo, A. (2014). Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France. *Innovations agronomiques* 37 (2014), 23-37.
- Cong, W.-F., van Ruijven, J., Mommer, L., De Deyn, G. B., Berendse, F., & Hoffland, E. (2014). Plant species richness promotes soil carbon and nitrogen stocks in grasslands without legumes. *Journal of Ecology*, Volume 102, Issue 5, September 2014, Pages 1163-1170.
- De Deyn, G.B., Quirk, H., Yi, Z., Oakley, S., Ostle, N.J., & Bardgett, R.D. (2009). Vegetation composition promotes carbon and nitrogen storage in model grassland communities of contrasting soil fertility. *Journal of Ecology*, Volume 97, Issue 5, September 2009, Pages 864-875.
- De Deyn, G. B., Shiel, R.S., Ostle, N.J. McNamara, N.P. Oakley, S. Young, I. Freeman, C. Fenner, N. Quirk, H., & Bardgett R. (2010). Additional carbon sequestration benefits of grassland diversity restoration. *Journal of Applied Ecology*, Volume 48, Issue 3, June 2011, Pages 600-608.
- Derrien, D., Dignac, M. F., Basile-Doelsch, I., Barot, S., Cécillon, L., Chenu, C., Chevallier, T., Freschet, G. T., Garnier, P., Guenet, B., Hedde, M., Klumpp, K., Lashermes, G., Maron, P. A., Nunan, N. Roumet, C., & Baré, P. (2016). Stocker du C dans les sols : quels mécanismes, quelles pratiques agricoles, quels indicateurs ? *Etude et Gestion des Sols* 33.
- FAO (2019). Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems – A scoping analysis for the LEAP work stream on soil carbon stock changes. Rome. 84 pp. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO
- Filser, J., Faber, J. H., Tiunov, A. V., Brussaard, L., Frouz, J., De Deyn, G., Uvarov, A. V., Berg, M. P., Lavelle, P., Loreau, M., Wall, D.H., Querner, P., Eijsackers, H., & J. J Jiménez. 2016. Soil fauna: key to new carbon models. *Soil*, 2, 565-582, 2016.

- GIS Sol (2006). « Gis Sol » Le stock de carbone organique dans les 30 premiers centimètres des sols de France métropolitaine ». Consulté 12 décembre 2018 (<http://www.gissol.fr/donnees/cartes/le-stock-de-carbone-organique-dans-les-30-premiers-centimetres-des-sols-de-france-metropolitaine-1487>).
- Ghosh, P. K., & Mahanta, S.K. (2014). Carbon sequestration in grassland systems. *Range Mgmt. & Agroforestry* 35 (2) : 173-181. ISSN 0971-2070.
- Holzworth D. P., Huth, N.I., deVoil, P.G., Zurcher, E.J., Herrmann, N.I., McLean, G., Chenu, K., van Oosterom, E.J., Snow, V., Murphy, C., Moore, A.D., Brown, H., Whish, J.P.M., Verrall, S., Fainges, J., Bell, L.W., Peake, A.S., Poulton, P.L., Hochman, Z., Thorburn, P.J., Gaydon, D.S., Dalgliesh, N.P., Rodriguez, D., Cox, H., Chapman, S., Doherty, A., Teixeira, E., Sharp, J., Cichota, R., Vogeler, I., Li, F.Y., Wang, E., Hammer, G.L., Robertson, M.J., Dimes, J.P., Whitbread, A.M., Hunt, J., van Rees, H., McClelland, T., Carberry, P.S., Hargreaves, J.N.G., MacLeod, N., McDonald, C., Harsdorf, J., Wedgwood, S., & Keating, B.A. (2014). APSIM – Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation, *Environmental Modelling & Software*, Volume 62, 2014, Pages 327-350, ISSN 1364-8152, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009>.
- INRA (2013). « Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? » 8.
- IPCC (2006). Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Volume 4 : Agriculture, foresterie et autres affectations des terres.
- Jenkinson, D. S., Andrew, S. P. S., Lynch, J. M., Goss, M. J., & Tinker, P.B. (1990). The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. *Philosophical Transactions: Biological Sciences* Vol.329, No. 1255, 1990, pp. 361-368.
- Jones, MB & Donnelly, A. (2004). Carbon Sequestration in Temperate Grassland Ecosystems and the Influence of Management, Climate and Elevated CO₂. *New Phytologist* 164(3):423-39.
- Liu, D., Li, Y., Wang, T., Peylin, P., MacBean, N., Ciais, P., Jia, G., Ma, M., Ma, Y., Shen, M., Zhang, X., & Piao, S. (2018). Contrasting Responses of Grassland Water and Carbon Exchanges to Climate Change between Tibetan Plateau and Inner Mongolia. *Agricultural and Forest Meteorology* 249:163-75.
- Ma, A., He, N., Yu, G., Wen, D., & Peng, S. (2016). Carbon Storage in Chinese Grassland Ecosystems: Influence of Different Integrative Methods. *Scientific reports* 6.
- Maillard, É., Angers, D.A., Chantigny, M., Lafond, J., Pageau, D., Rochette, P., Lévesque, G., Leclerc, M.-L., & Parent, L.-E. (2016). Greater Accumulation of Soil Organic Carbon after Liquid Dairy Manure Application under Cereal-Forage Rotation than Cereal Monoculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 233:171-78.
- Metz, Bert et Intergovernmental Panel on Climate Change, éd. 2005. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage. Cambridge: Cambridge University Press, for the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- 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 (2016), pp. 16-34.
- Nemoto, R., Klumpp, K., Coleman, K., Dondini, M., Goulding, K., Hastings, A., Jones, M.B., Leifeld, J., Osborne, B., Saunders, M., Scott, T., Teh, Y. A., & Smith, P. (2017). Soil Organic Carbon (SOC) Equilibrium

- and Model Initialisation Methods: an Application to the Rothamsted Carbon (RothC) Model. *Environmental Modeling & Assessment* 22(3):215-29.
- Nocita, M., Stevens, A., Toth, G., Panagos, P., van Wesemael, B., & Montanarella, L. (2014). Prediction of soil organic carbon content by diffuse reflectance spectroscopy using a local partial least square regression approach. *Soil Biology and Biochemistry* 68:337-47.
- Parton, W.J., Schimel, D.S., Cole, C.V. & Ojima, D.S. (1987) Analysis of factors controlling soil organic levels of grasslands in the Great Plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:1173–1179.
- Parton W.J. (1996) The CENTURY model. In: Powlson D.S., Smith P., Smith J.U. (eds) Evaluation of Soil Organic Matter Models. NATO ASI Series (Series I: Global Environmental Change), vol 38. Springer, Berlin, Heidelberg
- Poeplau C., Marstorp, H., Thored, K., & Kätterer, T. (2016). Effect of grassland cutting frequency on soil carbon storage - A case study on public lawns in three Swedish cities. *Soil* 2(2):175-184, DOI:10.5194/soil-2-175-2016
- Poeplau, C., Zopf, D., Greiner, B., Geerts, R., Korvaar, H., Thumm, U., Don, A., Heidkamp, A., & Flessa, H. (2018). Why does mineral fertilization increase soil carbon stocks in temperate grasslands ? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 265, 1 October 2018, 144-155.
- Riedo M., Grub A., Rosset M., & Fuhrer J., (1998). A pasture simulation model for dry matter production and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy. *Ecological Modelling* 105, 141-183.
- Smith, A. P., Marín-Spiotta, E., de Graaff, M. A., & Balser, T. C. (2014). Microbial community structure varies across soil organic matter aggregate pools during tropical land cover change. *Soil Biology and Biochemistry* 77:292-303.
- 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):334-50.
- Soussana, J.F., Klumpp, K., & Ehrhardt, F. (2014). The role of grassland in mitigating climate change. *Grassland Science in Europe*, Vol. 9 - EGF at 50 : the Future of European Grasslands.
- 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.
- Williams, J.R., Jones, C.A., & Dyke, P.T. (1984). A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* 27:129–144
- Yang, Y., Tilman, D., Furey, G., & Lehman, C. (2019). Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity. *Nature Communications* 10, Article number : 718 (2019).
- Zhou, X., Zhou, L., Nie, Y., Fu, Y., Du, Z., Shao, J., Zheng, Z., & Wang, X. (2016). Similar responses of soil carbon storage to drought and irrigation in terrestrial ecosystems but with contrasting mechanisms: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 228:70-81.
- Ziegler S., Benner, E.R., Billings, S.A., Edwards, K.A., Philben, M., Zhu, X., & Laganière, J. (2017). Climate warming can accelerate carbon fluxes without changing soil carbon stocks. *Front. Earth Sci.*, 03 February 2017.