

3.1.2.

Prise en compte de la dynamique de variations de stock de carbone dans les bilans GES



Rédacteurs : Aurélie Tailleur (ARVALIS – Institut du végétal), Armelle Gac (Idele)

Il s’agit dans cette fiche de présenter les questions que soulève la prise en compte de la dynamique du stockage / destockage de carbone dans les bilans GES et les différentes approches méthodologiques existantes. Si les méthodes « Gain Loss » et « Stock difference » sont les plus utilisées, d’autres approches ont été proposées en réponse à ces questions et peuvent être intéressantes à explorer dans certains cadres.

Cette fiche s’appuie en particulier sur les enseignements issus du projet SOCLE (programme REACCTIF) (Bessou *et al.*, 2018). Un exemple d’application est présenté en Partie 4 afin de les illustrer.

Les processus en jeu ainsi que les références et méthodes disponibles pour estimer les émissions et stockage de carbone liés à des changements d’usage, de pratique ou à l’occupation des terres sont détaillées dans une fiche du chapitre 4 : Flux Directs - Carbone du sol et de la biomasse.

Lien avec autre fiche : [4.1.8 Flux Directs - Emissions GES induites par les variations de stocks de carbone dans les sols et la biomasse agricoles](#)

Table des matières

1.	Prise en compte de la temporalité des émissions de GES dans les bilans environnementaux et spécificités des émissions de CO2 liés au sol et à la biomasse	2
2.	Méthodes liant variation de stock de carbone du sol et de la biomasse et changement climatique	3
2.1.	Les deux méthodes proposées par le GIEC, 2006	3
2.1.1.	Méthode « gain loss » (GIEC, 2006)	3
2.1.2.	Méthode « stock difference » (GIEC, 2006)	3
2.2.	Méthode de Müller-Wenk and Brandão (2010)	4
2.3.	Méthode d’ACV dynamique	5

3.	Comparaison des différentes méthodes	5
4.	Exemple d'application sur un cas d'étude Grandes cultures	7
4.1.	Description du cas d'étude.....	7
4.2.	Méthode utilisée	7
4.3.	Résultats	8
5.	Références bibliographiques.....	9

1. Prise en compte de la temporalité des émissions de GES dans les bilans environnementaux et spécificités des émissions de CO₂ liés au sol et à la biomasse

L'évaluation de l'impact induit par des émissions de polluants pose de manière générale des questions de temporalité :

- Définition d'un horizon de temps : il s'agit de la perspective de temps qui est retenue pour évaluer les impacts environnementaux. Au-delà de cet horizon temporel, les impacts ne sont pas considérés. Un horizon de 100 ans est couramment utilisé pour des bilans GES pour des raisons plus politiques que scientifiques (Shine, 2009).
- Prise en compte des aspects temporels par la méthode de caractérisation : détermination de facteurs de caractérisation dépendant du temps écoulé depuis la date de d'émission/de consommation d'une ressource.

Cette dernière question se pose en particulier pour la prise en compte des processus de variation de stock de carbone du sol et de la biomasse dans les bilans GES. En effet, il s'agit de processus réversibles, dont la cinétique de stockage est plus lente que la cinétique de déstockage. Par ailleurs, ces cinétiques de variation de stock sont fonction de l'état initial du stock de carbone. Enfin, les quantités stockées sont conditionnées par l'usage du sol et le contexte pédoclimatique : en cas de changement récent d'usage ou de pratiques, le système peut connaître une période de stockage ou déstockage dont l'intensité dépend, entre autres, de la teneur en matière organique initiale et du contexte pédoclimatique. Si l'occupation du sol et les pratiques sont constantes depuis un grand nombre d'années, le système peut s'approcher d'un équilibre autour duquel la teneur en matière organique se stabilise (il n'y a donc plus de stockage ou déstockage additionnel).

Différentes questions en lien avec ces caractéristiques en termes de dynamique peuvent se poser :

- Quel est l'impact d'un stockage temporaire de carbone dans le sol et la biomasse ?
- Peut-on compenser des émissions ayant lieu à un instant t par un stockage qui sera effectif au bout de t + n années ?
- Comment prendre en compte dans le bilan GES les quantités de carbone stockées à l'état d'équilibre dans un usage donné ?

C'est à ces questions que cette fiche tente de donner des éléments de réponse.

2. Méthodes liant variation de stock de carbone du sol et de la biomasse et changement climatique

Si ces questions de temporalité ne sont pas ou peu prises en compte selon les cadres d'évaluation environnementale, différentes approches ont été développées en vue de mieux prendre en compte ces dynamiques. Le projet SOCLE (Bessou *et al.*, 2018) a identifié différents types d'approche dont les principales sont présentées ci-dessous.

2.1. Les deux méthodes proposées par le GIEC, 2006

Ces deux méthodes estiment des variations de stock de carbone, les convertissent en quantité de CO₂ sur la base de masses molaires (facteur de conversion C → CO₂ = 44/12) et appliquent le même pouvoir de réchauffement global (PRG, voir Fiches [1.1 Contexte, définition et cadre réglementaire](#) et [3.1.1 Les métriques pour la quantification de l'impact des gaz à effet de serre sur le changement climatique](#)) que celui appliqué pour les émissions CO₂ d'origine fossile (soit un PRG de 1).

2.1.1. Méthode « gain loss » (GIEC, 2006)

Cette approche se base sur une **évolution annuelle des stocks de carbone des sols et de la biomasse**, soit sur la base de mesures ou de simulations. Ces variations sont alors converties en quantité équivalent CO₂ sur la base du ratio des masses molaires du CO₂ et du C.

2.1.2. Méthode « stock difference » (GIEC, 2006)

Cette approche se base sur une **comparaison de stocks entre deux points temporels**. Dans le cadre des méthodes GIEC tier 1 et tier 2 pour estimer les flux de carbone, il s'agit de comparer les stocks d'équilibre de carbone entre deux usages (pratiques ou occupation). Selon cette méthode, l'impact sur le réchauffement climatique induit par une variation de stock de carbone (du sol ainsi que de la biomasse) sur une année donnée est estimée par la différence de stocks entre les deux usages, divisée par la période de temps présumée nécessaire pour que les stocks de carbone atteignent l'équilibre l'ancien et le nouvel usage. Une valeur de 20 ans est proposée par défaut. De même que pour la méthode précédente, les variations sont alors converties en quantité équivalent CO₂ sur la base du ratio des masses molaires du CO₂ et du C.

Cette méthode peut toutefois permettre de prendre en compte des cinétiques différentes de stockage pour des changements de pratiques ou d'occupation sur une période retenue, si celles sont connues. Ces cinétiques peuvent être :

- connues par des mesures de suivi dans le temps ou de la modélisation
- ou approximée par la méthode d'approximation exponentielle (voir [Fiche 4.1.8 Flux Directs - Emissions GES induites par les variations de stocks de carbone dans les sols et la biomasse agricoles](#)).

Il est dans ce cas possible d'estimer les stocks de carbone à une date donnée, en tenant compte de la dynamique du stockage / déstockage de carbone.

Dans le cas d'une approximation linéaire, ces différences de cinétique ne pourront alors pas être prises en compte.

2.2. Méthode de Müller-Wenk and Brandão (2010)

Elle considère l'impact des usages et changements d'usages des sols sur le transfert de CO₂ entre la végétation, le sol et l'atmosphère. Cette méthode prend en compte à la fois l'impact sur le climat lié à la transformation et à l'occupation (Figure 1).

- L'impact de transformation prend en compte la variation de stockage de carbone (dans le sol et la biomasse), comparativement à un usage de référence (peut être un état antérieur, la végétation naturelle potentielle, etc.), et le temps de régénération nécessaire pour le rétablissement des stocks après changement d'usage ou après occupation d'un sol vers cet état de référence.
- L'impact de l'occupation est fonction de la durée de l'occupation du sol pour l'usage considéré.

Cette méthode utilise également comme métrique le PRG mais introduit dans le calcul des indicateurs d'impact des facteurs de pondération tenant compte des temps de régénération et, pour l'impact transformation, de la durée d'occupation.

Des facteurs de caractérisation sont proposés pour certains usages et changements d'usage, pour six zones climatiques différentes à l'échelle globale.

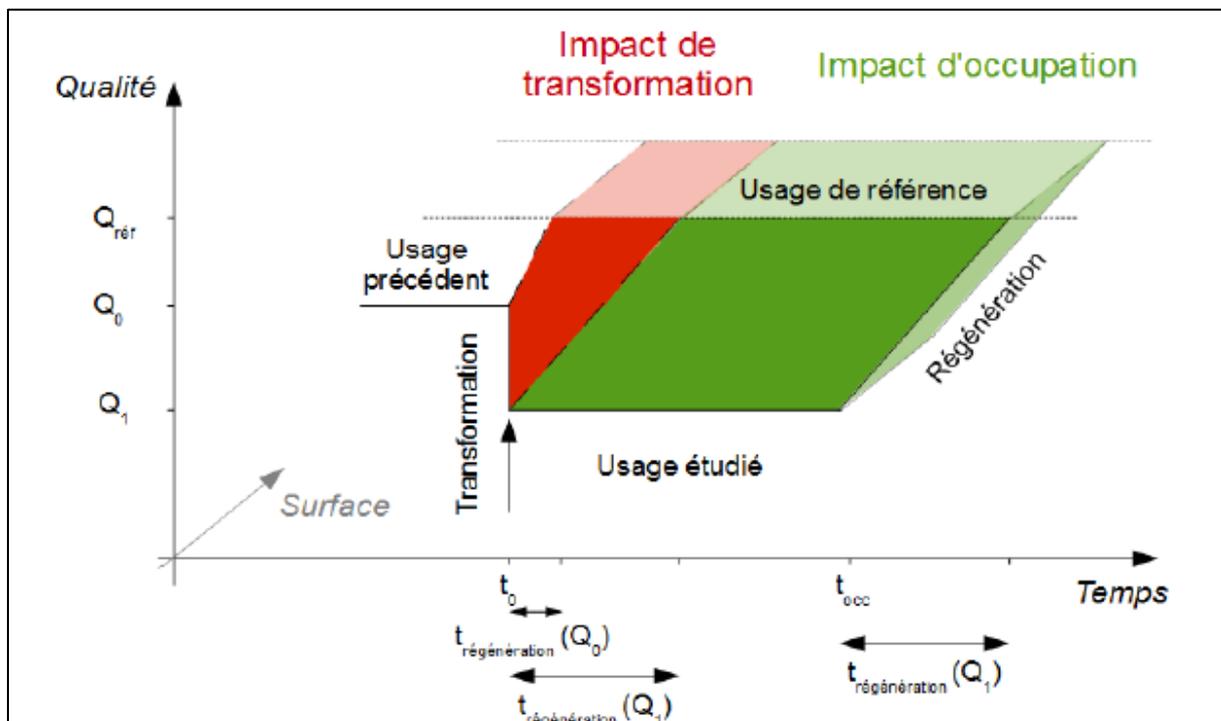


Figure 1 : Représentation schématique du cadre conceptuel de prise en compte de l'usage des sols en ACV, pour une transformation réversible (adaptée de Koellner *et al.* 2013)

2.3. Méthode d'ACV dynamique

Le principe de la méthode est d'introduire une caractérisation différente des émissions de gaz à effet de serre selon leur année d'émission (Levasseur, 2010), en modifiant les PRG. Cette caractérisation tient compte du temps entre l'émission et un moment retenu pour l'étude, mais pas de la variation de la concentration atmosphérique au cours du temps. Cette méthode nécessite de développer un inventaire qui tient compte de la distribution temporelle des émissions et d'utiliser un calculateur (ex : DynCO2, <http://www.ciraig.org/en/dynco2.php>).

3. Comparaison des différentes méthodes

Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques des différentes méthodes.

Les méthodes « Gain Loss » et « Stock difference » sont les plus utilisées. La méthode Müller-Wenk et Brandão (2010) présente l'avantage d'intégrer partiellement la dynamique de carbone et d'apporter un éclairage complémentaire par rapport à la méthode « Stock difference » en tenant compte de l'écart de stock de carbone entre l'usage étudié et l'état de référence, à travers l'indicateur impact de l'occupation. En revanche, sa mise en œuvre soulève des difficultés de collecte de données (temps de régénération). Par ailleurs, les résultats obtenus ne sont pas comparables avec ceux obtenus avec les deux autres approches.

Le choix de la ou des méthodes est à définir en fonction du cadre de l'étude (objectif de comparabilité avec d'autres références, besoin de ne prendre en compte que l'évolution des pratiques ou également du stock de carbone atteint).

Le projet SOCLE (Bessou *et al.*, 2018) avait abouti à recommander l'utilisation du GIEC « Stock difference » ou de Müller-Wenk and Brandão (2010), celle-ci étant en particulier recommandée pour des études visant à respecter les recommandations de l'UNEP (Koellner *et al.*, 2013) pour la prise en compte des effets du Land Use dans les ACV. Pour cette méthode, il est également recommandé de conduire une analyse de sensibilité avec d'autres états de référence potentielle et/ou d'autres dynamiques de régénération.

Il est dans tous les cas conseillé de bien différencier dans les bilans GES les flux de CO₂ des sols et de la biomasse des autres flux.

Tableau 1 : comparaison des différentes approches pour l'intégration des flux de CO₂ du sol dans les bilans GES

Méthode	Principe	Cadre d'utilisation actuel	Données d'entrée nécessaire	Point fort	Processus non pris en compte / limite
Méthode « gain loss », (GIEC, 2006)	Evolution annuelle des stocks de carbone des sols Traduit un impact lié à la transformation (transformation d'usage ou de pratiques)		Stock de carbone initial et final		Pas de prise en compte de la réversibilité de variation de stock. Pas d'avantage attribué à un système ayant atteint un état d'équilibre. Collecte de données peut être complexe
Méthode « stock difference », (GIEC, 2006)	Méthode par défaut : comparaison de stocks de carbone du sol et de la biomasse à l'équilibre pour deux usages donnés Traduit un impact lié à la transformation (transformation d'usage ou de pratiques)	Méthode la plus couramment recommandée Utilisée dans le cadre de l'inventaire national	Stock de carbone à l'équilibre pour les usages avant et après transformation	Plus simple à mettre en œuvre	Pas de prise en compte de la réversibilité et dynamique de variation de stock. Un système n'ayant pas subi de modification ne se voit pas attribué de stockage
Méthode de Müller-Wenk and Brandão (2010)	Evaluation de l'impact de variation de stockage de carbone (dans le sol et la biomasse), comparativement à un usage de référence, et en tenant compte des temps de régénération nécessaires Traduit un impact lié à la transformation ainsi qu'à l'occupation	Méthode reconnue d'un point de vue scientifique mais usage peu répandu	Stock de carbone à l'équilibre pour les usages avant et après transformation Temps de régénération entre les usages avant et après transformation et un usage de référence	Prise en compte d'éléments de la dynamique via les temps de régénération Indicateurs tenant compte de l'évolution du stock de carbone suite à des changements de pratique ou d'usage ainsi que du niveau du stock de carbone à l'équilibre	Prise en compte partielle de la dynamique Résultats obtenus pas comparables avec ceux obtenus par d'autres méthodes Sensibilité vis-à-vis de données difficiles à collecter (temps de régénération, stock de carbone à l'état de référence)
Méthodes d'ACV dynamique	Caractérisation différente des émissions de gaz à effet de serre selon leur année d'émission	Travaux de recherche	Inventaire avec distribution temporelle des émissions		Peu opérationnel : difficulté à reconstituer la distribution temporelle des émissions, en particulier pour les données d'arrière-plan, résultats obtenus avec cette approche non comparable avec les autres

4. Exemple d'application sur un cas d'étude Grandes cultures

4.1. Description du cas d'étude

Il s'agit de réaliser le bilan GES d'un système maïs fourrage / blé tendre en y intégrant l'impact d'un changement de pratique (évolution vers des pratiques plus favorables en termes de stockage de carbone). Ce cas d'étude est issu du projet SOCLE (Tailleur *et al.*, 2019).

Tableau 2 : Cas d'étude pour l'application des méthodes permettant d'intégrer les flux de CO₂ dans les bilans GES, selon les approches ACV

Rotation Maïs fourrage / Blé tendre en Loire Atlantique		
Région géographique	Loire Atlantique, La Jaillière	
Région climatique	T° moy annuelle = 12°C ; Précipitations/ETP = 1.04	
Sol	Luvisol → sol argileux très actif, stock de carbone initial : 52 t C/ha	
Scénario	Usage précédent	Usage actuel
Caractéristiques itk	Labour tous les ans Pas de couvert intermédiaire Pas d'apport organique Paille de blé tendre exportée	Non labour Couverts intermédiaires avant maïs (1 / 2 ans) Apports de fumier ou lisier bovin sur maïs (1 / 2 ans) Paille de blé tendre exportée
Rendement	Blé : 73.9 q/ha ; maïs : 12.4 t MS/ha	Blé : 76.1 q/ha ; maïs : 13.2 t MS/ha
Stock de carbone	Stock à l'équilibre pour l'usage étudié : 52 t C/ha	Stock à l'équilibre pour l'usage étudié : 57 t C/ha

4.2. Méthode utilisée

Les trois premières méthodes décrites ci-dessus ont été mises en œuvre. L'évolution du stock de carbone a été estimée en utilisant le modèle AMG. Les autres émissions GES induites par les pratiques dans l'usage précédent et actuel ont été obtenues selon la méthode Agribalyse v1.3. Une durée de transition de 20 ans entre l'équilibre du précédent usage à l'usage actuel a été prise en compte et les impacts ont été alloués linéairement sur cette période.

Pour Müller-Wenk and Brandão (2010), le temps de régénération est issu pour l'usage forêt (soit valeur de 74 ans) et a été fixé à 20 ans pour l'usage permettant d'obtenir un stock maximal pour la région étudiée. Les sources données utilisées pour les stocks de carbone de référence sont :

- pour la forêt : stock C dans le sol et dans la biomasse aérienne estimé selon la méthode GIEC, 2006, soit respectivement des stocks de 88 t C/ha et de 84 t C/ha
- pour la valeur maximale pour la région étudiée : stock C dans la biomasse aérienne selon la méthode GIEC, 2006 (nul pour les cultures annuelles) et stock C dans le sol à partir des données Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (troisième quartile pour la région Pays de la Loire, tout usage confondu, soit 55 t C/ha).

4.3. Résultats

Tableau 3 : Prise en compte dans un cas d'étude des flux de CO₂ du sol selon trois méthodes différentes

Les valeurs négatives correspondent à un stockage et les valeurs positives à une émission

	« Gain loss »	« Stock difference »	Müller-Wenk and Brandão (2010)
Emissions GES pour l'usage précédent, flux de CO ₂ du sol non inclus, kg éq CO ₂ /ha/an		2 170	
Emissions GES pour l'usage actuel, flux de CO ₂ du sol non inclus, kg éq CO ₂ /ha/an		2 310	
Emissions CO ₂ du sol, kg éq CO ₂ /ha/an	- 380	- 900	Stock C de référence : stock forêt (estimation selon GIEC) Transformation : - 210 Occupation : 2 690
			Stock C de référence : valeur maximale pour la région étudiée Transformation : - 160 Occupation : - 340

Selon la méthode « Gain loss », le stockage de carbone induit par le système du fait de l'évolution de pratique est de 380 kg éq CO₂/ha.an sur 20 ans. Lorsque le stock de carbone aura atteint l'état d'équilibre, aucun stockage ne sera pris en compte.

Selon la méthode « Stock difference », le stockage obtenu est de 900 kg éq CO₂/ha. La valeur est plus importante que pour la méthode « Gain loss » car le stock de carbone obtenu après 20 ans de simulation sur ce cas d'étude est beaucoup plus faible que celui obtenu à l'état d'équilibre. Dans un usage où les pratiques sont stables depuis plus de 20 ans, aucun stockage ou déstockage de carbone ne sera pris en compte dans le bilan GES.

Selon la méthode Müller-Wenk and Brandão (2010), on distingue deux types d'impact :

- L'impact transformation correspondant à l'impact de l'évolution des pratiques sur le changement climatique. Celui-ci est obtenu par la différence entre le facteur transformation pour l'usage actuel et celui pour l'usage précédent. Le facteur transformation prend lui-même en compte l'écart de stock entre un usage de référence et un usage étudié, multiplié par un ratio tenant compte du temps de régénération de l'usage étudié à la référence. Ce ratio étant inférieur à 1, l'impact transformation est inférieur à la valeur de stockage obtenue avec les deux méthodes précédentes.
- L'impact occupation correspond à l'impact de disposer d'un usage en comparaison à une référence. Il est obtenu par l'écart de stock de carbone entre un usage de référence et un usage actuel, divisé par la durée de vie dans l'atmosphère du CO₂.

Cette méthode permet de tenir compte de l'effet de l'évolution des pratiques mais également du niveau du stock de carbone du système par comparaison à une référence. Elle nécessite de définir un ou des usages de références et un temps de régénération de l'usage étudié à l'usage de référence.

5. Références bibliographiques

ADEME. Aurélie Tailleux, Anthony Benoist, Cécile Bessou, Armelle Gac, Caroline Godard, Julie Lebas de Lacour, 2018, Application de différentes méthodes pour la prise en compte de l'évolution du stock de carbone organique en ACV sur 5 filières agricoles Projet SOCLE, soil organic carbon changes in LCA, which evaluations to improve environmental assessments? 108p.

ADEME. Cécile Bessou, Anthony Benoist, Aurélie Tailleux, Caroline Godard, Armelle Gac, Joachim Boissy, 2018, Projet SOCLE, soil organic carbon changes in LCA, which evaluations to improve environmental assessments? Rapport de synthèse 19p.

GIEC, 2006, Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, préparé par le Programme pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. et Tanabe K. (eds). Publié : IGES, Japon.

Koellner T., De Baan L., Beck T., Brandao M., Civit B., Margini M., Milà i Canals L., Saad R., Maia de Souza D. et Müller-Wenk R., 2013. UNEP-SETAC guideline on global land use impact assessment on biodiversity and ecosystem services in LCA. In: The International Journal of Life Cycle Assessment [en ligne]. 2013. Vol. 18, n° 6, p. 1188-1202. DOI 10.1007/s11367-013-0579-z. Disponible à l'adresse : <http://link.springer.com/10.1007/s11367-013-0579-z>

Levasseur, Annie, 2011. Développement d'une méthode d'analyse du cycle de vie dynamique des impacts sur le réchauffement climatique [en ligne]. S.l. : Université de Montréal. Disponible à l'adresse : https://publications.polymtl.ca/706/1/2011_AnnieLevasseur.pdf.

Müller-Wenk R., and Brandão M. 2010. Climatic impact of land use in LCA—carbon transfers between vegetation/soil and air. *Int. J. Life Cycle Assess.* 15(2): 172–182. doi: 10.1007/s11367-009-0144-y.

Shine K. P. (2009). The global warming potential - the need of an interdisciplinary retrieval. *Climatic Change*, 96, 467-472.