

<p>4. 1.8. Flux directs</p>	<p>Emissions de GES induites par les variations de carbone dans les sols et la biomasse agricole</p>	
---------------------------------	--	---

Rédacteurs : Aurélie Tailleux (Arvalis – Institut du Végétal)

Cette fiche a pour objectifs de présenter les mécanismes en jeu ainsi que les différentes méthodes disponibles pour estimer les quantités de carbone stockées dans le sol et dans la biomasse et leurs variations. Des références sont également proposées pour la forêt afin de fournir des ordres de grandeur et permettre de chiffrer des changements d'occupation d'une forêt à un usage agricole. En annexe, on y trouve une comparaison des modèles évoqués.

Lien avec autres parties GES'TIM+ :

- [1.3. Fiches outils : ALDO, AMG, ABC'terre](#)
- [3.1.2. Prise en compte des dynamiques de variation de stock de carbone dans les bilans GES](#) : exploration méthodologique permettant de préciser la manière d'aborder les aspects de cinétiques et de dynamiques de stockage et déstockage et panorama des différentes méthodes de caractérisation de l'impact sur le changement climatique ;
- [3.1.3. Prise en compte des flux liés à la photosynthèse dans les bilans énergie et GES](#) : cette fiche traite du lien entre photosynthèse, captation de carbone (et donc variations des stocks de carbone du sol et de la biomasse qui sont abordés ici) et traduction en bilan GES et impact sur le changement climatique ;
- [3.2.0 Fiches projet : projets en court qui permettront de fournir à moyen termes des références / méthodes mobilisables pour estimation des flux de carbone](#) : CARBOCAGE, Carsolel, CE-Carb (stockage de carbone lié aux cultures semi-pérennes énergétiques), Csopra, Méthode CITEPA pour estimer les changements d'occupation des sols, Méthode CITEPA pour estimer les variations de stocks de carbone suite à des changements de pratique
- [4.1.3. Emissions par les sols agricoles](#) : pour les liens carbone – azote pris en compte dans certains modèles
- [4.3.10. Estimation des surfaces ayant subi un changement d'occupation des terres](#) : cette fiche précise quelles sources de données sont mobilisables pour alimenter les modèles qui sont présentés ici ;

Contenu

1. Sources et processus de stockage et d'émissions	3
1.1. Stockage de carbone dans la biomasse	4
1.2. Stockage de carbone dans le sol	4
1.3. Emission de protoxyde d'azote (N ₂ O) induite lors d'un déstockage de carbone.....	5
1.4. Les différents types de mécanismes induisant des variations de stocks de carbone : LU, LMC, LUC	5
2. Les différentes ressources à mobiliser pour estimer les variations de stocks	6
2.1. Méthodes pour estimer les variations de stocks de carbone	6
2.1.1. Méthodes pour estimer les variations de stocks de carbone du sol.....	6
2.1.2. Méthodes d'approximation de la cinétique de variation de stock	7
2.1.3. Approximation linéaire.....	7
2.1.4. Approximation exponentielle pour le carbone du sol.....	8
2.1.5. Méthodes pour estimer les variations de stocks de carbone dans la biomasse.....	8
3. Estimation des variations de stock du carbone du sol	10
3.1. Recensement des méthodes et outils pour estimer les flux de carbone du sol	10
3.1.1. Les différents types de modèles et de références	10
3.1.2. Aide au choix du type de modèle en fonction de la situation étudiée et de la méthode de caractérisation retenue	11
3.1.3. Liste des modèles disponibles	12
3.2. Méthodes pour les changements d'occupation des sols	15
3.2.1. Références sur le stock de carbone du sol par type d'occupation.....	15
3.2.2. Références sur les variations de stock du carbone du sol associées à des changements d'occupation.....	16
3.3. Méthode pour les changements de pratiques	17
3.3.1. Références bibliographiques nationales sur les flux de stockage additionnel pour différentes pratiques.....	17
3.3.2. Méthode GIEC tier 2 pour les changements de pratique.....	20
3.3.3. Méthode PEF, tier 2.....	25
3.3.4. Méthodes de niveau 3.....	27
4. Estimation des émissions de N ₂ O associées à un flux de déstockage de carbone du sol	27
5. Estimation des stocks de carbone dans la biomasse par type d'occupation et pratique	28
5.1. Références par types d'occupation	28

5.1.1.	Biomasse vivante aérienne et souterraine.....	28
5.1.2.	Le bois mort et les litières	29
5.2.	Références pour les haies et l'agroforesterie	30
6.	Références bibliographiques.....	31
7.	Annexe.....	33

1. Sources et processus de stockage et d'émissions

Le stockage de carbone organique¹ correspond à la rétention dans le sol et la biomasse de carbone sous forme organique, le déstockage correspond à la libération de ces stocks par minéralisation dans l'atmosphère sous forme de CO₂. En moyenne, le carbone compose environ 58% de la matière organique du sol (Antoni et Arrouays, 2007) et de l'ordre de 40-50% de la biomasse végétale (Hazard et al 1996, Clivot et al, 2019).

Les stocks de carbone dans la biomasse et le sol (Figure 1) résultent d'un équilibre entre des entrées (photosynthèse, apports exogènes) et des sorties (respiration des plantes et des organismes du sol, récolte, feux, érosion). Les différentes situations sont les suivantes :

- Situation de stockage de carbone si les entrées excèdent les sorties,
- Situation de déstockage de carbone si les entrées sont inférieures aux sorties ;
- Situation d'équilibre en cas d'entrées égalant les sorties.

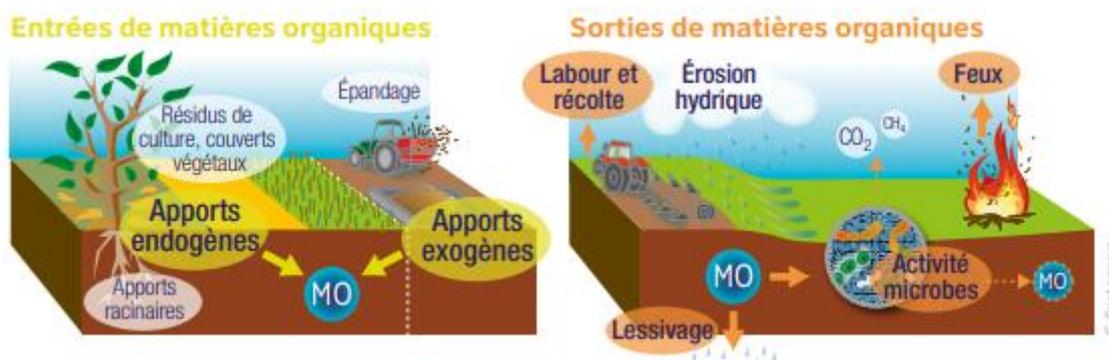


Figure 1 Modalités de formation et de dégradation des matières organiques du sol, ADEME, GIS Sol, 2015

Cette partie précise les mécanismes de variation de stock de carbone dans le sol et la biomasse, tandis que les parties suivantes de cette fiche précisent la manière de les quantifier.

¹ Le stockage et déstockage de carbone sous forme minérale (ex : carbonates) ne sont pas considérés ici car relevant d'un cycle plus long.

1.1. Stockage de carbone dans la biomasse

Le carbone minéral de l'atmosphère (sous forme de CO₂) est fixé sous forme de carbone organique par la photosynthèse lors de la croissance de la biomasse végétale (le bilan entre photosynthèse et respiration qui, elle, libère du CO₂ est positif : plus de CO₂ absorbé que libéré).

Seules les quantités stockées « durablement » sont prises en compte dans les bilans GES (voir Fiche [3.1.2. Emissions des déjections animales](#)). Les lignes directrices du GIEC ne précisent pas de durée à partir de laquelle un stockage est considéré durable. En revanche, la norme ISO 14067 (AFNOR, 2018) propose une durée minimale de 10 ans.

Le GIEC distingue différents pools de carbone :

- biomasse aérienne et biomasse souterraine,
- matière organique morte : bois mort et litière.

1.2. Stockage de carbone dans le sol

Lorsque de la matière organique est apportée au sol (dite « fraîche »), elle subit des processus de décomposition sous l'action des organismes vivants du sol. Une partie du carbone contenu est libérée sous forme de CO₂ par minéralisation rapide (dite primaire) tandis qu'une partie participe aux processus d'humification, synthèses de nouvelles molécules organiques issues de la transformation des résidus. Les matières organiques « humifiées » sont plus ou moins stables en fonction notamment de la nature des matières fraîches apportées, du niveau de maturation, des caractéristiques du sol et du climat, de l'historique des pratiques culturales, du type et de l'activité des organismes microbiens présents. Les matières organiques humifiées peuvent, en fonction de leur « instabilité », être dégradées plus ou moins rapidement par minéralisation (dite secondaire), le carbone contenu étant là aussi libéré sous forme de CO₂. La stabilité des matières organiques peut être renforcée par un phénomène dit « de protection ». En effet, l'apport au sol de matière organique favorise le développement de la population microbienne et de son activité autour de cette matière organique. Lorsque la texture du sol permet la formation d'associations organo-minérales (présence d'argile dans les sols), les produits de la dégradation microbienne réduisent progressivement l'accession des micro-organismes à la matière organique encore non dégradée, ce qui entraîne la formation d'associations organo-minérales protégeant plus ou moins durablement les matières organiques des dégradations ultérieures.

Le type d'occupation des sols et les pratiques mises en œuvre peuvent modifier le stock de carbone en modifiant les flux suivants :

- (1) les entrées en modifiant la production primaire et donc les quantités de carbone dans la biomasse aérienne et racinaire : par exemple, en modifiant le type d'occupation de sols (ex : prairies, cultures pérennes, en augmentant la couverture des sols ou en augmentant la production de biomasse,
- (2) le retour au sol d'une partie de la biomasse végétale produite : par exemple, en restituant ou non les résidus de récolte, en réduisant l'intensité d'un pâturage,
- (3) l'import de matières organiques externes à la parcelle (par exemple des produits résiduels organiques tels que des composts, des effluents d'élevage) ou

(4) la minéralisation des matières organiques (par exemple en limitant les opérations de travail du sol qui stimulent la décomposition).

D'après les connaissances actuelles (Pellerin et al, 2019), parmi ces pratiques, ce sont celles influençant les quantités de carbone restituées, qui alimentent le pool de C organique du sol (flux (1), (2) et (3)), qui vont déterminer le stock de carbone à l'équilibre dans un contexte pédoclimatique donné.

Le sol peut donc être un puit ou une source de carbone, en fonction des dynamiques de dégradation des matières organiques fraîches apportées, d'humification et de minéralisation de la matière organique dans le sol. La notion de stockage et déstockage est très dépendante du pas de temps considéré : le stockage du carbone dans le sol est toujours temporaire car les flux d'entrée et sortie s'équilibrent à terme (exemple : la minéralisation de la matière organique augmente avec l'augmentation des stocks de carbone). Par ailleurs, il s'agit d'un processus réversible.

1.3. Emission de protoxyde d'azote (N₂O) induite lors d'un déstockage de carbone

Les cycles de l'azote et du carbone sont fortement interdépendants (voir Fiche [1.1. Contexte, définition et cadre réglementaire](#)). Ainsi, lorsque les matières organiques se dégradent, elles produisent des formes labiles de carbone mais également d'azote. Une fraction de cet azote est émise sous forme de N₂O et contribue à l'impact sur le changement climatique.

Pour toute molécule de C déstockée par le sol, des molécules de N sont donc également perdues, au prorata du rapport C/ N. Le GIEC propose une valeur par défaut de 15 pour le ratio carbone sur azote (plage d'incertitude allant de 10 à 30, GIEC 2006).

1.4. Les différents types de mécanismes induisant des variations de stocks de carbone : LU, LMC, LUC²

Lors de la quantification de l'impact des activités anthropiques sur le stockage de carbone dans le sol et dans la biomasse, on distingue différentes situations provoquant des flux de variation :

- **Evolution sous l'action d'un type d'usage des sols (LU, Land Use)** : il s'agit d'évaluer sur une période donnée l'évolution du stock de carbone pour un usage du sol donné (sans changement d'occupation des terres, ni de pratiques).
- **Evolution sous l'action d'un changement d'occupation des sols (LUC, Land Use Change)** : les stocks de carbone diffèrent fortement en fonction du type d'occupation et le passage d'une occupation à une autre peut provoquer d'importants flux de CO₂ (séquestration ou déstockage). La conversion d'un bois, d'une prairie ou d'une culture s'accompagne de modifications des caractéristiques physico-chimiques du milieu, du mode et du régime d'incorporation des entrées organiques, de la nature et de la protection de la matière organique du sol.
- **Evolution sous l'effet d'un changement de pratique (LMC, Land Management Change)**, cf. paragraphe 3.2.2 pour le détail sur les mécanismes.

² Terminologie utilisée dans les lignes directrices du GIEC.

2. Les différentes ressources à mobiliser pour estimer les variations de stocks

Cette partie donne un aperçu des différents types de méthodes à mobiliser pour estimer les variations de stocks de carbone.

2.1. Méthodes pour estimer les variations de stocks de carbone

2.1.1. Méthodes pour estimer les variations de stocks de carbone du sol

Le choix des méthodes est fonction des objectifs et de la disponibilité des données sur la situation étudiée (cf. section 3).

En fonction du type de modèle retenu, il peut être nécessaire de mettre en œuvre une méthode d'approximation de la cinétique de la variation de stock si l'objectif est de s'approcher de la variation de stock sur une période donnée (Figure 2) :

- les modèles de niveau 3 (cf. paragraphe 3.3.4) permettent directement d'estimer la dynamique des variations de stocks,
- les modèles de niveau 1 ou 2 (cf. paragraphes 3.3.2 et 3.3.3) permettent d'estimer des stocks de carbone à l'équilibre : ils nécessitent de faire un choix en termes d'approximation de la cinétique de variation de stock (cf. paragraphe 2.1.2). Des flux annuels de variation de stock sont cependant également directement disponibles (cf. paragraphe 3.3.1).

Remarque concernant la Figure 2 : aucun modèle opérationnel permettant d'évaluer l'effet d'un changement d'occupation des sols n'étant aujourd'hui disponible, seules des méthodes de niveau 1 ou 2 peuvent être mobilisées (cf. paragraphe 3.2).

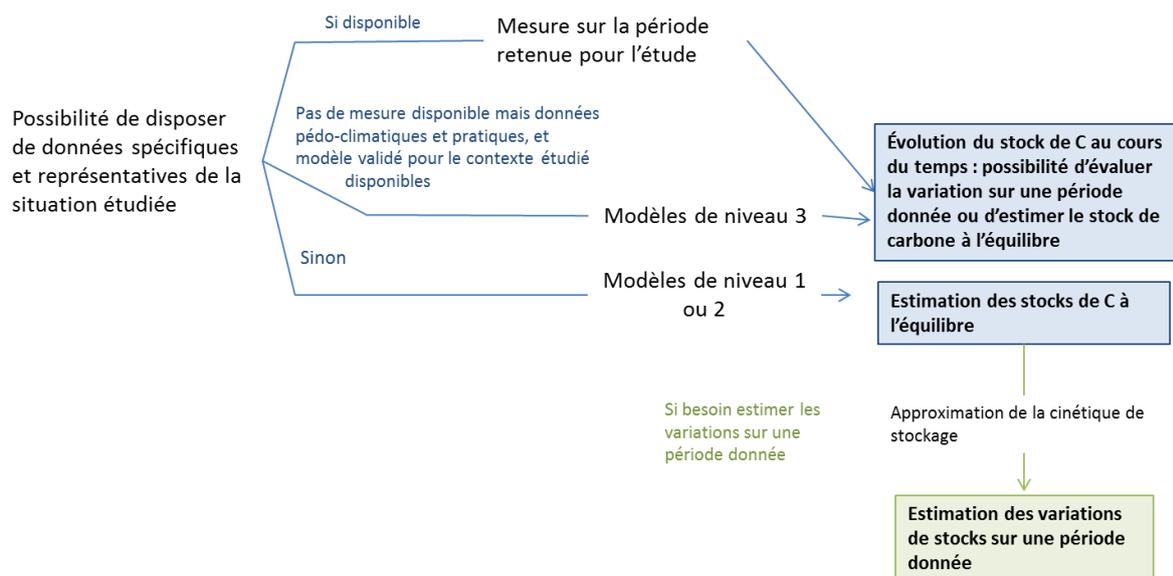


Figure 2 : Les différentes étapes à mettre en œuvre pour estimer les variations de stock en fonction du modèle retenu

2.1.2. Méthodes d'approximation de la cinétique de variation de stock

Si seuls les stocks de carbone à l'équilibre sont disponibles mais pas la cinétique de stockage, il est possible d'utiliser l'une des deux types d'approche d'approximation de la cinétique de variation de stock : approximation linéaire et approximation exponentielle (Figure 3).

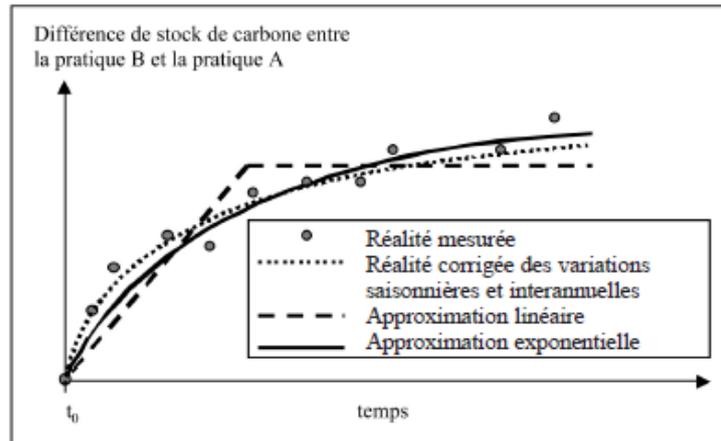


Figure 3 : Deux modes d'approximation de la cinétique du stockage de carbone, dans le cas où une pratique B succède à une pratique A, Arrouays et al. 2002

Différents critères sont à prendre en compte dans le choix de l'une des approches :

- Seule l'approche exponentielle permet de mettre en évidence que le déstockage est plus rapide que le stockage,
- Le respect de référentiels existants : par exemple, l'ILCD (2010) (référentiel pour la conduite des ACV, produit par le JRC) recommande par défaut une approximation linéaire et préconise l'utilisation d'une approximation exponentielle quand cela est possible,
- La comparabilité avec d'autres études (ex : le CITEPA utilise une approximation linéaire pour l'inventaire national, Pellerin et al, 2013 et Perez *et al.*, 2018 utilisent une approximation exponentielle selon l'approche Arrouays *et al.*, 2002).

2.1.3. Approximation linéaire

Pour une surface affectée par un changement d'usage (pratique ou occupation) A -> B sur la période définie dans le cadre de l'étude, le flux de CO₂ correspond à l'écart de stock de carbone à l'équilibre entre la nouvelle et l'ancienne occupation divisé par la dépendance temporelle des facteurs de variation des stocks.

Équation 1 : Estimation des variations de stock annuelles dans le sol et la biomasse, selon la méthode « Stock difference », d'après la méthode GIEC tier 1, 2006

$$Flux\ CO_2\ A \rightarrow B = \frac{[(C_{solB} + C_{biomB}) - (C_{solA} + C_{biomA})] * F_{C \rightarrow CO_2}}{D}$$

Avec :

Flux CO₂ : émission (si < 0) ou stockage annuel de carbone dans la biomasse et dans le sol suite à un changement d'usage des sols de A vers B, t CO₂/ha/an

Csol : stock de carbone dans le sol pour un usage donné, t C/ha (cf. Partie 3)

Cbiom : stock de carbone dans la biomasse pour un usage donné, t C/ha (cf. Partie 0)

F_{C->CO2} : facteur de conversion de C en CO₂, soit 44/12

D : durée permettant d'atteindre le nouvel équilibre, ans, proposition du GIEC par défaut : 20 ans

Cette approche, proposée notamment dans les lignes directrices du GIEC et mise en œuvre dans le cadre des inventaires nationaux, ne prend pas en compte la dynamique de variation de carbone après le changement d'occupation. Elle ne prend donc pas en compte le fait que les cinétiques de stockage/déstockage diffèrent entre un changement d'occupation de A → B et de B → A. Par exemple, le déstockage engendré par la conversion d'une forêt en prairie, est deux fois plus rapide que le stockage induit par la conversion inverse.

2.1.4. Approximation exponentielle pour le carbone du sol

Il existe deux approches d'approximation exponentielle.

- Approche sur la base d'une constante de vitesse du stockage

Cette approche a été développée par l'INRAE dans Arrouays *et al.*, 2002. Le stockage est déterminé par deux paramètres :

- une amplitude Δ qui est la différence de stock à l'équilibre (C_{sol_B}) – (C_{sol_A}), cf. méthodes d'estimation disponibles dans la fiche [3.1.2. Prise en compte de la dynamique de variations de stock de carbone dans les bilans GES](#).
- une constante de vitesse k du stockage, des valeurs sont disponibles dans Arrouays *et al.*, 2002.

Le flux moyen annuel F peut être calculé pour une durée de scénario D choisie :

Équation 2 : Estimation des flux annuels de variation dans le sol et la biomasse, selon la méthode d'approximation développée dans Arrouays *et al.*, 2002

$$Flux\ CO_2 = \Delta * [1 - \exp(-k * D)] / D$$

- Approche exponentielle proposée par l'ILCD

L'ILCD propose de considérer que les pertes ou le stockage suivent une distribution triangulaire sur une période permettant de couvrir au moins 90% de la variation de stock de l'état initial jusqu'à l'état d'équilibre du nouvel usage. La formule proposée par l'ILCD est la suivante :

Équation 3 : Calcul du pourcentage d'impact alloué à l'année n en dégressif linéaire pour une durée D en année (l'ILCD recommandant 20 ans par défaut)

$$Pourcent_n = (100 * 2) / (D + 1) * (D - n) / D$$

2.1.5. Méthodes pour estimer les variations de stocks de carbone dans la biomasse

Deux cas de figure nécessitent d'estimer des variations de stock :

- Dans le cadre de changement d'occupation des sols, se reporter aux méthodes de quantification de la partie 5.1,

- Dans le cadre de l'implantation de haie ou d'agroforesterie, se reporter aux méthodes de quantification de la partie 5.2.

3. Estimation des variations de stock du carbone du sol

3.1. Recensement des méthodes et outils pour estimer les flux de carbone du sol

3.1.1. Les différents types de modèles et de références

Pour rappel, la classification des modèles adoptée dans GES'TIM+ est la suivante :

- Modèle de niveau 1 : basé sur des références internationales, prenant en compte un nombre très limité de données d'entrée concernant le contexte pédo-climatique ou les pratiques (GIEC tier 1).
- Modèle de niveau 2 : références ou modèles simplifiés adaptés au contexte français
- Modèle de niveau 3 : modèle mécaniste

Par ailleurs, concernant les modèles d'estimation des flux de carbone du sol, on peut également les différencier en 3 catégories :

Tableau 1 : Les différents types de modèles de carbone du sol

Type de modèle	Particularités	Modèles identifiés	Complexité	Sensibilité (aux pratiques et milieu)
Empirique	Ne simule pas de mécanisme, repose sur des facteurs établis sur la base de références de stock de carbone sur un jeu de situations	Modèles de niveau 1 et 2 GIEC, références bibliographiques	+	Fortement dépendantes du jeu de données sur lequel les facteurs ont été conçus. Pratique : faible Situation pédoclimatique : faible
Sol	Simule des mécanismes du compartiment sol, les entrées de carbone sont estimées à partir des données sur les entrées de biomasse saisies	Modèles de niveau 3 AMG, Roth C	++	Pratique : moyenne Situation pédoclimatique : moyenne
Sol - Plante	Simule des mécanismes du compartiment sol et la croissance des plantes	Modèles de niveau 3 STICS, CHN, Century, Daycent	+++ / ++++	Très sensible à la qualité de la modélisation de la production végétale

Concernant spécifiquement les **références bibliographiques issues d'essais de longue durée**, leur utilisation pose des limites :

- Dans la plupart des essais de longue durée, les pratiques testées sont reproduites systématiquement chaque année durant au moins vingt ans, tandis que dans la réalité, on observe plutôt une alternance de pratiques. La dynamique de stockage et déstockage des matières organiques n'est ni linéaire ni symétrique, le stockage étant plus lent que le déstockage (Arrouays *et al.*, 2002). Cela rend donc très difficile de préjuger, au regard de ces données, de l'impact d'une alternance de pratiques.

- Du fait de la non-linéarité des processus de stockage et déstockage de la matière organique, les résultats, qui sont des moyennes annuelles d'évolution du stock de matière organique, peuvent être très différentes des données réelles annuelles.

3.1.2. Aide au choix du type de modèle en fonction de la situation étudiée et de la méthode de caractérisation retenue

Le choix du type de modèle diffère notamment en fonction du type de mécanisme étudié (cf. 1.4) :

- **LU** : il est alors nécessaire de connaître le stock de carbone initial et de recourir à des mesures ou à un modèle de niveau 3 pour estimer l'évolution pour l'usage étudié.
- **LUC** : cette évolution est souvent évaluée par l'utilisation de références bibliographiques pour différentes occupations étudiées, ou par la méthode GIEC (tier 1 ou 2). En effet, si des modèles de niveau 3 (ORCHIDEE, Century) pourraient les simuler, ceux-ci manquent de fiabilité.
- **LMC** : des modèles de niveau 1, 2 ou 3 peuvent être utilisés en fonction des données disponibles et des objectifs.

Compatibilité avec les différentes méthodes de caractérisation présentées dans la fiche 3 1 2 Prise en compte des dynamiques de variation de stock de carbone dans les bilans GES

- Les références et modèles proposés ci-dessous sont utilisables pour chacune des méthodes présentées mais les méthodes Müller Wenk and Brandao (MW&B) et ACV dynamique requièrent des données supplémentaires (temps de régénération entre l'usage étudié et l'usage de référence pour la première, inventaire dynamique des autres flux pour la seconde). Celles-ci ne sont pas couvertes dans GES'TIM+, cf ADEME - Tailleux *et al.*, 2019 pour accéder aux sources identifiées dans le cadre du projet SOCLE).
- Pour la méthode « Stock difference », aucun impact LU n'est pris en compte.
- La méthode MW&B intègre un impact occupation ne tenant pas compte de l'évolution du stock de carbone observé sur une période donnée mais de l'écart de stock de carbone à l'équilibre pour l'usage étudié et un usage de référence, ainsi que du temps de régénération pour le rétablissement du stock de carbone de l'usage étudié à l'usage de référence.
- Les méthodes « Gain Loss » et ACV dynamique peuvent en revanche être utilisées dans des situations LU, LUC, LMC à condition de disposer de données mesurées ou d'utiliser un modèle de niveau 3.

Tableau 2 : Aide au choix des modèles concernant les flux de variation de stock de carbone dans le sol

Niveau modèle	Modèles	Situation	Limite	Sortie	Méthode de caractérisation *
1 Empirique	GIEC tier 1	LUC, LMC		Stock C équilibre	« Stock difference », « MW&B »,
2 Empirique	GIEC tier 2	LUC, LMC			
	Références bibliographiques nationales sur les stocks de carbone à l'équilibre pour différentes pratiques	LMC	Pas d'évaluation possible d'une combinaison ou d'une alternance de pratiques		
	GIEC tier 2 modifié	LUC, LMC			
3 Sol ou sol plante	Modèles mécanistes	LU, LMC		Evolution stock de C	« Gain Loss », « Stock difference », « MW&B », ACV dynamique

* Différentes méthodes de caractérisation des impacts sur le réchauffement climatique induit par les émissions GES provenant du stockage et déstockage de carbone dans les sols et la biomasse agricoles sont présentées dans la fiche ([3.1.2 Prise en compte des dynamiques de variation de stock de carbone dans les bilans GES](#)). La dernière colonne du tableau présente la compatibilité des différents modèles avec ces différentes méthodes de caractérisation.

3.1.3. Liste des modèles disponibles

A noter : pour toutes les références et modèles cités ci-dessous, seuls les 30 premiers cm du sol sont pris en compte. Mais la moitié du stockage de carbone s'observe à des profondeurs plus importantes (Balesdent *et al.*, 2018). L'étude Pellerin *et al.*, 2019 estime ainsi dans un deuxième temps le stockage sur 1 m de profondeur à partir des estimations obtenues sur les 30 premiers centimètres et de l'hypothèse d'un stockage du même ordre de grandeur dans les couches inférieures (excepté pour le semis direct, pour lequel un stockage additionnel est considéré dans les 30 premiers cm et aucun stockage n'est considéré pour les couches inférieures).

Tableau 3: Modèles pour évaluer l'évolution du stock de carbone dans le sol pour des situations LU, LUC et LMC, liste non exhaustive

Modèle	Situation couverte	Niveau modèle	Complexité	Domaine de validité	Productions couvertes	Echelle d'application	Données d'entrée	Sensibilité aux pratiques agricoles / contexte pédo clim	Porteur	Accès aux modèles
Modèle empirique										
GIEC Tier1	LUC/LMC	1	+	Monde	« cultures » « prairies » « forêt »	Régionale ou plus élevée	Usage précédent, usage actuel	Contexte pédoclimatique : très faible Pratiques agri : faible (rq : incohérence concernant la prise en compte de l'effet du labour)	GIEC	Lignes directrices du GIEC, 2006
Références moyennes pour des usages issues de la bibliographie : RMQS	LUC	2 pour LUC	+	France		Régionale ou plus élevée		Pratiques agri : 0 Contexte pédoclimatique : faible	à partir des données INRAE Infosol Orléans (différents traitements réalisés)	https://www.gissol.fr/donnees/tableaux-de-donnees/stock-de-carbone-par-region-et-par-occupation-du-sol-3045 rapport OMINEA (CITEPA, 2018), étude 4p1000
Référence moyenne sur l'effet de pratiques issue de la bibliographie	LMC	2	+	France		Régionale ou plus élevée	Pratique précédente, pratique actuelle	Pratiques agri : faible, pas d'étude combinaison de pratique possible Contexte pédoclimatique : 0	Compilation de données bibliographiques (Arrouays 2002, Pellerin 2013 dont Agrip Sol)	Cf. détail dans le paragraphe 3.3.1
GIEC Tier2 Intégrant des références moyennes pour des usages issues du RMQS	LUC/LMC	2 pour LUC Niveau 1 pour LMC	+	France	« cultures » « prairies » « forêt »	Régionale ou plus élevée	Usage précédent, usage actuel	Pratiques agri : faible Contexte pédoclimatique : faible	CITEPA (à partir des données INRAE Infosol Orléans)	Cf. détail dans le paragraphe 3.3.2

GIEC Tier 2 – Variante Prairie	LUC/LMC	2	+	France	Cultures, prairies temporaires, prairies permanentes	Parcelle	Pratique précédente, pratique actuelle	Idem GIEC Tier 2 + facteurs supplémentaires pour prairies temporaires (dynamique du stockage entre cult. et prairie dans une rotation) et permanentes (âge, niveau défoliation)	Klumpp & Dollé, dans le cadre des PEF meat et PEF dairy (in Tuomisto et al. 2015)	Annexe in Tuomisto et al., 2015
Modèle sol										
AMG / Simeos-	LU/LMC	3	++	France	Cultures	Parcelle	Données pédo-climatiques, teneur en C initiale, Pratiques, entrée biomasse	Pratiques agri : moyenne Contexte pédoclimatique : moyenne	AgroTransfert - RT	http://www.simeos-amg.org/ licence pour version complète : 900€
RothC	LU/LMC	3	++	Monde	Cultures	Parcelle			Rothamsted Research (UK)	Accès gratuit https://www.rothamsted.ac.uk/rothamsted-carbon-model-rothc
Modèle sol										
CHN (AMG)	LU/LMC	3	++	France	Céréales, maïs	Parcelle	Données pédo-climatiques, teneur en C initiale, pratiques,	Pratiques agri : forte Contexte pédoclimatique : forte	ARVALIS	b.soenen@arvalis.fr
STICS (AMG)	LU/LMC	3	+++	France	Cultures	Parcelle			INRAE	https://www6.paca.inrae.fr/stics/
PaSim (Century)	LU/LMC	3	+++	France	Prairies	Parcelle			INRAE - UREP	raphael.martin@inrae.fr
Century / DayCent	LU/LMC	3	+++	Monde	Toute occupation	Parcelle			Natural Resource Ecology Laboratory (Colorado, USA)	https://www2.nrel.colostate.edu/projects/century/

3.2. Méthodes pour les changements d'occupation des sols

Il s'agit ici d'estimer les flux de carbone associés à des changements d'occupation qui ont eu lieu sur une certaine période (en fonction de l'approche adoptée : situation antérieure ou de référence).

A défaut de disposer de données spécifiques, le réseau RMQS permet d'obtenir des références moyennes pour le contexte français, qui peuvent être utilisées par approximation comme des estimations du stock de carbone à l'équilibre. Il est possible d'utiliser des extractions ou de s'appuyer sur des traitements réalisés dans le cadre d'études spécifiques. Certaines d'entre elles (cf. 3.2.2) proposent des références sur des flux annuels estimés par approximation exponentielle (cf. 2.1.4).

Le RMQS, Réseau de Mesure de la Qualité des Sols, repose sur le suivi de 2 200 sites répartis uniformément sur le territoire français, selon une maille carrée de 16 km de côté. Des prélèvements d'échantillons de sols, des mesures et des observations sont effectués tous les dix à quinze ans au centre de chaque maille. L'ensemble des opérations réalisées sur un site est détaillé dans le Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (Jolivet et al, 2006). La première campagne de prélèvement en métropole s'est déroulée de 2000 à 2009. La seconde campagne a été initiée en 2016 pour une période de 12 ans.

3.2.1. Références sur le stock de carbone du sol par type d'occupation

Différentes sources sont mobilisables en fonction de l'échelle souhaitée.

L'extraction des données RMQS téléchargeable sur le site (<https://www.gissol.fr/donnees/tableaux-de-donnees/stock-de-carbone-par-region-et-par-occupation-du-sol-3045>) permet de disposer de stock de carbone pour sept grands types d'occupation du sol (Tableau 4), sur le territoire métropolitain (Corse incluse), de façon globale et par région administrative.

Par ailleurs, une carte issue notamment du programme Global Soil Map (Mulder *et al.*, 2016) estime sur une grille de 1km de résolution les stocks de carbone sur 30 cm (<https://www.gissol.fr/donnees/cartes/la-carte-nationale-des-stocks-de-carbone-des-sols-integree-dans-la-carte-mondiale-de-la-fao-4335>).

Tableau 4 : Types d'occupation des terres disponibles dans la base de données RMQS

Type d'occupation des terres
Culture
Prairies permanentes
Forêts
Vignes
Zones humides
Autres
Vergers

Des valeurs par occupation et zone pédoclimatique, définie selon les lignes directrices du GIEC (cf. méthode en partie 3.3.2.3 – a et [Fiche 4.3.8 Données d'activité – Données pédoclimatiques](#)), sont utilisées dans les inventaires du CITEPA (2018) pour des occupations culture, prairie et forêt (Tableau

6). Celles-ci sont disponibles par Communauté de Communes et Communauté d'agglomérations depuis l'outil ALDO (Perez *et al.*, 2018).

Tableau 5 : Stocks de carbone moyens selon les caractéristiques des zones pédoclimatiques, CITEPA, 2018 (voir les définitions des classes de texture et climat au 3.3.2.3)

Texture	Climat	Stock C (tC/ha) par occupation		
		Culture	Prairie	Forêt
Grossière	Chaud tempéré humide	47	74	68
	Chaud tempéré sec	36	49	47
	Frais tempéré humide	71	96	82
Moyenne	Chaud tempéré humide	50	69	60
	Chaud tempéré sec	43	55	83
	Frais tempéré humide	52	89	79
Moyenne - fine	Chaud tempéré humide	51	75	66
	Chaud tempéré sec	39	63	56
	Frais tempéré humide	55	97	93
Fine	Chaud tempéré humide	48	84	83
	Chaud tempéré sec	39	37	68
	Frais tempéré humide	54	87	81

3.2.2. Références sur les variations de stock du carbone du sol associées à des changements d'occupation

Moyennes à l'échelle France

Une synthèse bibliographique a été conduite dans le cadre de l'étude Pellerin et al, 2019. Les valeurs obtenues sont issues de l'approche exponentielle (cf 2.1.4).

Tableau 6 : Variations des stocks de carbone organique du sol associées aux changements du sol, Pellerin et al, 2019 d'après une méta-analyse de Poeplau *et al.*, 2011.

Transition	Taille de l'échantillon	Durée depuis la transition (années)	Profondeur moyenne de mesure (cm)	Stockage de carbone organique du sol mesurée (kg C/ha/an)	Stockage de carbone organique du sol mesurée (kg CO ₂ /ha/an)
Culture -> Prairie	89	20	23.5	920 +/- 250	3 370 +/- 920
		100		590 +/- 110	2 160 +/- 400
Prairie -> Culture	176	20	27.1	- 2 080 +/- 260	-7 630 +/- 950
		100		- 420 +/- 50	-1 540 +/- 180
Forêt -> Culture	29	20	28.5	- 2 310 +/- 1 500	-8 470 +/- 5 500
		100		- 470 +/- 290	-1 720 +/- 1 060
Culture -> Forêt	70	20	28	770 +/- 360	2 820 +/- 1 320
		100		800 +/- 370	2 930 +/- 1 360
Prairie -> Forêt	10	20	38.9	-170 +/- 250	-620 +/- 920
		100		240 +/- 100	880 +/- 370

Moyennes à une échelle plus fine

Des valeurs par zone pédoclimatique ont été estimées avec une approche exponentielle sur la base des données du RMQS. Ces estimations sont disponibles à l'échelle de Communauté de Commune et Communauté d'Agglomérations dans l'outil ALDO (Perez *et al.*, 2018).

3.3. Méthode pour les changements de pratiques

3.3.1. Références bibliographiques nationales sur les flux de stockage additionnel pour différentes pratiques

Les ordres de grandeur proposés ci-dessous dans le Tableau 7 sont issus des études INRA suivantes.

Etude	Objectifs
[1] Pellerin et al, 2013	état objectif et le plus exhaustif possible des connaissances sur les actions qui pourraient être potentiellement déployées afin d'atténuer les émissions de GES en agriculture, puis de sélectionner, avec des critères transparents et explicites, une dizaine d'actions pour lesquelles une instruction du rapport coût/efficacité a été réalisée de manière détaillée.
[2] Pellerin et al, 2019	i) identifier des pratiques agricoles et sylvicoles plus "stockantes" que les pratiques actuellement mises en œuvre ; ii) chiffrer le potentiel de stockage additionnel associé, le cartographier, quantifier les autres effets induits liés à l'adoption de ces pratiques stockantes (pertes ou gains de rendement, émissions de N ₂ O, lixiviation de nitrate, utilisation de produits phytosanitaires...) ; iii) chiffrer leur coût de mise en œuvre, identifier les freins à l'adoption et proposer une stratégie coût-efficace de stockage.

Pour plus d'informations sur les sources mobilisées ainsi que le bilan GES (stockage carbone et autres émissions) de scénarios avec des pratiques plus stockantes par rapport aux pratiques actuelles, se référer au rapport des deux études.

Tableau 7 : Estimation des impacts de changement de pratiques sur le stockage de carbone dans les sols, valeurs retenues dans le cadre de l'étude Pellerin et al, 2013 et 2019

Pratiques (1/2)	Flux additionnel annuel moyen /ha (scénario à 20 ans)		Détails
	tC/ha/an	t CO ₂ /ha/an	
Couvert végétal intermédiaire	0.31 ± 0.31 [2]	1.14 ± 1.14	Forte variabilité en fonction notamment de la biomasse du couvert.
Haies, bandes enherbées			Hypothèse : implantation autour des parcelles d'une haie pluristrate, alternant arbres de haut-jet et essences arbustives, de 2 m de large ; elle est bordée de part et d'autre d'une bande enherbée de 1,5 m. L'emprise totale au sol de la haie est donc de 5 m de large, soit 2,5 m dans chacune des parcelles adjacentes. D'où un potentiel de 49 à 68 mètres linéaires par hectare, en fonction de la taille moyenne des parcelles de la région.
- Pour les prairies temporaires	0.006 [2]	0.02	
- Pour les cultures annuelles	0.02 [2]	0.07	
Agroforesterie	0.25 (0.23 à 0.73) [2]	0.92 (0.84 à 2.68)	Densité moyenne de 182 arbres /ha
Sur prairie permanente	0 (-0.2 à 0.29) [2]	0 (-0.73 à 1.06)	Densité moyenne de 272 arbres /ha
Enherbement vignes et vergers			
- Pour les couverts permanents en vergers	0.5 ± 0.3 [1]	1.80 ± 0.95	
- Pour les couverts permanents en vigne	0.3 ± 0.2 [1]	1.19 ± 0.63	
- Pour les couverts temporaires en vigne	0.16 [1]	0.59	
Intégration de prairie temporaire dans les rotations	0.47 ± 0.16 [2]	1.72 ± 0.59	
Gestion des prairies			Augmentation du stock de carbone par rapport aux pratiques dominantes actuelles
- Accroissement de la durée des prairies	0.28 ± 0.78 [2]	1.03 ± 2.86	
- Augmentation du pâturage (conversion de prairie de fauche)	0.27 ± 0.08 [2]	0.99 ± 0.29	
- Augmentation de la fertilisation azotée	0.18 ± 0.06 [2]	0.66 ± 0.22	

Pratiques (2/2)	Flux additionnel annuel moyen /ha (scénario à 20 ans)		Détails
	tC/ha/an	t CO ₂ /ha/an	
Epandage effluents et composts (minéralisation plus faible si le rapport C/N est élevé)	Composts : 0.5 Fumiers : 0.3 Lisiers : 0.1 Boues épuration < 0.1 [2]	1.83 1.10 0.37 < 0.37	L'apport de produits résiduaux organiques sur une parcelle permet d'augmenter son stock de carbone. En revanche, à une échelle plus globale, il s'agit souvent d'un transfert de carbone d'un site à un autre. En France, le principal gisement est constitué des biodéchets, sous réserve de maîtrise des contaminations et dans les déchets verts actuellement brûlés.
Travail du sol - Travail superficiel ou labour occasionnel - Semis direct	0 [2] 0.06 ± 0.035 sur les 30 premiers cm 0 sur 1 m profondeur [2]	0 0.22 ± 0.13 0	

3.3.2. Méthode GIEC tier 2 pour les changements de pratique

3.3.2.1. Description générale

Le modèle empirique des lignes directrices du GIEC appartient à la catégorie des modèles empiriques, c'est à dire qu'il ne représente pas explicitement les processus d'apport et de minéralisation de la matière organique des sols, mais modélisent directement des niveaux de carbone organique du sol (COS) en fonction de quelques variables d'entrée (Martin *et al.*, 2019). Dans la représentation GIEC (GIEC *et al.*, 2006), ce modèle s'écrit :

$$COS(t) = COS_{ref} \cdot F_{LU} \cdot F_I \cdot F_g \quad (1)$$

où COS_{ref} est le stock de carbone organique du sol, dans les conditions de référence (c'est à-dire lorsque la végétation indigène n'a été ni dégradée, ni améliorée), dans la couche de 0 à 30 cm de profondeur (tC/ha). F_{LU} est le facteur lié à l'affectation des sols, qui reflète l'influence de l'occupation du sol sur les niveaux de stocks de COS associés, suivant les différentes régions climatiques. F_I le facteur des intrants, reflétant la différence entre le stock de COS associé aux différents niveaux d'apport de carbone et le stock de COS de référence et enfin F_g est le facteur de gestion, reflétant la différence entre le stock de COS associé au type de travail du sol et le stock de COS de référence, pour une année t.

Dans la pratique, l'équation est appliquée en distinguant :

- Les surfaces affectées par des LUC : F_I et F_g sont alors fixés à 1. Voir plutôt la démarche proposée en 3.2.
- Les surfaces affectées par un LMC : F_{LU} est alors fixé à 1.

Les valeurs prises par les facteurs d'émission liés aux pratiques agricoles dépendent de la catégorisation des pratiques agricoles. Cette catégorisation est donnée dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Pratiques culturales prises en compte dans la méthodologie de Tier 1 des lignes directrices du GIEC (GIEC, 2006) et classes pour les facteurs d'émission. Les valeurs des facteurs d'émission correspondant à chacune des classes sont déclinées par grande zone climatique

Facteur	Classe	Caractéristiques
<i>Fg</i>	Labour complet	Perturbation importante avec inversion complète et/ou labour fréquent. Faible couverture de résidus (< 30% par exemple) au moment de la plantation.
<i>Fg</i>	Travail du sol réduit	Travail avec une moindre perturbation du sol, laissant une couverture de résidus > 30% au moment de la plantation.
<i>Fg</i>	Pas de travail du sol	Ensemencement direct sans labour, avec une perturbation minimale du sol.
<i>Fi</i>	Intrants faibles	Le taux de résidus est faible lors de l'enlèvement des résidus, fréquentes mises en jachère nue, cultures produisant peu de résidus, absence de l'utilisation d'engrais minéraux, absence de cultures fixant l'azote.
<i>Fi</i>	Intrants modérés	Mise en culture annuelle avec plantation de céréales, la totalité des résidus étant laissée dans les champs. Si des résidus sont retirés, des matières organiques supplémentaires sont ajoutées. Cela nécessite aussi des engrais minéraux et des cultures fixant l'azote en assolement.
<i>Fi</i>	Intrants importants sans fumier	Apports beaucoup plus importants de résidus de cultures en raison de pratiques supplémentaires, comme des cultures produisant beaucoup de résidus, utilisation d'engrais verts, cultures de couverture, jachères végétalisées améliorées, irrigation, utilisation fréquente de graminées vivaces dans les assolements annuels, mais sans application de fumier.
<i>Fi</i>	Intrants importants avec fumier	Apports de carbone beaucoup plus importants en raison d'une pratique supplémentaire d'ajout régulier de fumier

3.3.2.2. Implémentations dans le contexte français

La méthode des lignes directrices du GIEC pour la prise en compte des terres en grandes cultures a déjà fait l'objet d'implémentations différentes dans le contexte français (ex : Besson, Tosser, and Martin 2013). Le rapport Martin et al, 2019 explique les différences entre les différentes approches.

Pour le facteur intrants, la méthode utilisée dans les inventaires nationaux par le CITEPA repose sur l'utilisation d'un système "à points" permettant de moduler les intrants depuis la catégorie intrants faibles à élevés avec fumure organique, la présence de fumure organique permettant soit de passer dans la catégorie d'intrant supérieure, soit de passer de la catégorie intrants élevés à intrants élevés avec fumure organique selon la typologie GIEC. Cet algorithme de classification est donné dans la Figure 4.

Au contraire, dans Besson, Tosser, and Martin (2013), le choix de représentation réalisé a été celui d'un arbre décisionnel, qui implique par construction une certaine hiérarchisation des pratiques ou des assemblages de modalités de pratiques. Cette représentation est peut-être plus conforme aux lignes directrices du GIEC, dans lesquelles les pratiques (en dehors de la fumure organique) ne sont pas toutes équivalentes. Cela n'est pas possible dans la représentation "à points" de l'approche CITEPA. Cette représentation prend en compte également les doses de fertilisants minéraux.

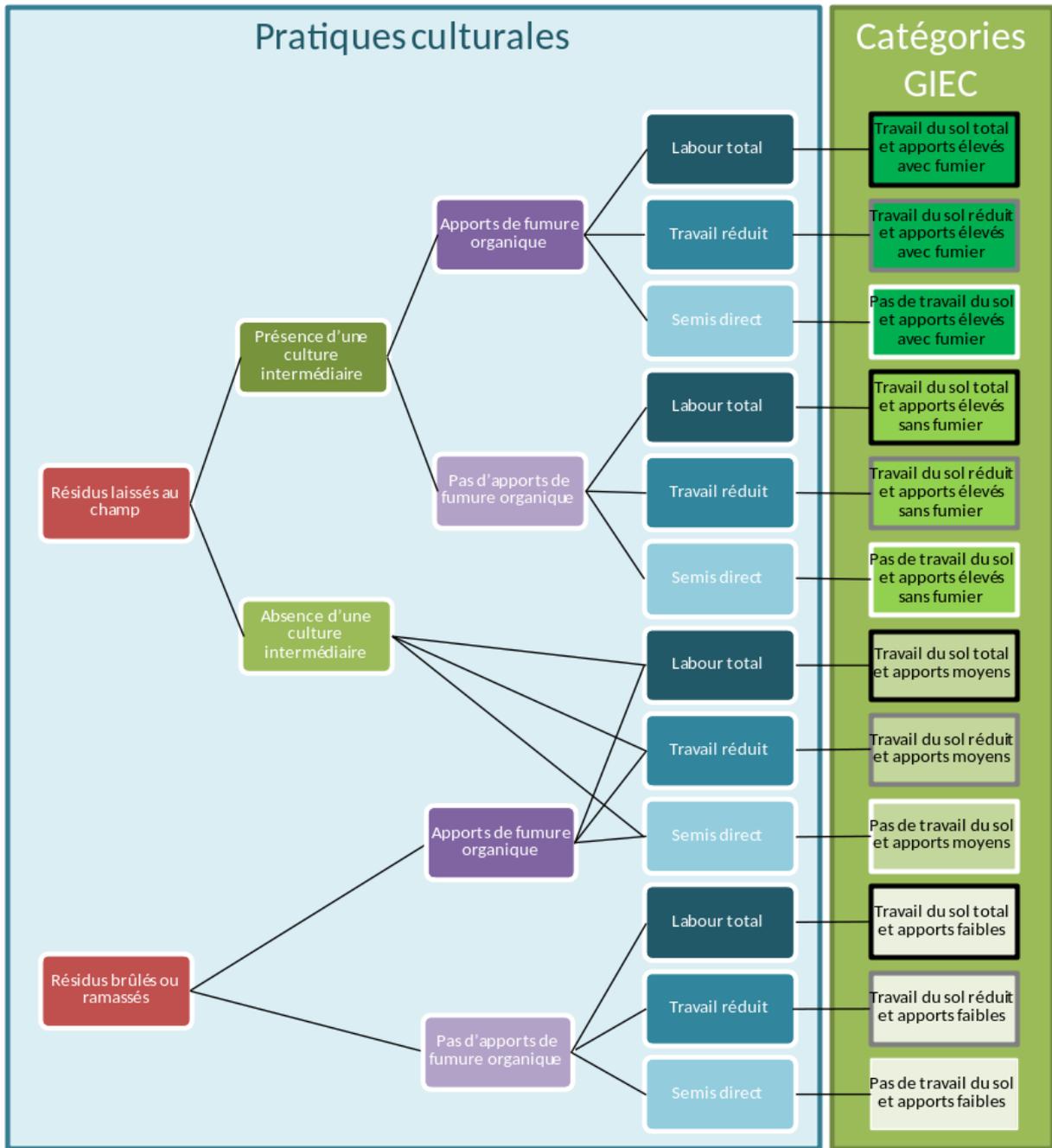


Figure 4 : Critères de délimitation des catégories GIEC en fonction des données disponibles dans les enquêtes sur les pratiques culturales, CITEPA, 2018.

3.3.2.3. Identification des stocks de carbone de référence et des facteurs d'émission

a) Identification du contexte pédoclimatique

Règles proposées par le GIEC pour la classification du climat

La classification se base sur l'élévation, la température annuelle moyenne (TAM), les précipitations annuelles moyennes (PAM), le rapport précipitations annuelles moyennes/taux potentiel d'évapotranspiration (PAM:TPE), et les occurrences du gel.

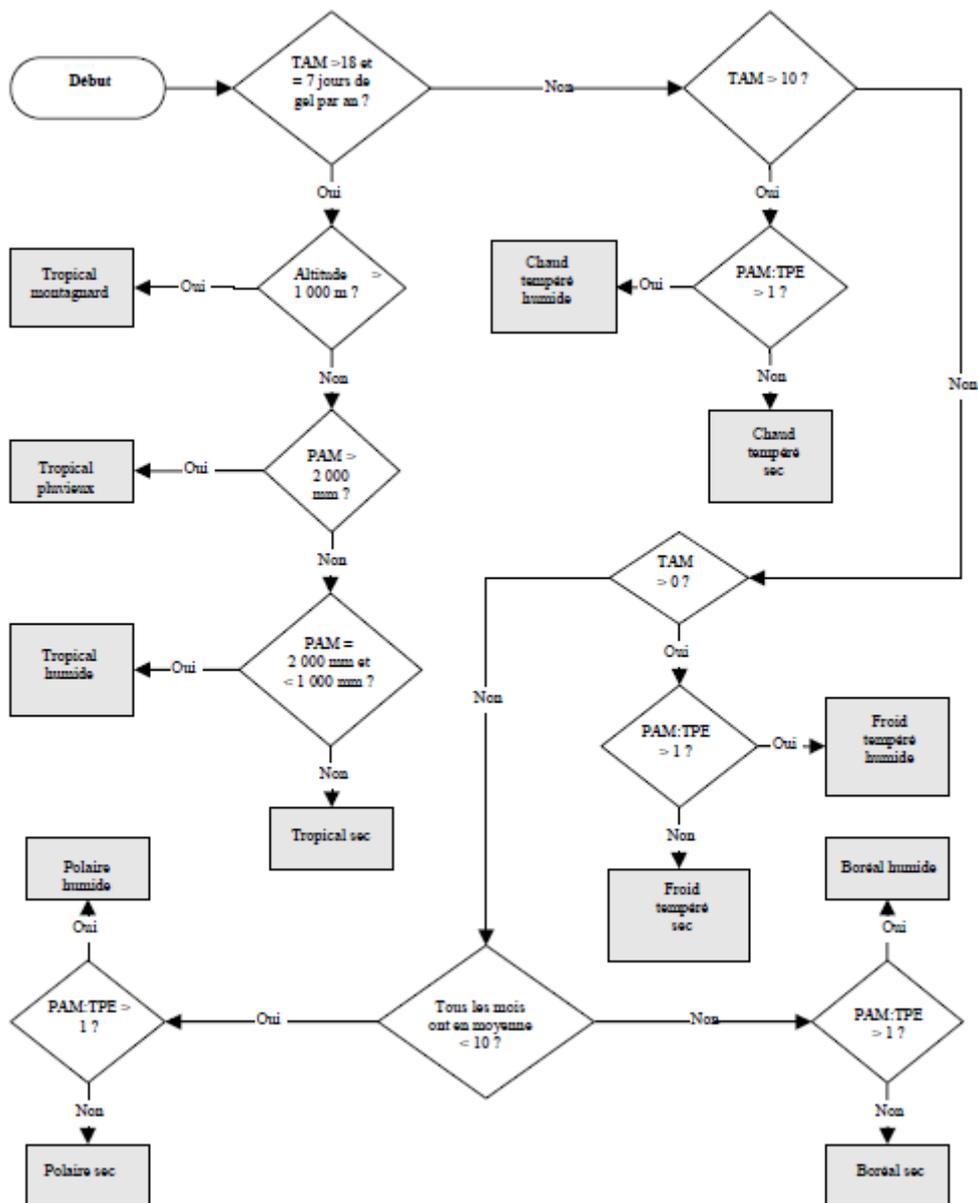


Figure 5 : règle de décision pour la détermination de la catégorie climatique, GIEC et al, 2006, vol 4, chapitre 3

Règles utilisées par le CITEPA pour la classification du type de sol

Le CITEPA utilise pour les inventaires nationaux une typologie avec cinq niveaux de texture (1 = grossière ; 2 = moyenne ; 3 = moyenne fine ; 4 = fine ; 5 = très fine).

Voir données d’activité ([Fiche 4.3.8. Données pédoclimatiques](#)) pour identifier des sources de données permettant d’identifier le contexte pédoclimatique

b) Identification des stocks de carbone de référence

Le stock de carbone sous forêt (source de données RMQS) est utilisé comme stock de carbone de référence.

Par zone pédoclimatique

Tableau 9 : Stocks de carbone moyens pour l'occupation forêt selon les caractéristiques des zones pédoclimatiques (tC/ha), OMINEA, 2018

Texture	Climat	Stock C occupation forêt
Grossière	Chaud tempéré humide	68
	Chaud tempéré sec	47
	Frais tempéré humide	82
Moyenne	Chaud tempéré humide	60
	Chaud tempéré sec	83
	Frais tempéré humide	79
Moyenne - fine	Chaud tempéré humide	66
	Chaud tempéré sec	56
	Frais tempéré humide	93
Fine	Chaud tempéré humide	83
	Chaud tempéré sec	68
	Frais tempéré humide	81

A l'échelle de région administrative

Tableau 10 : Stocks de carbone moyens pour l'occupation forêt par région administrative (tC/ha), OMINEA 2018

Périmètre	Région	tC/ha	Région	tC/ha	Source
France métropolitaine (22 régions)	Alsace	53	Île-de-France	49	Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS) [424]
	Aquitaine	60	Languedoc-Roussillon	94	
	Auvergne	80	Limousin	87	
	Basse-Normandie	97	Lorraine	80	
	Bourgogne	77	Midi-Pyrénées	73	
	Bretagne	70	Nord-Pas-de-Calais	79	
	Centre	57	Pays de la Loire	59	
	Champagne-Ardenne	61	Picardie	59	
	Corse	81	Poitou-Charentes	61	
	Franche-Comté	88	Provence-Alpes-Côte d'Azur	84	
Haute-Normandie	70	Rhône-Alpes	78		
Outre-mer inclus dans le Protocole de Kyoto (5 régions)	Guyane	100			[328]
	Guadeloupe	15			[386]
	Martinique	14			[386]
	Réunion	2			[386]
	Mayotte	64			[386]

A l'échelle de communauté de communes ou d'agglomérations

Cf. outil ALDO 1.4 (Perez *et al.*, 2018)

c) Identification des facteurs d'émission

Les valeurs proposées par le GIEC sont identiques entre la version de 2006 et la version actualisée de 2019.

Pour les tableaux complets, cf. GIEC 2006, vol 4, chap 5, p5.20 et GIEC 2019, vol 4, chap 5, p5.30.

Tableau 11 : Facteurs d'émission par changement de pratique, modèle GIEC tier1, GIEC, 2006.

Facteur	Classe	Valeur selon le contexte pédoclimatique, 2006 et 2019	
		Chaud ou frais tempéré humide	Chaud tempéré sec
<i>Fg</i>	Labour complet	1*	
<i>Fg</i>	Travail du sol réduit		
<i>Fg</i>	Pas de travail du sol		
<i>Fi</i>	Intrants faibles	0.92	0.95
<i>Fi</i>	Intrants modérés	1	1
<i>Fi</i>	Intrants importants sans fumier	1.11	1.04
<i>Fi</i>	Intrants importants avec fumier	1.44	1.37

* les lignes directrices GIEC, 2006 propose des facteurs différenciés en fonction du travail du sol. Au regard des résultats de l'étude Pellerin *et al*, 2019, il est proposé de ne pas considérer d'effet.

3.3.3. Méthode PEF, tier 2

Dans le cadre de l'expérimentation européenne sur l'affichage environnemental menée par la Commission Européenne de 2013 à 2018, la question de la prise en compte des flux de carbone des sols dans les empreintes produits s'est posée. Des propositions ont été faites par le Cow Model Working Group - CMWG (Tuomisto *et al.*, 2015) et des outils de calculs développés, notamment dans le cadre du PEF Red Meat :

- Blonk (*outil Carbon Sequestration pour le PEF Meat*), avec les facteurs par défaut IPCC
- K Klump & JB Dollé (*outil et annexe Carbon sequestration / release in grassland systems dans le cadre des PEF meat et PEF dairy ; in Tuomisto et al., 2015*), avec des facteurs complémentaires pour la prairie

Ces approches ont été reprises et appliquées dans le cadre du projet SOCLE (ADEME, 2019).

La méthode est celle du GIEC Tier 2, avec ajout de paramètres pour spécifier le stockage sous prairie (en fonction des pratiques).

Prairies permanentes :

Deux paramètres, sur le niveau de défoliation et l'âge des prairies permanentes sont ajoutés. L'équation (1) devient :

$$COS(t) = COS_{ref} \cdot F_{LU} \cdot F_i \cdot F_g \cdot F_d \cdot F_a \quad (2)$$

où

COS_{ref} est le stock de COS, dans les conditions de référence (c'est à-dire lorsque la végétation indigène n'a été ni dégradée, ni améliorée), dans la couche de 0 à 30 cm de profondeur (tC/ha).

F_{LU} est le facteur lié à l'affectation des sols, qui reflète l'influence de l'occupation du sol sur les niveaux de stocks de COS associés, suivant les différentes régions climatiques.

F_i le facteur des intrants, reflétant la différence entre le stock de COS associé aux différents niveaux d'apport de carbone et le stock de COS de référence

F_g est le facteur de gestion, reflétant la différence entre le stock de COS associé au type de travail du sol et le stock de COS de référence, pour une année t.

F_d est le facteur de défoliation de la prairie (niveau de prélèvement des parties aériennes).

F_a est le facteur lié à l'âge de la prairie

Tableau 12 : Facteurs de modulation du stock de référence, en fonction du niveau de défoliation et de l'âge des prairies permanentes, Tuomisto *et al.*, 2015.

Facteur	Classe	Valeurs
F_d	Prairies –Niveau défoliation Intensif	0.95
F_d	Prairies –Niveau défoliation Moyen	1.025
F_d	Prairies –Niveau défoliation Bas	1.1
F_a	Prairies - < 30 ans	1.10
F_a	Prairies- 30-60 ans	1.05
F_a	Prairies - >60 ans	1.00

Prairies temporaires :

Il est considéré que la prairie temporaire (PT) se comporte comme une prairie permanente vis-à-vis du carbone du sol et qu'elle se trouve en rotation avec des cultures. Cela conduit à calculer, pour une surface de ce type d'usage, un facteur de variation de stock pondéré à la rotation.

Ainsi pour une rotation de X années, avec Y années de présence de la prairie temporaire et Z années de cultures (avec $X = Y+Z$), le stock de carbone organique annuel moyen à l'échelle de la rotation se calcul à partir des stocks annuels des occupations prairies (COS PT) et cultures (COS cult).

Pour les prairies temporaires, l'équation (1) est utilisée (sans les paramètres supplémentaires pour la prairie permanente) et devient l'équation (3) :

$$COS\ rotation\ (t) = (COS\ prairie\ temporaire \cdot Y + COS\ culture \cdot Z) / X \quad (3)$$

3.3.4. Méthodes de niveau 3

Les performances des modèles Century, Roth C et AMG (cf Annexe 1) ont été évaluées et comparées avec la méthode GIEC tier 1 sur une base de 21 essais (81 traitements) mises en place par ARVALIS ou l'INRAE, seul ou avec d'autres partenaires (données de ces sites saisies dans la base de données AIAL). Ces différents modèles font l'objet d'une description dans Martin *et al.*, 2019. Les résultats de leur comparaison sont présentés dans l'annexe, sur la comparaison de modèles.

4. Estimation des émissions de N₂O associées à un flux de déstockage de carbone du sol

La perte de carbone du sol induit des émissions de N₂O. Les lignes directrices du GIEC proposent d'estimer ces émissions en divisant les quantités de carbone perdues par le ratio C/N.

Rq : Les modèles STICS (voir Annexe de la [Fiche 4.1.3. Emissions par les sols agricoles](#)) et CHN estiment également les émissions de N₂O, dont ces émissions liées à un déstockage.

Emissions de N₂O par voie directe

Emissions de N₂O déstockage suite changement usage A à un usage B

$$= (COS_B - COS_A) / R * FE_{(p)} * 1\ 000$$

Avec :

- Emissions de N₂O en : kg N₂O/ha
- COS_B et COS_A : stock de carbone organique des usage B et A, en t C/ha
- R : rapport C:N de la matière organique des sols. Valeur par défaut du GIEC indiqué en partie 1.3.
- FE_(p) : facteur de conversion des quantités d'azote en quantité de protoxyde d'azote, = 44/14

Il faut ensuite éventuellement ramener ces émissions à l'année en les divisant par la période de l'étude prise en compte.

5. Estimation des stocks de carbone dans la biomasse par type d'occupation et pratique

Selon les lignes directrices du GIEC, il s'agit de comptabiliser les stocks contenus dans la biomasse vivante aérienne et souterraine, le bois mort et la litière. Les références sur forêts sont présentées également afin de pouvoir quantifier les flux induits par des changements d'occupation depuis ou vers une forêt.

5.1. Références par types d'occupation

5.1.1. Biomasse vivante aérienne et souterraine

Références à l'échelle de grandes régions

Les références ci-dessous proviennent de CITEPA, 2018, elles sont utilisées pour les inventaires nationaux.

Stocks de carbone (tC/ha) dans la biomasse vivante aérienne des terres forestières

Périmètre	Région	Feuillus	Mixte	Résineux	Peupliers	Source de données
France métropolitaine (5 interrégions)	Centre-est	66	52	56	44	Inventaire forestier national (IGN) [202]
	Nord-est	59	52	56	37	
	Nord-ouest	61	52	56	37	
	Sud-est	34	52	56	35	
	Sud-ouest	48	52	56	24	
Outre-mer inclus dans le Protocole de Kyoto (5 régions)	Guyane	166	n.d	n.d	n.d	ONF-CIRAD [328]
	Guadeloupe	49	n.d	n.d	n.d	ONF [386]
	Martinique	48	n.d	n.d	n.d	ONF [386]
	Réunion	5	n.d	n.d	n.d	ONF [386]
	Mayotte	75	n.d	n.d	n.d	ONF [386]
Autres territoires		n.d	n.d	n.d	n.d	

n.d : non déterminé

Stocks de carbone (tC/ha) dans la biomasse vivante aérienne des terres non forestières

	Zone arborée	Zone arbustive	Zone herbacée	Zone nue	Source de données
Prairies	Idem forêt	5	0		Estimation [493]
Cultures	12 (vergers)	4 (vignes)	0 (cultures annuelles)		
Zones humides				0	Estimation
Zones artificialisées	Idem forêt		0	0	Estimation
Autres terres		n.d	n.d	n.d	

n.d : non déterminé

Stocks de carbone (tC/ha) dans la biomasse vivante racinaire des terres forestières

Périmètre	Région	Feuillus	Mixte	Résineux	Peupliers	Source de données
France métropolitaine (5 interrégions)	Centre-est	20	16	17	13	Inventaire forestier national (IGN) [202]
	Nord-est	18	16	17	11	
	Nord-ouest	18	16	17	11	
	Sud-est	10	16	17	11	
	Sud-ouest	14	16	17	7	
Outre-mer inclus dans le Protocole de Kyoto (5 régions)	Guyane	26	n.d	n.d	n.d	ONF-CIRAD [328]
	Guadeloupe	11	n.d	n.d	n.d	ONF [386]
	Martinique	10	n.d	n.d	n.d	ONF [386]
	Réunion	1	n.d	n.d	n.d	ONF [386]
	Mayotte	17	n.d	n.d	n.d	ONF [386]
Autres territoires		n.d	n.d	n.d	n.d	

n.d : non déterminé

Stocks de carbone (tC/ha) dans la biomasse vivante aérienne des terres non forestières

	Zone arborée	Zone arbustive	Zone herbacée	Zone nue	Source de données
Prairies	Idem forêt	2	0		Estimation
Cultures	4 (vergers)	1 (vignes)	0 (cultures annuelles)		[493]
Zones humides				0	Estimation
Zones artificialisées	Idem forêt		0	0	Estimation
Autres terres	n.d	n.d	n.d	n.d	

n.d : non déterminé

Figure 6: Stock de carbone dans la biomasse vivante aérienne et souterraine en t C/ha, estimation par grande région, source CITEPA, 2018

Références à une échelle plus fine

L'outil ALDO (Perez *et al.*, 2018) permet d'accéder à des estimations, provenant de l'inventaire national forestier réalisé par l'IGN sur la période 2012-2016 :

- Par grande région écologique pour les forêts de feuillus, de résineux et mixtes,
- Par bassins populicoles pour les peupliers
- Par Communauté de Communes et Communautés d'Agglomération : moyennes des références obtenues à une échelle plus fine.

Sont également disponibles des références par essence à l'échelle de la sylvo-éco-région (ADEME, IGN, 2019).

5.1.2. Le bois mort et les litières

Les références ci-dessous sont utilisées par le CITEPA, 2018 pour les inventaires nationaux.

Stocks de carbone (tC/ha) dans la litière des terres forestières						
Périmètre	Région	Feuillus	Mixte	Résineux	Peupliers	Source de données
France métropolitaine		9,0	9,0	9,0	9,0	[206]
	Guyane	2,0	n.d	n.d	n.d	[328]
Outre-mer inclus dans le Protocole de Kyoto	Guadeloupe	0,6	n.d	n.d	n.d	[386]
	Martinique	0,6	n.d	n.d	n.d	[386]
(5 régions)	Réunion	0,1	n.d	n.d	n.d	[386]
	Mayotte	0,9	n.d	n.d	n.d	[386]
Autres territoires		n.d	n.d	n.d	n.d	

n.d : non déterminé

Stocks de carbone (tC/ha) dans le bois mort des terres forestières						
Périmètre	Région	Feuillus	Mixte	Résineux	Peupliers	Source de données
France métropolitaine		1,0	1,0	2,5	2,5	[206]
	Guyane	8,8	n.d	n.d	n.d	[328]
Outre-mer inclus dans le Protocole de Kyoto	Guadeloupe	1,2	n.d	n.d	n.d	[386]
	Martinique	1,2	n.d	n.d	n.d	[386]
(5 régions)	Réunion	0,1	n.d	n.d	n.d	[386]
	Mayotte	1,9	n.d	n.d	n.d	[386]
Autres territoires		n.d	n.d	n.d	n.d	

n.d : non déterminé

Figure 7: Stock de carbone dans le bois mort et la litière en t C/ha, estimation par grande région, source CITEPA, 2018

5.2. Références pour les haies et l'agroforesterie

Le CITEPA considère un stock de carbone de la biomasse vivante ligneuse (aérien et racinaire) identiques à la forêt (cf. 5.1.1) pour les surfaces de haies et de bosquets.

Les références de flux annuel suite à l'implantation de haie de l'étude Pellerin et al, 2013 sont les suivantes :

- pour 60 mètres linéaires de haie : 0.09 t C/ha/an,
- pour 100 mètres linéaires de haie : 0.015 t C/ha/an,
- pour l'agroforesterie : 0.7 t C/ha/an

6. Références bibliographiques

ADEME, GIS Sol, 2015 - Le carbone organique des sols - L'énergie de l'agro-écologie, une solution pour le climat. 15 p.

ADEME, IGN, 2019. Contribution de l'IGN à l'établissement des bilans carbone des forêts des territoires (PCAET). 30 pages.

ADEME. Aurélie Tailleur, Anthony Benoist, Cécile Bessou, Armelle Gac, Caroline Godard, Julie Lebas de Lacour, 2019, 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? 111p.

ADEME. Martin Manuel, 2018. Méthode de comptabilisation du stockage organique des sols sous l'effet des pratiques culturales (CSopra). Rapport de synthèse 14p.

AFNOR, 2018. ISO 14067: 2018. Gaz à effet de serre -- Empreinte carbone des produits -- Exigences et lignes directrices pour la quantification. Ed AFNOR, La Plaine Saint-Denis, France.

Antoni V., Arrouays D., 2007 – Le stock de carbone dans les sols agricoles diminue. Les 4 pages, Ifen, n° 121, novembre 2017, 4p.

Arrouays, D., J. Balesdent, J.C. Germon, P.A. Jayet, J.F. Soussana et P. Stengel (eds), 2002. Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ? Expertise scientifique collective. Rapport. INRA. 332 pp. Balesdent J., Basile-Doelsch I., Chadoeuf J., Cornu S., Derrien D., Fekiacova Z., Hatté C. Atmosphere-soil carbon transfer as a function of soil depth. Nature 11 juillet 2018

Balesdent, J., Basile-Doelsch, I., Chadoeuf, J. et al., 2018. Atmosphere–soil carbon transfer as a function of soil depth. Nature 559, 599–602.

Besson A., Martin M., Tossier V. Amélioration de la méthodologie d'inventaire des stocks de carbone dans les sols agricoles et forestiers. Avril 2013.

Chenu C., Klumpp K., Bispo A., Angers D., Colnenne C., Metay A., 2014 Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France. Innovations Agronomiques 37, 23-37

CITEPA, 2018. Rapport OMINEA – 15^{ème} édition

Clivot, H. ; Mouny, J.-C. ; Duparque ; Dinh ; Denoroy, P. ; Houot, S. ; Vertes, F. ; Trochard, R. ; Bouthier, A. ; Sagot, S. ; Mary, B. Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model Environmental Modelling and Software, 2019, 118 : 99-113.

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.

Hazard C., Barette J.-P. et Mayer J., 1996 - Mémotech Bois et Matériaux Associés, Paris, Éditions Casteilla.

ILCD, 2010. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Specific Guide for Life Cycle Inventory Data Sets. 139 p.

Jolivet C., Boulonne L., Ratié C., 2006. Manuel du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols. Edition 2006, Unité InfoSol, INRA Orléans, France, 190 p.

Guide GES'TIM+ v1.2

Projet réalisé par Arvalis, en partenariat avec l'Idèle, le Ctifl, l'Ifv, l'Itavi, l'Ifip et Terres Inovia. Avec la participation financière de l'ADEME - Agence de la transition écologique.

Août 2023.

Martin, M., Dimassi, B., Millet, F., Picaud, C., Bounoua, E.-M., Bardy, M., Bispo, A., Boulonne, L., Bouthier, A., Duparque, A., Eglin, T., Guenet, B., Huard, F., Mary, B., Mathias, E., Mignolet, C., Robert, C., Saby, N., Sagot, S., Schott, C., Toutain, B., Trochard, R., 2019. Méthodes de comptabilisation du stockage de carbone organique des sols sous l'effet des pratiques culturales (CSopra)

Mulder, V.L., Lacoste, M., Richer-de-Forges, A.C., Martin, M.P., Arrouays, D., 2016. National versus global modelling the 3D distribution of soil organic carbon in mainland France. *Geoderma* 263, 16–34

Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Rapport d'étude, INRA (France), 454 p.

Pellerin S. et Bamière L. (pilotes scientifiques), Launay C., Martin R., Schiavo M., Angers D., Augusto L., Balesdent J., Basile-Doelsch I., Bellassen V., Cardinael R., Cécillon L., Ceschia E., Chenu C., Constantin J., Darroussin J., Delacote P., Delame N., Gastal F., Gilbert D., Graux A.-I., Guenet B., Houot S., Klumpp K., Letort E., Litrico I., Martin M., Menasseri S., Mézière D., Morvan T., Mosnier C., Roger-Estrade J., Saint-André L., Sierra J., Théron O., Viaud V., Gâteau R., Le Perchec S., Savini I., Réchauchère O. (coordinateur), 2019. Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 114 p.

Perez L., Buitrago M, Eglin T. 2018. Notice technique de l'outil ALDO : Estimation des stocks et des flux de carbone des sols, des forêts et des produits bois à l'échelle d'un EPCI. 21p., <https://www.territoires-climat.ademe.fr/actualite/loutil-aldo-pour-une-premiere-estimation-de-la-sequestration-carbone-dans-les-sols-et-la-biomasse>

Poeplau, C., Don, A., Vesterdal, L., Leifeld, J., van Wesemael, B., Schumacher, J., Gensior, A.. 2011. Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach. *Global Change Biology*. 17(7), 2415-2427.

Tuomisto H.L., Saouter E., Pant R., 2015. Default approaches for cross-cutting issues for the cattle related product environmental footprint pilots. European Commission, Joint Research Center. Italy. 21p.

7. Annexe

Annexe 1	Comparaison de modèles de variation de stock du carbone du sol (projet CSopra)	
----------	--	--

Cette fiche a pour objectif de présenter les travaux de comparaison de modèles conduits dans le cadre du projet CSopra (Manuel *et al.*, 2019).

Ce projet est présenté dans les Fiches projet (voir Fiche [3.2. 13 fiches sur les projets en cours, susceptibles d'alimenter GES'TIM+](#))

Objectifs

En matière d'étude de la dynamique de la matière organique, les modèles sont un élément important pour, dans un cadre mathématique et informatique, intégrer, étudier et tester les dynamiques et connaissances qui s'y rattachent. Les modèles de dynamique du carbone sont nombreux et de complexité variable, bien que de nombreux partagent les mêmes concepts. Ceux-ci sont basés sur une discrétisation des types de la matière organique des sols en différents compartiments et une dynamique linéaire du premier ordre, où les vitesses de minéralisation ne dépendent pas des quantités de matière organique des sols, ni de sa nature. Les modèles les plus couramment utilisés (RothC, Century, DayCent, Yasso, AMG en contexte français, le module SOM ORCHIDEE pour les modèles globaux) appartiennent à cette catégorie, mais intègrent cependant des processus variés qui vont moduler de façon plus ou moins fine la dynamique de la matière organique dans les différents compartiments. Cette augmentation de la complexité des modèles doit permettre de mieux représenter la dynamique du COS et d'améliorer la performance des modèles dans des conditions plus variées. Néanmoins, cette augmentation de la complexité aboutit généralement à une baisse de l'applicabilité, car les modèles complexes nécessitent un plus grand nombre de données d'entrée que les modèles simples. Ils peuvent également présenter des limites en termes de robustesse lorsque certains processus fins n'ont pu être calibrés et validés que sur un nombre très restreint de situations.

Les modèles présentent différents niveaux de complexité concernant leur représentation du sol et la représentation de l'effet des pratiques sur d'une part les entrées de carbone et d'autre part la minéralisation du COS. Plus le modèle est complexe, concernant un processus donné, plus, en général, les variables d'entrées sont nombreuses. Par exemple, on peut comparer le modèle Century d'un côté, qui, pour le bilan hydrique, nécessite de caractériser les différents horizons du solum, et les modèles type RothC ou AMG qui ne considèrent qu'un horizon de surface, unique (même si pour ces deux modèles, des améliorations ont été testées afin de caractériser des comportements variables du COS selon la profondeur).

Une autre différence fondamentale parmi les modèles de la matière organique des sols, est leur intégration d'un module de croissance végétale, ou plus généralement de simulation des entrées de

carbone dans les sols. Par exemple, les modèles RothC, AMG, Yasso, ont comme variable d'entrée le carbone organique entrant dans le sol, alors que des modèles tels que STICS (qui initialement est d'ailleurs un modèle de culture) ou Century intègrent un module de croissance végétale, et simulent donc eux-mêmes ces entrées en fonction du type de couvert, de la gestion du couvert, du sol et du climat.

Méthode

AMG, RothC, Century, ORCHIDEE et GIEC tier 1 ont été testés sur le jeu de données AIAL, base de données des sites expérimentaux de suivi de longue durée pour évaluer les modèles. Les sites de suivis sont des expérimentations de moyenne durée (entre 7 et 40 ans) qui ont été mises en place par ARVALIS ou l'INRAE, seul ou avec des partenaires, dans différents contextes pédoclimatiques français. Ces expérimentations concernent notamment le travail du sol, les rotations, système de culture, gestion des pailles, mode de gestion des périodes d'interculture (sol nu, cultures intermédiaires), apports de produits résiduaux organiques, fertilisation PK. Ces essais comportent un suivi de la teneur en carbone organique du sol (COS) de la couche arable avec plusieurs mesures sur la période de suivi. L'ensemble des interventions culturales susceptibles d'affecter le stock de COS a été enregistré ainsi que le rendement des cultures mesuré chaque année. Un ensemble de 21 essais avec plusieurs modalités (soit 81 traitements) a été constitué, après sélection statistique parmi des jeux de données candidats. Une quinzaine d'autres essais ont été analysés depuis et ont été incorporés à cette base de données, notamment concernant le site de Boigneville.

Les simulations ont porté sur une profondeur correspondant à la couche labourée (ou ayant été labourée dans le cas des sites avec travail réduit du sol).

Résultats

La Figure 8 et le Tableau 13 présentent les résultats sur certains des modèles testés et dans certaines configurations de simulation (d'autres modèles ont été testés, et certains modèles présentés sur la Figure 8 ont été testés avec d'autres modalités de simulation).

C'est avec des modèles simples et forcés à l'aide de données d'entrée de carbone que les meilleurs résultats ont été obtenus. L'approche Tier 1 du GIEC, telle qu'elle a été implémentée dans le projet, a le plus faible pouvoir prédictif.

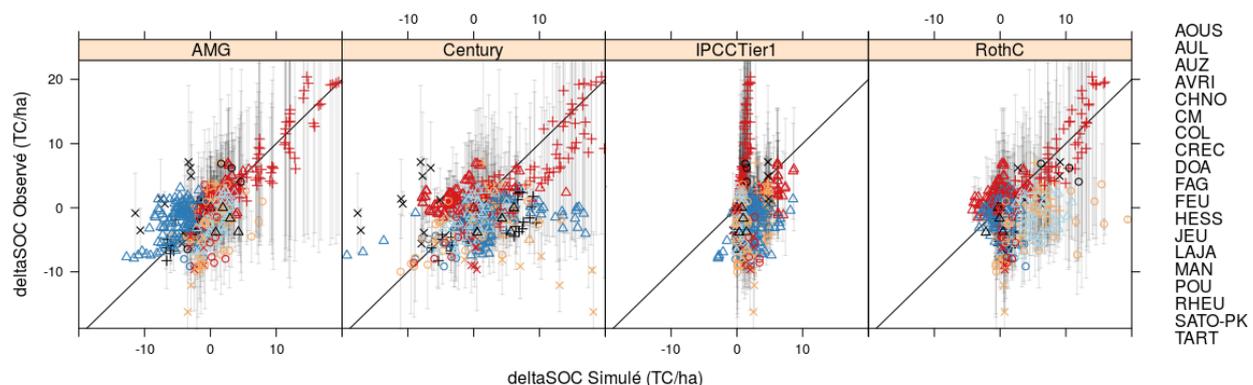


Figure 8 : Comparaisons des variations de stocks de carbone simulées et mesurées pour 19 sites de longue durée de la base de données AIAL.

Tableau 13 : Performance des modèles sur l'estimation des variations de stocks de carbone (RothCRelaxed : initialisation avec relaxation, forçage avec observations de rendements ; RothCRelaxed_SAACins : RothC avec forçage des entrées issus des statistiques agricoles).

R2 : coefficient de détermination, indicateur qui permet de juger la qualité d'une régression linéaire simple ici entre les valeurs estimées et les valeurs mesurées, **RMSPE** : erreur quadratique moyenne de prédiction, **MPE** : erreur de prédiction moyenne, **MedPE** : erreur de prédiction médiane, **RMedSPE** : racine carré de la médiane des carrés des écarts entre valeurs estimées et valeurs mesurées.

Modèle	R2	RMSPE	MPE	MedPE	RMedSPE
AMG	0.56	3.27	-0.09	0.00	1.49
RothCRelaxed_SAACins	0.54	3.31	-0.67	-0.06	1.71
RothCRelaxed	0.47	3.47	0.14	0.00	1.88
RothC_SAACins	0.32	4.50	-2.26	-1.18	2.05
RothC	0.26	4.69	-2.17	-0.97	2.28
CenturyUnforced	0.26	5.10	-0.38	0.00	2.61
Century	0.11	9.66	-2.49	-0.41	2.75
ORCHIDEE	0.05	7.67	1.73	2.02	3.43
GIECTier1 (=IPCCTier1)	0.02	5.03	-1.87	-1.93	2.65