

Fiche méthodologique 1 : Mesure et calcul des indicateurs carbone



Version n°2 du 24.05.2024

Adopté par le comité d'AgroImpact le 24.05.2024

Entrée en vigueur le 01.06.2024– Version 2

AgroImpact
Avenue des Jordils 1
Case postale 1080
1001 Lausanne
www.agroimpact.ch

Table des matières

1. Généralités	3
1.1 Définitions	3
Par <i>droit carbone</i> , on entend tout crédit, certificat, titre ou comptabilité carbone propriété d'une personne physique ou morale agricole. Ce droit peut être cédé, vendu ou utilisé librement.	
1.2 Champs d'application	3
1.3 Droit d'usage du logo ClimaCert niveau 2	3
2. Démarche pour l'obtention d'indicateur carbone	4
2.1 Demande de diagnostic carbone.....	4
2.2 Acceptation du devis	4
2.3 Transmission des données	4
2.4 Diagnostic	4
2.5 Attestation	5
2.6 Facturation et contrôles	5
2.7 Plan d'action	5
2.8 Mise à jour des indicateurs.....	5
3 Calcul des indicateurs carbone.....	5
3.1 Calcul des émissions de GES.....	6
3.2 Calcul du stock et du stockage carbone dans les sols	7
3.3 Méthode d'estimation du potentiel de stockage.....	7
3.4 Allocation du stockage carbone pour le calcul du bilan carbone.....	8
3.5 Calcul en cas de cession de droit carbone.....	9
4. Contrôles	9
4.1. Contrôles des données pour le calcul des indicateurs carbone.....	9
4.2 Donnée contrôlées en routine	9
4.3. Données spécifiques au dispositif ClimaCert	10
4.4 Contrôle des personnes et organismes habilités au calcul d'indicateurs d'émissions de GES	11
4.5 Contrôle des personnes habilitées au prélèvement d'échantillons.....	11
4.6 Contrôle des personnes habilitées au calcul du stock de carbone et du potentiel de stockage carbone.....	11
5. Attestation.....	11
6. Références.....	14
Annexe FM1.1 : Données à fournir par les exploitations.....	15

Annexe FM1.2 : Méthodologie HEPIA pour prélèvement de sol, mesure du stock de carbone et du potentiel de stockage carbone	26
1.1.1. Protocoles de prélèvement	27
1.1.2. Protocole de traitement de l'échantillon EN LABORATOIRE	29

1. Généralités

1.1 Définitions

Par *indicateur carbone*, on entend le total des émissions de GES annuel, le stock de carbone des sols, le potentiel de stockage carbone minimal des sols annuel, établi pour l'ensemble de l'exploitation et par unité de matière première brute produite. Les indicateurs sont calculés pour l'année *n*, à partir des éléments fournis par le demandeur (valeurs, descriptifs, pratiques...) relevés pour l'année *n* et/ou *n-1* (sol, rendement...) et d'un diagnostic carbone réalisé avec les outils et méthodes définis dans la présente fiche méthodologique.

Par *potentiel de stockage minimal*, on entend la valeur théorique de stockage carbone de l'ensemble de la SAU de l'exploitation basée sur la somme du *potentiel de stockage minimal* de chaque parcelle modélisée par le model prédictif développé par la Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève (HEPIA, version du 1^{er} janvier 2023¹)

Par *demandeur*, on entend toute exploitation agricole demandant l'établissement d'indicateurs carbone ClimaCert.

Par *attestation*, on entend un document récapitulatif des indicateurs de transition ClimaCert.

Par *droit carbone*, on entend tout crédit, certificat, titre ou comptabilité carbone propriété d'une personne physique ou morale agricole. Ce droit peut être cédé, vendu ou utilisé librement.

1.2 Champs d'application

Le calcul d'indicateur carbone s'applique à l'échelle d'une exploitation agricole à l'exception de tout atelier équin, porcin, de volaille car il n'existe pas d'outil pour prendre en compte ces ateliers.

Les indicateurs carbone sont calculés et mesurés pour l'année *n*.

1.3 Droit d'usage du logo ClimaCert niveau 2

L'exploitation ayant obtenu une attestation ClimaCert est autorisée à faire usage du logo niveau 2 si 1) elle est en mesure de justifier auprès de la gérance une démarche de transition (réduction des émissions de GES ou amélioration de son potentiel de stockage carbone notamment par l'élaboration d'un plan d'action) et 2) qu'un second calcul / mesure d'indicateur sera effectué avant l'échéance des premiers indicateurs. Le second calcul / mesure ne nécessite pas forcément le calcul / mesure de tous les indicateurs carbone car certains indicateurs ont une durée d'évolution qui est plus longue qu'une année.

¹ Se référer à l'annexe FM1.2 sur la méthodologie de quantification du stock de carbone développée par l'HEPIA AgrolImpact
Avenue des Jordils 1
Case postale 1080
1001 Lausanne
www.agroimpact.ch

2. Démarche pour l'obtention d'indicateur carbone

Pour obtenir une attestation ClimaCert concernant les indicateurs carbone, toute exploitation agricole doit avoir réalisé les 6 premières étapes de la démarche exposée à la figure 1 ci-après. Seules les trois premières étapes requièrent du travail de la part des exploitations agricoles (transmission des données agricoles).

2.1 Demande de diagnostic carbone

Pour obtenir un devis pour un diagnostic, l'exploitation doit remplir le formulaire en ligne disponible au lien suivant : <https://forms.office.com/e/tCysSmy9Y4>. La demande de diagnostic permet d'établir un devis qui estime les coûts liés aux prestations demandées. Tant que le devis n'est pas signé et retourné à la gérance, celui-ci reste informatif. Les montants des devis et conditions de ceux-ci pouvant changer avec le temps, une actualisation de ces derniers est en tout temps possible. Les exploitations concernées par l'actualisation des devis sont informées par la gérance.

2.2 Acceptation du devis

Le devis est accepté une fois signé et retourné à la gérance par voie postale ou électronique et ceci, dans le délai imparti figurant sur le devis. Par la signature du devis, l'exploitant.e accepte les conditions figurant sur le devis et accepte les directives édictées par le règlement ClimaCert. L'exploitation agricole s'engage donc dans une démarche de transition et met en oeuvre les leviers sélectionnés dans son plan d'action. L'exploitant.e accepte d'être contrôlé.e dans le cadre du dispositif ClimaCert. Si le délai du devis est dépassé mais que les conditions et les montants correspondent aux conditions du jour de la réception du devis, la gérance se réserve le droit d'accepter le devis même si ce dernier est hors délai. Un email confirmant la bonne réception du devis signé est transmis à l'exploitant.e dès sa réception.

2.3 Transmission des données

Une fois le devis accepté par l'exploitation agricole, les données nécessaires au calcul des indicateurs sont récoltées par des formulaires spécifiques émis par la gérance et par des documents déjà existants. L'exploitation agricole est responsable de la transmission de l'ensemble des données nécessaires au calcul et de la véracité des données transmises. Un échange téléphonique d'une heure entre l'exploitant.e et la personne responsable des diagnostics est prévu avant le commencement de ces derniers afin de compléter d'éventuelles données manquantes et de valider de potentielles données incohérentes.

2.4 Diagnostic

Sur la base des données collectées auprès des exploitants.es, les diagnostics (mesure et calcul des indicateurs) sont réalisés par la gérance ou des tiers habilités et mandatés par cette dernière. Les diagnostics sont réalisés avec des outils informatiques reconnus et/ou des prélèvements sur le terrain. Aucun travail de l'exploitant.e n'est requis pour la réalisation du diagnostic. Si un besoin de données supplémentaires venait à émerger lors de la réalisation d'un diagnostic, celles-ci seront récoltées directement par la gérance ou le tiers mandaté qui réalise le diagnostic. Les types de diagnostics et les indicateurs calculés sont détaillés dans les chapitres 3 et 5.

Au terme du ou des diagnostics, un rapport de diagnostic rassemblant en détail 1) les résultats et indicateurs carbone 2) des comparaisons à des moyennes de références si celles-ci sont disponibles et 3) des explications méthodologiques, est transmis à l'exploitation.

2.5 Attestation

Une attestation exposant la valeur de chaque indicateur carbone est établie et transmise à l'exploitation. La liste complète des éléments pouvant figurer sur l'attestation est détaillée dans le chapitre 5. L'exploitation qui reçoit une attestation ClimaCert est inscrite au registre public ClimaCert. Les demandes de soutiens cantonaux pour l'exploitation peuvent être transmises par la gérance auprès de l'autorité cantonale compétente.

2.6 Facturation et contrôles

Sur la base du devis établi en début de la démarche, les prestations réalisées par la gérance ou des tiers mandatés sont facturées à l'exploitation. Si la procédure est interrompue, les prestations réalisées sont facturées en prorata de l'avancement du dossier. Les factures sont payables sous 30 jours sur le compte figurant sur la facture adressée à l'exploitation concernée.

Des contrôles externes pourront avoir lieu sur les exploitations ayant reçu une attestation et cela dans les 4 années suivant l'émission de l'attestation. Ainsi, les exploitations s'engagent à garder tous les éléments notamment les pièces comptables, calculs, décomptes et autres documents relatifs aux données transmises durant les 5 années consécutives à la signature du devis.

2.7 Plan d'action

Sur la base des résultats calculés / mesurés lors des diagnostics, un plan d'action est élaboré avec l'aide d'un conseiller agréé par la gérance. Le plan d'action liste les mesures que l'exploitant.e mettra en place sur son exploitation. Le choix des mesures est libre. L'effet des leviers sélectionnés est simulé par la gérance et la réduction du bilan induite par la mise en oeuvre des leviers est communiquée à l'exploitant.e.

2.8 Mise à jour des indicateurs

Afin de faire l'état de la transition climatique d'une exploitation, la mise à jour du diagnostic, suivant une procédure simplifiée (collecte de données et d'échantillons simplifiée), est réalisé. Ainsi, de nouvelles valeurs pour les indicateurs carbone peuvent être calculées et une nouvelle attestation est délivrée.

3 Calcul des indicateurs carbone

Dans le cadre du règlement ClimaCert, il existe 3 indicateurs carbone distincts : les émissions de GES, le stock de carbone dans les sols et le potentiel de stockage minimal de ces derniers.

3.1 Calcul des émissions de GES

La quantification des émissions de GES d'une exploitation agricole est calculée avec les outils de calculs reconnus par le présent règlement. La liste des outils reconnus pour chaque type de production est exposée dans le tableau 1 ci-dessous :

Tableau 1 : outils reconnus pour le calcul d'indicateur carbone

Catégorie	Outil de calcul des émissions	Organisation	Adresse
Grandes cultures	CAP'2ER®	Institut de l'Élevage (idele)	Maison Nationale des Eleveurs 149 rue de Bercy 75595 PARIS CEDEX 12
Gros bétail (Bovin lait et viande)	CAP'2ER®	Institut de l'Élevage (idele)	Maison Nationale des Eleveurs 149 rue de Bercy 75595 PARIS CEDEX 12
Bovins laitier (Exploitation avec seulement un atelier lait uniquement)	KLIR	Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires (HAFL)	Länggasse 85, 3052 Zollikofen
Petit Bétail (Ovins et Caprins)	CAP'2ER®	Institut de l'Élevage (idele)	Maison Nationale des Eleveurs 149 rue de Bercy 75595 PARIS CEDEX 12
Equins	Pas d'outil actuellement disponible		
Atelier de volaille et poule pondeuse	Pas d'outil actuellement disponible		
Atelier porcin	Pas d'outil actuellement disponible		
Viticulture	GES&Vit	Institut Français de la Vigne et du Vin	Domaine de l'Espiguette 30240 Le Grau du Roi
Arboriculture	Pas d'outil actuellement disponible		
Maraichage	Pas d'outil actuellement disponible		
Stock de carbone et potentiel de stockage carbone	Feuille de calcul HEPIA (Version du 31.03.2023)	HEPIA Genève	Rue de la Prairie 4 CH-1202 Genève

Les outils reconnus doivent (i) respecter les standards établis par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC /IPCC) (ii) reposer sur les méthodes de l'analyse de cycle de vie (ISO 14064) (iii) reposer sur des données contrôlables et spécifiques à l'exploitation (iv) produire des indicateurs propres à l'exploitation agricole.

Les données permettant le calcul des émissions de GES sont des données administratives et techniques collectées directement auprès de l'exploitant.e agricole à l'aide de formulaires de collecte et de liste de documents à fournir. Les documents et catégories de données à fournir sont exposés dans l'annexe FM1.1.

3.2 Calcul du stock et du stockage carbone dans les sols

L'échantillonnage des parcelles et la quantification du stock de carbone est réalisée selon la méthodologie de l'HEPIA, basée sur la méthodologie de prélèvement de masse de sol équivalent (ESM, Equivalent Soil Mass) d'après la publication scientifique de Boivin et al. (en. prép.). Le protocole respecte les standards établis par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC /IPCC) et fait consensus dans la communauté scientifique internationale. Le protocole détaillé est exposé dans l'annexe FM1.2. Le stockage du carbone est modélisé selon la méthodologie publiée dans l'article scientifique de Dupla et al. 2022.

3.3 Méthode d'estimation du potentiel de stockage

Le potentiel de stockage est estimé sur toutes les parcelles d'une exploitation (hors SPB et prairies permanentes). Ce calcul est réalisé en appliquant au stock de carbone d'une parcelle (mesuré via prélèvements de sol), son taux d'évolution annuel de la teneur en carbone du sol, estimé à l'aide du modèle développé par Dupla et al (2022) (voir équation ci-dessous).

$$S_{\text{tot}} = Tx * \text{Stock}$$

Avec :

- S_{tot} = Potentiel de stockage total en t eq.CO₂/ha/an
- Tx = Taux d'évolution annuel estimé de la teneur en carbone organique du sol en ‰
- Stock = Stock de carbone du sol en t eq.CO₂/ha

Ce modèle considère les pratiques agricoles accessibles via le carnet des champs mises en œuvre par l'exploitant ainsi que les rapports carbone organique sur argile (rapport Corg/A) des différentes parcelles. Les pratiques agricoles considérées sont en lien avec : (1) la couverture du sol dans le temps, (2) les apports de matière organique et (3) l'intensité de travail du sol (voir équation ci-dessous).

$$Tx = 37.03 + (\text{ISMO} * 0.53) - (\text{Corg/A} * 2.95) - (\text{STIR} * 0.12) - (\text{CI} * 1.26)$$

Avec :

- Tx = Taux d'évolution annuel estimé de la teneur en carbone organique du sol en ‰
- ISMO = Masse de matière organique humifiée apportée sur 10 ans en t/ha
- Corg/A = Rapport entre la teneur en carbone organique d'un sol et sa teneur en argile
- STIR = Indice de perturbation du sol moyen de la rotation
- CI = Nombre d'intercultures supérieures à six semaines non couvertes sur 10 ans

Comme toutes les prédictions basées sur un modèle mathématique, l'estimation du potentiel de stockage est entachée d'une erreur. De manière à réaliser une prédiction de stockage qui soit conservatrice, l'erreur est soustraite au potentiel de stockage total afin d'obtenir le potentiel de stockage minimum (voir équation ci-dessous).

$$S_{\text{min}} = S_{\text{tot}} * (-0.88 + (0.65 * Tx))$$

Avec :

S_{\min} = Potentiel de stockage minimum t eq.CO₂/ha/an

3.4 Allocation du stockage carbone pour le calcul du bilan carbone

Le bilan carbone d'une exploitation ou d'un produit agricole est calculé en soustrayant aux émissions de gaz à effet de serre le potentiel de stockage minimal de carbone. Pour le bilan carbone d'un produit agricole, il est nécessaire d'allouer spécifiquement le stockage minimal aux surfaces utilisées pour sa production. Les équations ci-dessous généralisent le calcul du bilan carbone à l'échelle des produits agricoles issus des grandes cultures et des ateliers de production animale. Ces équations répartissent le stockage du carbone dans les ateliers de l'exploitation en fonction des surfaces qui leur sont dédiés.

Pour les cultures:

Pour le bilan annuel des produits agricoles issus des grandes cultures, on considère le stockage minimal effectué sur les surfaces de terre assolée qui servent à produire ces cultures.

$$BPB_i \text{ [kg eq-CO}_2\text{/dt]} = \frac{GES_i \text{ [kg eq-CO}_2\text{/ha]} - S_{\min} \text{ [kg eq-CO}_2\text{/ha]}}{\text{Rendement}_i \text{ [dt/ha]}}$$

BPB_i = Bilan annuel au produit agricole de la culture i

GES_i = Émissions de gaz à effet de serre par hectare de culture i

S_{\min} = Stockage minimal de carbone par hectare

Rendement_i = Rendement de la culture i

Pour les produits animaliers:

Pour le bilan annuel des produits agricoles issus des ateliers avec bétail, on considère le stockage minimal effectué sur les surfaces de terre assolée qui servent à fourrager le bétail de l'atelier. Pour rappel, le stockage sur les herbages permanents n'est pas encore considéré dans ce calcul car il n'est pas possible de modéliser le potentiel de stockage carbone annuel et que l'on fait l'hypothèse que ces sols sont pour la plupart à l'équilibre. Le stockage de ces surfaces pourra être pris en compte une fois que le stockage réel aura été mesuré (après un deuxième échantillonnage).

$$BPB_j [\text{kg eq-CO}_2/\text{U}] = \text{GES}_j [\text{kg eq-CO}_2/\text{U}] - \frac{(\text{Surf cult. conso}_j [\text{ha}] + \text{Surf PT}_j [\text{ha}]) \times S_{\text{min}} [\text{kg eq-CO}_2/\text{ha}] \times \text{Alloc}_j}{\text{Production totale}_j [\text{U}]}$$

BPB_j = Bilan annuel au produit agricole j de(s) l'atelier(s) laitier(s) ou d'élevage

U = Unité du produit en kilo ou litre

GES_j = Émissions de gaz à effet de serre par unité de produit j

Surf cult. conso_j = Surface de culture consommée par l'atelier animalier concerné

Surf PT_j = Surface prairie temporaire dédiée à l'atelier animalier concerné

S_{min} = Stockage minimal de carbone par hectare

Alloc_j = Coefficient d'allocation des émissions au produit (viande, lait, laine) j

Production totale_j = Production totale du produit j

3.5 Calcul en cas de cession de droit carbone

Pour éviter la double comptabilisation, toute vente ou cession de droit carbone à un tiers par l'exploitant est prise en compte dans le calcul des indicateurs carbone et mentionné sur l'attestation. L'exploitant doit faire part à la gérance de toute cession de droit carbone.

4. Contrôles

4.1. Contrôles des données pour le calcul des indicateurs carbone

La majorité des données utilisées pour les calculs d'indicateurs sont contrôlées en routine de façon exhaustive par les organes de contrôles cantonaux (chapitre 4.2). Les données qui ne sont pas contrôlées en routine font l'objet d'un contrôle spécifique de la gérance et par un organe de contrôle reconnu mandaté par l'OIC (contrôle agricole de terrain). Les contrôles de terrain se basent sur des listes données, contrôlées, éditées par la gérance. Celles-ci ne sont pas publiques.

Toute exploitation agricole détenant une attestation ClimaCert peut être contrôlée dans les quatre années suivant l'émission de l'attestation. A la demande de la gérance, certaines exploitations peuvent être contrôlées.

En cas de fausse déclaration, non-conformité ou fraude, le schéma de sanctions exposé au chapitre 3.4 du règlement technique sera appliqué immédiatement par la gérance.

Des supervisions lors de contrôles peuvent être réalisées sans annonce au préalable par l'OIC, un organe de contrôle reconnu ou la gérance.

4.2 Donnée contrôlées en routine

Les données contrôlées en routine sont listées de manière non exhaustive ci-dessous :

- Données de recensement cantonal et fédéral
 - Parcellaire, assolement, surfaces, programmes cantonaux, surfaces de promotion de biodiversité, surface de qualité 2, mise en réseau, programmes cantonaux et fédéraux,

conventions cantonales pour des surface de biodiversité, données paysagères, recensement des animaux (BDTA), protection de l'air et de l'eau

- Données géoréférencement
 - Données spatiales (géoréférencement des parcelles)
- Pratiques culturelles / achats et utilisation d'intrants
 - Carnet des champs
 - Utilisation de fertilisants et produits de protection des plantes
- Analyses de sol
- Données de labels tiers (Biosuisse, IP-SUISSE, ...)
- Données viticoles et d'encavage
 - Acquis et productivité
 - Quantité encavée

4.3. Données spécifiques au dispositif ClimaCert

Les contrôles spécifiques au règlement ClimaCert portent sur des données qui ne sont pas contrôlées par des organismes / autorités tierces lors de contrôles agricoles. Ces données sont contrôlées par un contrôle de cohérence par la gérance et/ou par un contrôle terrain.

Partie grande culture et bétail :

- Achat et vente des animaux
- Poids des animaux
- Gestion du troupeau (mortalité, âge à la mise bas, au sevrage, ...)
- Logements des animaux de la ferme
- Stockage des effluents sur la ferme
- Type d'épandage des effluents
- Répartition des engrais
- Type et rendement des cultures et intercultures
- Composition botanique des prairies
- Alimentation du bétail
- Autoconsommation de produits et énergie
- Consommation énergétique
- Réalisation de travaux pour / par tiers

Partie viticole :

- Densité de plantation
- Enherbement de l'inter-rang
- Palissage
- Destination de la vendange
- Achat et utilisation semences / intrants / produit de protection des plantes
- Travaux d'entretien manuel de la vigne
- Parc machines
- Autoconsommation de produits et énergie
- Consommation énergétique

4.4 Contrôle des personnes et organismes habilités au calcul d'indicateurs d'émissions de GES

Les personnes habilitées au calcul des émissions ont suivi une formation dispensée par l'organisme détenteur de l'outil ou un tiers habilité. Afin de s'assurer de l'homogénéité des calculs réalisés par les différentes personnes habilitées, 1% des diagnostics, sélectionnés de manière aléatoire, sont contrôlés par la gérance (réalisation du diagnostic par la gérance sur la base des mêmes données). La gérance s'assure que toute personne habilitée participe à un groupe d'échange technique relatif à l'outil utilisé.

Dans le cas d'un changement majeur de la méthodologie de calcul des émissions ou de l'outil, toutes les personnes habilitées au calcul d'émission de GES devront suivre une formation continue afin de se tenir à jour.

4.5 Contrôle des personnes habilitées au prélèvement d'échantillons

Les personnes habilitées au prélèvement de sol ont suivi une formation organisée par la gérance et validée par HEPIA. Afin de s'assurer de l'homogénéité des prélèvements, la gérance organise des formations validées par l'HEPIA pour que les personnes habilitées suivent une formation continue au moins une fois tous les trois ans dès leur première formation. Au terme de la formation, la personne habilitée doit réussir à fournir des échantillons de sol correspondant à la méthodologie de l'HEPIA.

Dans le cas d'un changement majeur de la méthodologie de prélèvement, toutes les personnes habilitées au prélèvement d'échantillons devront suivre une formation continue afin de se tenir à jour.

4.6 Contrôle des personnes habilitées au calcul du stock de carbone et du potentiel de stockage carbone

Les personnes habilitées au calcul du stock de carbone et du potentiel de stockage carbone ont suivi une formation organisée par la gérance validée par l'HEPIA. Afin de s'assurer de l'homogénéité des calculs réalisés par les différentes personnes habilitées, 1% des diagnostics, sélectionnés de manière aléatoire, sont contrôlés par la gérance (réalisation du diagnostic par la gérance sur la base des mêmes données). La gérance s'assure que toute personne habilitée participe à un groupe d'échange technique relatif à l'outil utilisé.

Dans le cas d'un changement majeur de la méthodologie de calcul du stock de carbone et du potentiel de carbone, toutes les personnes habilitées au calcul du stock devront suivre une formation continue afin de se tenir à jour.

5. Attestation

Une exploitation ayant réalisé les six premières étapes de la procédure exposée dans la figure 1 (chapitre 2) se voit délivrer une attestation ClimaCert par la gérance pour l'année concernée par la mesure des indicateurs carbone. Ainsi, l'exploitation et les résultats peuvent faire usage de la marque ClimaCert et des résultats de l'année n pour une durée de 5 ans. Les attestations ont une durée de validité de 5 ans. Les attestations émis par la gérance contiennent les éléments exposés à la page suivante :

Informations générales

- Niveau du logo de ClimaCert

- Numéro d'attestation
- Date de délivrance de l'attestation
- Année de calcul des indicateurs
- Coordonnées de l'exploitation agricole
- Adresse de l'émetteur de l'attestation

Indicateurs généraux (si calculé)

- Emissions globales à l'échelle de l'exploitation agricole [t eq-CO₂/an & t eq-CO₂/ha*an]
- Somme des stocks de carbone à l'échelle de l'exploitation agricole et moyenne par hectare [t eq-CO₂/an & t eq-CO₂/ha*an]
- Potentiel de stockage carbone minimal à l'échelle de l'exploitation agricole [t eq-CO₂/ an]
- Moyenne du potentiel de stockage carbone par hectare [t eq-CO₂/ ha*an]

Données de l'exploitation

- Ateliers de production diagnostiqué
 - Bovin lait
 - Bovin viande
 - Ovin lait
 - Ovin viande
 - Caprin
 - Grandes cultures
 - Viticulture
- Autres labels détenus par l'exploitation agricole, engagement dans des projets en faveur du climat, engagement dans des programmes en lien avec le climat
- Contrat de cession de droits carbone existant décompté si présent

Résultats par indicateur

Une fois l'attestation émise, l'exploitation agricole est inscrite au registre public des exploitations ClimaCert. Les valeurs des indicateurs ne sont en aucun cas publiées, sauf demande explicite de l'exploitation agricole.

Tous les indicateurs dans le tableau 2 ci-dessous résultent d'un diagnostic et peuvent figurer sur l'attestation. Néanmoins, il n'est pas obligatoire de calculer / mesurer tous les indicateurs ci-dessous pour obtenir une attestation ClimaCert.

Tableau 2 : Indicateurs pouvant être attesté ClimaCert

Indicateur	Unité	Diagnostics		
		Emissions	Sol	Combiné
Emissions de GES				
Emissions GES totales exploitation	T eq-CO ₂	X		X
Emissions GES par hectare de SAU	T eq-CO ₂ / ha	X		X
Emissions GES par 100kg MS prairie	Kg eq-CO ₂ / dt MS	X		X
Emissions GES par 100 kg de culture fourragère	Kg eq-CO ₂ / dt	X		X
Emissions GES par 100 kg de céréales	Kg eq-CO ₂ / dt	X		X
Emissions GES par 100 kg de maïs grain	Kg eq-CO ₂ / dt	X		X
Emissions GES par 100 kg de protéagineux	Kg eq-CO ₂ / dt	X		X
Emissions GES par 100 kg d'oléagineux	Kg eq-CO ₂ / dt	X		X
Emissions GES par 100 kg de culture spécialisée	Kg eq-CO ₂ / dt	X		X
Emissions GES par kg de viande vive (bovin)	Kg eq-CO ₂ / kg	X		X
Emissions GES par kg de viande vive (ovin)	Kg eq-CO ₂ / kg	X		X
Emissions GES par kg de viande vive (caprin)	Kg eq-CO ₂ / kg	X		X
Emissions GES par litre de lait (bovin)	Kg eq-CO ₂ / L	X		X
Emissions GES par litre de lait (ovin)	Kg eq-CO ₂ / L	X		X
Emissions GES par litre de lait (caprin)	Kg eq-CO ₂ / L	X		X
Emissions GES par kilo de raisin	Kg eq-CO ₂ / kg	X		X
Stock de carbone dans les sols				
Stock de carbone total de l'exploitation	T eq-CO ₂		X	X
Stock moyen par ha de SAU	T eq-CO ₂ / ha		X	X
Potentiel de stockage carbone				
Potentiel de stockage carbone minimal de l'exploitation	T eq-CO ₂ / an* an		X	X
Potentiel de stockage carbone minimal moyen par ha de SAU	T eq-CO ₂ / ha * an		X	X
Bilan carbone				
Bilan carbone annuel moyen	T eq-CO ₂ / an	X		X
Bilan carbone par 100kg MS prairie	Kg eq-CO ₂ / dt MS	X		X
Bilan carbone par 100 kg de culture fourragère	Kg eq-CO ₂ / T MS	X		X
Bilan carbone par 100 kg de céréales	Kg eq-CO ₂ / dt	X		X
Bilan carbone par 100 kg de maïs grain	Kg eq-CO ₂ / dt	X		X
Bilan carbone par 100 kg de protéagineux	Kg eq-CO ₂ / dt	X		X
Bilan carbone par 100 kg d'oléagineux	Kg eq-CO ₂ / dt	X		X
Bilan carbone par 100 kg de culture spécialisée	Kg eq-CO ₂ / dt	X		X
Bilan carbone par kg de viande vive (bovin)	Kg eq-CO ₂ / kg	X		X
Bilan carbone par kg de viande vive (ovin)	Kg eq-CO ₂ / kg	X		X
Bilan carbone par kg de viande vive (caprin)	Kg eq-CO ₂ / kg	X		X
Bilan carbone par litre de lait (bovin)	Kg eq-CO ₂ / L	X		X
Bilan carbone par litre de lait (ovin)	Kg eq-CO ₂ / L	X		X
Bilan carbone par litre de lait (caprin)	Kg eq-CO ₂ / L	X		X
Bilan carbone par kilo de raisin	Kg eq-CO ₂ / kg	X		X

6. Références

Dupla, X., Lemaître, T., Grand, S., Gondret, K., Charles, R., Verrecchia, E., & Boivin, P. (2022). On-farm relationships between agricultural practices and annual changes in organic carbon content at a regional scale. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 834055.

Annexe FM1.1 : Données à fournir par les exploitations

Exploitation agricole

De manière générale, les exploitations agricoles, dépendamment de leur atelier de production doivent notamment fournir les documents suivants :

- Données de recensement cantonal et fédéral
- Données géoréférencement
- Pratiques culturales et rendement des cultures
- Bulletins de livraison/encavage et factures
- Autoconsommation de produits et énergie
- Achats et utilisation d'intrants et vente de produits
- Gestion du troupeau et recensement du troupeau
- Alimentation du troupeau
- Analyses de sol et carte pédologique
- Consommation énergétique (électricité, carburant, ...)
- Parc machines
- Travail par tiers et pour tiers
- Données de règlement tiers (Biosuisse, IP-SUISSE, ...)
- Données concernant la cession de droits carbone

Exploitation en grande culture sans bétail et sans viticulture et pour un diagnostic émissions gaz à effet de serre

Documents à fournir	Informations générales
Dossier PER	3 années précédentes
Formulaire de recensement complet	Année précédente
Bulletins livraison récolte (rendements)	3 années précédentes
Carnet des champs	Année précédente
Factures travail par et pour tiers	Année précédente
Hoduflu	Année précédente

Exploitation en grande culture sans bétail, avec viticulture et pour un diagnostic avec émission gaz à effet de serre

Documents à fournir	Informations générales
Dossier PER	3 années précédentes
Formulaire de recensement complet	Année précédente
Bulletins livraison récolte (rendements)	3 années précédentes
Carnet des champs (GC et vigne)	Année précédente
Factures travail par et pour tiers	Année précédente
Hoduflu	Année précédente
Déclaration d'encavage	Année précédente
Dossier Viti+	Année précédente

Exploitation en grande culture sans bétail et sans viticulture et pour un diagnostic combiné

Documents à fournir	Informations générales
Dossier PER	3 années précédentes
Formulaire de recensement complet	Année précédente
Bulletins livraison récolte (rendements)	3 années précédentes
Carnet des champs	Année précédente
Factures travail par et pour tiers	Année précédente
Hoduflu	Année précédente
Analyses de sol (PER et autres)	Toutes celles disponibles
Géoréférencement des parcelles	Année en cours
Liste des parcelles	Année en cours

Exploitation en grande culture sans bétail, avec viticulture et pour un diagnostic combiné

Documents à fournir	Informations générales
Dossier PER	3 années précédentes
Formulaire de recensement complet	Année précédente
Bulletins livraison récolte (rendements)	3 années précédentes
Carnet des champs (GC et vigne)	Année précédente
Factures travail par et pour tiers	Année précédente
Hoduflu	Année précédente
Analyses de sol (PER et autres)	Toutes celles disponibles
Géoréférencement des parcelles	Années en cours
Liste des parcelles	Année en cours
Déclaration d'encavage	3 années précédentes
Dossier Viti+	Année précédente

Exploitation en grande culture sans bétail avec ou sans viticulture et pour un diagnostic sol

Documents à fournir	Informations générales
Dossier PER	Année précédente
Formulaire de recensement complet	Année précédente
Carnet des champs	Année précédente
Analyses de sol (PER et autres)	Toutes celles disponibles
Géoréférencement des parcelles	Année en cours
Liste des parcelles	Année en cours
Hoduflu	Année précédente

Exploitation en grande culture avec bétail, sans viticulture et pour un diagnostic émission gaz à effet de serre

Documents à fournir	Informations générales
Dossier PER	3 années précédentes
Formulaire de recensement complet	Année précédente
Bulletins livraison récolte (rendements)	3 années précédentes
Bulletins de livraison BD lait	3 années précédentes
Analyse qualité BD lait	3 années précédentes
Carnet des champs	Année précédente
Factures travail par et pour tiers	Année précédente
Cheptel 1 ^{er} janvier	Année précédente
Cheptel 31 décembre	Année précédente
Cheptel moyen	Année précédente
Hoduflu	Année précédente

Exploitation en grande culture avec bétail et avec viticulture pour un diagnostic émission gaz à effet de serre

Documents à fournir	Informations générales
Dossier PER	3 années précédentes
Formulaire de recensement complet	Année précédente
Bulletins livraison récolte (rendements)	3 années précédentes
Bulletins de livraison BD lait	3 années précédentes
Analyse qualité BD lait	3 années précédentes
Carnet des champs	Année précédente
Factures travail par et pour tiers	Année précédente
Cheptel 1 ^{er} janvier	Année précédente
Cheptel 31 décembre	Année précédente
Cheptel moyen	Année précédente
Hoduflu	Année précédente
Déclaration d'encavage	3 années précédentes
Dossier Viti+	Année précédente

Exploitation en grande culture avec bétail, sans viticulture et pour un diagnostic combiné

Documents à fournir	Informations générales
Dossier PER	3 années précédentes
Formulaire de recensement complet	Année précédente
Bulletins livraison récolte (rendements)	3 années précédentes
Bulletins de livraison BD lait	3 années précédentes
Analyse qualité BD lait	3 années précédentes
Carnet des champs	Année précédente
Factures travail par et pour tiers	Année précédente
Cheptel 1 ^{er} janvier	Année précédente
Cheptel 31 décembre	Année précédente
Cheptel moyen	Année précédente
Hoduflu	Année précédente
Analyses de sol (PER et autres)	Toutes celles disponibles
Géoréférencement des parcelles	Années en cours
Liste des parcelles	Année en cours

Exploitation en grande culture avec bétail et viticulture et pour un diagnostic combiné

Documents à fournir	Informations générales
Dossier PER	3 années précédentes
Formulaire de recensement complet	Année précédente
Bulletins livraison récolte (rendements)	3 années précédentes
Bulletins de livraison BD lait	3 années précédentes
Analyse qualité BD lait	3 années précédentes
Carnet des champs	Année précédente
Factures travail par et pour tiers	Année précédente
Cheptel 1 ^{er} janvier	Année précédente
Cheptel 31 décembre	Année précédente
Cheptel moyen	Année précédente
Hoduflu	Année précédente
Analyses de sol (PER et autres)	Toutes celles disponibles
Géoréférencement des parcelles	Années en cours
Liste des parcelles	Année en cours
Déclaration d'encavage	3 années précédentes
Dossier Viti+	Année précédente

Exploitation en grande culture avec bétail, avec ou sans viticulture et pour un diagnostic sol

Documents à fournir	Informations générales
Dossier PER	Année précédente
Formulaire de recensement complet	Année précédente
Carnet des champs	Année précédente
Analyses de sol (PER et autres)	Toutes celles disponibles
Géoréférencement des parcelles	Années en cours
Liste des parcelles	Année en cours
Hoduflu	Année précédente

Exploitation viticole

De manière générale, les exploitations viticoles, dépendamment de leur cépages et modes de production doivent fournir les documents suivants :

- Données de recensement cantonal et fédéral
- Données géoréférencement
- Pratiques culturales et rendement des cépages
- Achats d'intrants et vente de produits
- Gestion du troupeau et recensement du troupeau
- Alimentation du troupeau
- Analyses de sol et carte pédologique
- Consommation énergétique (électricité, carburant, ...)
- Parc machines
- Travail par tiers et pour tiers
- Données de règlement tiers (Biosuisse, IP-SUISSE, ...)
- Données concernant la cession de droits carbone

Exploitation exclusivement viticole pour un diagnostic émissions de gaz à effet de serre

Documents à fournir	Informations générales
Dossier PER	3 années précédentes
Formulaire de recensement complet	Année précédente
Bulletins livraison (rendements)	3 années précédentes
Carnet des champs	Année précédente
Factures travail par et pour tiers	Année précédente
Déclaration d'encavage	3 années précédentes
Dossier Viti+	Année précédente
Hoduflu	Année précédente

Exploitation exclusivement viticole pour un diagnostic combiné

Documents à fournir	Informations générales
Dossier PER	3 années précédentes
Formulaire de recensement complet	Année précédente
Bulletins livraison récolte (rendement)	3 années précédentes
Carnet des champs	Année précédente
Factures travail par et pour tiers	Année précédente
Déclaration d'encavage	3 années précédentes
Dossier Viti+	Année précédente
Hoduflu	Année précédente
Analyses de sol (PER et autres)	Toutes celles disponibles
Géoréférencement des parcelles	Années en cours
Liste des parcelles	Année en cours

Exploitation exclusivement viticole pour un diagnostic sol

Documents à fournir	Informations générales
Dossier PER	Année précédente
Formulaire de recensement complet	Année précédente
Carnet des champs	Année précédente
Hoduflu	Année précédente
Analyses de sol (PER et autres)	Toutes celles disponibles
Géoréférencement des parcelles	Années en cours
Liste des parcelles	Année en cours

Annexe FM1.2 : Méthodologie HEPIA pour prélèvement de sol, mesure du stock de carbone et du potentiel de stockage carbone

Méthode d'établissement du bilan de stock de carbone du sol en parcelle de grande culture (partie HEPIA)

Résumé exécutif

Ce travail avait pour but de tester et simplifier une méthode d'établissement du bilan de stock de carbone organique du sol en grandes cultures sur la couche de surface (0-30 cm). Cette couche est celle recommandée par IPCC (GIEC) pour l'établissement des bilans de stock car elle rassemble en moyenne 80% des changements de stocks pour les 50 années à venir.

Plusieurs problèmes sont soulevés :

- Alors qu'il est bien connu que le bilan doit se faire à masse de sol échantillonné constante (méthode dite « *Equivalent Soil Mass* », ESM), les prestataires privés travaillent à profondeur constante (avec des préleveurs automatisés), ce qui fait l'impasse sur les variations d'épaisseur du sol et engendre des erreurs non supportables (Fowler et al. 2023).
- La méthode ESM permet notamment de contourner la mesure de densité apparente du sol, délicate et coûteuse, grâce à des prélèvements à la gouge. Mais ces gouges peuvent être de différent diamètre, opérée manuellement ou avec un système mécanisé. Tous les systèmes conviennent-ils pour obtenir des masses volumiques de sol réalistes ?
- Une méthode ESM « one-layer » adaptée au cas d'étude a été proposée (J. W. Wendt et Hauser 2013), elle est relativement simple mais elle suppose encore de prélever et analyser deux couches de sol, ce qui demeure coûteux.
- Le pourcentage volumique d'éléments grossiers dans la couche échantillonnée doit être soustrait à ce volume de sol, mais ce point et les erreurs associées forment une zone d'ombre dans la littérature.
- Les erreurs associées, et donc les changements minimaux détectables, doivent être aussi faibles que possibles pour permettre une évaluation régulière des stocks de carbone dans des intervalles de temps raisonnables (≤ 10 ans).

L'objectif de cette étude est de résoudre toutes ces inconnues tout en proposant une méthode ESM « One-Layer » simplifiée plus économique. Les erreurs associées aux différents protocoles possibles sont chiffrées et un protocole optimal en termes de coût et de précision est défini.

Résumé des conclusions

Les conclusions suivantes sont apportées :

- L'estimation du % volumique d'éléments grossiers est faite visuellement lors du premier échantillonnage d'une parcelle. Ce chiffre doit être conservé dans le temps. L'erreur associée à cette estimation est quantifiée, elle augmente avec le % d'éléments grossiers et pèse sur la précision de l'établissement du stock.

- Échantillonner à profondeur constante introduit des erreurs non supportables pour une estimation correcte des stocks. La méthode par masse de sol équivalente (ESM) doit impérativement être employée.
- Les prélèvements par système hydraulique automatisé et motorisé ne permettent pas d'échantillonner correctement la masse de sol. En moyenne moins de 50% d'une couche est récolté, ce qui représente donc une erreur d'un facteur supérieur à 2. **Les systèmes motorisés ne permettent en aucun cas d'établir des stocks de carbone fiables** (ou de tout autre élément).
- **Les différentes gouges manuelles sont adaptées au prélèvement pour mesure des stocks** par méthode ESM. Elles extraient des masses de sol en accord avec la densité apparente mesurée directement dans les sols.
- L'échantillonnage adapté est donc le prélèvement d'un échantillon composite sur 30 cm, **prélever 20 aliquotes sur les diagonales de la parcelle est une pratique de rapport coût / précision optimal.**
- Lorsque l'échantillonnage est répété sur la couche 0-30 cm, on doit corriger le stock trouvé en complétant ou soustrayant une masse de sol pour se ramener à celle obtenue lors du premier échantillonnage. Le facteur de correction a les caractéristiques (teneur en carbone par gramme) de la couche inférieure. La simplification proposée est de ne pas prélever et analyser cette seconde couche mais de lui attribuer les valeurs moyennes de teneur en carbone organique observées sur la région. Sous la semelle de labour, la variance de la teneur en carbone est en effet faible. **Cette simplification entraîne une erreur négligeable pour un coût de mesure du stock divisé par deux.**
- Les *Minimum Detectable Change* (MDC) correspondants dépendent principalement de la teneur volumique en éléments grossiers, de la vitesse d'évolution des taux de carbone organique du sol, et de l'importance du terme correctif nécessaire. **Une détectabilité inférieure à 10 ans est garantie pour la plupart des taux d'évolution observés sur la région.**
- Les protocoles de prélèvement et d'analyse correspondants sont précisés (ci-dessous).
- Nous recommandons de rassembler l'ensemble de la saisie et traitement de l'information (y compris les critères de rejet d'un échantillonnage) dans un même outil de saisie non modifiable.
- Nous recommandons de mettre en œuvre une interface de saisie reliée à un GIS adapté à la gestion des informations (polygones transformés en fichier raster, valeurs standardisées de stock et critères associés à chaque carré raster).

1.1.1. Protocoles de prélèvement

Conditions d'échantillonnage

Le stock de carbone doit être établi par parcelle. Il est parfois nécessaire de laisser de côté une portion de parcelle ou de segmenter une parcelle. Il est parfois possible de rassembler des parcelles.

- En cas de présence de terres noires.
 - Par convention on considère ce cas lorsque la teneur en matière organique excède 8%.
 - Lorsque les terres noires font plus de 30 cm d'épaisseur, elles ne peuvent pas être prises en compte dans le protocole ESM décrit ici. Il faut alors utiliser le protocole ESM complet jusqu'à la couche sous la terre noire. (J. W. Wendt et Hauser 2013).

- Pour une petite surface² (e.g. moins de 3000 m² ou moins de 10% de la parcelle) cette portion doit être ignorée lors de l'échantillonnage et des calculs.
- Au-delà cette surface doit être traitée séparément.
- En cas de forte hétérogénéité, de même que pour les analyses PER, la parcelle doit être segmentée.
- Des petites parcelles attenantes et dont la mise en valeur est voisine peuvent être rassemblées. La parcelle rassemblée ne peut pas faire plus de 8 ha.
- Ce sont les polygones saisis dans Acorda qui décrivent les parcelles.

Les sondages sont faits à la gouge manuelle

- Le volume intérieur de la gouge doit être conservé dans les informations d'échantillonnage, ainsi que le nom de l'opérateur et la date d'opération.
 - En cas de répétition de l'échantillonnage avec une gouge de volume intérieur différent, une règle de 3 doit être appliquée pour corriger la masse sèche de terre fine prélevée en fonction de la différence de volume des gougues.
- Après avoir enlevé la végétation et les résidus non décomposés (litière) en surface du sol la gouge est enfoncée à 30 cm, elle est arrasée et son contenu est versé dans un seau.
- Cette opération est répétée 20 fois (selon un schéma en croix) sur la parcelle pour réaliser le prélèvement composite.
- Un sol trop sec ou trop humide risque de poser des problèmes de remplissage de la gouge. Ceci conduira à rejeter les résultats obtenus lors de leur traitement (voir section dédiée). L'échantillonnage ne doit donc être réalisé que si l'opérateur observe un bon remplissage de la gouge lors de l'extraction de cette dernière.

Premier prélèvement (état initial)

- **Ce premier prélèvement (T0) doit être fait par un expert autorisé**, en effet il doit fixer les valeurs initiales qui feront référence pour la suite : % volumique en éléments grossiers et masse de terre fine sur 30 cm.
- 20 aliquotes sont prélevées à la gouge sur la couche 0-30 cm.
 - Les gougues sont arasées, après contrôle de leur bon remplissage (le prélèvement est refait si la gouge n'est pas bien remplie).
 - Le modèle de gouge (volume intérieur) est noté.
 - Volume prélevé VP = (volume de la gouge) X 20.
 - Les 20 aliquotes sont prélevées sur les deux diagonales. **Une géolocalisation au GPS différentiel n'est pas utile.**
 - L'ensemble du sol prélevé (gouge arasée) est expédié au laboratoire (ci-dessous).
- 5 mini profils de 30 cm de profondeur sont ouverts et le % volumique d'éléments grossiers est estimé visuellement à l'aide d'un abaque (Figure 4). Le % moyen est calculé et consigné.
- La masse de terre fine trouvée (après traitement au laboratoire, ci-dessous) fait référence pour les déterminations suivantes.

Prélèvement pour le suivi des stocks

² Il nous semble que cela ne peut pas excéder 5000 m², chiffre à fixer a priori, il est difficile de proposer une limite rationnelle.

- La valeur de % de grossiers trouvée en T0 est conservée.
- 20 aliquotes sont prélevées à la gouge sur la couche 0-30 cm.
 - Le modèle de gouge (volume intérieur) est noté. Volume prélevé VP = volume de la gouge X 20.
 - Les gougues sont arasées, après contrôle de leur bon remplissage (le prélèvement est refait si la gouge n'est pas bien remplie).
 - Les 20 aliquotes sont prélevées sur les deux diagonales. **La géolocalisation au GPS différentiel est inutile.**
 - L'ensemble du sol prélevé (gouge arasée) est expédié au laboratoire (ci-dessous).

1.1.2. Protocole de traitement de l'échantillon EN LABORATOIRE

- 1- La totalité de l'échantillon prélevé doit être rapportée en laboratoire³.
- 2- L'échantillon frais est tamisé à 2mm. La fraction grossière est séchée et pesée. Masse des grossiers : MG
- 3- La fraction fine est séchée à 40°C jusqu'à afficher une masse constante. Masse de terre fine provisoire : MTF_p.
- 4- Le volume des grossiers VG est calculé selon : $VG = MG / 2.6$
- 5- La masse de la terre fine MF est calculée : $MTF = MTF_p * VP / (VP - VG)$
- 6- Une aliquote de la terre fine est analysée pour la teneur en SOC.

Attention, si le modèle de gouge est changé, il faut corriger par règle de 3 la masse de terre fine sèche du composite grâce au volume de la première gouge utilisée.

Il est recommandé d'inclure tous ces calculs dans une feuille Excel guidant la réalisation.

Calculs

Critères d'acceptation et de rejet du prélèvement

Le critère d'acceptation 1 est appliqué (section 0) : la différence de masse de terre fine sèche avec le prélèvement composite T0 est-elle acceptable ? Si oui : poursuite de l'analyse. Non : refaire le prélèvement.

Les critères d'acceptation 2 et 3 sont appliqués⁴ (sections 0 et 0) : la relation Da / SOC et le changement de teneur en SOC sont-ils dans les limites acceptables ? Si oui, poursuite des calculs. Non : prélèvement à refaire.

- Calcul de la différence de masse de terre fine sèche entre le prélèvement initial et le prélèvement au temps n (temps T₀ et T_n) : $(M_0 - M_n)$

Attention de corriger les masses de terre fine sèche si changement de volume de la gouge

Attention les masses de terres fines sèches sont corrigées pour tenir compte de la proportion volumique d'éléments grossiers dans la gouge (section 0).

- Stock de carbone dans le terme correcteur : $(M_0 - M_1) * \overline{SOC}$

³ Une méthode ne nécessitant de n'emporter qu'une aliquote est en cours de test.

⁴ Dans le cas du premier prélèvement, seul le critère 2 (Da en fonction de SOC) est applicable.

SOC_{corr} : teneur en carbone **moyenne** de la couche de correction en % (m/m)

- Stock de carbone dans l'échantillon composite au temps n : $StockEch_n$
Calculs effectués selon 0, Équation 9.

$$StockEch_n = M_n \times SOCEch_n + (M_0 - M_n) * SOC_{\text{corr}} \quad \text{Équation 9}$$

Avec :

- $StockEch_n$ stock **corrigé** (Équation 5) de carbone en g dans l'échantillon composite
- M_n masse sèche à l'étuve en g de la fraction < 2 mm de l'échantillon composite au temps T_n
- M_0 masse sèche à l'étuve en g de la fraction < 2 mm de l'échantillon composite au temps T_0
- $SOCEch_n$ teneur en carbone de l'échantillon composite en % (m/m)
- SOC_{corr} : teneur en carbone **moyenne** de la couche de correction en % (m/m)
- Stock de carbone dans la parcelle au temps n : $Stock_n$
Calculs effectués selon :

$$Stock_n = StockEch_n \times \frac{3000}{V_{\text{Gouge}_n} \times N_{\text{piq}}} \quad \text{Équation 4}$$

Avec :

- $Stock_n$ Stock corrigé de carbone sur la couche 0-30 cm en tonnes par hectare au temps T_n .
- V_{gouge_n} volume intérieur de la gouge utilisée **en cm³**.
- N_{piq} nombre de piqûres effectuées pour l'échantillon composite.
- Changement de stock
Calcul du MDC selon 0

Calcul de la différence de stock : nulle si < MDC

Nota : en cas de différence non significative entre les stocks n et n-1, le stock au temps n+1 devra être comparé au stock n-1 (et idem à la suite : comparer au premier stock de référence avant changement non significatif)

Objectifs

L'objectif général de ce travail est de proposer une ou des méthodes d'échantillonnage des parcelles agricoles (grandes cultures dans ce travail) pour l'établissement des stocks de carbone en vue d'un suivi à travers le temps de ces stocks. Ces méthodes doivent être compatibles avec l'état de l'art dans le domaine (donc méthode des masses équivalentes dite *ESM*), non biaisées, aussi précises que possible tout en minimisant la complexité et les coûts de mise en œuvre.

Les objectifs spécifiques portent sur :

- Le schéma d'échantillonnage à appliquer ;
- La technique d'échantillonnage : manuelle ou motorisée, compatibilité et incidence sur la fiabilité des mesures ;

- Une simplification maximale de la méthode ESM : possibilité d'adopter des valeurs moyennes pour les corrections et impact de cette simplification sur la détectabilité des changements ;
- Comparaison entre méthode ESM et méthode non ESM – impact sur la précision d'estimation des stocks et détectabilité des changements ;
- Méthodologie de prise en compte de la fraction grossière, erreurs associées et conséquences sur la détectabilité des changements ;
- Formalisation du protocole opératoire retenu : échantillonnage et traitement analytique de l'échantillon.

La méthode ESM, les simplifications proposées et les inconnues à résoudre

Le sol n'a pas une masse constante par unité de volume. En d'autres termes sa *densité apparente* (D_a) varie en fonction du travail du sol, de l'humidité du sol, ou des changements de teneur en carbone organique (SOC)⁵. En conséquence, une couche d'épaisseur H à un temps T_0 n'a pas la même épaisseur à un autre temps T_1 . Par conséquent **échantillonner un sol pour déterminer le stock** d'un certain élément qu'il contient à un temps T_0 puis à un temps T_1 **suppose d'échantillonner la même masse de sol par unité de surface et non la même profondeur.**

L'établissement de bilans carbone est devenu un enjeu technique et économique fort. Il s'agit en effet de promouvoir et rémunérer sous forme de « crédits carbone » la principale technique de séquestration de carbone susceptible de limiter la hausse des teneurs en CO_2 dans l'atmosphère, à savoir la séquestration de carbone sous forme de SOC ou matière organique (MO) dans les sols (European Academies Science Advisory Council 2018).

Tant d'un point de vue environnemental qu'économique il est évidemment essentiel, pour que des crédits « carbone » soient attribués, qu'ils correspondent à une augmentation du stock de SOC dans le sol estimée de manière exacte, appropriée et vérifiable. Pour cela, la recherche a démontré, en accord avec ce qui précède, qu'il faut travailler en « Equivalent Soil Mass » (ESM) (J. Wendt et Hauser 2013). La profondeur de la couche à considérer doit être au moins de 30 cm (Eggleston et al. 2008) car elle représente environ 80% des changements de stock sur 50 ans (Balesdent et al. 2018). Une modalité *one layer* de la méthode ESM a été proposée pour ce cas de figure (J. W. Wendt et Hauser 2013). Le principe est de considérer la masse de sol initiale M_0 obtenue sur cette couche lors du premier prélèvement (au temps T_0), puis de comparer celles des prélèvements suivants (M_x au temps T_x) à cette masse. La différence de masse est corrigée pour se ramener à cette masse initiale et appliquer ainsi un facteur correctif sur le stock de carbone. Le facteur de correction provient de la couche limite (28-32 cm dans la publication citée). Ceci suppose donc d'échantillonner et analyser deux couches de sol : 0-28 et 28-34 cm. La masse de sol dans une couche de profondeur 30 cm est connue en réalisant un échantillonnage composite à la gouge, et en corrigeant la masse trouvée des surfaces respectives de la section de la gouge (multipliée par le nombre de piqûres) et de la parcelle. Ceci permet notamment de ne pas mesurer la densité apparente D_a du sol, très coûteuse et délicate à déterminer. Le schéma d'échantillonnage adopté pour faire l'échantillon composite a une influence

⁵ La matière organique du sol ou humus est composée à 60% environ de carbone organique. Une tonne de carbone organique représente 3.66 t de CO_2 .

sur la précision de la mesure (Deluz et al. 2020). **Le schéma d'échantillonnage optimal sera testé dans cette étude.**

Une simplification de cette méthode *one layer* est ici proposée et testée. Elle tient compte des faits suivants : (i) la couche 0-30 doit être caractérisée et (ii) la semelle de labour sur le territoire suisse est toujours au-dessus de 28 cm. On peut donc faire l'hypothèse que les teneurs en SOC sous cette limite sont faibles et peu variables. C'est pourquoi il est proposé d'introduire un terme de correction de teneur en SOC standard au lieu d'échantillonner et analyser une seconde couche. **Le gain de temps et de coût est à comparer à l'impact sur la précision d'évaluation des stocks de cette procédure simplifiée, impact chiffré dans cette étude.**

Les teneurs en SOC (ou en tout autre élément) du sol sont par convention rapportées à la masse de terre fine. Cela signifie qu'on ne tient pas compte des éléments grossiers, soit par convention le refus au tamisage à 2mm. Dans les sols sur moraine (par exemple), les tailles des éléments grossiers vont de 2 mm (graviers) à plusieurs décimètres (blocs). Il est donc nécessaire de déduire le % volumique d'éléments grossiers du volume de la couche échantillonnée. Contrairement à la prise en compte du changement de Da du sol, la prise en compte du volume des éléments grossiers n'est quasiment pas discutée dans la littérature. **Dans cette étude, l'évaluation des éléments grossiers au champ, leur prise en compte dans les calculs et l'impact de cette procédure sur la précision des évaluations de stock, sont calculés.**

La méthode ESM apporte une grande simplification à l'évaluation de stock en évitant de devoir mesurer la Da du sol. Pour cela la masse extraite par une gouge de diamètre connu est prise en compte. Ceci suppose toutefois que la gouge soit bien remplie lorsqu'elle est extraite du sol. Deux méthodes sont disponibles pour un échantillonnage à la gouge : manuel ou au moyen d'un système pneumatique sur engin motorisé. Dans le second cas, il est impossible (avec les dispositifs actuels) de contrôler le bon remplissage de la gouge. **L'erreur commise dans l'évaluation de la masse de sol comprise dans une couche de profondeur connue, due au remplissage non contrôlé de la gouge, est évaluée dans ce travail.**

Les systèmes motorisés sont utilisés actuellement à profondeur constante sans correction ESM. **L'impact de cette impasse sur la qualité de l'estimation du stock est chiffré dans ce travail.**

Enfin, les erreurs de mesure sur l'évaluation des stocks se concrétisent par une variance de l'évaluation du stock sur une parcelle, qui permet de calculer le *Minimum Detectable Change* (MDC) du stock considéré. Ce MDC doit être suffisamment bas pour qu'un bilan de stock entre deux dates d'échantillonnage ait une valeur statistique (= que la différence chiffrée ait une faible probabilité de provenir des erreurs d'estimation). Dans le cadre d'une politique de rémunération des crédits carbone, il est nécessaire de disposer d'un MDC assez sensible pour que le temps de retour entre deux évaluations (ou le niveau de détectabilité d'un changement) soit compatible avec les dynamiques de changement des teneurs en SOC observées et la politique de promotion de la séquestration. **Le Minimum Detectable Change induit par les différentes procédures pratiquées et testées ici sera quantifié dans cette étude.**

Méthodologie

Après une description de la méthode ESM simplifiée, la stratégie d'échantillonnage et les méthodes de calcul sont introduites, depuis les valeurs de stock et densité apparente au calcul du *minimum detectable change* (MDC).

Méthode ESM et choix des couches prélevées

Le stock de carbone est communément mesuré sur une couche de sol de profondeur fixée et est calculé grâce au produit de la densité apparente et de la teneur en carbone organique. Or la densité apparente est fastidieuse à mesurer au champ et pour éviter des coûts difficilement absorbables, c'est toujours une valeur moyenne qui est utilisée au sein des dispositifs de rémunération de la séquestration, à l'international comme en Suisse. Utiliser une valeur de densité moyenne, sans tenir compte ni de la densité mesurée ni de sa variation entre deux échantillonnages, entraîne de fortes imprécisions sur l'estimation du stock (Fowler et al. 2023), comme le mettent en évidence les Figure 1 et Figure 2. La solution pour estimer précisément le stock de carbone, sans passer par une mesure directe de la densité apparente, est de travailler sur une masse de sol constante prélevée à la gouge (ESM) (J. Wendt et Hauser 2013).

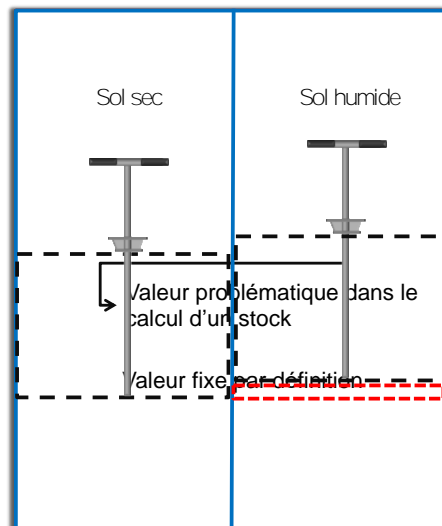


Figure 1: Changement d'épaisseur de la première couche de sol suite à une augmentation d'humidité (gonflement). Le prélèvement à profondeur constante ignore la partie entourée en rouge sur sol humide, par rapport au sol plus sec.

Intervales théoriques (95 % des valeurs)



Teneur en eau
-0,8 et +0,8 [cm]



Teneur en carbone
organique
-0,2 et +0,2 [cm/an]



Travail du sol
+ 1 [cm] (non-labour)
-2,41 [cm] (travail
d'une prairie)

Figure 2 Importance relative des différentes sources de changement d'épaisseur de la couche supérieure du sol

Principe de la méthode ESM (sans le traitement des éléments grossiers)

Pour travailler sur une masse de sol constante il faut dans un premier temps prélever une masse de sol de référence pour établir l'état initial (temps T_0). Ici c'est la couche 0-30 cm qui nous intéresse comme recommandé par le GIEC (Eggleston et al. 2008). Le stock de carbone dans l'échantillon composite est égal à la masse de *terre fine* prélevée multipliée par la teneur pondérale en carbone de cet échantillon. Le stock de carbone par ha dans la couche 0-30 cm est égal au stock dans l'échantillon, divisé par le volume prélevé à la gouge (volume interne de la gouge * nombre de piqûres) et multiplié par le volume de terre fine de la couche 0-30 cm. Ce volume V par ha est de 3000 m³ moins le volume du refus à 2 mm (éléments grossiers estimés visuellement), soit pour un taux d'éléments grossiers T_{xg} , $V = 3000 * (1 - T_{xg}) \text{ m}^3$.

Le traitement du volume des éléments grossiers sur une parcelle sera introduit dans un second temps. En supposant nulle la teneur volumique en éléments grossiers (particules > 2 mm par convention), le stock en g de carbone dans l'échantillon prélevé au temps T_0 se formule ainsi :

$$\text{StockEch}_0 = M_0 \times \text{SOCEch}_0$$

Avec

- StockEch_0 stock de carbone en g dans l'échantillon composite
- M_0 masse sèche à l'étuve en g de la fraction < 2 mm de l'échantillon composite
- SOCEch_0 teneur en carbone de l'échantillon composite en % (m/m)

Équation 1 : Stock de carbone (en g) dans un échantillon composite

Le stock de carbone en t ha⁻¹ dans la couche 0-30 cm se calcule alors en (i) convertissant les masses de grammes en tonnes et (ii) en effectuant une règle de 3 entre le volume prélevé à la gouge et celui de la couche sur 1 ha.

Soit :

$$\text{Stock}_0 = \frac{\text{StockEch}_0}{10^6} \times \frac{3000}{V_{\text{Gouge}_0} \times N_{\text{Piq}}}$$

Avec :

- $Stock_0$ Stock de carbone sur la couche 0-30 cm en tonnes par hectare.
- V_{gouge_0} volume intérieur de la gouge utilisée en m^3 .
- N_{piq} nombre de piqûres effectuées pour l'échantillon composite.

Équation 2 : Calcul du stock de carbone sur la couche 0-30 cm en tonnes par hectare, à partir du stock contenu dans l'échantillon composite, et sans tenir compte des éléments grossiers (hypothèse de fraction > 2 mm nulle dans la gouge et dans la couche de sol).

Lorsqu'un nouvel échantillonnage est réalisé (au temps T_n), afin de constater si la teneur en carbone a changé, la couche 0-30 cm sera échantillonnée, ainsi qu'une seconde couche, que nous appellerons couche de correction. Wendt et Hauser (2013) utilisent la couche 28-34 cm pour procéder à cette correction, nous avons choisi ici de travailler avec la couche 30-35 cm de manière à faciliter les prélèvements, mais aussi car en Suisse la semelle de labour se trouve presque systématiquement au-dessus de 30 cm. Une fois ces prélèvements réalisés, la masse de terre fine sèche M_0 du prélèvement initial à T_0 est comparée à celle M_n de l'échantillon au temps T_n . Cette dernière masse sera ajustée « théoriquement » avec les caractéristiques de la couche de correction afin d'être identique à celle de l'échantillon initial.

La différence de masse de terre fine contient un stock égal à cette masse multipliée par la teneur en SOC de la couche de correction. Soit pour l'échantillonnage au temps T_n , le stock dans l'échantillon composite corrigé de la différence de masse avec le temps T_0 s'écrit :

$$StockEch_n = M_n \times SOCEch_n + (M_0 - M_n) * SOC_{corr}$$

Avec :

- $StockEch_n$ stock corrigé de carbone en g dans l'échantillon composite
- M_n masse sèche à l'étuve en g de la fraction < 2 mm de l'échantillon composite au temps T_n
- M_0 masse sèche à l'étuve en g de la fraction < 2 mm de l'échantillon composite au temps T_0
- $SOCEch_n$ teneur en carbone de l'échantillon composite en % (m/m)
- SOC_{corr} teneur en carbone de la couche de correction en % (m/m)

Équation 3 : Stock de carbone (en g) dans un échantillon composite, corrigé pour se ramener à la masse prélevée au temps T_0 .

Le stock de carbone dans la couche 0-30 cm lors de ce second échantillonnage est donc calculé comme le stock dans la couche 0-30 cm prélevé au second échantillonnage plus le stock introduit par le terme correctif.

Sans tenir compte de la teneur en éléments grossiers (discutée plus loin), le stock au temps T_n est donc formulé ainsi (en t / ha) :

$$Stock_n = StockEch_n \times \frac{3000}{V_{Gouge_n} \times N_{piq}}$$

Avec :

- $Stock_n$ Stock corrigé de carbone sur la couche 0-30 cm en tonnes par hectare au temps T_n .

- $StockEch_n$ Le stock dans l'échantillon composite en g
- V_{gouge_n} volume intérieur de la gouge utilisée en cm^3 .
- N_{piq} nombre de piqûres effectuées pour l'échantillon composite.

Équation 4 : Calcul du stock de carbone corrigé sur la couche 0-30 cm en tonnes par hectare, à partir du stock contenu dans l'échantillon composite, et sans tenir compte des éléments grossiers (hypothèse de fraction > 2 mm nulle dans la gouge et dans la couche de sol).

Simplification testée

Dans un second temps, de manière à éviter de prélever systématiquement la couche 30-35 cm et partant de l'hypothèse que cette couche, se trouvant en dessous de la semelle de labour (i) aura des caractéristiques relativement homogènes entre les parcelles et que (ii) le terme correcteur en stock de carbone sera faible, nous avons cherché ici à savoir si nous pouvions utiliser des caractéristiques moyennes pour cette couche de correction. Ce point et l'erreur d'approximation qu'il introduit sont discutés plus bas.

Prise en compte des éléments grossiers

Le volume de la fraction grossière (> 2 mm) ne doit pas être pris en compte dans le volume de la couche échantillonnée. Le volume de cette fraction est évalué visuellement au champ (voir ci-dessous 0) pour être soustrait au volume de la couche de sol. Dans ce calcul, les éléments grossiers contenus dans l'échantillon composite ne doivent pas être pris en compte car (i) ils seraient comptabilisés deux fois et (ii) leur volume dans la gouge est aléatoire et non représentatif de celui sur la parcelle. Il faut donc dans un premier temps corriger la masse de terre fine trouvée pour se ramener à la masse qui aurait été prélevée s'il n'y avait pas eu d'éléments grossiers dans l'échantillon composite. Pour ceci, on va tenir compte des volumes.

Correction de la masse de terre fine dans le composite

Soit M_g la masse en g des éléments grossiers dans l'échantillon composite.

Soit V_g le volume en cm^3 des éléments grossiers dans l'échantillon composite. Ce volume est soit mesuré au laboratoire (immersion dans l'eau) soit calculé comme $V_g = M_g/2.6$

Soit M_{tf} la masse de terre fine trouvée dans l'échantillon composite.

Soit V_{gouge} le volume intérieur de la gouge en cm^3 et N le nombre de piqûres effectuées pour prélever l'échantillon composite.

La masse de terre fine de l'échantillon composite en g au temps t est recalculée comme :

$$M_t = \frac{M_{tf} \times V_{gouge} \times N}{(V_{gouge} \times N - V_g)}$$

Équation 5 : Correction de la masse prélevée dans l'échantillon composite pour enlever le volume des éléments grossiers

Correction du stock au champ

Si le volume en % (v/v) des éléments grossiers évalué au champ est de Txg (%) du volume de sol au champ, alors le volume V_{tf} de terre fine (donc contenant du carbone) en m^3 par ha de la couche 0-30 cm devient :

$$V_{tf} = 3000 \times (1 - Txg) \text{ avec } V_{tf} \text{ par ha sur les 30 premiers cm en } m^3.$$

Le facteur $(1 - Txg)$ doit être appliqué à l'Équation 2 et à l'Équation 4 pour tenir compte des éléments grossiers.

Compte tenu de l'importance de cette correction, Txg n'est estimé qu'une fois (au temps T_0) et cette valeur est ensuite appliquée à tous les échantillonnages.

Les équations de stock de carbone en tonnes par hectare sur les 30 premiers cm de sol deviennent :

Au temps T_0

$$Stock_0 = StockEch_0 \times \frac{3000}{V_{Gouge_0} \times N_{piq}} \times (1 - Txg)$$

Avec :

- $Stock_0$ Stock de carbone sur la couche 0-30 cm en tonnes par hectare.
- V_{gouge_0} volume intérieur de la gouge utilisée en cm^3 .
- $StockEch_0$ Stock de carbone dans le composite en g.
- N_{piq} nombre de piqûres effectuées pour l'échantillon composite.
- Txg taux de refus à 2mm estimé au champ.

Équation 6 : Calcul du stock de carbone sur la couche 0-30 cm en tonnes par hectare, à partir du stock contenu dans l'échantillon composite, et sans tenir compte des éléments grossiers (hypothèse de fraction > 2 mm nulle dans la gouge et dans la couche de sol).

Et au temps T_n :

$$Stock_n = StockEch_n \times \frac{3000}{V_{Gouge_n} \times N_{piq}} \times (1 - Txg)$$

Avec :

- $Stock_n$ Stock corrigé de carbone sur la couche 0-30 cm en tonnes par hectare au temps T_n .
- V_{gouge_n} volume intérieur de la gouge utilisée en cm^3 .
- N_{piq} nombre de piqûres effectuées pour l'échantillon composite.
- Txg taux de refus à 2mm estimé au champ

Équation 7 : Calcul du stock de carbone corrigé sur la couche 0-30 cm en tonnes par hectare, à partir du stock contenu dans l'échantillon composite, et sans tenir compte des éléments grossiers (hypothèse de fraction > 2 mm nulle dans la gouge et dans la couche de sol).

Choix de la méthode de prélèvement

La gouge permet de prélever un volume connu avec une bonne précision sur la profondeur. Elle ne mélange pas les couches contrairement à la tarière. Dans ce travail, deux manières d'effectuer la prise d'échantillons avec une gouge ont été comparées : manuelle ou mécanique. Pour le prélèvement manuel la gouge est enfoncée, contrôlée et vidée par l'opérateur, tandis que pour le

prélèvement mécanique la gouge est montée sur un véhicule, enfoncée dans le sol à l'aide d'un marteau hydraulique et vidée automatiquement. Dans les versions existantes les préleveurs mécaniques ne permettent pas de contrôler le bon remplissage de la gouge, ce qui représente un risque de mauvais remplissage non constaté, et donc de mauvaise évaluation de la masse de terre fine. Le prélèvement manuel permet un contrôle pour chaque prélèvement du bon remplissage de la gouge au prix d'un temps d'échantillonnage plus important⁶. Nous cherchons ici à savoir si le prélèvement mécanique est suffisamment fiable du point de vue de la portion de couche extraite du sol, ce qui sera contrôlé par la masse de sol extraite.

Au total, 403 parcelles ont été échantillonnées, que ce soit de manière manuelle, mécanisée ou les deux. Trois diamètres de gouges différents ont été étudiés pour le prélèvement manuel (1.8, 2.7 et 2.8 cm) et deux diamètres différents pour le prélèvement mécanique (1.7 et 2.6 cm respectivement, pour les modèles d'échantillonneurs automatiques de sol « *Wintex 1000* » et « *Wintex 3000* » de *WintexAgro*).

Pour le prélèvement manuel, les prélèvements sont arrasés sur la gouge de manière à gagner en homogénéité. Dû aux différents degrés d'ouverture des modèles de gouges la surface, et donc le volume, de sol prélevé est plus important pour la gouge de diamètre 2.7 cm que pour la gouge de 2.8 cm. Pour éviter toute confusion, on se référera aux gouges d'après leur volume en cm³ arrondi à l'entier pour un prélèvement de 30 cm de profondeur. Ces informations sont résumées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Types de gouges comparées dans cette étude et volumes intérieurs associés

Type de gouge	Diamètre gouge (cm)	Surface de prélèvement (cm ²)	Volume de prélèvement (cm ³)	Pourcentage de parcelles échantillonnées (%)
Manuelle	1.8	3.5	70.0	16
	2.7	6.6	132.2	50
	2.8	6.2	124.5	34
Mécanique	1.7	3.4	68.1	70
	2.6	8.0	159.3	30

Pour comparer les performances des méthodes manuelles et mécaniques, 38 parcelles ont été échantillonnées avec les deux méthodes. Afin d'analyser si l'un des deux diamètres des gouges mécaniques (68 cm³ et 159 cm³) conviendrait mieux à ce type d'échantillonnage 18 parcelles ont été échantillonnées avec les deux diamètres différents : 13 des 36 parcelles citées auparavant ainsi que 5 autres parcelles non échantillonnées manuellement.

Schéma d'échantillonnage

⁶ Mais semble-t-il à un coût moindre

Il s'agit de savoir combien de piqûres de gouge effectuer, et selon quelle distribution sur la parcelle, pour un objectif de précision de l'évaluation du stock chiffré. La méthodologie employée est reprise de celle de Deluz et al. (2020) dédiée à la détermination du schéma d'échantillonnage optimal pour l'évaluation des teneurs en SOC du sol (sur 0-20 cm dans le cadre des PER). On a cette fois évalué les contraintes d'échantillonnage du stock de SOC. Brièvement : 150 prélèvements de la couche 0-30 cm de sol ont été réalisés sur 3 parcelles représentatives des sols du canton de Genève et présentant différents historiques de mise en valeur. Des cartes du stock de SOC ont été créées par krigeage sur une grille de 1x1m pour chaque champ. Ceci a ensuite permis de simuler 500 répétitions d'échantillonnage pour différents schémas (schéma d'échantillonnage en diagonale, en croix, en double-parallèle, ...) et avec différents nombres d'échantillons pour chaque passage (5, 10, ..., 25 échantillons par schéma). Une composante aléatoire a été introduite pour disperser les points d'échantillonnages le long des trajectoires des schémas pour simuler le passage de l'opérateur dans le champ. La précision obtenue a été calculée sur la base de la variance observée entre les répétitions, en fonction du nombre de prélèvement par échantillonnage (Figure 3).

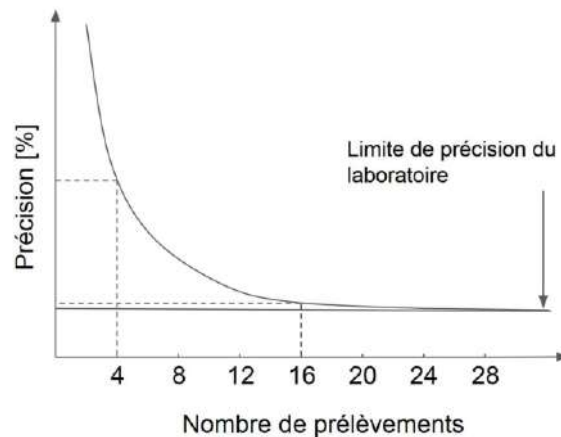


Figure 3 : Niveau de précision d'un échantillon composite en fonction du nombre de prélèvements qui le composent. D'après Diab-Sas (1991)

Mesure de la masse de terre fine, de la teneur en carbone organique et de la densité apparente

Chaque échantillon est tamisé à 2 mm, les masses de terre fine sèche (étuve à 40°C) et de grossiers sont mesurées.

La masse de terre fine est ensuite corrigée pour se ramener à un prélèvement composé uniquement de terre fine dans le volume de la gouge⁷ (Équation 5).

⁷ En effet la teneur en éléments grossiers est prise en compte après estimation visuelle – voir section dédiée plus bas.

Dans la suite de ce rapport la masse de terre fine dans l'échantillon composite désignera la masse de terre fine corrigée en utilisant l'Équation 5 pour éliminer la présence de la fraction grossière dans le composite.

La densité apparente du sol échantillonné est simplement donnée par le rapport entre la masse de terre fine corrigée sur le volume total des 20 piqûres.

Les sols organiques (teneur en MO > 8 %) n'ont pas été pris en compte dans ce travail. Ils représentent une situation particulière où la séquestration de carbone est impossible, le défi étant d'en perdre le moins possible dans ce cas. Sur 397 prélèvements de sol manuel sur la couche 0-30 cm, 9 ont donc été écartés. Sur 68 prélèvements de sol mécaniques sur la couche 0-30 cm, 3 ont été écartés. Ceci n'empêche pas de les inclure dans un suivi des stocks. Toutefois, leur profil organique peut représenter plus de 30 cm de profondeur. Dans ce cas la perte de SOC se matérialisera par un tassement de cette couche, qui ne sera pas détecté par un prélèvement à 30 cm. **Nous recommandons donc de les exclure d'un suivi tel qu'étudié ici et de les traiter séparément.**

Évaluation de la teneur en éléments grossiers (> 2mm)

La correction du calcul de stock dû pour tenir compte du volume relatif des éléments grossiers au champ n'est quasiment pas discutée dans la littérature. Nous proposons donc ici une méthode pour estimer le pourcentage volumique d'éléments grossiers sur une parcelle et évaluons l'erreur de qui peut être associée à cette valeur.

En vue de soustraire le volume des éléments grossiers du volume de la couche considérée, la teneur volumique en éléments grossiers de chaque parcelle a été estimée visuellement. Pour ce faire 5 mini profils de 30 centimètres de profondeur ont été creusés à la bêche, répartis selon les 4 coins des parcelles et en leur centre (comme les 5 points sur un dé). Les profils sont ensuite rafraichis à l'aide d'un couteau de pédologue et la teneur en grossiers estimée en s'appuyant sur les abaques visuels du *Munsell Soil Color Chart* présentées en Figure 4. Le pourcentage volumique des grossiers sur la parcelle est estimé comme la moyenne des 5 estimations. La variance de la teneur volumique en grossiers a été calculée grâce aux données récoltées sur les 403 parcelles. La variance intra-parcellaire est la variance des 5 valeurs.

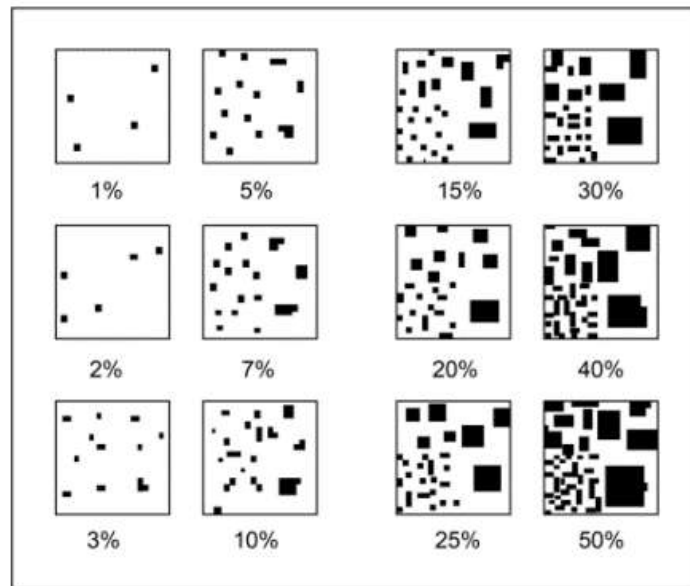


Figure 4. Schéma d'aide à l'appréciation visuelle de la teneur volumique en éléments grossiers dans les sols (source : Munsell Soil Color Chart)

Validation des prélèvements initiaux (temps T0)

Les premiers prélèvements doivent être réalisés de la manière la plus précise possible car ils déterminent les résultats futurs à travers deux paramètres qui seront conservés, soit la masse de terre fine de référence et le pourcentage volumique d'éléments grossiers.

Malgré le soin apporté au prélèvement, des erreurs persistent. Afin de déterminer si un échantillon initial est valide ou non, on propose de vérifier que sa densité apparente mise en relation avec sa teneur en SOC est cohérente avec les moyennes régionales. Les bases de données HEPIA – Sols et Substrats régionales permettent de tracer la régression linéaire entre la densité apparente et le taux de SOC du sol sur l'arc lémanique. La teneur en SOC permet d'expliquer une grande part de la variance des densités apparentes observées ($R^2 = 0.59$) et la régression est hautement significative ($p < 0.01$) (Figure 5). Si la densité apparente mesurée se trouve hors de l'intervalle de prédiction à 95% de la densité apparente attendue pour la teneur en SOC mesurée, alors le prélèvement initial est mis en doute et devra être refait. On conditionne donc la validité de l'échantillon à une densité apparente qui doit être dans l'intervalle de prédiction à 95% de la régression linéaire.

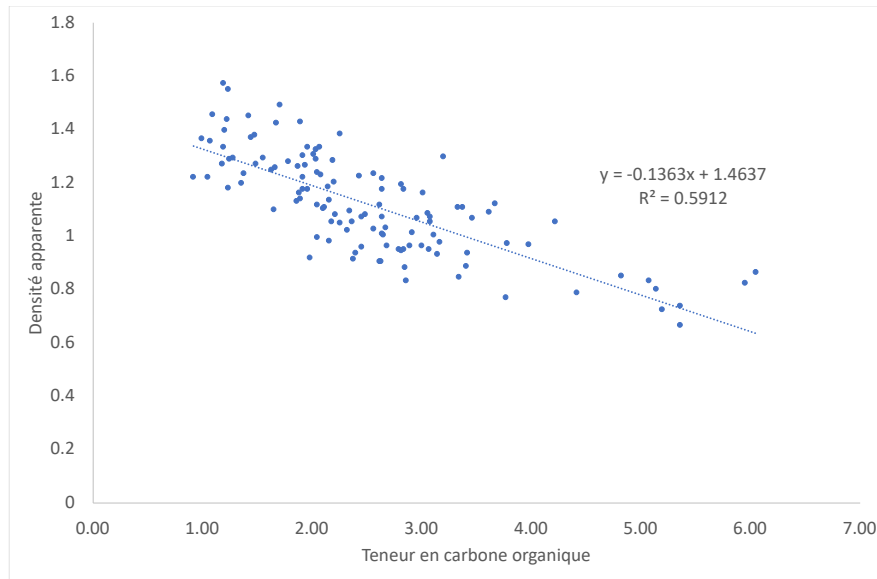


Figure 5 Relation régionale entre la densité apparente du sol et sa teneur en carbone organique faisant foi pour valider un prélèvement au temps T_0 sur une parcelle (base de données HEPIA sols et substrats).

Calcul du stock de SOC initial, de son erreur associée et du MDC

Pour estimer le stock pour la couche 0-30 cm, 388 parcelles ont été échantillonnées avec la méthode manuelle et 48 avec la méthode mécanique (après déduction des terres noires, MO > 8%).

Le stock de carbone (en $t\ ha^{-1}$) est estimé selon l'Équation 6.

Le *minimum detectable change* (MDC) en tonnes de carbone par hectare sur une parcelle dépend de la variance de ce stock et est estimé selon (Saby et al. 2008) par :

$$MDC(Stock) = z_{\alpha} * \sqrt{Var(Stock)} * \sqrt{\frac{2}{n}}$$

Avec :

MDC : Changement minimum de stock de carbone détectable en $t\ ha^{-1}$

z_{α} : Valeur de la distribution normale standardisée à la probabilité α (prise à 5%, $z_{\alpha} = 1.96$)

Var(Stock) : variance d'estimation du stock de carbone

n : Nombre de prélèvements par parcelle (20)

Équation 8 : Minimum Detectable Change (MDC) du stock de carbone en fonction de la variance d'estimation du stock.

L'évolution du stock

Calcul de l'évolution du stock avec la méthode ESM - Simplification

La méthode ESM corrige les différences de masse de la couche 0-30 cm causées par des évolutions de densité entre deux mesures en utilisant une couche de correction située à 30-35 cm. Cependant cela implique de devoir prélever à une profondeur plus importante, de devoir réaliser une autre analyse

supplémentaire par échantillon, et de manière générale de compliquer le prélèvement et d'augmenter les coûts.

Nous avons donc évalué la possibilité de remplacer le prélèvement et l'analyse de la couche 30-35 cm par un terme correctif correspondant aux valeurs moyennes observées sur la zone pédologique correspondante pour cette profondeur. Dans ce cas l'Équation 3 qui calcule le stock compris dans l'échantillon composite devient :

$$StockEch_n = M_n \times SOCEch_n + (M_0 - M_n) * SOC_{\overline{correct}}$$

Avec :

- StockEch_n stock **corrigé** (Équation 5) de carbone en g dans l'échantillon composite
- M_n masse sèche à l'étuve en g de la fraction < 2 mm de l'échantillon composite au temps T_n
- M₀ masse sèche à l'étuve en g de la fraction < 2 mm de l'échantillon composite au temps T₀
- SOCEch_n teneur en carbone de l'échantillon composite en % (m/m)
- $SOC_{\overline{correct}}$: teneur en carbone **moyenne** de la couche de correction en % (m/m)

Équation 9 Stock de carbone (en g) dans un échantillon composite, corrigé en utilisant une teneur SOC moyenne de la couche correctrice pour se ramener à la masse prélevée au temps T₀.

Si la variance de la teneur en SOC de la sous couche (30-35 cm) est faible, l'erreur introduite par l'utilisation d'un terme correcteur moyen aura un impact faible sur l'évaluation du changement de stock et son MDC, ce qui doit être évalué.

Il est important de retenir (i) que ce test est conduit en grandes cultures principalement. Le profil de SOC des prairies permanentes est moins contrasté avec la profondeur qu'en terre travaillée. L'emploi d'un terme correcteur standard dans ces situations devra être discuté et confirmé. (ii) D'autre part la simplification proposée est double puisqu'outre l'emploi d'un terme correcteur standard, la couche de correction considérée est la couche 30-35. Ceci doit permettre de faire un état initial du stock 0-30 cm qui servira de référence dans la suite sans échantillonner deux couches. L'applicabilité repose sur le fait que sous les (anciennes) semelles de labour, généralement à 25 cm et jamais observées à plus de 28 cm, la couche de sol est homogène et qu'échantillonner 28-34 cm (méthode « one Layer » de Wendt et Hauser (2013)) ou 30-35 cm donnera un résultat non significativement différent en termes de teneur en SOC et Da.

Pour tester ces hypothèses, nous avons (i) déterminé les caractéristiques moyennes et la variabilité des teneurs en SOC (et Da) de la couche 30-35 sur le territoire concerné, et (ii) calculé l'erreur effectuée sur un terme correcteur en attribuant une valeur moyenne ou médiane à ces valeurs plutôt que la valeur observée et (iii) calculé l'impact de cette erreur sur le MDC du stock carbone par ha.

Erreur sur le stock en prélevant la couche 30-35 cm – méthode ESM

La correction de stock dans l'échantillon composite est décrite par l'Équation 3. Cette correction fait intervenir la différence de masse entre les composites aux temps T₀ et T_n et la teneur en SOC mesurée dans cette couche. L'écart type de la teneur en SOC a été estimée à 0.16% pour la couche 30-35 à l'échelle intra parcellaire. A l'échelle inter parcellaire, l'écart type de SOC est de 0.5 % pour la couche 30-35 cm selon notre échantillonnage (0).

Le terme correctif est ajouté au stock dans l'échantillon composite, et sa variance est donc additionnelle à celle de la variance du stock sur 0-30 cm. Pour un ha sur 0-30 cm le stock en t de carbone est en effet donné par l'Équation 7 :

$$Stock_n = StockEch_n \times \frac{3000}{VGouge_n \times N_{Piq}} \times (1 - T_xg)$$

$$Et StockEch_n = M_n \times SOCEch_n + (M_0 - M_n) * SOC_{ccorr} \quad (\text{Équation 3})$$

La variance du terme correctif à cette échelle est donc celle de SOC dans la couche 30-35 avec le facteur multiplicatif

$$(M_0 - M_n) * \frac{3000}{VGouge_n \times N_{Piq}}$$

$$VarStock_{Par} = VarStock_{0-30} + \left(\frac{3000}{VGouge_n \times N_{Piq}} \times (M_0 - M_n) * STDSOC_{ccorr} \right)^2$$

Avec :

$VarStock_{Par}$ La variance du stock sur 0-30 cm pour un ha.

$VarStock_{0-30}$ la variance expérimentale du stock sur 0-30 cm déterminée en section 0 (en supposant cette variance inchangée au temps n).

$STDSOC_{ccorr}$ L'écart-type intra parcellaire de la teneur en SOC sur la couche 30-35 cm (0.16 % m/m).

Équation 10 : Variance associée à la mesure du stock avec terme correctif – sans prise en compte des éléments grossiers.

On obtient le MDC de cette méthode en utilisant la variance calculée grâce à l'Équation 10 dans l'Équation 8 de calcul du MDC. La variance à l'échelle de la parcelle doit encore prendre en compte l'erreur sur la teneur en éléments grossiers (Équation 7) qui intervient en facteur multiplicateur du calcul de stock. En supposant la teneur en éléments grossiers et la teneur en Soc de la couche 0-30 cm indépendantes, la variance totale du stock par ha $VarStock_{ha-G}$ pour la couche 0-30 cm s'écrit :

$$VarStock_{ha-G} = VarStock_{Par} \times Var(1 - Tg) + VarStock_{Par} \times (\overline{1 - Tg})^2 + Var(1 - Tg) \times (\overline{Stock})^2$$

Avec :

Tg : teneur volumique en éléments grossiers.

$VarStock_{Par}$ La variance du stock sur 0-30 cm pour un ha

$VarStock_{ha-G}$ La variance du stock sur 0-30 cm pour un ha compte tenu de la variance de l'estimation des éléments grossiers

Équation 11 Calcul de la variance du stock sur la parcelle, compte tenu du % volumique d'éléments grossiers Tg.

On obtient le MDC correspondant à cette méthode en utilisant la variance calculée grâce à l'Équation 11 dans l'Équation 8 de calcul du MDC.

Erreur sur le stock en utilisant un terme correctif moyen – méthode ESM simplifiée

Avec la méthode ESM simplifiée, on remplace la teneur SOC du terme correctif par la valeur moyenne des teneurs en SOC mesurées dans la couche 30-35 cm. On remplace alors l'erreur sur le SOC ci-dessus (0.16%) par l'erreur due à la variance autour de la moyenne de teneur en SOC de la couche 30-35 cm soit 0.5% (section 0) dans l'Équation 10. De la même manière, le MDC est calculé avec l'Équation 8 et sera comparé au MDC de la méthode ESM.

Comparaison avec le calcul du stock à profondeur constante et à densité apparente moyenne

En effectuant un échantillonnage à profondeur constante et en appliquant une densité apparente moyenne, le stock est évalué selon l'Équation 12:

$$\text{Stock} = TC * Da_{\text{moyenne}} * V_{\text{sol}} * (1 - G)$$

Équation 12 : Calcul du stock de SOC sur 30 cm selon la méthode à profondeur constante

Avec :

Stock : Stock de carbone en [t.ha⁻¹]

TC : Teneur en SOC [-]

V_{sol} : Volume de sol en [m³.ha⁻¹] (toujours égal à 3000)

Da_{moyenne} : Densité apparente moyenne des sols agricoles en grandes cultures [t.m⁻³]

En mesurant le changement de stock à profondeur constante et avec une densité apparente du sol unique, on introduit les erreurs suivantes :

- On ne prend pas en compte le changement d'épaisseur du sol et on n'échantillonne donc pas la même couche.
- On suppose que la densité apparente du sol ne varie ni à l'échelle de la parcelle ni à l'échelle du territoire ce qui n'est pas vrai (cf Figure 5).
- La teneur en grossiers n'est pas mesurée et on la suppose constante à l'échelle du territoire.

Ici les facteurs d'erreur sont les variances de la densité apparente, de la teneur en SOC du sol et de la teneur volumique en éléments grossiers. Étant donné que ce sont des données moyennes qui sont utilisées pour la densité et la teneur en grossier, ce sont les variances inter-parcellaire et non intra-parcellaire qui ont été utilisées. La variance sur le stock due à cette méthode s'écrit :

$$\begin{aligned} \text{Var}(\text{Stock}_{\text{Prof. constante}}) &= \text{Var}((SOC_n * Da) - (SOC_0 * Da) * 3000 * (1 - TG)) \\ &= ((9 * (1000000 * ((\text{Var}(Da) * 2\text{Var}(SOC)) + (\text{Var}(Da) \\ &\quad * E(SOC_n - SOC_0)^2) + (2\text{Var}(SOC) * E(Da)^2)))) * \text{Var}(TG)) + ((9 * (1000000 \\ &\quad * ((\text{Var}(Da) * 2\text{Var}(TC)) + (\text{Var}(Da) * E(SOC_0 - SOC_0)^2) + (2\text{Var}(SOC) \\ &\quad * E(Da)^2)))) * E(1 - TG)^2) + (\text{Var}(TG) * E(3\Delta C)^2) \end{aligned}$$

Avec :

SOC : Teneur en SOC en % m/m ; *SOC_n* et *SOC₀* teneur en SOC aux temps *T₀* et *T_n*.

V_{sol} : Volume de sol en [m³.ha⁻¹] (toujours égal à 3000)

Da : densité apparente du sol en t m⁻³

Da_{moyenne} : Densité apparente moyenne des sols agricoles en grandes cultures [t.m⁻³]

TG : Teneur en grossier au champ % v/v

Équation 13 : Variance sur le stock de SOC sur 30 cm selon la méthode à profondeur constante

Expression du MDC en années avant l'échantillonnage suivant

Tous les MDC des stocks sont calculés avec la même formule (Équation 8). Pour connaître le nombre d'années nécessaires avant de pouvoir observer un changement statistiquement significatif pour chaque méthode, on doit tenir compte de la teneur en SOC trouvée au temps précédent et de la vitesse d'évaluation de ce stock. Cette dernière information est disponible grâce à l'étude de (Dupla et al. 2022). La formule utilisée est la suivante :

$$N = \frac{\log \left(\frac{\text{Stock}_{\text{initial}} + \text{MDC}}{\text{Stock}_{\text{initial}}} \right)}{\log (1 + T_x)}$$

Avec :

N : Nombre d'années avant de pouvoir observer un changement significatif du stock [an]

$\text{Stock}_{\text{initial}}$: Stock de carbone initial en $[t \cdot ha^{-1}]$

MDC : Minimum Detectable Change $[t \cdot ha^{-1}]$

T_x : Taux d'évolution annuel de la teneur en SOC en $\% / \text{an}$

Équation 14 : MDC (années) ou nombre d'années avant de pouvoir observer un changement significatif du stock de carbone

Détection des erreurs de prélèvement et limites d'erreur acceptable

Il sera dans le futur primordial de vérifier la qualité des échantillons afin d'exclure avant analyse ceux qui auraient été réalisés avec une qualité insuffisante. L'erreur principale sera sur le poids récolté, et ceci correspond à un remplissage incomplet de la gouge. Le rejet d'un échantillonnage initial a été envisagé ci-dessus (section 0). De manière à déterminer si un échantillonnage ultérieur est acceptable nous proposons d'utiliser une valeur maximale de changement d'épaisseur de la couche de sol 0-30 et de limiter la variation de masse observée acceptable à l'aide de ces informations. Si l'échantillon prélevé a une masse inférieure ou supérieure à celle de l'état initial plus ou moins ce facteur de changement maximal, la répétition de l'échantillonnage sera demandée.

Plusieurs facteurs peuvent entraîner un gonflement ou tassement du sol (Wendt et Hauser 2013). Les principaux facteurs et leurs intervalles de confiance à 95 % sont : un labour récent (de -2.41 à + 1 cm), un changement de teneur en eau (± 0.8 cm) et un changement de teneur en SOC (± 0.2 cm) (Figure 2).

Étant donné que les mesures ne devront pas être effectuées après un labour⁸, les facteurs principaux sont donc les changements de teneurs en eau et SOC. Nous considérons donc comme borne supérieure du changement d'épaisseur du sol sur 0-30 cm la valeur de 3 cm soit 10% de l'épaisseur de la couche 0-30 cm. Selon cette hypothèse, la masse de sol prélevé au 2^{ème} passage devra donc être comprise dans la masse du prélèvement initial ± 10 % (voir Équation 15 ci-dessous).

$$MTF_{\text{final}} \in [0.9 * MTF_{\text{initial}}, 1.1 * MTF_{\text{initial}}]$$

Équation 15 : Gamme maximale admissible de la masse d'échantillon

De plus la densité apparente trouvée ($MTF / (\text{Volume prélevé} - \text{grossiers})$) doit être cohérente avec les données régionales (voir section 0 et Figure 5), ce qui prend en compte le changement de teneur en

⁸ Contrevenir à cette règle n'est pas dans l'intérêt de l'agriculteur : la masse prélevée étant trop faible, elle sera corrigée par la valeur de la sous-couche, soit un terme de stock faible.

SOC. Enfin, le taux d'évolution de SOC entre deux dates doit être cohérent avec les pratiques agricoles durant cette période.

Ce modèle de séquestration du SOC développé par l'HEPIA pour les sols suisses en grandes cultures permet d'estimer le taux d'évolution annuel du SOC. Il prend en compte le travail du sol, la matière organique apportée, la durée des intercultures non couvertes et le rapport SOC/Argile. Il a été développé grâce aux données récoltées sur 120 parcelles des cantons de Vaud et Genève. L'Équation 16 ci-dessous donne le taux d'évolution de la matière organique attendu selon ces quatre paramètres. Les erreurs entre le modèle et les taux d'évolutions observés pour les 120 fermes suivent une relation linéaire et hautement significative (voir Chapitre 0). On s'attend donc à ce que l'erreur entre le taux d'évolution observé et le modèle soit proche de l'erreur attendue.

$$T_x = 37.03 + 0.53 * ISMO - 2.95 * SOC/A - 0.12 * STIR - 1.26 * I$$

Avec :

T_x = Taux d'évolution annuel de carbone organique [‰]

ISMO = Masse de matière organique humifiée apportée rapportée à l'année [$t \cdot ha^{-1}$]

SOC/A = Rapport teneur en carbone organique sur teneur en argile [%]

STIR = Indice d'intensité de travail du sol [-]

I = Nombre d'intercultures non couvertes sur 10 ans [-]

Équation 16 : Taux d'évolution annuel de la teneur en MO attendu selon divers paramètres à l'échelle de la parcelle d'après le modèle linéaire généralisé de l'HEPIA

Si les différences (ou résidus) entre les valeurs observées et ces deux régressions sont supérieures à soit l'erreur standard résiduelle des différences observées sur les données de ce projet, alors on considère que les valeurs observées sont en dehors des limites acceptables.

En résumé, nous proposons de procéder à un triple contrôle avant acceptation d'une mesure de stock :

- Acceptabilité de la masse de terre fine M_n trouvée dans l'échantillon composite (Équation 5) au temps T_n par rapport à la masse M_0 au prélèvement aux temps T_0 .
- Acceptabilité de la D_a trouvée par rapport à la régression entre la densité et le taux de SOC (Figure 5).
- Acceptabilité du changement de teneur en SOC par rapport aux pratiques et au modèle linéaire généralisé du taux d'évolution annuel (Dupla et al. 2022).

Ce triple contrôle peut être automatisé et permettra d'identifier les échantillonnages suspects nécessitant un contrôle.

Résultats

Les résultats abordent successivement le schéma d'échantillonnage et son influence sur les erreurs d'évaluation des stocks, la comparaison entre les systèmes de prélèvement, la prise en compte de la teneur en éléments grossiers, le calcul des différentes erreurs et MDC.

Schéma d'échantillonnage

Les calculs effectués ont permis de valider la stratégie d'échantillonnage en croix comme étant la plus robuste. L'étude a aussi montré que le nombre d'échantillons nécessaire par parcelle est d'environ 20 : jusqu'à 20 échantillons la diminution de l'écart-type pour les 500 répétitions est très marquée, au-dessus de 20 la diminution de l'écart-type est négligeable et ne justifie pas l'augmentation des coûts nécessaire au plus grand nombre de piqûres. Dans la suite de cette étude, les échantillons composites ont donc été constitués de 20 échantillons collectés à la gouge le long des deux diagonales des parcelles et en évitant les bords (environ 10 mètres) comme visible sur la Figure 6. Les carottes de sol prélevées à la gouge sont contrôlées visuellement : elles doivent être bien remplies, à défaut la piqûre est refaite.

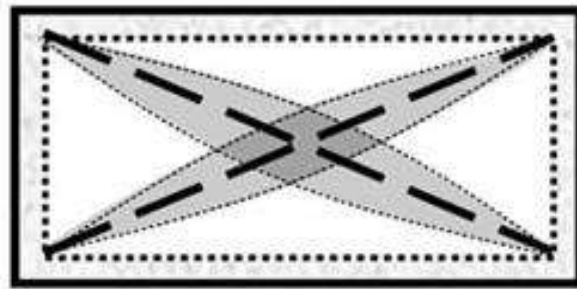


Figure 6 Schéma d'échantillonnage en croix

Le stock de carbone présente, entre deux échantillons composites de 20 piqûres prélevé selon un schéma d'échantillonnage en croix, en prenant en compte la variance analytique, un **écart-type de 1.9 t ha⁻¹ pour la couche 0-30 cm** (Figure 7).

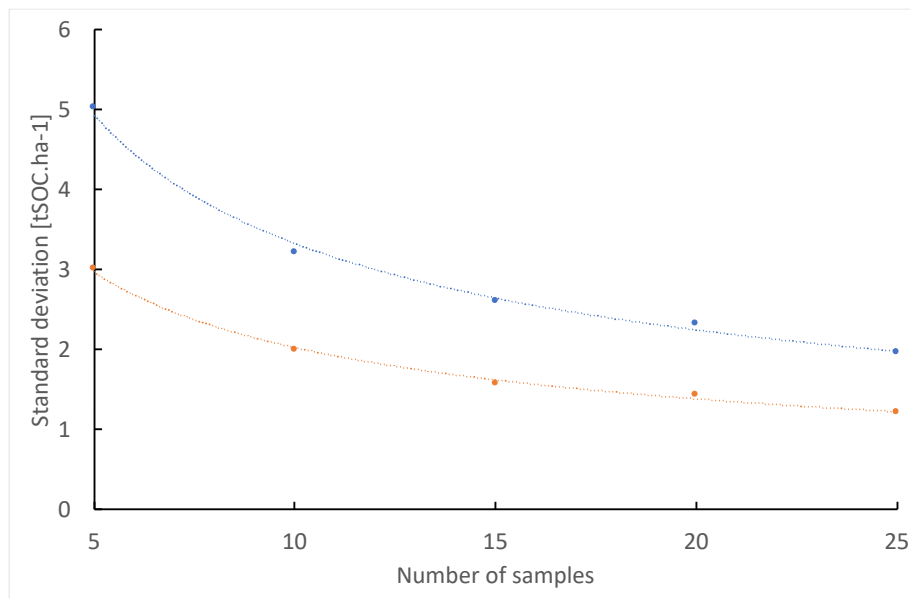


Figure 7 : Écart Type sur la mesure du stock en fonction du nombre de piqûres à la gouge pour former l'échantillon composite pour les deux parcelles échantillonnées. Résultat de 500 répétitions aléatoires selon un schéma en croix (diagonales de la parcelle). En bleu : parcelle en semis direct, en rouge : parcelle en conventionnel.

Avant de réaliser l'échantillonnage l'homogénéité des parcelles a été vérifiée visuellement en la parcourant et en questionnant les agriculteurs concernés lors d'entretiens préalables. Si une zone hétérogène est identifiée (spot de terre noire, zone humide, zone de remblais...) mais qu'elle est inférieure à 5000 mètres carrés ou si elle représente moins de 1/6^{ème} de la parcelle, alors la parcelle est échantillonnée normalement, dans le cas contraire, cette zone est échantillonnée séparément.

Sous réserve de certaines conditions des parcelles ont dû être regroupées de manière à ne réaliser qu'un seul prélèvement composite : (i) si la somme des surfaces regroupées ne dépasse pas 10 hectares, (ii) si les pratiques agricoles sont identiques depuis au moins 10 ans et (iii) si les parcelles se trouvent sur une unité pédologique homogène.

Variance de la teneur en grossier à l'échelle des parcelles

La variance intra-parcellaire de la teneur en éléments grossiers (> 2 mm) augmente avec le pourcentage volumique moyen des grossiers. Si l'on regarde la distribution du logarithme de la variance en fonction du logarithme de la moyenne des grossiers, on peut voir que la distribution de la variance est linéaire (Figure 8). Cela indique que la relation entre la variance et la moyenne des grossiers suit une relation de puissance (Figure 9). Pour le calcul de l'erreur sur le stock initial (0), puisque la variance des grossiers est approximée par l'équation donnée sur la Figure 9, **on donnera donc l'erreur en fonction du pourcentage volumique moyen d'éléments grossiers dans la parcelle.**

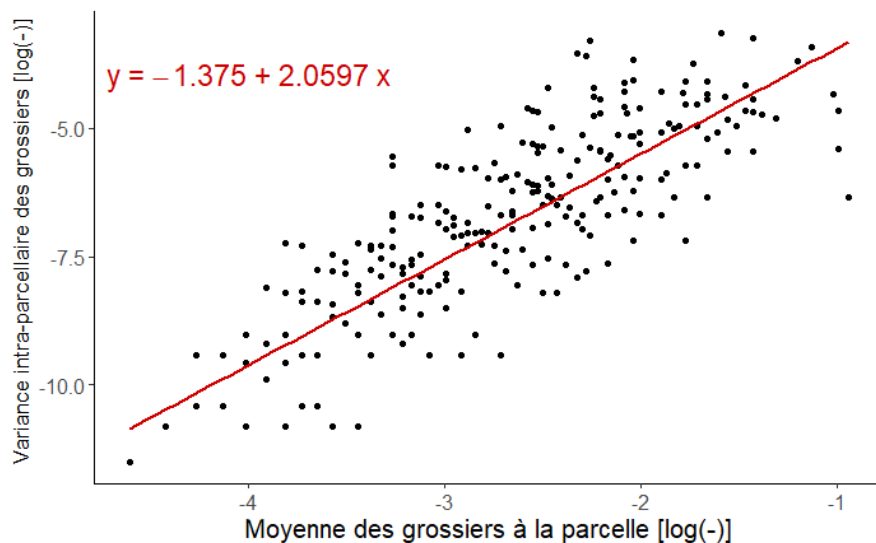


Figure 8 : Logarithme de la variance intra-parcellaire en fonction du logarithme de la teneur moyenne en éléments grossiers. La ligne rouge est la régression linéaire dont l'équation est donnée en rouge.

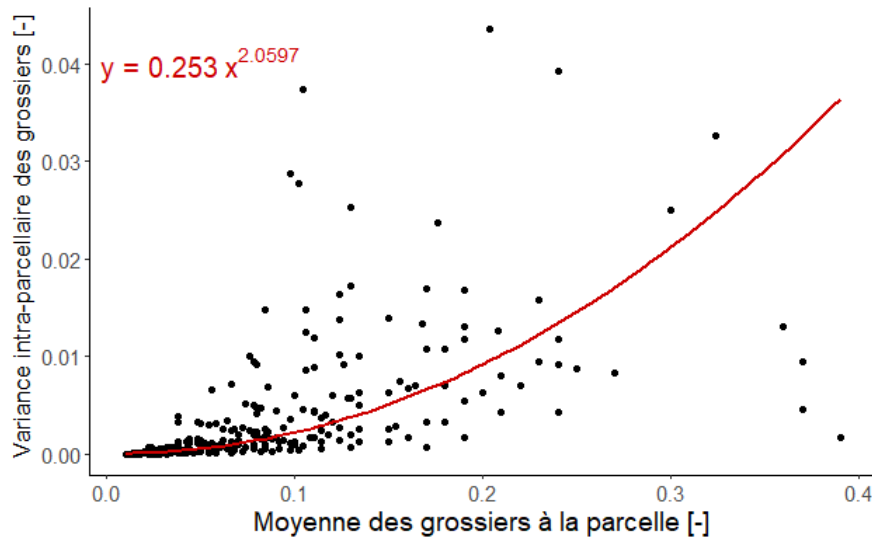


Figure 9 : Variance intra-parcellaire en fonction de la teneur moyenne en éléments grossiers. La ligne rouge est la régression de puissance dont l'équation est donnée en rouge.

Influence de la méthode de prélèvement et du diamètre des gouges sur le calcul du stock

Relation entre les masses obtenues par prélèvement mécanique selon les diamètres de gouges

Un résumé de la distribution des valeurs de SOC, densité apparente et teneurs en grossiers pour les 65 mesures mécaniques sur 0-30 cm est présenté dans le Tableau 2. Pour les teneurs en SOC, les extrêmes et les écart-types sont similaires selon le volume de la gouge tandis que les valeurs moyennes diffèrent mais de manière non-significatives (t-test : $t(36.49) = 1.3$, p-value = 0.2). Pour les densités apparentes, la moyenne des valeurs est significativement plus faible pour la gouge de 159 cm³ (t-test : $t(62.4) = 26.7$, p-value = 2e-16). On notera également que les densités sont anormalement faibles dans les deux cas. Cela indique (i) que les gouges sont faiblement remplies, (ii) que la gouge de 68 cm³ a tendance à mieux se remplir que celle de 159 cm³ et que c'est la partie supérieure de la carotte qui a tendance à manquer lors des prélèvements avec cette dernière puisqu'en théorie la teneur en carbone diminue avec la profondeur. Les teneurs en éléments grossiers sont plus faibles que pour le prélèvement manuel (voir Tableau 3).

Tableau 2 : Distribution de la teneur en SOC, la teneur en grossiers et de la densité des 65 mesures mécaniques sur la couche 0-30cm, après avoir retiré les terres noires. En vert les différences non-significatives, en rouge les différences significatives.

Variable	Volume de la gouge (cm ³)	Min	Max	Moyenne	Médiane	Ecart-type
SOC (%)	68	1.22	4.45	2.41	2.23	0.79
	159	1.29	4.46	2.14	1.94	0.73
	Indifférencié	1.22	4.46	2.33	2.05	0.78
Densité apparente (g.cm ⁻³)	68	0.37	0.73	0.57	0.59	0.08
	159	0.08	0.26	0.18	0.19	0.04
	Indifférencié	0.08	0.73	0.46	0.55	0.19
Teneur en éléments grossiers (%)	Indifférencié	1.2	24	5.2	3.9	4.4

Pour les 18 parcelles qui ont été échantillonnées avec les deux gouges, les comparaisons de paires pour les densités et les teneurs SOC sont visibles sur la Figure 10. Les densités ainsi que les teneurs en carbone sont supérieures pour la gouge de 68 cm³ de diamètre.

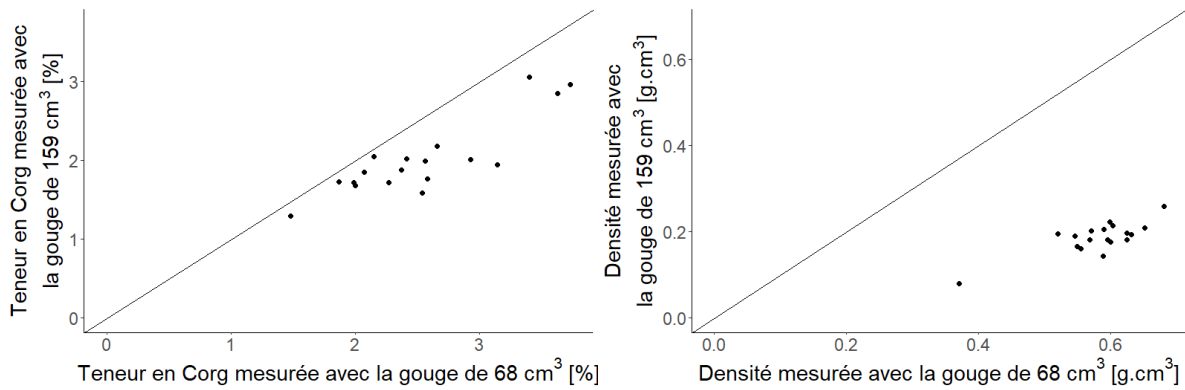


Figure 10. Comparaison de paires des valeurs de SOC et de densité mesurée aux mêmes parcelles avec les deux gouges mécaniques (N = 18). Les droites correspondent à la bissectrice.

Correspondance entre les prélèvements manuels selon le diamètre de gouge

Un résumé de la distribution statistique des teneurs volumiques en grossiers, pondérales en SOC et de densité apparente en fonction du diamètre de la gouge utilisée pour les 388 parcelles prélevées manuellement est donné dans le Tableau 3. Alors que les valeurs maximales et les écart-types sont sensiblement les mêmes selon la gouge pour les deux variables, on remarque une légère tendance selon le volume de la gouge pour les moyennes et médianes : elle est légèrement croissante pour la teneur en SOC et légèrement décroissante pour la densité. Les valeurs moyennes obtenues avec les gouges manuelles sont de l'ordre de grandeur attendu pour les sols suisses : deux t-tests ont été effectués pour comparer les données avec les valeurs de la base régionale HEPIA établies au cylindre. On ne relève pas de différence significative (voir Chap. 0).

Tableau 3: Distribution de la teneur en SOC, la teneur en grossiers et de la densité des 388 parcelles prélevées manuellement sur la couche 0-30cm, après avoir retiré les terres noires

Variable	Volume de la gouge (cm ³)	Min	Max	Moyenne	Médiane	Ecart-type
Teneur en SOC (%)	70	1.12	4.32	1.98	1.82	0.63
	125	0.96	4.45	2.17	2.01	0.69
	132	0.93	4.47	2.23	2.09	0.67
	Indifférencié	0.93	4.47	2.17	2.00	0.68
Densité (g.cm ⁻³)	70	0.88	1.59	1.23	1.24	0.16
	125	0.77	1.52	1.20	1.20	0.12
	132	0.79	1.61	1.12	1.13	0.12
	Indifférencié	0.77	1.61	1.17	1.17	0.13
Teneur en grossiers (%)	Indifférencié	1	39	7.83	5.80	6.60

On sait que la densité apparente est fortement dépendante de la teneur en SOC (Johannes et al. 2017; Manrique et Jones 1991). La Figure 11 montre les régressions linéaires pour chaque volume de gouge entre la densité apparente et la teneur en SOC. Visuellement, on peut voir que les pentes sont très proches et que les ordonnées à l'origine diffèrent un peu. On se demande donc s'il existe des différences statistiques significatives entre les gouges manuelles.

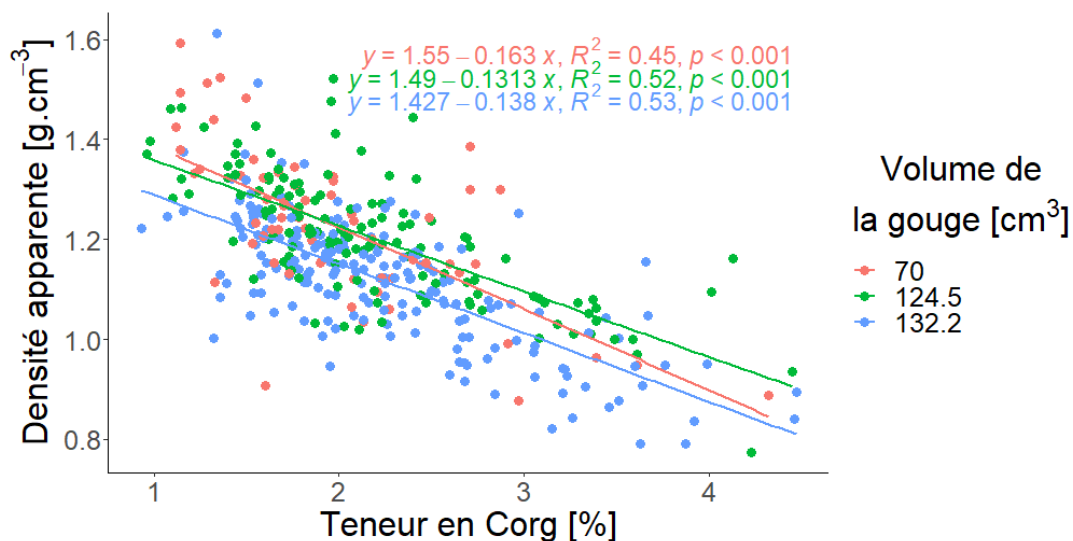


Figure 11. Relation entre densité et teneur en SOC selon le diamètre de la gouge manuelle utilisée pour la couche 0-30 cm

Les tests statistiques montrent que les pentes des régressions linéaires sont identiques de manière hautement significative, tandis que les ordonnées à l'origine sont légèrement différentes entre les gouges (Annexe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Nous avons comparé ces résultats à ceux de la relation de référence sur les sols de la région obtenue dans notre base de données à l'aide de prélèvements classiques (voir Chap. 0).

La régression Da-SOC rassemblant toutes les données récoltées manuellement est présentée en Figure 12.

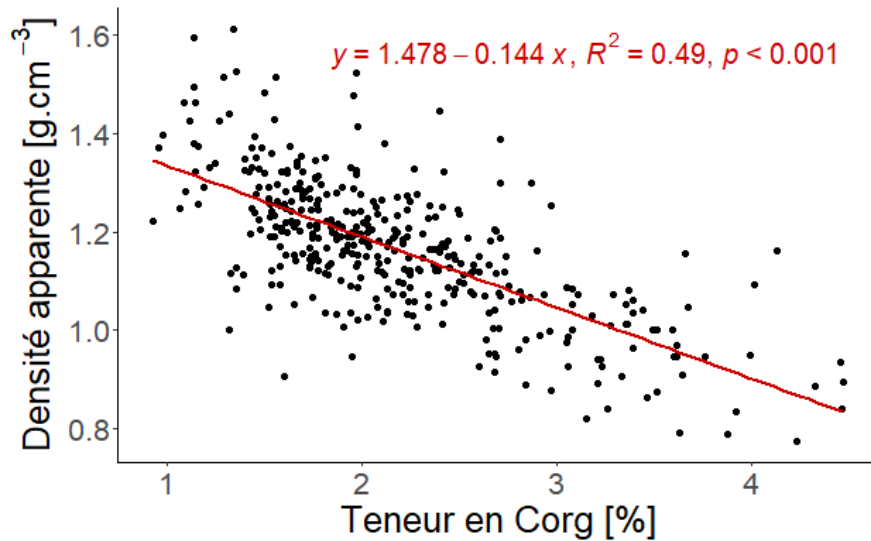


Figure 12. Relation entre densité apparente et teneur en SOC selon le diamètre de la gouge utilisée pour les 388 parcelles prélevées manuellement sur la couche 0-30 cm.

Correspondance entre les prélèvements mécaniques et manuels

En moyenne et sur l'ensemble des échantillons, les gougues mécaniques sous-estiment significativement la densité apparente comparativement aux gougues manuelles (t-test : $t(74.80) = -26.65$, $p = 2.2e^{-16}$) avec une moyenne de Da 59 % plus faible ; elles surestiment la teneur en SOC de manière non-significative (t-test : $t(80.99) = 1.59$, $p = 0.12$) avec une moyenne 5 % supérieure à celle obtenue avec les gougues manuelles.

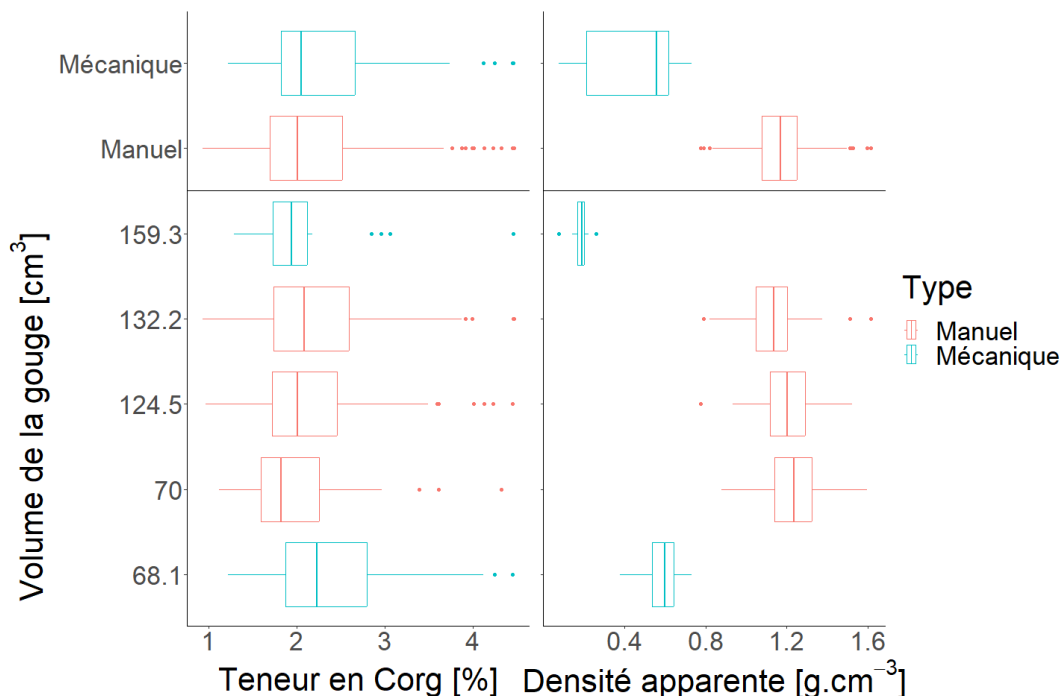


Figure 13 : Boite à moustaches des teneurs en SOC et des densités apparentes selon le mode de prélèvement (manuel ou mécanique) et selon le volume de la gouge (N manuel = 388, N mécanique = 65).

Pour les 38 parcelles échantillonnées selon les deux modalités, les comparaisons de paires confirment ce qui a été trouvé sur l'ensemble des échantillons : l'échantillonnage mécanique sous-estime grandement la densité et légèrement la teneur en SOC (Figure 14) et les valeurs trouvées ne sont pas réalistes (la moyenne $< 0.5 \text{ g cm}^{-3}$). Cela confirme que les gouges mécanisées ne se remplissent pas correctement, et que relativement à la gouge manuelle la partie inférieure de la carotte manque dans la gouge mécanisée.

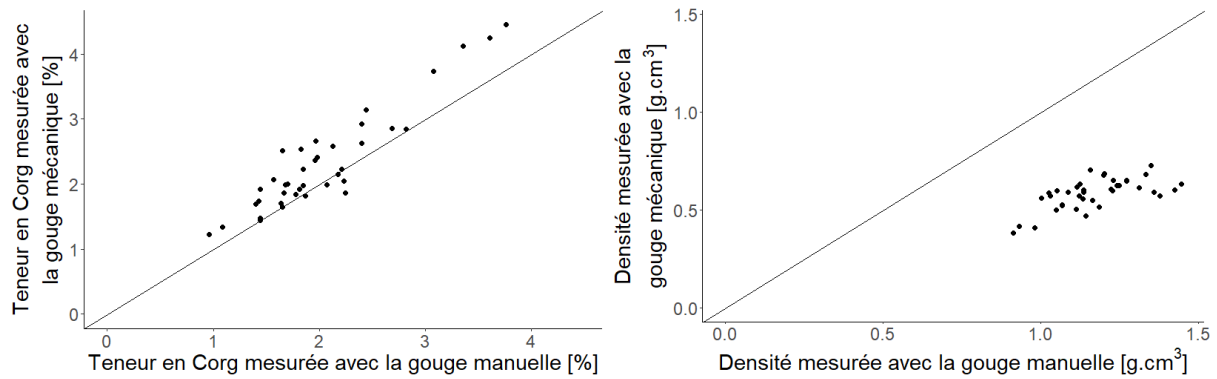


Figure 14 : Comparaison de paires des valeurs de SOC et de densité mesurée aux mêmes parcelles avec une gouge mécanique et manuelle (N = 38). Les droites correspondent au rapport 1:1.

Comparativement à des prélèvements manuels avec contrôle visuel du remplissage des gouges, le prélèvement par gouge mécanisée sous-estime la densité apparente d'un facteur 2. **Les prélèvements mécaniques ne peuvent pas être utilisés pour faire un suivi des stocks de carbone car ils ne permettent pas d'estimer les masses. Dans la suite de ce travail, seuls les résultats de prélèvements effectués manuellement seront considérés.**

Validation des prélèvements initiaux

La distribution des données de densité apparente en fonction de la teneur en SOC correspond bien à celle trouvée pour nos données HEPIA régionales (Figure 15). Les tests statistiques sur les régressions entre Densité apparente et SOC montrent que les pentes et les ordonnées sont statistiquement identiques.

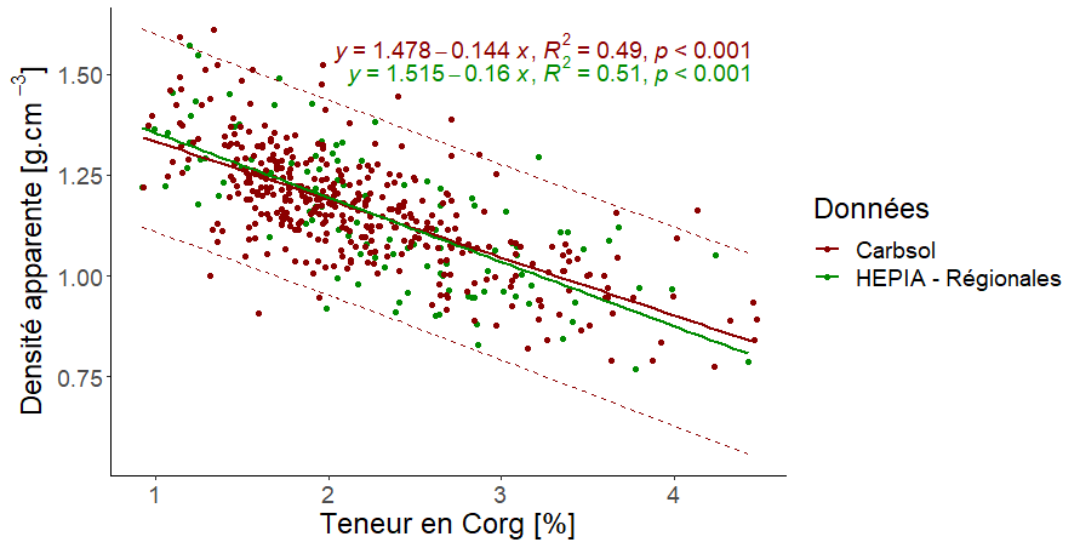


Figure 15 : Relation entre densité apparente et teneur en SOC sur la couche 0-30 cm pour les données récoltées manuellement dans le cadre de ce travail (N = 388) et pour les données régionales HEPIA par mesure directe (N = 120). Les droites pleines sont les régressions linéaires de chaque jeu de données, les droites en tirets rouges représentent l'intervalle de prédiction à 95 % des données HEPIA régionales.

Stock de carbone organique, erreur sur le stock et MDC initiaux des parcelles échantillonnées

Distribution des stocks observée

Pour les 388 parcelles échantillonnées manuellement sur 0-30 cm, on a calculé les stocks selon l'Équation 7. La distribution du stock et ses paramètres statistiques sont respectivement visibles sur la Figure 16 et le Tableau 4. Le stock moyen des 388 parcelles est de 67 t ha⁻¹.

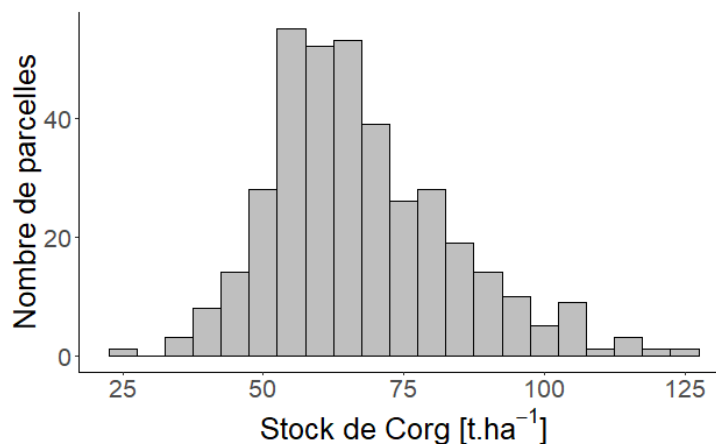


Figure 16. Distribution du stock de SOC pour les 388 parcelles prélevées manuellement sur 0-30 cm. Classes de 5 t ha⁻¹.

Tableau 4 : Caractéristiques de la distribution des stocks de SOC des 388 parcelles prélevées manuellement sur la couche 0-30 cm, après avoir retiré les terres noires (> 8% de MO).

	Min	Max	Moyenne	Médiane	Écart-type
Stock de SOC [t ha⁻¹]	25	125	67	65	16.3

Distribution des erreurs et MDC associés au calcul du stock de SOC initial

L'erreur sur le calcul de stock de SOC a été estimée grâce à l'Équation 11 en considérant la variance intra-parcellaire de la masse de SOC et de la teneur en grossier. Les données permettant le calcul de la variance de la masse de carbone à l'échelle d'une parcelle sont reprises du travail de diplôme de Lucien Schneeberger (2020). Pour le stock de carbone dans la couche 0-30cm, les écarts types à considérer sont soit de 5.5 t ha⁻¹ de carbone (écart-type intra parcellaire moyen S trouvé à partir de 150 sondages de stock de carbone), à utiliser dans l'Équation 8 avec N = 20, soit celui de la simulation des trajectoires pour n=20 (schéma en croix) soit :

$$\text{Cas 1 : } MDC = 1.96 \times 5.5 \times \sqrt{\frac{2}{20}} = 3.4 \text{ t ha}^{-1} \text{ de carbone pour la couche 0-30 cm}$$

$$\text{Cas 2 : } MDC = 1.96 \times 1.88 = 3.7 \text{ t ha}^{-1} \text{ de carbone pour la couche 0-30 cm}$$

Le calcul selon le cas 1 est le plus rigoureux et les deux valeurs sont très proches, nous retiendrons, en l'absence de grossiers, un MDC de 3.4 t ha⁻¹ pour la couche 0-30 cm.

La variance intra-parcellaire de la teneur en éléments grossiers est fonction de la teneur volumique moyenne en éléments grossiers, dont l'équation est donnée dans le chapitre 0, introduite dans l'Équation 11. En toute rigueur, dans l'équation 13, c'est le stock de la parcelle qui doit être introduit. Pour le stock moyen trouvé (67 t ha⁻¹), on peut calculer la variance du stock et donc le MDC (Équation 8) en fonction de la teneur en éléments grossiers. Le MDC en t ha⁻¹ du stock initial en fonction du pourcentage de grossiers à la parcelle, calculé avec l'Équation 8, est donné en Figure 17. Pour la valeur moyenne des teneurs volumiques en éléments grossiers des parcelles échantillonnées dans le cadre de ce travail, qui est de 7.6 %, le MDC du stock initial est de 3.5 t.ha⁻¹ soit 5 % du stock moyen sur 30 cm.

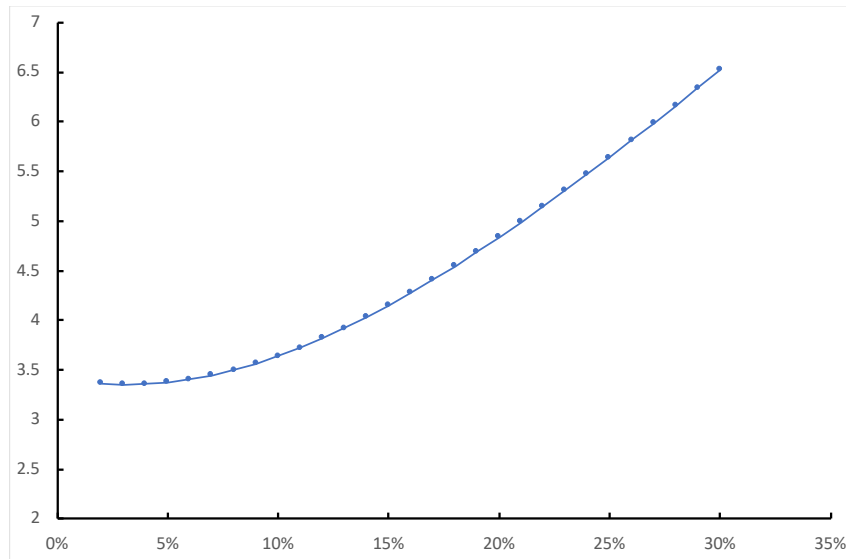


Figure 17. MDC en t/ha du stock initial de carbone sur la couche 0-30 cm selon le pourcentage volumique d'éléments grossiers dans la couche 0-30 cm.

Le MDC en années du stock initial selon le taux d'évolution annuel moyen, calculé avec l'Équation 14, est donné sur la Figure 18. Pour un stock moyen de carbone de 67 t ha^{-1} et un taux d'évolution annuel moyen de 5 ‰, le MDC du stock initial est de 10 ans.

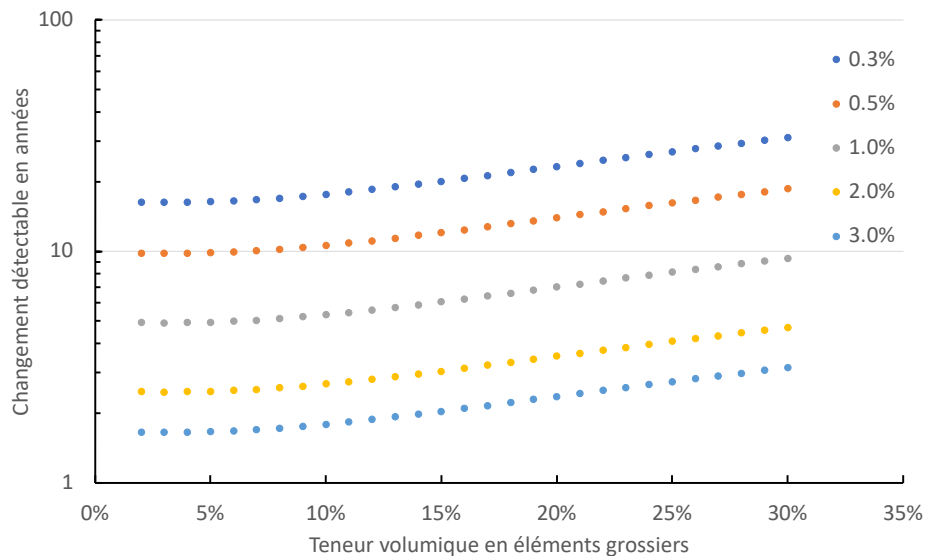


Figure 18. MDC du stock initial (0-30 cm) en années selon le pourcentage volumique d'éléments grossiers sur la parcelle et le taux d'évolution annuel moyen, pour un stock initial de 67 t ha^{-1} .

Calcul du stock au 2^{ème} passage

Caractéristiques de la couche 30-35 cm

Nous avons analysé les caractéristiques des couches 0-30 cm et 30-35 cm sur 33 parcelles, après prélèvement à la gouge manuelle. Les valeurs moyennes de la teneur en carbone organique et de la

densité apparente sont respectivement inférieure et supérieure à celles de l'horizon 0-30 cm, tandis que les écart-types sont inférieurs (Tableau 5).

Le stock de carbone pour la couche 30-35 cm est en moyenne de 6.7 t ha⁻¹ (Tableau 6 et Figure 19).

Tableau 5: Comparaison des caractéristiques des couches 0-30 et 30-35 cm

Couche de sol	Variabes	Moyenne	Ecart type
0-30 cm	Teneur en carbone organique (%)	2.19	0.73
	Densité apparente (g.cm ⁻³)	1.17	0.14
30-35 cm	Teneur en carbone organique (%)	1.07	0.48
	Densité apparente (g.cm ⁻³)	1.31	0.12

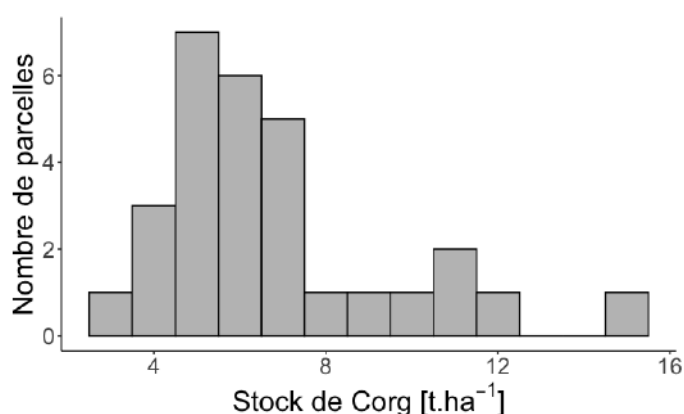


Figure 19. Distribution du stock de carbone organique dans la couche 30-35 cm. Largeur de classe : 1 t ha⁻¹

Tableau 6 : Caractéristiques de la distribution des stocks de SOC des 35 parcelles prélevées manuellement sur la couche 30-35 cm, après avoir retiré les terres noires

	Min	Max	Moyenne	Médiane	Écart-type
Stock de SOC [t ha ⁻¹]	3.2	15.4	6.7	5.9	2.6

1.1.2.1. Erreur associée aux différentes méthodes de calcul de l'évolution du stock

Erreur associée à l'estimation du stock sur la couche 30-35 cm :

A l'échelle intra-parcellaire, l'écart type moyen des valeurs de SOC dans la couche 30-35 (dérivé du travail de Bachelor de L. Schneeberger) est de 0.17 % m/m.

A l'échelle inter parcellaire, l'écart type (ci-dessus) des valeurs de SOC pour la couche 30-35 est de 0.5% m/m.

Erreur associée au calcul de l'évolution du stock de carbone selon la méthode ESM :

L'erreur sur l'estimation du stock pour un ha de la couche 30-35, en connaissant la teneur en SOC de cette couche, correspond à la variance du calcul de stock initial à laquelle s'ajoute celle du terme correctif, fonction de la masse de ce terme correctif et du volume de la gouge (Équation 10) :

$$VarStock_{Par} = VarStock_{0-30} + \left(\frac{3000}{V_{Gouge_n} \times N_{Piq}} \times (M_0 - M_n) * STDSOC_{corr} \right)^2$$

La variance additionnelle est faible, elle correspond à un écart type maximal de 0.57 t de carbone par ha pour un terme correctif maximal (égal à 10% de la masse du composite).

Erreur associée au calcul de l'évolution du stock de carbone selon la méthode ESM simplifiée :

La variance du terme correctif est cette fois plus élevée, ce qui correspond à un écart type maximal de 1.8 t de carbone par ha pour un terme correctif maximal (égal à 10% de la masse du composite). L'influence de la masse de correction sur le changement minimum détectable (0-30 cm, en t ha⁻¹) est présentée en Figure 20. On voit que cette influence est faible, avec un impact maximal de 0.16 t ha⁻¹. Cet impact est négligeable en termes de détectabilité des changements en années.

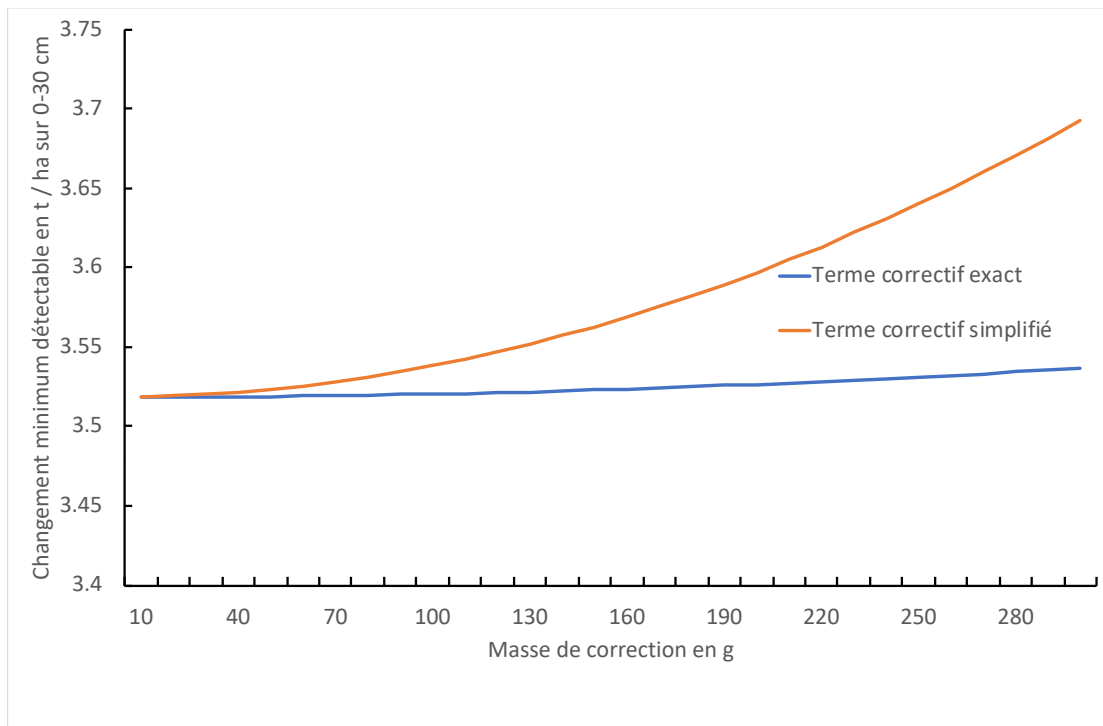


Figure 20. Minimum de changement détectable sur le stock de carbone sur 0-30 cm avec un terme correctif exact et avec la méthode ESM-simplifiée selon la masse de correction utilisée.

Erreur associée au calcul de l'évolution du stock de carbone calculé à profondeur constante et avec une densité apparente moyenne :

On calcule l'erreur associée au calcul du stock à profondeur constante avec l'Équation 12. La méthode simplifiée engendre une variance de 542.4 t².ha⁻² et donc un écart-type de 23.3 t.ha⁻¹, soit une erreur de plus de 8 fois l'erreur maximale attendue avec la méthode ESM-simplifiée.

Détection des erreurs de prélèvement et limites acceptables

Trois critères sont employés pour accepter / rejeter le résultat d'un prélèvement comme présenté en section 0.

Détection des erreurs de prélèvement selon un critère de changement maximal d'épaisseur de la couche 0-30 cm.

Si l'écart entre le poids de l'échantillon composite au temps T_0 et l'actuel est supérieur au 10 % de la valeur initiale M_0 , le prélèvement doit être refait. Première condition : pour les gouges de 70, 125 et 132 cm³ la masse moyenne de terre fine corrigée dans l'échantillon composite est respectivement de 1720, 3000 et 2960 g. Une variation de 10 % de ces masses moyennes représentent par exemple 172, 300 et 296 g. Puisque l'on effectue 20 piqûres par prélèvement, 10 % de variation représente en moyenne le poids de 2 piqûres.

Vérification basée sur la relation entre la densité apparente et la teneur en carbone organique

La deuxième condition sera vérifiée si la densité est comprise entre les intervalles de prédiction de l'équation de régression (Figure 21), soit cette régression $\pm 2\sigma$, avec $\sigma = 0.098 \text{ g.cm}^{-3}$ l'erreur résiduelle standard :

- $(1.478 + 2\sigma) - 0.144 \cdot \text{SOC} = \mathbf{1.674 - 0.144 \cdot \text{SOC}}$
- $(1.478 - 2\sigma) - 0.144 \cdot \text{SOC} = \mathbf{1.282 - 0.144 \cdot \text{SOC}}$

Ces bornes sont représentées sur la Figure 21 ci-dessous :

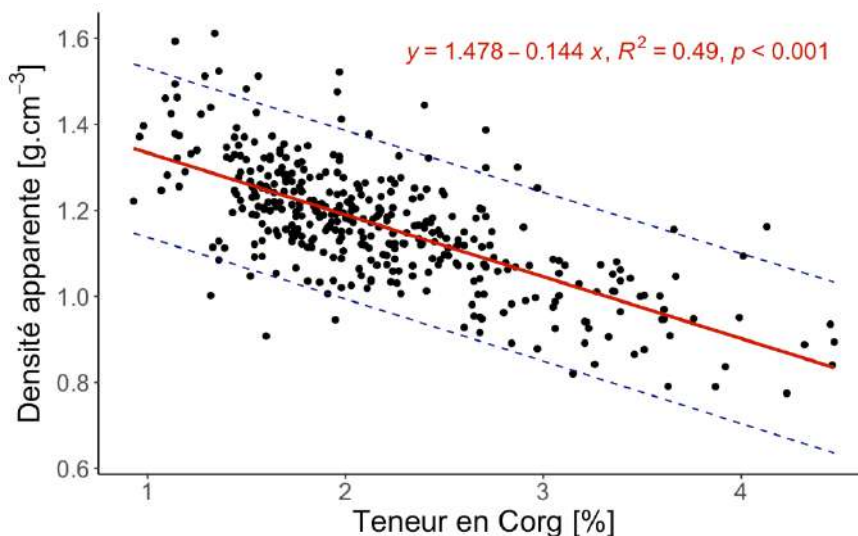


Figure 21. Densité apparente du sol en fonction de la teneur en SOC pour les 388 prélèvements manuels. La droite en trait plein rouge est la régression linéaire dont l'équation est donnée en rouge également. En tirets bleu, intervalles de prédiction à 95% $2X\sigma$ l'erreur résiduelle standard ($\sigma = 0.098 \text{ g.cm}^{-3}$).

Si la densité apparente sort des intervalles de prédiction à 95% de cette relation, il sera demandé de refaire le prélèvement.

Vérification basée sur le modèle d'estimation des taux annuels tiré de (Dupla et al., 2022)

La troisième condition sera vérifiée si la différence entre le taux d'évolution observé ($T_{X_{obs}}$) et le taux d'évolution prédit par le modèle de séquestration (Équation 16), est comprise dans l'intervalle de prédiction à 95% de l'équation de régression (donnée sur la Figure 22) $\pm 2\sigma$, avec $\sigma = 5.3279\%$ l'erreur résiduelle standard.

- $(-0.508 + 2\sigma) + 0.657 * T_{X_{obs}} = \mathbf{10.148 + 0.657 * T_{X_{obs}}}$
- $(-0.508 - 2\sigma) + 0.657 * T_{X_{obs}} = \mathbf{-11.164 + 0.657 * T_{X_{obs}}}$

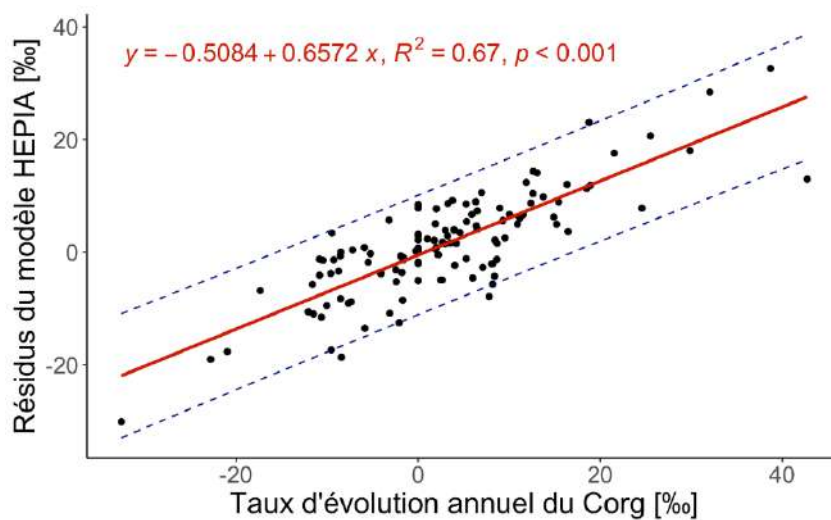


Figure 22. Résidus du modèle HEPIA du taux d'évolution annuel du SOC en fonction du