

## ETUDE DU DEFICIT DE CARBONE ORGANIQUE DES SOLS VAUDOIS, TAUX D'EVOLUTION ET RELATION AVEC LES PRATIQUES AGRICOLES

### RAPPORT D'ETUDE FINAL

Sur mandat du canton de Vaud, section Sols de la Direction générale de l'environnement, Direction des ressources et du patrimoine naturels, Division géologie, sols et déchets (DGE-DIRNA-GEODE/Sols), de la Division Air, climat et risques technologiques (DGE-DIREV/Climat) et de la Direction générale de l'agriculture, de la viticulture et des affaires vétérinaires, Direction de l'agriculture, de la viticulture et des améliorations foncières (DGAV-DAGRI).

HEPIA – Groupe sols et substrats

Pascal Boivin, Professeur

Karine Gondret, adjointe scientifique, Xavier Dupla et Téo Lemaître, assistants de recherche.

Genève, le 11.02.2021



## TABLE DES MATIERES

1	Objectifs .....	7
2	Estimation du potentiel de séquestration en équivalent CO <sub>2</sub> .....	8
2.1	Méthodologie .....	8
2.2	Sources d'imprécision et sous-estimation du potentiel de sequestration .....	9
2.3	teneurs en matière organique sur Vaud en Grande culture - Données utilisées .....	10
2.4	Les rapports de matière organique sur argile (MO/Argile) en Grande culture sur Vaud .....	14
2.5	Déficit de Matière Organique observé en grandes cultures.....	16
3	Taux d'évolution annuel des teneurs en matière organique (MO) .....	18
3.1	Données disponibles et distribution des Taux d'évolution.....	18
3.2	Tendance temporelle des taux d'évolution.....	20
4	Discussion et conclusions partielles .....	22
5	Typologie des exploitations et facteurs de séquestration.....	23
5.1	Information collectée .....	23
5.2	RElations entre les pratiques et les taux de séquestration .....	25
5.3	Typologie des systèmes de culture et relation à la dynamique du carbone.....	31
5.4	Les stratégies de séquestration .....	34
5.5	Réversibilité de la séquestration de carbone .....	36
5.6	Recommandations.....	37
6	Dimension économique de la séquestration.....	40
7	Comparaison au système genevois .....	44
8	Références.....	46
9	Annexes .....	48

## ABBREVIATIONS

2

Route de Presinge 150 – CH-1254 Jussy-Genève



AB : Agriculture Biologique

ABC : Agriculture Biologique de conservation

AC : Agriculture de conservation (des sols), parfois appelée Agriculture de Régénération

Corg : carbone organique du sol, voir MO

GC : Grandes cultures

IPCC : Intergouvernemental panel on climate change

MO : Matière organique du sol. Correspond aux débris végétaux et animaux (microbiens) transformés en humus. La matière organique est composée à 60% de carbone, appelé Carbone Organique

PER : Prestations écologiques requises. Ce sont les prestations agro-environnementales requises par la LAgr, en vue de préserver les ressources, en sol en particulier, et requises pour prétendre aux paiements directs.



## RESUME EXECUTIF

Les teneurs en matière organique (MO) et en argile des 20 cm supérieurs des sols en grandes cultures et en prairies permanentes ont été obtenues à partir des archives d'analyses PER. Après contrôle de qualité, 2'202 analyses obtenues après 2006 pour les surfaces en grandes cultures ont été prises en compte pour les calculs effectués.

L'écart entre le rapport MO/Argile trouvé et la valeur minimale nécessaire de 17%, du point de vue de la qualité des sols, a permis d'évaluer le déficit en matière organique des sols pour chaque parcelle. Rapporté à la proportion de parcelles déficitaires et en tonnes de CO<sub>2</sub>, ce déficit est de 2'000'000 tonnes (annexe 3) pour les grandes cultures de la SAU. Il représente un objectif minimal de séquestration puisqu'il doit être comblé pour rendre une vulnérabilité acceptable aux sols (ce qui inclut leur adaptation au changement climatique). Les options de calcul retenues ont toutes été choisies dans une approche conservatrice, ce qui revient le cas échéant à sous-estimer le déficit et donc le potentiel de séquestration. Par exemple, viser un rapport MO/Argile de 20% est possible (et souhaitable), le déficit par rapport à cet objectif est alors de 4'000'000 de tonnes de CO<sub>2</sub>.

Les taux d'évolution des teneurs en MO constatés varient de -50‰ à +50‰. Alors que les taux moyen et médian étaient négatifs (-5‰) il y a 20 ans, ils deviennent nuls en 2005 puis positifs, selon une tendance hautement significative et linéaire. Après analyse des pratiques agricoles sur 60 exploitations, on met en évidence que les taux d'évolution des teneurs en carbone organique s'expliquent par les pratiques agricoles relevant des piliers de l'agriculture de conservation, en particulier la réduction du travail du sol, la couverture du sol et l'intensité des couverts végétaux. La fumure organique et les exportations jouent aussi un rôle quoique moins prépondérant. On peut rattacher l'évolution temporelle :

- Au « renforcement des prestations écologiques en agriculture lors du réaménagement de la législation agricole, à travers l'article 76 de la LAgr et de l'entrée en vigueur de l'OPD (1er janvier 1999). Les agriculteurs doivent, pour recevoir des paiements directs, remplir les prestations écologiques requises (PER) », qui règlementent les pratiques agricoles notamment en matière « d'assolement régulier »<sup>1</sup>, de prairies et de « couverture optimale du sol »<sup>2</sup>.
- Aux choix individuels des exploitants<sup>3</sup>, qui cherchent à conserver/protéger/améliorer la qualité de leurs sols, comme il est constaté pour le canton de Genève (Boivin et al., 2021).

---

<sup>1</sup> Les exploitations comptant plus de 3 ha de terres ouvertes doivent aménager au moins quatre cultures différentes chaque année (OPD art.16) (entré en vigueur au sein de l'Ordonnance du 7 décembre 1998) versés dans l'agriculture.

<sup>2</sup> « Les exploitations qui disposent de plus de 3 ha de terres ouvertes doivent semer l'année en cours une culture d'automne, une culture intercalaire ou des engrais verts sur chaque parcelle comprenant des cultures qui sont récoltées avant le 31 août » (OPD, art.17). Le principe de « protection appropriée du sol » est initialement entré en vigueur au sein de l'Ordonnance du 7 décembre 1998 au chapitre 5. La version de 1998 diffère légèrement de celui qui est cité ci-dessus mais le principe de couvrir le sol en hiver était déjà présent et ancré dans le texte de 1998 (voir annexe 3).

<sup>3</sup> Techniques culturales simplifiées, Agriculture de Conservation, diversification des cultures et des couverts, cultures associées, cultures dérobées, sont autant de pratiques dont il est montré qu'elles favorisent la séquestration de carbone (plan climat Genève et (Kravchenko *et al.*, 2019; Jian *et al.*, 2020).



L'objectif de séquestration total de 2'000'000 t de CO<sub>2</sub> en 2050 correspondrait à un taux de séquestration de 10‰ qui paraît un minimum largement atteignable compte tenu de la tendance observée. Cet objectif peut être revu à la hausse, d'une part car le 17% de rapport MO/Argile n'est pas une limite supérieure mais bien un minimum agronomique raisonnable, d'autre part parce que le taux d'évolution moyen peut largement dépasser 15‰ du point de vue technique. Les objectifs devraient être maximisés selon que l'échelle de travail soit cantonale ou par exploitation (4'000'000 de tonnes avec des taux de 20‰, voire jusqu'à 6'000'000 avec un objectif de teneur en MO/Argile de 24 %).

Une analyse des pratiques associées aux différents taux constatés permet de dégager les options les plus payantes économiquement et en termes de séquestration pour permettre une séquestration maximale, en quantité et en vitesse. Les techniques les plus efficaces relèvent au premier rang des couverts végétaux fréquents, intenses et à forte diversité. C'est donc la première mesure à soutenir. La fumure organique et la conservation des pailles sur site jouent aussi un rôle positif. A l'inverse, la pratique du labour et du travail du sol a un puissant effet négatif, en particulier parce que cela limite la possibilité de couverts végétaux intenses (retard dans l'implantation et séchage du lit de semence). Il est possible de séquestrer sous labour lorsque les teneurs en MO sont très faibles, mais il n'est pas possible d'atteindre le potentiel de séquestration minimal sans abandonner le labour, dont l'effet négatif augmente avec le rapport MO/Argile des sols. Les situations intermédiaires, avec des labours réduits ou des techniques culturales simplifiées, offrent un potentiel modéré dépendant de l'intensité avec laquelle les opérations de travail du sol sont compensées ou non par de la fumure organique et des couverts fréquents. L'échantillon d'exploitations observé se distingue par l'absence des couverts dérobés<sup>4</sup> dont l'effet séquestrant additionnel puissant est démontré sur le canton de Genève, qui soutient financièrement cette pratique.

Une typologie de 5 catégories d'exploitations a pu être dégagée, avec 3 groupes séquestrant du carbone dans leurs sols et deux groupes en émettant, avec des valeurs seuil les distinguant sur le travail du sol, les couverts végétaux et la gestion organique. Les groupes émettant fortement représentent 30% des exploitations de l'échantillon. Le gain de performance à l'échelle cantonale dépendra de la possibilité de convertir les groupes émetteurs et d'améliorer les groupes séquestrant, ce qui passe par une adoption plus poussée des piliers de l'agriculture de conservation. Cette conversion est plus complexe pour les productions biologiques (c'est le défi de l'ABC, Agriculture Biologique de conservation (Fleury *et al.*, 2011)) et les cultures spéciales (maraichères notamment). Les progrès se faisant dans ces domaines ouvriront des perspectives supplémentaires.

Les marges brutes par hectare des exploitations sont insensibles aux taux de séquestration constatés et aux mesures correspondantes. Autrement dit, les politiques publiques en la matière n'apportent pas aujourd'hui d'avantage comparatif aux exploitations qui séquestrent du carbone organique. Les mesures et méthodes de mise en œuvre correspondantes sont proposées en fin de cette étude.

Les mesures préconisées permettent également de préparer les sols aux effets du changement climatique, notamment d'atténuer les périodes sèches par l'augmentation des réserves en eau et inversement d'atténuer les périodes de fortes précipitations par des sols possédant une meilleure capacité d'infiltration et une meilleure résistance à l'érosion. C'est pourquoi elles sont hautement recommandées par les auteurs de ce rapport et la littérature internationale,

---

<sup>4</sup> Couvert mis en place entre une culture principale récoltée en été et une culture d'automne.



contrairement aux mesures d'enfouissement de matières organiques telles que des biochars ou des labours profonds. Ces derniers font courir de graves risques aux sols.

Enfin, le changement climatique, par la hausse des températures, pourrait contribuer à diminuer les teneurs en matière organique des sols dans les systèmes conventionnels. Bien que ce ne soit pas dans des proportions comparables avec les taux de séquestration proposés, cela renforce la nécessité de prendre ces mesures.



## 1 OBJECTIFS

### CETTE ETUDE VISE :

- À **évaluer le déficit en matière organique (MO) des sols cultivés** du canton de Vaud, en se focalisant sur les grandes cultures et en se référant à un minimum à atteindre pour assurer durablement la qualité des sols. De ce déficit est déduit un potentiel de séquestration de CO<sub>2</sub> si les méthodes permettant de restaurer les teneurs en matière organique des sols sont mises en œuvre.
- À **évaluer à quelle vitesse évolue actuellement la teneur en matière organique des sols** en grandes cultures. Cette information ouvre la voie :
  - à une **estimation de la vitesse à laquelle le déficit peut être comblé** et
  - à l'**identification des pratiques agricoles qui permettront de le faire**, dans une perspective de lutte contre le réchauffement et d'adaptation au changement climatique (meilleure résilience et résistance des sols, réduction des déficits hydriques, de l'érosion et des risques d'inondation).
- A définir une **typologie d'un réseau d'exploitations** sélectionnées pour représenter le territoire, les situations agronomiques et pédologiques. La typologie est formulée à partir de leurs pratiques répertoriées sur une période de 10 années.
- A **identifier et évaluer le potentiel de séquestration annuel de carbone organique (Corg), en relation avec les pratiques**, en prenant une ou deux parcelles test par exploitation. L'effet des pratiques et de leur combinaison, en termes de flux de carbone entrant ou sortant, est évalué.
- A proposer des **mesures et une stratégie avec des objectifs chiffrés pour la séquestration de Corg**.
- A **discuter de leur mise en œuvre et des tendances à long terme, notamment sur la réversibilité du processus**.

### RAPPELS

La matière organique des sols (MO) provient des résidus végétaux et animaux qui évoluent naturellement sous forme *d'humus* c'est à dire de composés organiques condensés, généralement liés à la matière minérale. Cette matière organique a en moyenne dans les sols, un âge élevé (environ 3000 ans) mais certaines formes apparaissent en une année.

La MO est formée en grande partie de Carbone (C) que l'on appelle communément Carbone organique (Corg) par opposition au carbone minéral présent dans les minéraux carbonatés. La MO est formée à près de 60% de carbone : les masses de MO et de Corg dans les sols sont liées par :  $MO = Corg \times 1.725$ .

Les gaz à effet de serre sont exprimés en équivalent CO<sub>2</sub>. Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) en est le composant principal. Une tonne de Corg équivaut à  $44/12=3.66$  tonnes de CO<sub>2</sub> et 1.725 tonnes de MO.

Dans la suite de ce travail, le déficit pondéral en MO est converti en équivalent CO<sub>2</sub>.



## 2 ESTIMATION DU POTENTIEL DE SEQUESTRATION EN EQUIVALENT CO<sub>2</sub>

### 2.1 METHODOLOGIE

- On utilise les résultats des analyses PER archivés chez Sol Conseil. Une étude préalable sur Genève a montré que ces résultats sont fiables pour ce type d'étude (Boivin et al., publication soumise, (Deluz et al., 2019)). L'étude porte donc sur la teneur en matière organique des 20 premiers cm du sol.
- Les informations concernant les pratiques agricoles mises en place par les agriculteurs ont été obtenues via la réalisation d'entretiens semi-dirigés basés sur les données de leurs carnets des champs.
- L'analyse du Corg (en %) est obtenue à l'aide du bichromate de potassium, les analyses dites « visuelle » ou « tactile » n'ont aucune fiabilité et ne peuvent donc pas être utilisées dans ce type d'étude.
- L'analyse de la teneur en argile (en %) est faite par sédimentation.
- Le déficit en matière organique est estimé par l'écart à la valeur de référence publiée par (Johannes *et al.*, 2017), soit un rapport de teneur en matière organique sur teneur en argile (MO/Argile) de 17%. Le déficit est donc considéré comme nul pour les parcelles dont le rapport MO/Argile dépasse 17%. Pour les autres, le manque de carbone organique pour atteindre ce rapport cible est quantifié.
- Il est important de noter qu'un **rapport MO/Argile de 17% est un objectif minimaliste** pour assurer une gestion durable de la qualité des sols. Il ne représente en aucun cas un maximum, comme le montrent notamment les valeurs collectées dans ce rapport. Des sols cultivés atteignent la valeur optimale de 24 % au-delà de laquelle nous pensons que des teneurs supplémentaires n'apportent plus rien en termes de fonctionnalité. **La valeur de référence utilisée est donc un objectif minimaliste qui peut être ré-évalué à la hausse.** En conséquence, les déficits estimés sont minimisés.
- Les sols sableux ou les sols organiques ne sont pas pris en compte dans cette étude. Ils représentent des situations très particulières : objectif de conservation de la MO pour les premiers, séquestration impossible pour les seconds.
- On se limite ici au cas des **grandes cultures** qui représentent le plus fort potentiel de séquestration. Les cultures spéciales (viticulture, maraichère et arboriculture) ne sont pas intégrées. Le cas des prairies permanentes est documenté en annexe 2.
- Afin d'avoir une vision actuelle du déficit en matière organique des sols agricoles, nous n'avons considéré que les analyses faites **après 2006** (2006-2019). Les données disponibles ont été filtrées selon différents critères (ci-dessous) en éliminant notamment (a) les analyses de MO jugées trop imprécises qui n'ont pas été réalisées à l'aide de la méthode Walkley-Black (ex : détermination visuelle ou tactile), (b) les analyses de teneur en argile qui n'ont pas été réalisées par sédimentation (ex : test tactile), (c) les valeurs suspectes au sens statistique (valeurs marginales) (d) les teneurs en argile inférieures à 10% (sols sableux) pour lesquelles la séquestration



a peu de sens<sup>5</sup> et (e) les teneurs en MO correspondant aux tourbes et terres noires<sup>6</sup> (prises aux teneurs > à 5.5% généralement comprises dans les valeurs marginales). Ces critères sont redondants et correspondent à peu d'exclusions (ci-après).

- Pour le calcul de l'évolution des teneurs en Corg dans les sols nous avons pris l'ensemble des analyses de Corg disponible de **1989 à 2019**.
- Dans cette étude, la surface des parcelles considérées n'est pas utilisée car non encore disponible. Les calculs sont effectués en proportion du total des parcelles, ce qui sur le grand nombre (> 2000) n'a pas d'influence sur le résultat comme montré sur le canton de Genève (Dupla, 2019). Le déficit moyen constaté est ensuite rapporté à la fraction de la surface en grandes cultures (GC) du canton (55'423 ha selon Agrinfo) réduite au pourcentage des parcelles dont le rapport MO/Argile est inférieur à 17% (soit 80% des parcelles ci-après).
- Une teneur moyenne en éléments grossiers de 10% a été appliquée (ce qui réduit le volume de terre fine pris en compte et donc le potentiel de séquestration calculé), elle correspond à nos données moyennes pour l'horizon 0-20 cm (93% de terre fine en moyenne).

## 2.2 SOURCES D'IMPRECISION ET SOUS-ESTIMATION DU POTENTIEL DE SEQUESTRATION

D'une façon générale, l'approche a été conservatrice et les choix méthodologiques ont donc toujours privilégié une éventuelle sous-estimation du déficit. Outre les facteurs de sous-estimation relevés ci-dessus, il faut encore noter :

- Dans les données cantonales les parcelles en GC et en maraîchage ne sont pas distinguées. Dans cette étude les parcelles maraîchères sont exclues par les critères d'exclusion ci-dessus (terres sableuses, terres noires etc.). La capacité de séquestrer du carbone en pleine terre en culture maraîchère est moins documentée que dans le cas des GC.
- La densité apparente (Da) du sol sur 0-20 cm a été estimée avec précision grâce à nos bases de données (ci-dessous). Nous avons volontairement utilisé la valeur à la capacité au champ, soit sol gonflé, ce qui sous-estime le déficit en MO et donc le potentiel de séquestration.
- Beaucoup de parcelles contiennent des petites zones de « Terres Noires ». Les quelques points correspondants prélevés pour former l'échantillon composite (prélèvement pour l'analyse PER) conduiront à une surestimation de la teneur moyenne de MO de la parcelle. Nous suspectons ce biais compte tenu des relativement fortes teneurs médianes trouvées, par comparaison avec des cantons herbagers d'altitude comme le Jura (ci-après). Ceci conduirait encore une fois à une sous-estimation du potentiel de séquestration et pourra être testé ultérieurement.

---

<sup>5</sup> Les sols sableux contiennent très peu d'argile. Or c'est la complexation de la MO sur les argiles qui la protège et permet de la séquestrer. Il est possible d'apporter de la MO en quantité sur des sols sableux, mais elle sera rapidement perdue (oxydée par les micro-organismes).

<sup>6</sup> Dont la problématique est non pas d'augmenter les teneurs (le rapport MO/Argile y est bon), mais de stopper la perte de MO par minéralisation. Cf études spécifiques dans le cadre du PNR68.



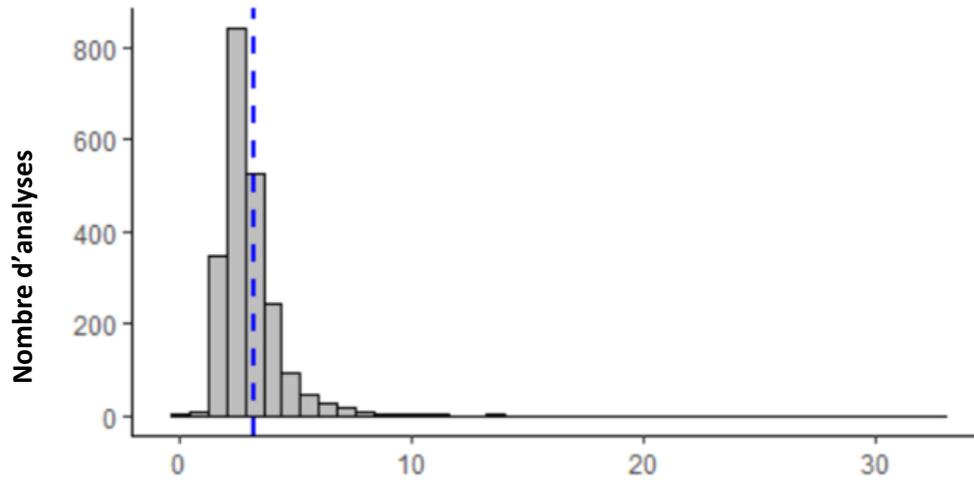
- Le déficit n'est calculé que pour les 20 premiers cm de sol. Il n'est pas clair aujourd'hui si les 10 cm suivants peuvent contribuer ou non.
- Le rapport MO/Argile de 17% visé n'est pas un plafond, mais un minimum exigible en termes de qualité des sols. Viser 20% ou 23% serait également légitime, bien que plus exigeant sur les méthodes de culture associées, et reviendrait à doubler ou tripler, respectivement, le potentiel calculé ici.
- La nécessité de sélectionner les données analytiques obtenues avec un protocole analytique fiable plus coûteux que les analyses visuelles ou tactiles, a probablement eu pour effet de sélectionner les agriculteurs les plus attentifs à leur teneur en MO. Dans ce cas l'échantillonnage d'agriculteurs conduit également à une sous-estimation du déficit.
- Les cultures spéciales ne sont pas prises en compte faute de données techniques suffisantes sur les possibilités de séquestrer dans ces conditions. Mais cette démarche se développe, ce qui accroît d'autant le potentiel de séquestration (Payen *et al.*, 2020).

### 2.3 TENEURS EN MATIERE ORGANIQUE SUR VAUD EN GRANDE CULTURE - DONNEES UTILISEES

Le laboratoire Sol Conseil nous a livré, avec l'accord de la DGAV, une base de données de 32'236 analyses de sol étalées de 1989 à 2019. Parmi celles-ci, **5'711 analyses de sol comprennent une mesure de matière organique** (méthodes Walkley et Black) **et une mesure de pourcentage d'argile** (analyse mécanique de la granulométrie par sédimentation (méthode de la pipette)). Il y a un total de 5'425 analyses en « Grande culture » (GC) et 286 en « Prairie permanente » (PP). Les analyses faites sur des parcelles maraichères sont comprises dans la catégorie « grandes cultures » au sein de la base de données « Sol Conseil ».

Pour une vision actuelle du rapport MO/Argile, nous avons sélectionné uniquement les analyses de sol ayant été faites après 2006. Soit un total de 2'202 analyses en « Grande culture » (GC) et 115 en « Prairie permanente » (PP).

Ces teneurs ont une distribution qui s'étire vers les valeurs hautes correspondant à des terres noires (les tourbes ont été exclues au préalable) (Figure 1 et Tableau 1). Elles ont été filtrées sur la base de la normalité (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Un total de 112 valeurs extrêmes sur 2'202 ont ainsi été détectées, ce qui concrètement coupe les hautes valeurs au-dessus de 5.5%. La teneur médiane est alors estimée à 2.7% et la moyenne à 2.84% (Tableau 2 et Figure 3). D'après le test de Shapiro-Wilk l'hypothèse de normalité de la population restante (Figure 3) est **rejetée car la p-value est nettement inférieure à 0.05**. Les teneurs en matière organique des 2'090 analyses ne suivent pas une loi normale. En conséquence, la valeur médiane devrait être préférée à la moyenne (Tableau 2).



**Teneurs en matière organique sur le canton de Vaud (%)**

Figure 1 : histogramme de la distribution des teneurs en matière organique (%) des parcelles en grandes cultures sur Vaud avant élimination des fortes valeurs (la ligne en pointillés bleu indique la moyenne : 3.15%). D'après le test de Shapiro-wilk l'hypothèse de normalité est rejetée. Les teneurs en matière organique des 2202 analyses ne suivent pas une loi normale.

Tableau 1 : Paramètres de la distribution de la teneur en matière organique (en %) des grandes cultures sur Vaud (2'202 analyses)

	minimum	1 <sup>er</sup> quartile	médiane	moyenne	3 <sup>ème</sup> quartile	maximum
Valeur de MO en %	0.30	2.20	2.70	3.15	3.50	32.70

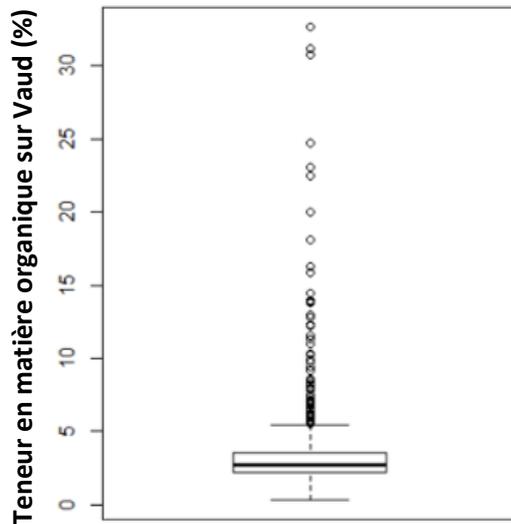


Figure 2 : Boite à moustache des teneurs en matière organique des parcelles en grandes cultures sur le canton de Vaud en %, avant élimination des valeurs extrêmes. La boîte représente l'intervalle interquartile, les tirets de part et d'autre de la boîte font 1.5 fois l'intervalle interquartile. Les valeurs atypiques sont représentées par les cercles, la barre noire représente la médiane.

Tableau 2 : Distribution de la matière organique (en %) des parcelles en grandes cultures sur Vaud après suppression des valeurs atypiques (2090 analyses).

	minimum	1 <sup>er</sup> quartile	médiane	moyenne	3 <sup>ème</sup> quartile	maximum
Valeur de MO en %	0.30	2.20	2.70	2.84	3.3	5.50

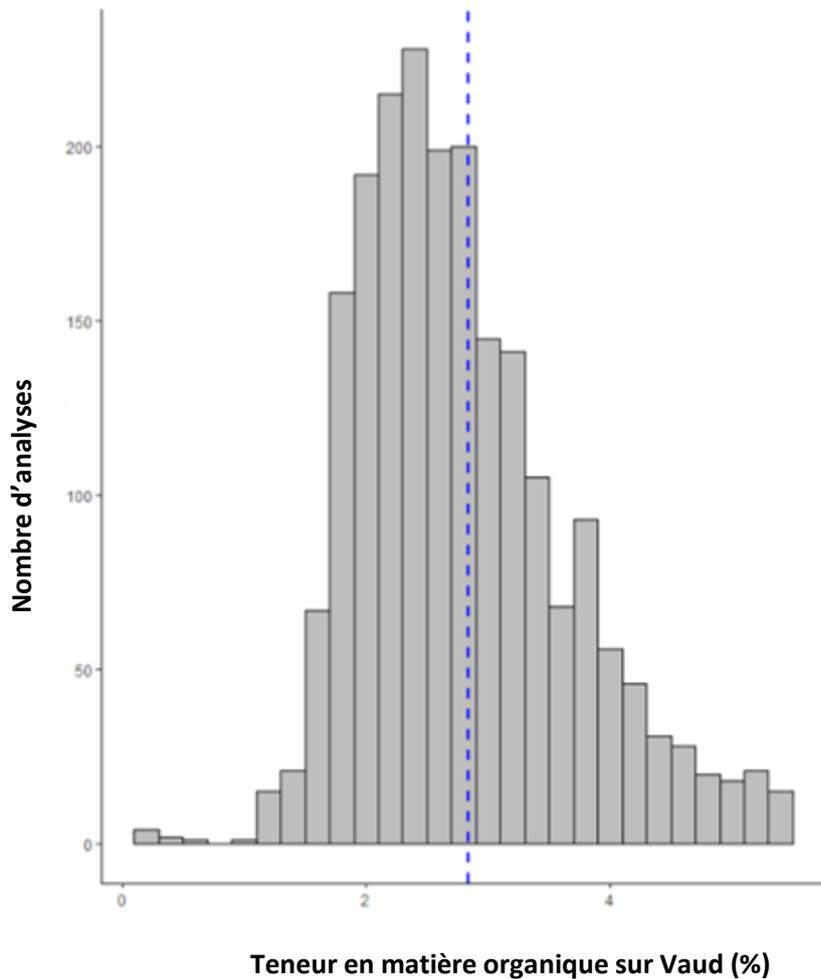


Figure 3 : histogramme de la distribution de la teneur en matière organique (%) pour les parcelles en grandes cultures sur Vaud après suppression des valeurs extrêmes (la ligne en pointillée bleu indique la moyenne : 2.84 %)



## 2.4 LES RAPPORTS DE MATIERE ORGANIQUE SUR ARGILE (MO/ARGILE) EN GRANDE CULTURE SUR VAUD

Les rapports MO/Argile ont été calculés à partir des 2'090 analyses (Figure 4) présentant des valeurs de MO inférieures ou égales à 5.5%. Le rapport médian est de 13.5% (Figure 5 et

Tableau 3) ce qui est élevé en comparaison des cantons du Jura (12%), et de Genève (10%), mais toujours très faible au regard de la valeur minimale de 17% pour des sols fonctionnels et non vulnérables.

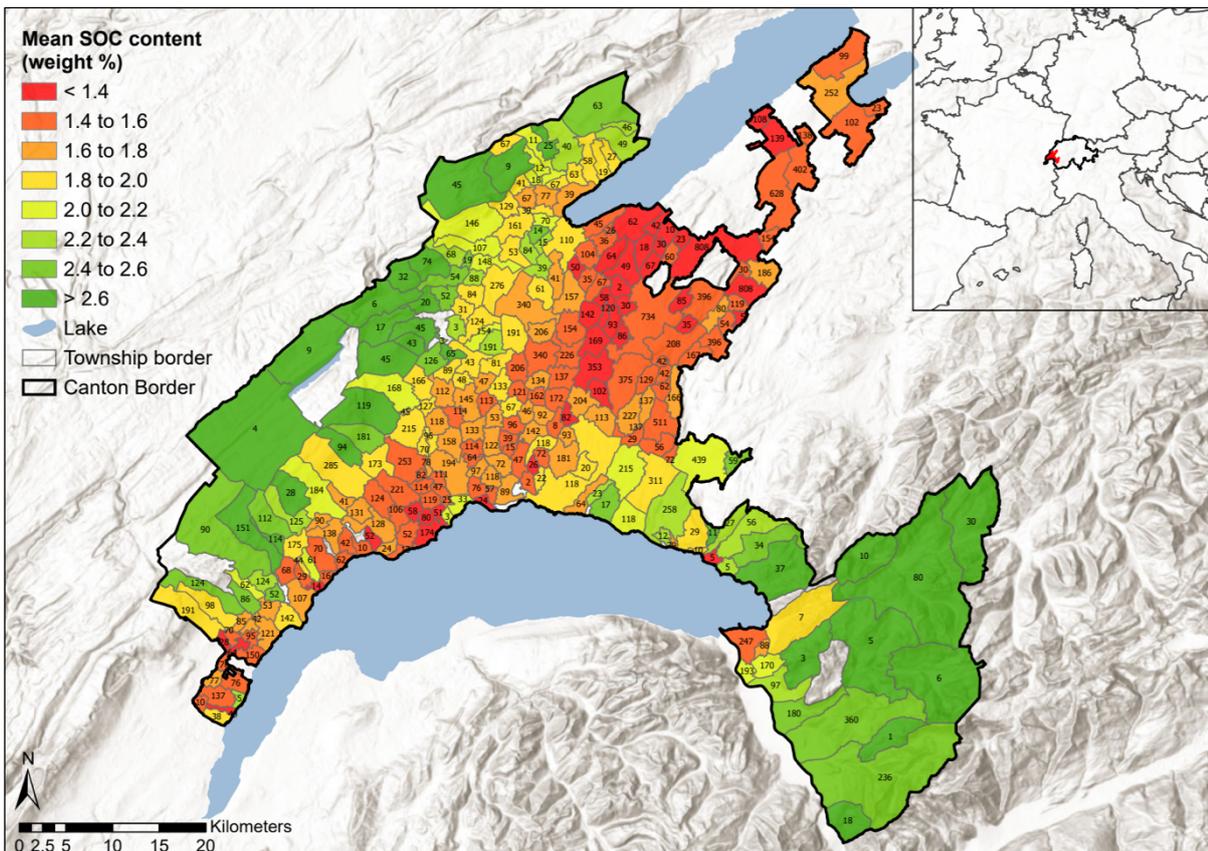


Figure 4 Localisation et teneurs en carbone organique des analyses de sol utilisées dans cette étude. Chaque commune est représentée par un polygone avec le nombre d'analyses fiables trouvées en son centre.

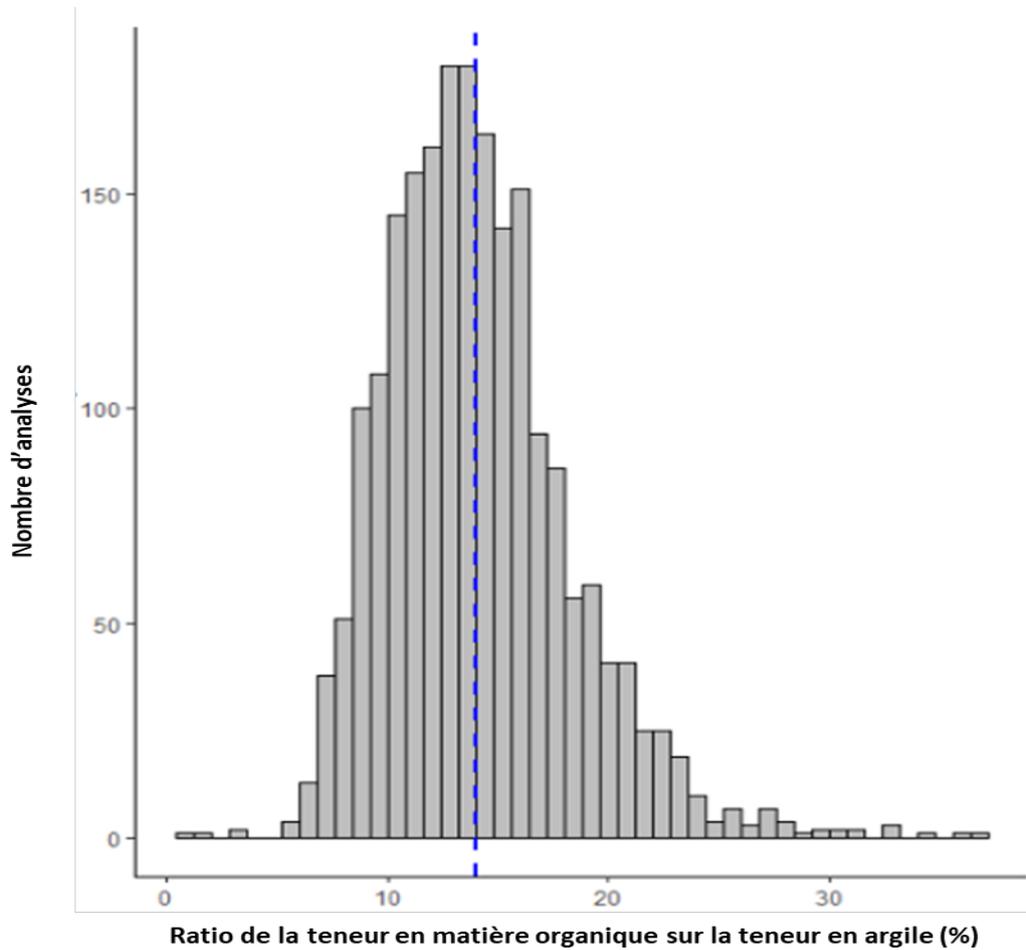


Figure 5 : histogramme de la distribution du rapport teneur en matière organique sur argile (en %) des parcelles en grandes cultures sur Vaud (la ligne en pointillée bleu indique la moyenne : 14.05 %, le pas est de 0.8). D'après le test de Shapiro-Wilk l'hypothèse de normalité est rejetée car la p-value est nettement inférieure à 0.05. Les rapports de MO/Argile des 2090 analyses ne suivent pas une loi normale.

Tableau 3 : Distribution du rapport teneur en matière organique sur argile (en %), parcelles en grandes cultures sur Vaud (2090 analyses)

	minimum	1 <sup>er</sup> quartile	médiane	moyenne	3 <sup>ème</sup> quartile	maximum
Valeur de MO/Argile en %	1.16	11.11	13.55	14.05	16.23	36.44



2.5 DEFICIT DE MATIERE ORGANIQUE OBSERVE EN GRANDES CULTURES

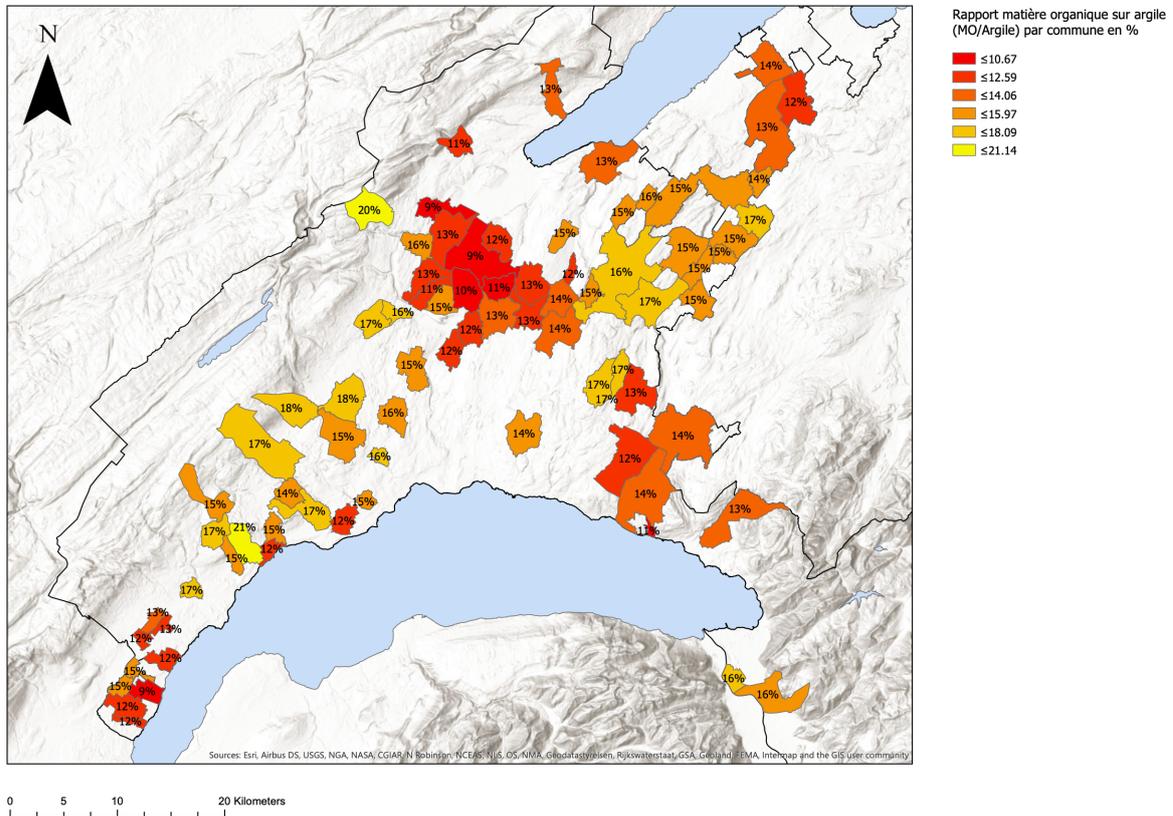


Figure 6 : Rapport MO/Argile moyen des sols en grandes cultures sur les communes pour lesquelles plus de 10 valeurs de MO/Argile étaient disponibles.

80 % des parcelles en GC ont un rapport MO/Argile inférieur à 17%. Le rapport moyen par commune a été cartographié lorsque suffisamment d'analyses (> 10) étaient disponibles (Figure 6) ce qui donne une indication sur la localisation des zones les plus déficitaires

On y retrouve sans surprise les zones les plus intensifiées (cultures sarclées, faible proportion d'herbages et d'élevage) en fort déficit, tandis que certaines zones de polyculture-élevage peuvent afficher un MO/Argile moyen supérieur à 17%. Le gradient de la typologie des exploitations agricoles entre la haute et la basse Broye est aussi visible.

Le déficit de matière organique a été estimé uniquement sur les surfaces de rapport MO/Argile inférieur à 17%, soit 80% des parcelles. On le calcule à partir de l'écart au MO/Argile de 17%. La différence multipliée par la teneur en argile donne le déficit de teneur en MO à combler en pourcentage pondéral (% g<sup>-1</sup> de sol).

Pour passer du déficit analytique (en g.g<sup>-1</sup>) au déficit en stock, il faut convertir ces valeurs à l'aide (i) de la densité apparente du sol puis (ii) de la surface totale en GC sur Vaud. Puis ce déficit en MO est converti en équivalent CO<sub>2</sub>.



La densité apparente  $D_a$  est obtenue par pédo-transfert à partir des données disponibles (résultats de nos projets antérieurs - annexe 1). Nous avons calculé les valeurs de  $D_a$  à la capacité au champ, considérant que les prélèvements avaient été faits sur sols plutôt humides (gonflés). Ceci revient à minorer la masse de sol prise en compte sur 20 cm si le sol n'était pas à la capacité au champ lors du prélèvement, donc à minorer le déficit carbone.

Le déficit estimé en tonnes de  $\text{CO}_2$  pour les parcelles en grandes cultures est de 2'000'000 tonnes. Cette valeur est un minorant, pour les raisons données en section méthodologique (chapitre 2.2 page 9).



### 3 TAUX D'ÉVOLUTION ANNUEL DES TENEURS EN MATIÈRE ORGANIQUE (MO)

#### 3.1 DONNEES DISPONIBLES ET DISTRIBUTION DES TAUX D'ÉVOLUTION

Les 32'236 analyses de sol utilisées présentent toutes une mesure de matière organique (méthodes Walkley et Black). Ceci nous a permis de sélectionner 3'032 parcelles en grandes cultures (GC), possédant au moins 2 analyses entre 1989 et 2019. Afin de ne sélectionner que les couples d'analyses faits dans le cadre des analyses PER, nous avons supprimé ceux qui présentaient moins de 5 années ou plus de 12 années entre les deux analyses. Au final, nous avons donc pris en compte 2'034 parcelles en GC et 2'270 couples d'analyses sur lesquels il a été possible de calculer un taux d'évolution annuel de la teneur en MO. Par homogénéité avec la littérature (initiative 4<sup>0</sup>/<sub>00</sub> en particulier<sup>7</sup>) les taux sont exprimés en ‰. **Un taux de 4 ‰ signifie que la différence de teneur entre l'année 2 et l'année 1 est de (Teneur année 1) \* 4/1000. Il ne s'agit donc pas d'une différence nette mais bien d'un taux d'évolution (Erreur ! Référence de lien hypertexte non valide.).**

Les taux d'évolution annuels des teneurs en matière organique des GC sur le canton de Vaud en ‰ de 1989 à 2019 (soit 2'270 couples d'analyse) ne suivent pas une loi normale (test de Shapiro-Wilk). Au total 158 valeurs atypiques ont été détectées par le test de normalité (Figure 7). Nous avons supprimé ces valeurs, ce qui revient à ne conserver que 2'114 couples d'analyses de parcelles en GC dans notre étude et à borner notre jeu de données entre - 53.752 ‰ et 55.893 ‰ (Figure 8 et Tableau 8) en ce qui concerne le taux d'évolution de la teneur en MO. Ces bornes correspondent à celles trouvées sur Genève et dans la littérature (Minasny *et al.*, 2017). La médiane des taux d'évolution de ces 3 décennies est strictement nulle, mais une tendance temporelle à la hausse conduit à une moyenne actuelle positive (voir ci-après l'évolution temporelle au chapitre 3.2).

Tableau 4 : Caractéristiques de la distribution du taux d'évolution annuel de la teneur en matière organique des GC sur le canton de Vaud en ‰ (2114 couples d'analyses) après avoir supprimé les valeurs atypiques ou aberrantes.

	minimum	1 <sup>er</sup> quartile	médiane	moyenne	3 <sup>ème</sup> quartile	maximum	Écart-type
Valeurs des taux d'évolution annuels de la teneur en MO en ‰	-53.752	-11.709	0.000	0.778	13.153	55.893	20.278

<sup>7</sup> Rappelons que l'initiative 4‰ est basée sur les 40 premiers centimètres du sol alors que dans cette étude nous étudions les 20 premiers centimètres, en raison des données disponibles (protocole de prélèvement des données PER).

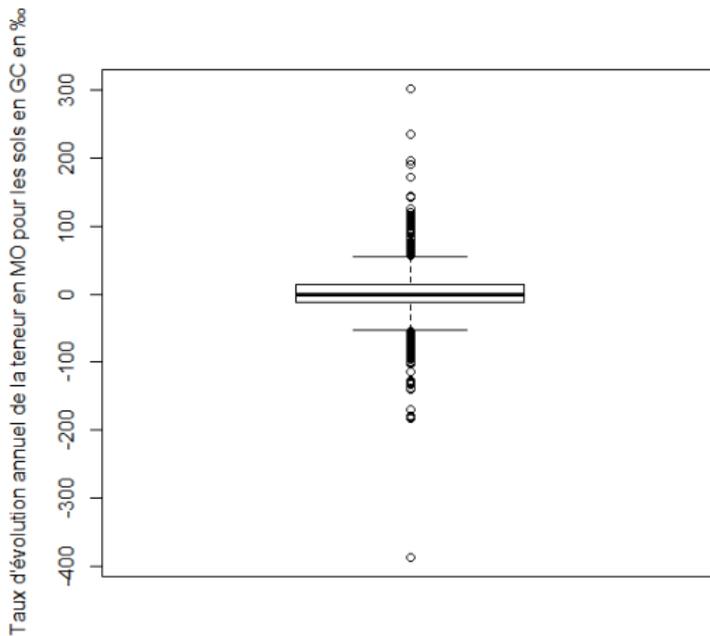


Figure 7 : Boîte à moustache présentant le taux d'évolution annuel de la teneur en matière organique des GC sur le canton de Vaud, en ‰ et compilés sur 3 décennies. La boîte représente l'intervalle interquartile, les tirets de part et d'autre de la boîte font 1.5 fois l'intervalle interquartile. Les valeurs atypiques ou aberrantes sont représentées par les cercles, la barre noire représente la médiane.

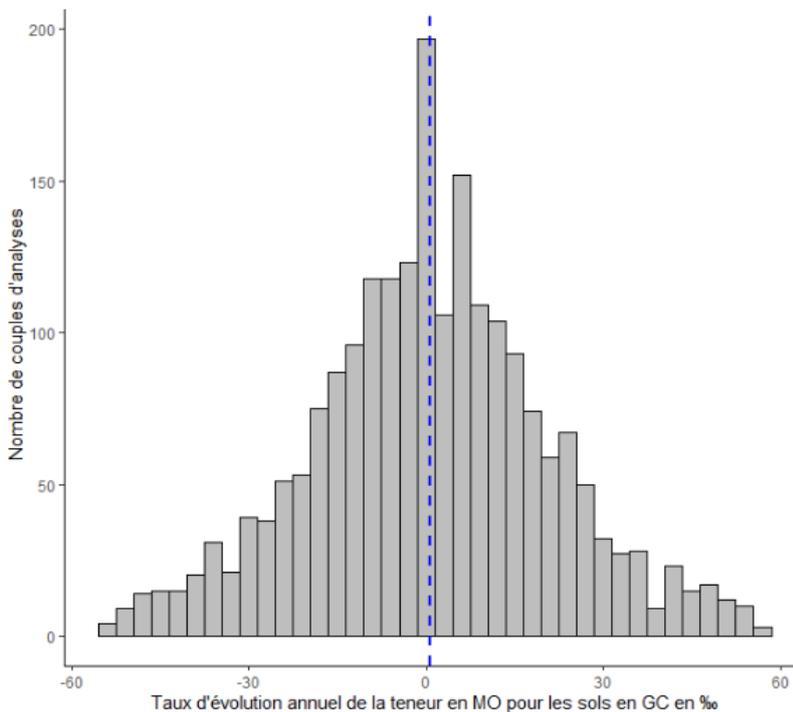


Figure 8 : histogramme de la distribution des taux d'évolution annuels de la teneur en matière organique des GC sur le canton de Vaud en ‰ (2114 couples d'analyses) après avoir supprimé les valeurs atypiques ou aberrantes (la ligne en pointillée bleu indique la moyenne : 0.778 ‰)

D'après le test de Shapiro-Wilk l'hypothèse de normalité est rejetée car la p-value est nettement inférieure à 0.05. Les taux d'évolution annuel des teneurs en matière organique des GC sur le canton de Vaud en ‰ de 1989 à 2019 après suppression des valeurs aberrantes (2'114 couples d'analyse) ne suivent pas une loi normale.



### 3.2 TENDANCE TEMPORELLE DES TAUX D'ÉVOLUTION

En affectant au taux d'évolution la date intermédiaire entre deux analyses des teneurs, on peut examiner l'évolution temporelle des taux d'évolution. Sur la Figure 9 on peut constater qu'entre 1995-2000 et 2015-2019, les taux d'évolution ont continuellement et régulièrement augmenté selon une tendance linéaire hautement significative ( $p$  value  $< 0.001$ ). La régression a pour équation :  $\text{Taux } \% = 0.98 * (\text{année}) - 1964.26$ . La valeur du taux moyen estimé selon cette régression pour 2000 est de  $-4.3$  ‰, et pour 2015 de  $+10.5$  ‰. Le taux moyen passe de négatif à positif en 2005.

Le Tableau 5 présente les distributions des taux d'évolution des teneurs en MO pour les périodes avant et après 2006. Ces informations confortent le passage progressif à des taux d'évolution positifs, tandis que les extrêmes supérieurs restent quasi inchangés de 1997 à 2015, les extrêmes inférieurs paraissent s'améliorer à partir de 2010. Les différences sont hautement significatives. On trouvera une analyse des causalités en section 5 et suivantes.

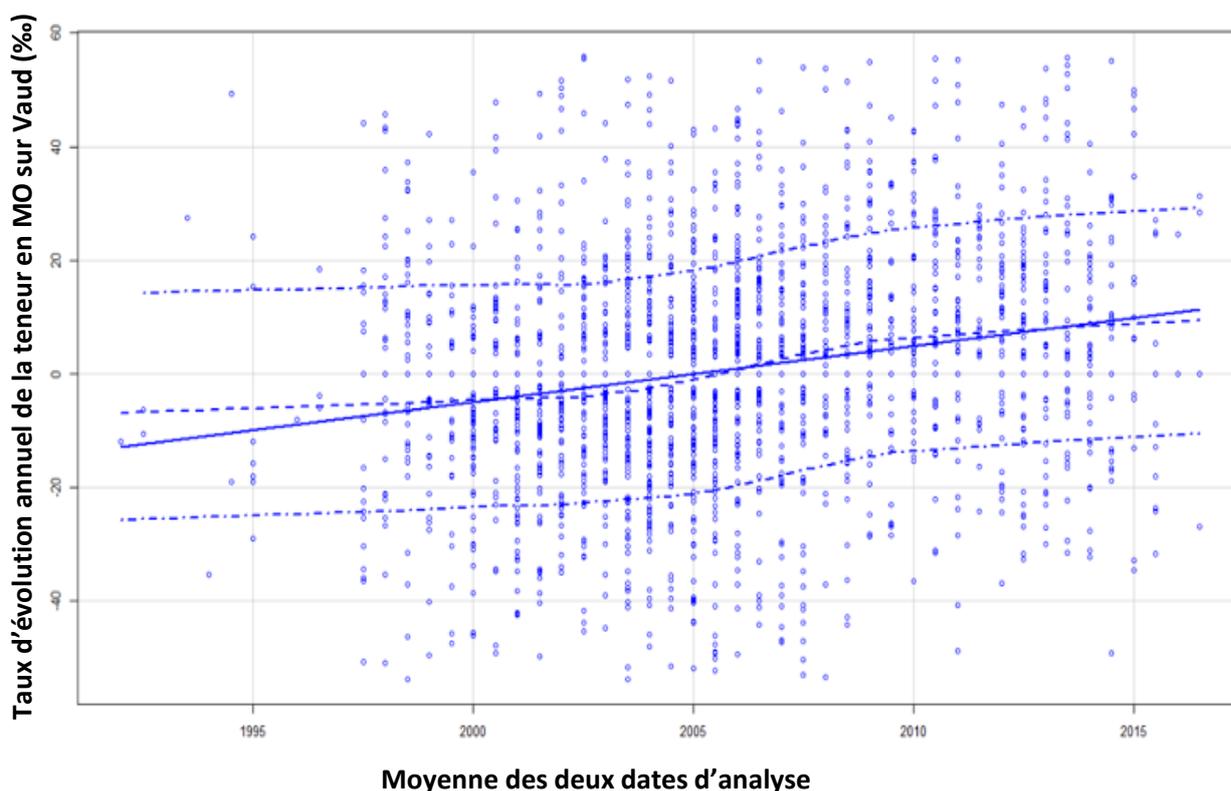


Figure 9 : Régression linéaire entre les taux d'évolution annuels des teneurs en matière organique des GC sur le canton de Vaud en ‰ de 1989 à 2019 et la moyenne entre les deux années ayant servi à calculer les taux. La ligne en trait plein est la droite de régression linéaire (définie par la méthode des moindres carrés) entre les deux variables. La ligne centrale en pointillé est la courbe de régression locale de type lowess. Ici, la droite de régression est comprise dans l'intervalle de confiance de la courbe lowess, l'hypothèse de linéarité est donc acceptable. <https://statistique-et-logiciel-r.com/la-regression-lineaire-simple-avec-le-logiciel-r/>



Tableau 5 : Distribution du taux d'évolution annuel de la teneur en matière organique des GC sur le canton de Vaud en % (2114 couples d'analyse) après avoir supprimé les valeurs aberrantes

Taux d'évolution annuels de la teneur en MO en ‰	minimum	1 <sup>er</sup> quartile	médiane	moyenne	3 <sup>ème</sup> quartile	maximum	Écart-type
Avant 2006 (1124 observations)	-53.75	-15.71	-4.07	-3.57	7.86	55.89	19.57
Après 2006 (990 observations)	-53.279	-5.198	5.209	5.723	18.033	55.709	19.934



## 4 DISCUSSION ET CONCLUSIONS PARTIELLES

Les calculs effectués ont retenu des hypothèses conservatrices pour estimer le potentiel de séquestration. En outre, les teneurs en MO obtenues via les analyses PER correspondent à des rapports MO/Argile relativement élevés en comparaison des autres cantons, ce qui méritera d'être compris dans une recherche ultérieure. On peut par exemple sans risque considérer que les agriculteurs ayant souhaité payer pour une analyse de teneur en MO sérieuse (et non le « test visuel ») font partie de ceux qui sont sensibles à la compréhension et à la qualité de leurs sols et qui veillent ainsi à préserver leur teneur en matière organique.

Le potentiel de séquestration, calculé en référence à un objectif de 17% de MO par rapport à la teneur en argile, est estimé à 2'000'000 de tonnes équivalent CO<sub>2</sub>. Pour un ensemble de raisons méthodologiques conservatrices, cette estimation est un minimum. On peut par exemple relever que 30 cm de sol et non 20 peuvent être pris en compte ou que le seuil de 17% de rapport MO/Argile n'est en aucun cas un plafond. Si on vise par exemple un seuil de rapport MO/Argile de 20%, ce qui a un sens agronomique et écosystémique élevé, on vise alors un potentiel non plus de 2'000'000 de tonnes mais de 4'000'000 de tonnes de CO<sub>2</sub>. **Les moyens techniques correspondants sont disponibles et identifiés en section 5 et suivantes. Ce n'est donc pas une question technique mais une question de volonté collective concrétisée par le cadre donné à l'agriculture.**

Séquestrer ces 2'000'000 à 4'000'000 de tonnes sous forme d'humus sur 30 ans reviendrait à assurer un taux de croissance des teneurs en MO de respectivement 10 à 20 ‰ en moyenne dans les 20 premiers centimètres des sols agricoles en GC. L'objectif de 10 ‰ paraît non seulement tout à fait atteignable au vu de l'évolution constatée sur les 20 dernières années, mais même peu ambitieux. Plus les taux d'évolution seront élevés, plus les sols seront résilients face au changement climatique, mais aussi plus productifs et assurant une meilleure santé aux plantes (moins de pression sanitaire permet un moindre recours aux pesticides). La tendance moyenne des sols cultivés à émettre du CO<sub>2</sub> est nette avant 2005 pour les sols en GC, elle s'annule en 2005 et continue de diminuer ensuite. Une évolution remarquablement similaire a été trouvée sur le canton de Genève (volet 6.4 du plan climat genevois, étude de mise en œuvre). Le cas particulier des sols organiques, beaucoup plus émetteurs, n'a pas été pris en compte dans cette analyse ("Peatlands," 2018).

Dans le cas du canton de Genève, les facteurs de croissance des taux sont bien établis : longueur des rotations, limitation des exportations, intensité et diversité des couverts, apports de fumure organique. **La question que traite la suite de cette étude est d'identifier pour le canton de Vaud les facteurs permettant de tirer les taux vers le haut plus rapidement et les verrous à cette d'évolution**, tout ceci en bonne compatibilité avec les revenus et motivations des exploitants agricoles.



## 5 TYPOLOGIE DES EXPLOITATIONS ET FACTEURS DE SEQUESTRATION

Nota : certaines figures ont été reprises du rapport de master de Xavier Dupla (Biogéosciences, Université de Lausanne, 2020), co-auteur de ce rapport.

### 5.1 INFORMATION COLLECTEE

Soixante exploitations ont été sélectionnées au hasard, parmi les exploitations ayant des grandes cultures et en excluant celles sur des terres noires. On s'est assuré que tous les systèmes étaient présents (Bio et non-bio, agriculture de conservation et labour conventionnel, avec et sans élevage, etc.).

La localisation des 60 exploitations est indiquée en Figure 10. Elles couvrent géographiquement bien le canton. Des paramètres descriptifs généraux de ces exploitations sont reportés en Figure 11. Ces exploitations ont été enquêtées sur la base du carnet des champs, complété par une interview pour récupérer les informations ne s'y trouvant pas. Les exploitations sont localisées à 83% (50) en plaine, 12% (7) en collines et 5% (3) en montagne selon les catégories définies (OFAG, 2020). Avec 22% (13), les exploitations bio sont deux fois plus nombreuses que la moyenne cantonale (OFAG, 2018). Le labour conventionnel représente 73% (44) des exploitations, tandis que 5% (3) ont adopté le non-labour strict et 22% (13) ont adopté des techniques culturales simplifiées, ce qui correspond à l'équilibre du nombre d'exploitations selon (**Erreur ! Référence de lien hypertexte non valide.**).

Une parcelle a été sélectionnée au hasard sur chaque exploitation. Une condition était recherchée : qu'une analyse Corg correcte ait été effectuée environ 10 ans plus tôt. La succession des opérations sur cette parcelle a été reconstituée pour les 10 années antécédentes. Parmi les informations établies (ci-dessous) se trouvait le The Soil Tillage Intensity Rating (STIR)<sup>8</sup> (USDA-ARS-NSL, 2003), le bilan des apports et exportations de matière organique, la rotation et les intercultures, avec des précisions sur la diversité spécifique pour ces dernières. La présence ou non de bétail, le nombre d'UGB, la taille des exploitations, sont aussi relevées. L'élevage peut impacter les performances de séquestration par les pratiques qui sont associées à l'élevage, à savoir la prairie et les apports d'engrais de ferme, et ces pratiques sont prises en compte dans notre analyse. Les facteurs qui ne sont pas cités ci-après, tels que nombre d'UGB, ne sont pas significativement corrélés aux taux d'évolution du carbone dans notre échantillon et ne sont donc pas les plus décisifs (voir ci-après).

Les parcelles sélectionnées ont été échantillonnées selon la méthode de (Deluz *et al.*, 2020) (20 piqûres selon les diagonales pour former un composite). Deux prélèvements ont été faits : sur 0-20 cm et sur 0-30 cm et la teneur en Corg a été analysée (ainsi que la texture si non disponible). La Figure 12 permet de constater que les parcelles sélectionnées couvrent bien la diversité des situations texturales et de teneur en Corg. Le taux d'évolution Corg médian est + 8.48 %, soit très proche de la moyenne cantonale actuelle. Pour l'analyse initiale, les agriculteurs ont indiqué avoir réalisé un composite de 10 piqûres en moyenne sur 0-20 cm, et sur l'ensemble de la parcelle dans 95% des cas.

---

<sup>8</sup> L'indice STIR tient compte de toutes les opérations mécaniques ayant un impact sur le sol. Il considère notamment la surface de sol perturbée, la vitesse et la profondeur de travail du sol, le fait que les couches soient retournées ou non.

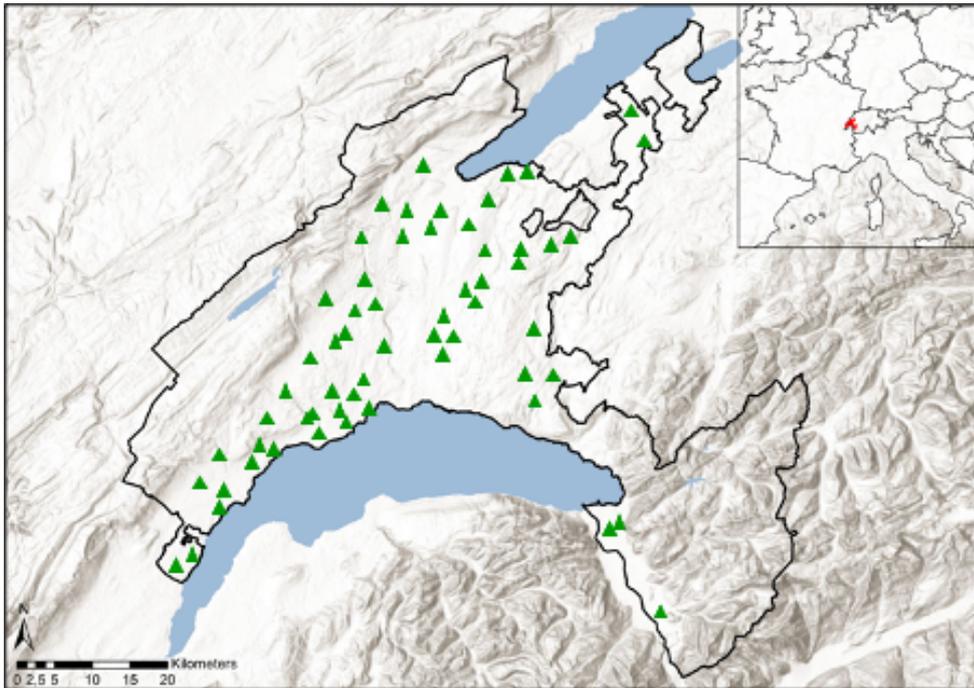


Figure 10 Localisation des 60 exploitations sélectionnées

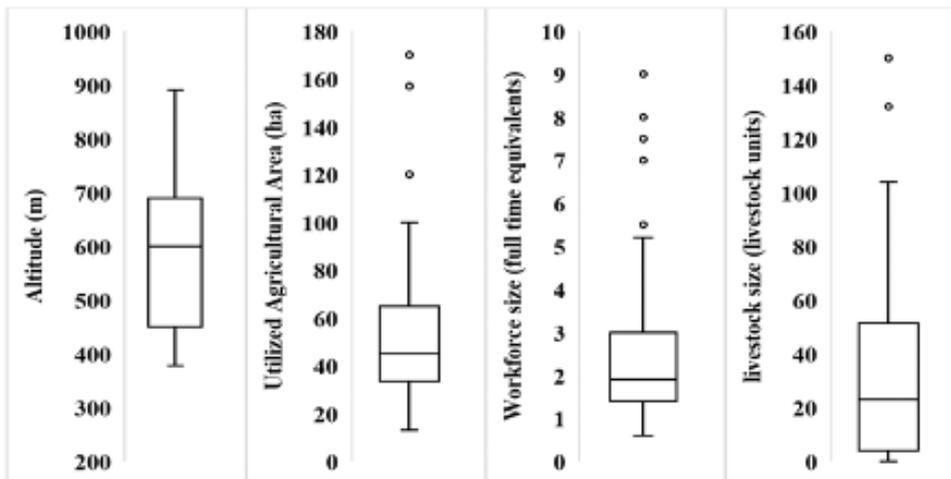


Figure 11: Altitude, surface Agricole utile, main d'œuvre et UGB des exploitations sélectionnées.

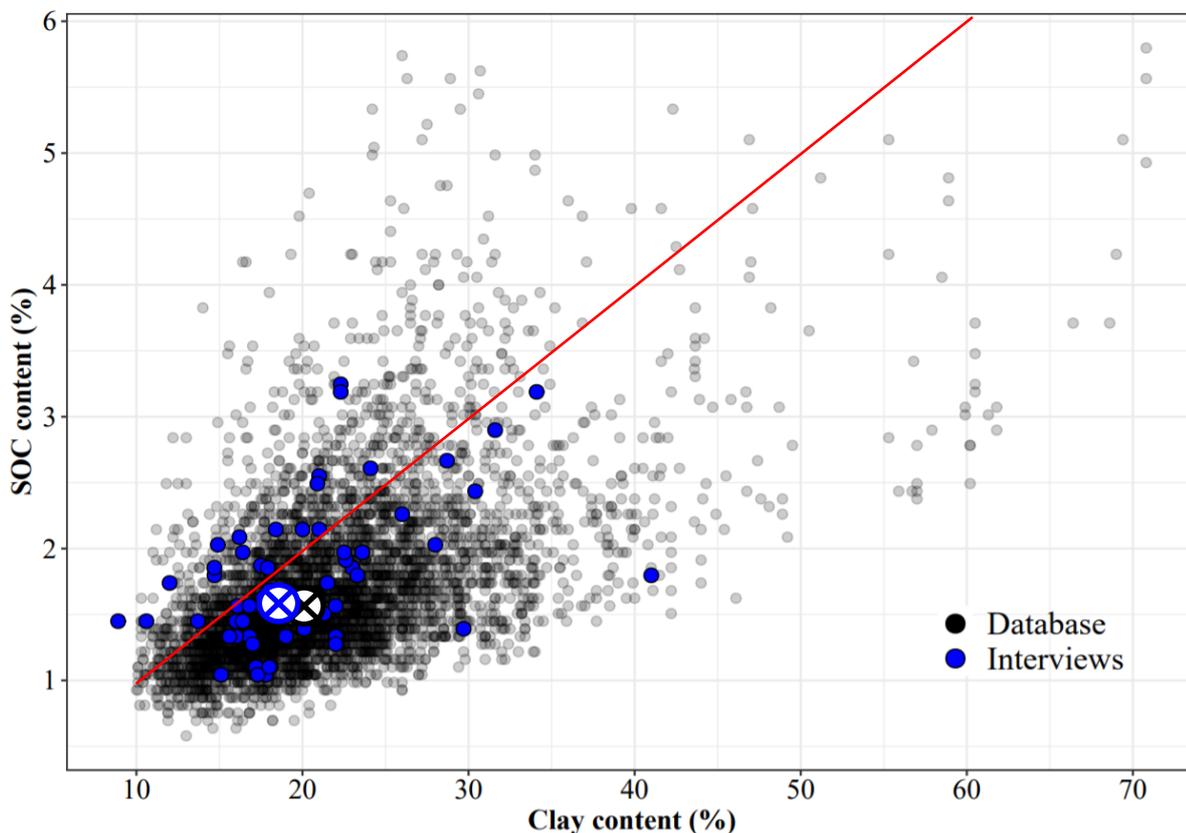


Figure 12: Relation Corg – Argile sur les sols de grande culture et pour les 60 parcelles sélectionnées (points bleus). La ligne rouge représente le rapport Corg:Argile de 10% qui correspond au rapport MO/Argile de 17%. Les croix représentent les médianes cantonales et du sous échantillon.

## 5.2 RELATIONS ENTRE LES PRATIQUES ET LES TAUX DE SEQUESTRATION

Le Tableau 6 présente les corrélations de Spearman entre les pratiques prises une à une et les taux de séquestration. En gras figurent les corrélations significatives. La variable « Apport MO Complexe » inclut les exportations de paille (en négatif) par rapport à la variable « Apport MO » qui ne tient compte que de la fumure.

Les variables montrant une corrélation directe avec le taux d'évolution carbone sont le **nombre de couverts total**, le **nombre d'espèce dans les couverts** et dans les couverts hivernants (= avant culture de printemps), le **STIR** et le **nombre de labours** (effet négatif pour ces deux derniers). Enfin, le **rapport initial MO/Argile** influence négativement les taux d'évolution : plus il y a de matière organique au départ plus le taux d'évolution est faible (voir le détail ci-après). Nous revenons ci-après en discussion sur ces variables.

Il est important de noter également que (i) la fréquence des prairies temporaires et les apports de MO n'ont pas d'effet significatif sur cet échantillon, en raison notamment de la fréquence des labours associés aux prairies temporaires, des intensités très variables des autres facteurs et de leur prépondérance ou des formes de MO différentes apportées, et que (ii) la longueur de la rotation n'a pas l'effet positif escompté, ce qui s'explique par le fait que lorsque les rotations s'allongent, c'est pour introduire des sarclées supplémentaires, en particulier pomme de terre et betterave. Ces



résultats ne signifient pas qu'une rotation plus longue ou des prairies temporaires ne peuvent pas avoir d'influence positive sur le sol, mais que ces facteurs n'apparaissent pas statistiquement sur cet échantillon, en raison de l'introduction des sarclées dans le cas des rotations allongées, et en raison de pratiques plus intensives dans nombre de cas de rotations avec beaucoup de prairies permanentes (labours, exportations fortes, lisier plutôt que fumier, compaction). Les apports de MO, quant à eux, ont un effet secondaire qui est mis en évidence ci-après<sup>9</sup>.

Les graphiques correspondant à ces corrélations significatives sont reportés en Figure 13. La relation entre le rapport MO/Argile en début de période d'évaluation (10 ans) et le taux d'évolution montre que globalement, plus on a de Corg dans le sol, moins on est susceptible d'avoir des taux d'évolution positifs importants.

En Figure 14 se trouve le même graphique mais avec l'indice STIR en label des observations. Ceci permet de voir que les taux les plus bas sont liés aux indices STIR élevés, que pour les rapports MO/Argile faibles il est possible de séquestrer avec un STIR moyen voire élevé (MO/Argile très faible) mais qu'au-delà de 17% de MO/Argile, seuls les STIR < 40 (AC strict) permettent de séquestrer. **Ceci indique que pour les faibles teneurs en MO, une adaptation progressive du système est possible, mais que pour poursuivre une séquestration vers des teneurs en MO acceptables voire bonnes, il faut adopter des techniques de semis direct** (cf. ci-après).

En Figure 15 la même observation est reportée en cumulant les observations effectuées sur les parcelles Vaudoises et Genevoises. Cette fois la corrélation négative est hautement significative (p-value = 0.005) dans le cas des STIR les plus élevés (labour conventionnel). En revanche, des taux de plus de 10 ‰ sont encore observés avec un rapport MO/Argile initial de 20%, pour les STIR les plus faibles (semis direct strict).

---

<sup>9</sup> Dans une étape ultérieure, ces apports seront corrigés par leur indice isohumique ce qui permettra peut-être de mieux mettre en évidence leur effet. Ici, une expression simplifiée sur la base des informations facilement accessible a été privilégiée.



Tableau 6: Corrélations de Spearman entre les principales propriétés des systèmes de culture et le taux d'évolution annuel de la teneur en matière organique des sols. La significativité (en gras) est retenue pour une p-value < 0.05 (signifie que la probabilité que cette corrélation soit due au hasard est inférieure à 5%). Apports MO complexe : apports de MO moins export des pailles.

Variabiles	Corrélation	Valeur de P	Influence
Nombre espèce dans la rotation	-0,216	0,097	Non
Rapport MO/Argile initial (%)	-0,310	0,016	Négatif
Proportion de prairie temporaire (%)	-0,079	0,550	Non
Proportion de cultures de printemps (%)	-0,018	0,893	Non
Nombre de cultures de pomme de terre ou betterave	0,005	0,970	Non
Nombre de couverts dérobés	0,150	0,253	Non
Nombre d'espèces dans les couverts dérobés	0,152	0,247	Non
Nombre de couverts hivernants	0,236	0,070	(non)
Nombre d'espèce dans les couverts hivernants	<b>0,505</b>	0,000	Positif
Nombre de couverts total	0,252	0,052	Positif
Nombre d'espèces dans les couverts	<b>0,488</b>	0,000	Positif
Durée des couverts (mois)	0,233	0,074	(non)
Nombre d'exportations de paille	-0,182	0,163	(négatif)
Apport d'amendements organiques (t/ha)	0,188	0,151	(positif)
Apport de MO complexe (*) (t/ha)	0,196	0,132	(positif)
Puissance des tracteurs (cv)	<b>0,331</b>	0,010	(négatif)
Nombre de labours	<b>-0,366</b>	0,004	Négatif
Indice STIR	<b>-0,342</b>	0,008	Négatif

(\*) inclut la prise en compte (négative) des exportations de paille

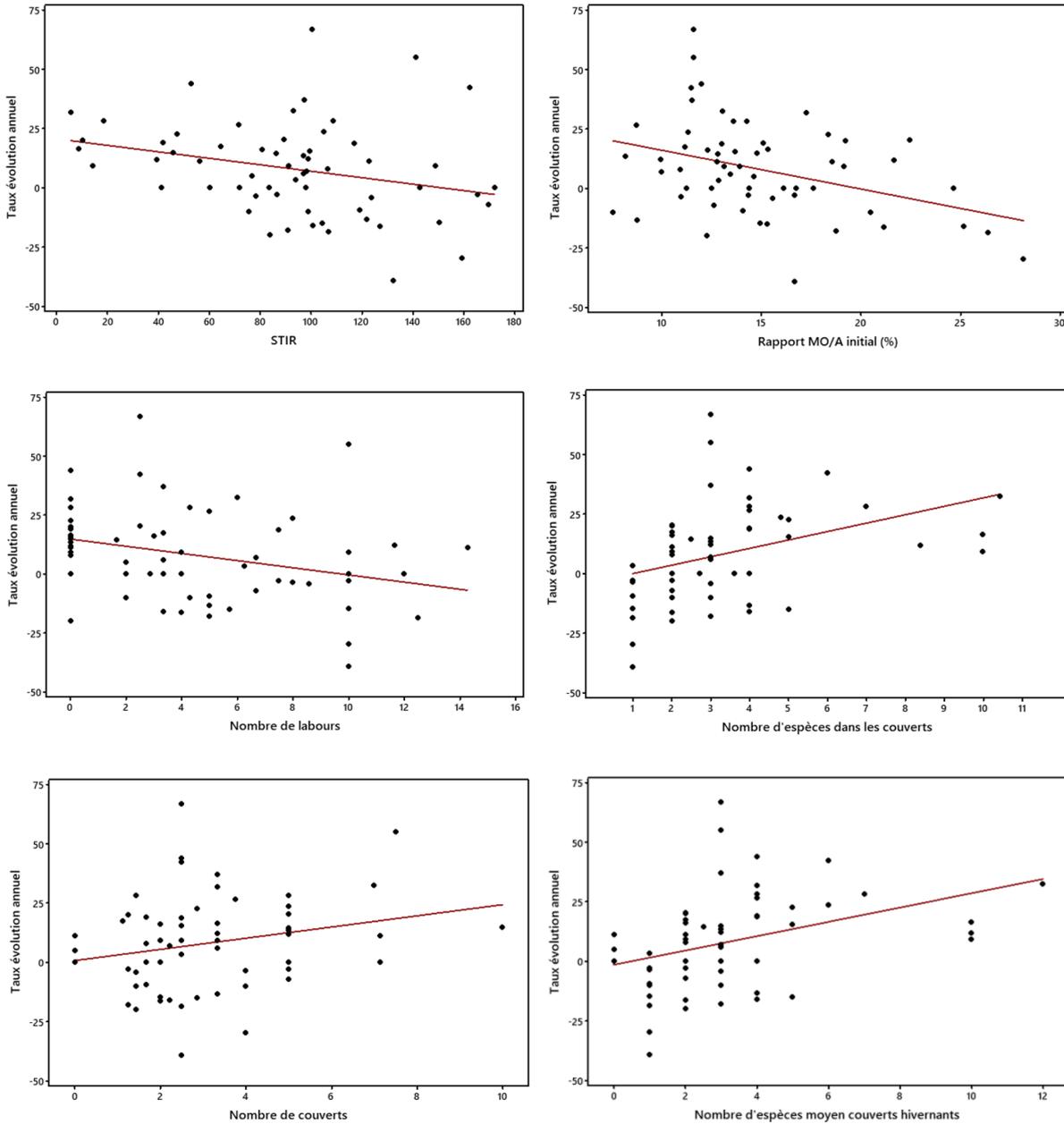


Figure 13: Graphiques des corrélations des variables au taux d'évolution annuel de matière organique. Ligne rouge : régression linéaire.

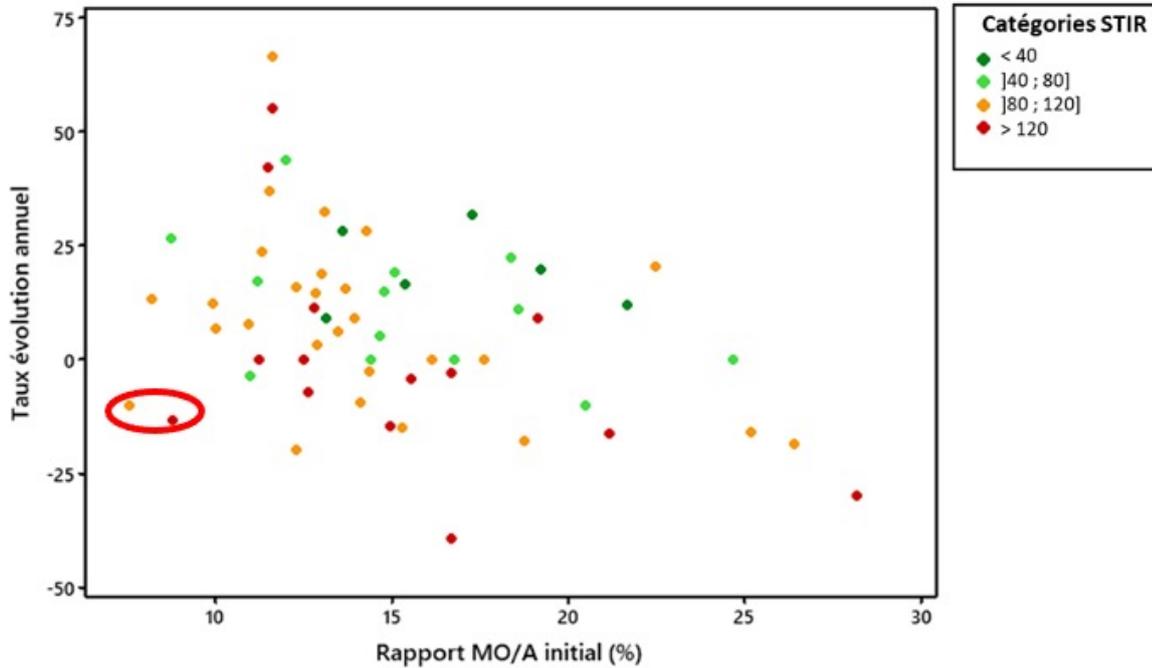


Figure 14: Répartition des parcelles vaudoises en fonction du taux d'évolution annuel et du rapport MO/Argile initial avec les catégories de STIR labélisées. Les deux parcelles entourées de rouge ont un STIR élevé et un taux d'évolution négatif malgré un rapport MO/Argile très faible (dû à des facteurs additionnels : exportation des pailles, faibles apports de MO, faible présence des couverts végétaux). Sans ces parcelles une corrélation négative significative pour les deux catégories de STIR les plus élevées entre le rapport MO/Argile et le taux d'évolution apparaît.

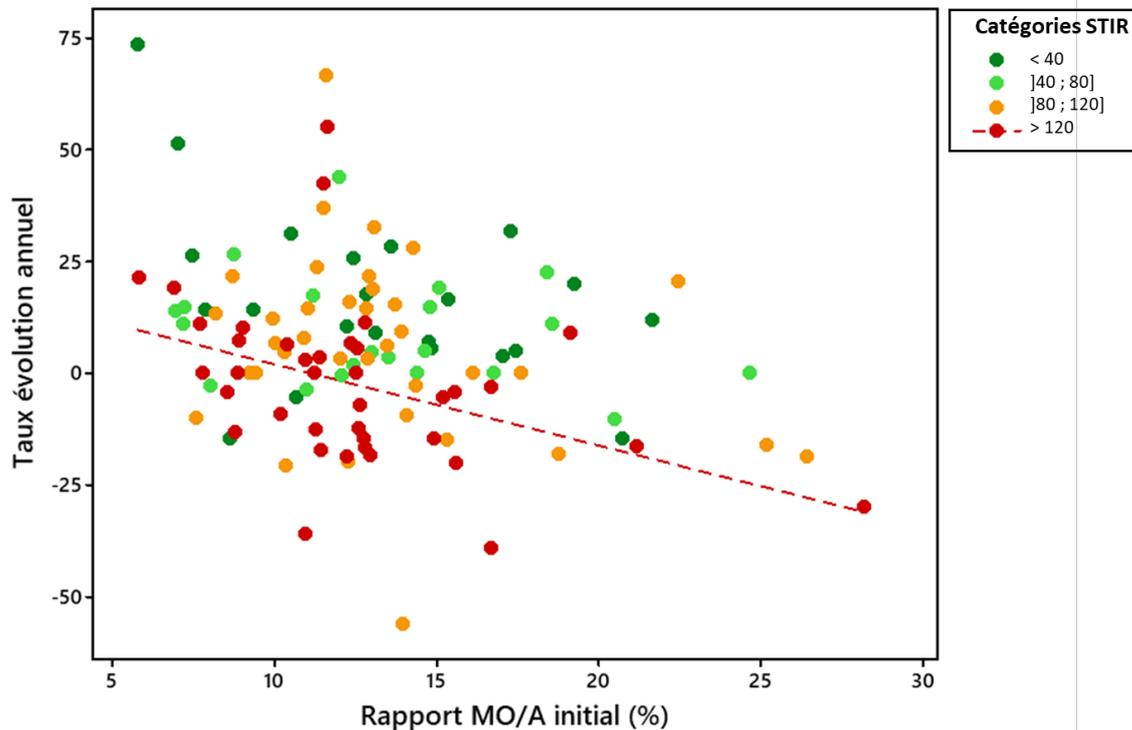


Figure 15: Répartition des parcelles vaudoises et genevoises en fonction du taux d'évolution annuel et du rapport MO/Argile initial avec les catégories de STIR labélisées

Au vu de ces graphiques et corrélations, les facteurs qui vont être des leviers pour améliorer la qualité des sols via l'augmentation des teneurs en carbone organique ressortent déjà clairement : **en premier lieu viennent les couverts végétaux et leur diversité. En second lieu les opérations mécaniques ont un effet négatif, d'autant plus qu'elles sont intenses et que le rapport MO/Argile est élevé.** STIR et implantation de couverts végétaux sont corrélés négativement : les agriculteurs savent souvent qu'un sol travaillé ne permettra pas de rentabiliser l'implantation d'un couvert, car l'implantation est retardée et a lieu sur un sol séché par le travail, ce qui annule ou réduit drastiquement les chances d'avoir un couvert significatif (biomasse et couverture suffisantes). Enfin, la diversité des couverts et l'intensité de recours aux couverts sont corrélées : on voit ainsi que la maîtrise technique s'exprime à travers la cohérence d'un ensemble de facteurs, et que cet ensemble conduit aux meilleures corrections des teneurs en MO. A ce propos relevons que sur Genève, le taux d'évolution des teneurs en MO et l'ancienneté de la conversion à l'AC sont liés positivement. Nous ne disposons pas de cette information sur Vaud, mais ce constat est en accord avec ce qui précède : acquisition de technicité et performance de l'AC (stricte) qui se manifeste même avec les forts rapports MO/Argile.

Ces réflexions conduisent à poser la question des systèmes de culture, de leur cohérence et de leur typologie.



5.3 TYPOLOGIE DES SYSTEMES DE CULTURE ET RELATION A LA DYNAMIQUE DU CARBONE

Pour aborder cette question, nous avons eu recours à l'Analyse en Composantes Principales (ACP) permettant d'explorer la structure des systèmes de culture dans leur dimension multivariée.

Pour information, nous retranscrivons en Figure 16 une ACP utilisant de nombreuses informations, dont les 2 axes principaux représentent 48% de la variance totale et qui permettent d'effectuer une première réflexion sur les systèmes et leur impact carbone. Une sélection des variables liées aux taux d'évolution des teneurs en MO a été opérée pour mieux discuter ce thème.

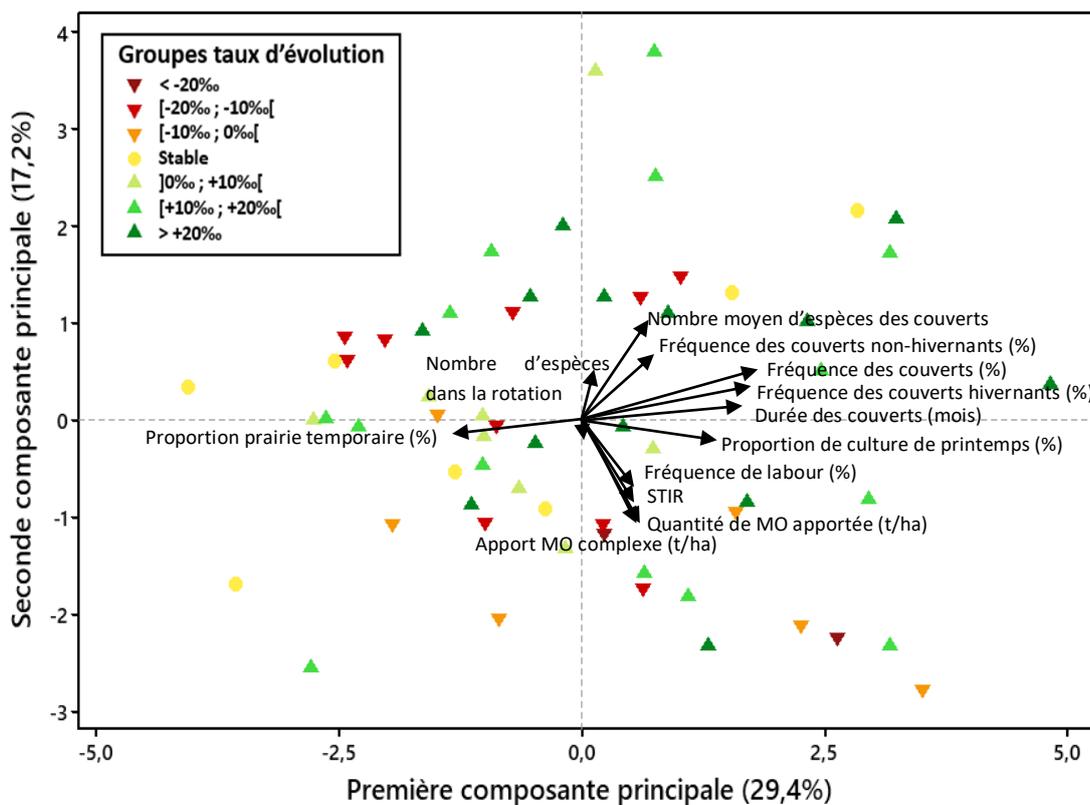


Figure 16 Analyse en composante principale des systèmes de culture, 60 exploitations sur 10 années. Pro\_PT (proportion de prairie temporaire), Nb\_esp\_couvert (nombre d'espèces dans les couverts), Nb\_couverts\_non\_hiv (nombre de couverts hivernants), Duree\_couverts\_mois (durée des couverts), Prop\_cult\_print (proportion de cultures de printemps), quant\_MO\_t\_ha (apports de matière organique), STIR (soil tillage intensity rating). Taux d'évaluation des teneurs en MO en labels.

SELECTION DES VARIABLES

Cette sélection retient les pratiques d'effet significatif du Tableau 6. Elle permet d'aboutir à une typologie des systèmes qui est très discriminante vis-à-vis de l'évolution des teneurs en MO. Dans un second temps, certaines informations supplémentaires sont appliquées aux sous-groupes pour expliquer des hétérogénéités internes.



- Les variables « Nombre de labours » et « STIR » sont très fortement corrélées (Corrélation = 0.710 et valeur de  $P < 0.0005$ ), pour éviter toute redondance dans les variables sélectionnées nous utiliserons la variable « STIR » qui, bien que moins bien corrélée au taux d'évolution, est plus précise pour caractériser l'intensité du travail du sol de chaque système.
- Bien que les apports de matière organique ne soient pas suffisamment corrélés au taux d'évolution pour que leur effet soit significatif (Tableau 6), leur effet est positif, et il est fort probable qu'il soit partiellement « caché » par d'autres ayant un effet plus important sur le taux d'évolution comme le STIR (avec lequel ils sont corrélés) ou le nombre de couverts végétaux. L'effet positif est cohérent avec la littérature, tout comme l'effet négatif des exports de paille. Nous avons donc généré une variable « Apports\_MO\_Complexe » qui tient compte des apports et des exports et que nous utilisons dans l'analyse.
- Bien que la mise en place de prairie temporaire soit souvent citée comme une pratique performante dans la séquestration de carbone, nos données ne permettent pas de le mettre en valeur (coefficient négatif). Ce constat pourrait être lié à une surexploitation des prairies sur le canton. Après examen approfondi, les prairies temporaires ne sont pas prises en compte dans ce qui suit.
- Nous avons pris le parti de calculer l'intensité des couverts en multipliant « Nombre de couverts total » et « Nombre d'espèces moyen dans les couverts ». Ceci nous permet de tenir compte des deux informations et de leur corrélation en une seule variable, dans un but de simplification. Les conserver séparées ne change pas les conclusions mais nuit à la clarté des rendus. La corrélation de cette nouvelle variable au taux d'évolution est très bonne et supérieure à celle de la variable « nombre de couverts total » (Corrélation = 0.482 et valeur de  $P < 0.0005$ ).

## TPOLOGIE SELON LES COMPOSANTES PRINCIPALES

Sur la base de cette sélection de variables, la Figure 17 présente les deux premiers axes principaux permettant de résumer les propriétés de systèmes de culture selon STIR, Couverts végétaux (fréquence X diversité) et « Apports MO complexes ». Ces deux axes expriment 75% de la variance totale ce qui est très satisfaisant. Les taux annuels d'évolution des teneurs en MO sont regroupés pour figurer en labels. Les cercles de couleur avec les lettres A à E correspondent à la typologie proposée (ci-après).

L'axe horizontal oppose STIR élevé (vers la droite) et intensité des couverts (à gauche). L'axe vertical est composé des importations-exports de MO et dans une moindre mesure des couverts. Cette ACP permet de délimiter une typologie des exploitations en 5 groupes, dont 2 sont dans une dynamique de perte de MO (E et B) et 3 dans une dynamique de séquestration (A, C et D). Ils peuvent être désignés comme suit et les Figure 17 et Figure 18 permettent de visualiser des seuils de discrimination de ces groupes :

- Groupe A : exploitations en SD, avec des couverts hivernants diversifiés (> 4 espèces, STIR < 60). Les taux d'évolution sont de 10 à plus de 20%. Ceux qui exportent les pailles, négligent les apports de MO ou les couverts sont les moins performants.
- Groupe B : Labour conventionnel (STIR > 120), recours variables aux couverts hivernants et apports de MO. Les taux varient de neutres à moins de 20%.
- Groupe C : Labour occasionnel (STIR < 100), quelques couverts hivernants et apports de MO, rapport MO/Argile faible (< 12%). Les taux sont généralement de neutres à 20%, mais peuvent atteindre -10%, selon l'intensité des facteurs et le rapport MO/Argile.

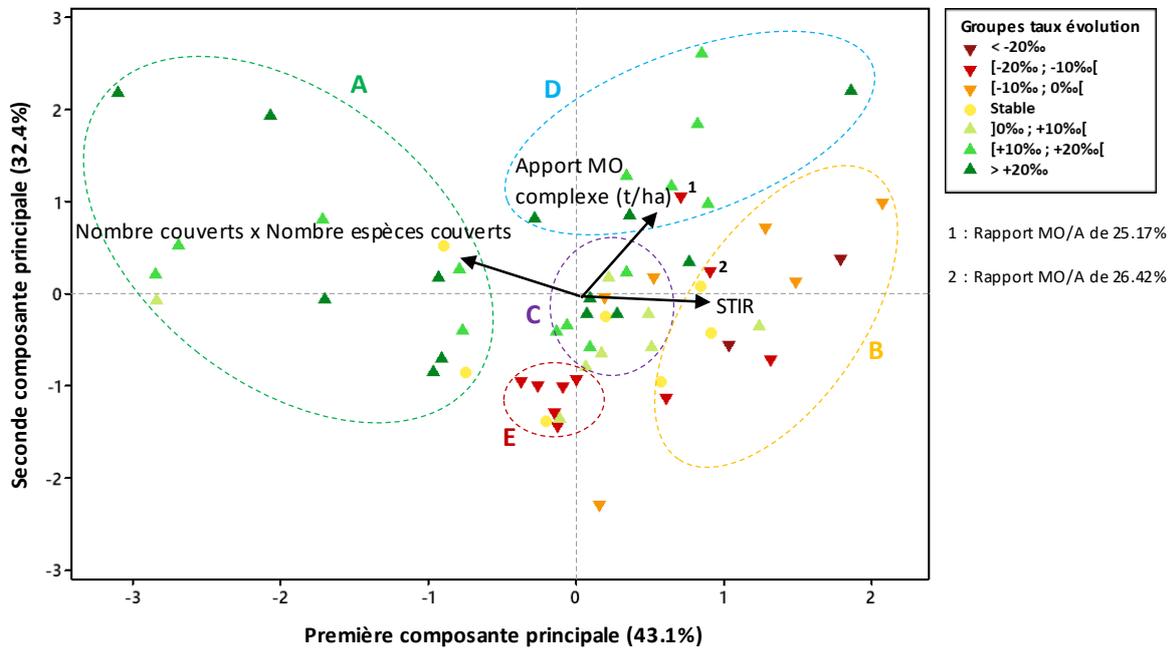


Figure 17: Deux premières composantes principales des systèmes de culture avec les taux d'évolution de MO labellisés. Entre parenthèse : le pourcentage de variance expliqué par les axes. Les sous-groupes A à E correspondent à la typologie des exploitations proposée.

- Groupe D : Labour occasionnel (STIR < 100), couverts hivernants (> 3/10) et apports de MO importants (> 60 tonnes par ha). Les taux vont de 10 à 20 ; un seul a des taux négatifs (observation no 1, car avec un ratio MO/Argile élevé).
- Groupe E : Labour occasionnel (STIR < 100), peu ou pas de couverts (< 3/10) ni d'apports de MO (< 10 t ha<sup>-1</sup>). Ce groupe a les taux d'évolution les plus négatifs, presque tous < -20‰.

Les couverts végétaux alliés à la fumure organique peuvent permettre de compenser l'impact négatif du labour occasionnel (groupes C et D). En revanche il semble difficile de compenser l'impact négatif du labour conventionnel (groupe B) (Figure 18). La Figure 14 montre que les STIR élevés ne peuvent séquestrer que si le rapport MO/Argile est faible (sols fortement appauvris en MO). Les observations 1 et 2 des groupes B et D sur la Figure 17 présentent des taux fortement négatifs bien que voisines d'observations moins négatives voire positives. Ce sont des parcelles ayant un rapport MO/Argile élevé.

Le STIR et les couverts (nombre et diversité) des groupes C et D (labours occasionnels) sont équivalents, tandis que la quantité de MO apportée sur les parcelles du groupe D est bien supérieure pour des performances de séquestration équivalentes (Figure 18). Ce constat est vraisemblablement lié au fait que les rapports MO/Argile initiaux des parcelles du groupe C sont inférieurs à ceux du groupe D, bien que la différence ne soit pas significative.

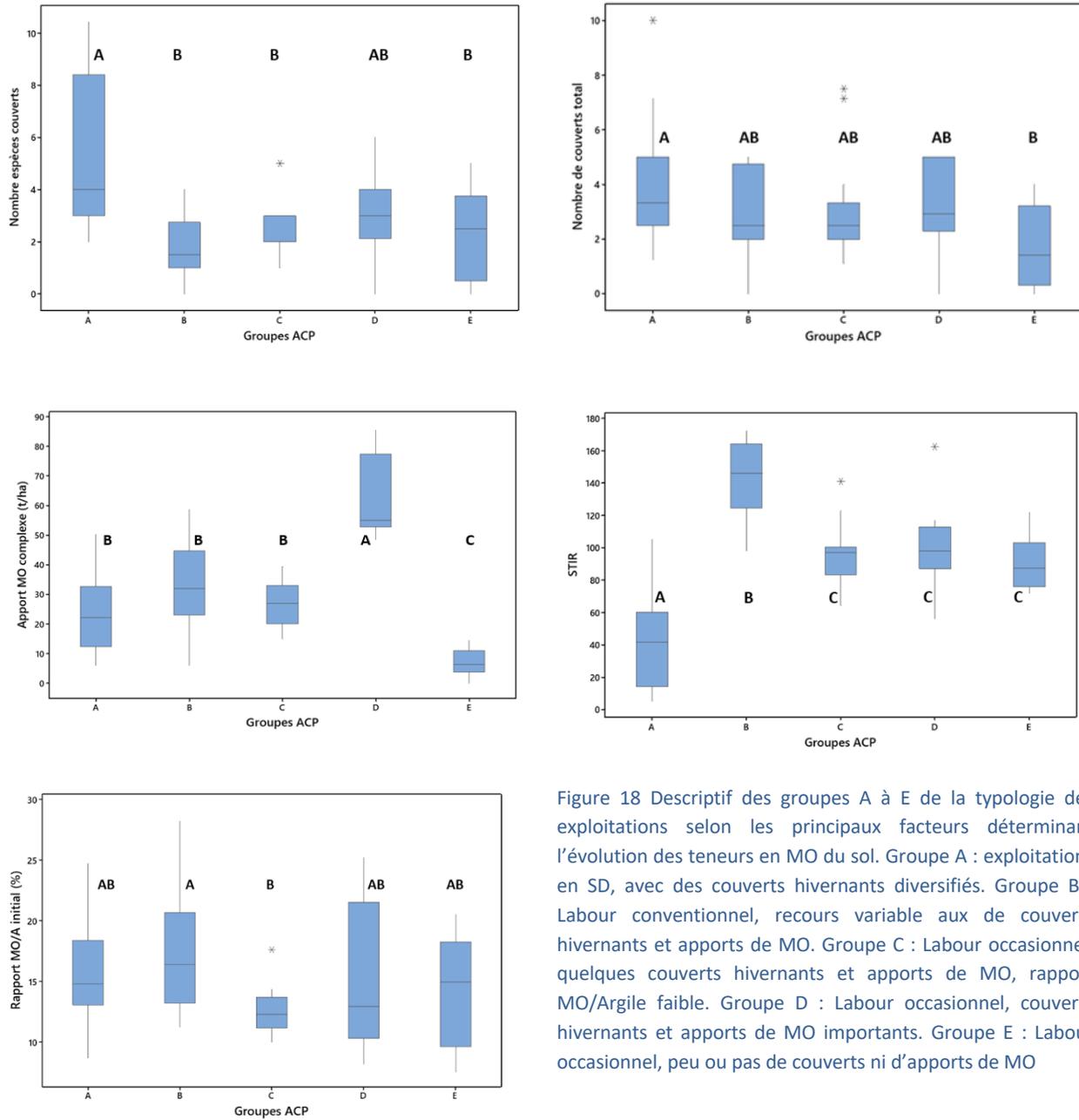


Figure 18 Descriptif des groupes A à E de la typologie des exploitations selon les principaux facteurs déterminant l'évolution des teneurs en MO du sol. Groupe A : exploitations en SD, avec des couverts hivernants diversifiés. Groupe B : Labour conventionnel, recours variable aux de couverts hivernants et apports de MO. Groupe C : Labour occasionnel, quelques couverts hivernants et apports de MO, rapport MO/Argile faible. Groupe D : Labour occasionnel, couverts hivernants et apports de MO importants. Groupe E : Labour occasionnel, peu ou pas de couverts ni d'apports de MO

## 5.4 LES STRATEGIES DE SEQUESTRATION

La séquestration relève de deux stratégies :

- D'une part augmenter les entrées de carbone dans le sol (couverts végétaux diversifiés ou fumure organique)



- Et d'autre part réduire les pertes (travail du sol) ou exportations (pailles) de carbone.

Notons au passage que les exploitations en AB ne se distinguent pas dans l'étude de la relation entre pratiques et taux d'évolution de la teneur en MO du sol.

## AUGMENTER LES ENTREES DE CARBONE

**La fumure organique** est une pratique déjà généralisée sur le canton grâce à l'élevage bovin. L'intérêt de cette pratique pour séquestrer du carbone est largement démontré et on peut une nouvelle fois la constater en comparant les groupes E et D (labours occasionnels). Cependant si l'entier des engrais de ferme est déjà utilisé pour amender les cultures et prairies (ce qui est fort probable) alors le seul moyen d'intensifier cette pratique serait l'achat de compost, dont les doses d'épandage autorisées sont limitées par l'OrChim.

De plus il est indispensable, s'agissant de séquestration, que l'apport de compost en un point ne soit pas une perte en un autre (ce qui équivaldrait à un simple transfert et non à une stratégie de séquestration). Ce qui suppose donc de maximiser les stratégies de distribution de compost d'origine urbaine par exemple. En réalité, toute la filière impliquant déplacement et transformation de MO doit être audité de ce point de vue, qu'il s'agisse de compost, de biochar ou de méthanisation.

D'autre part, ces amendements organiques doivent être de qualité : si les filières professionnelles peuvent disposer de techniques pour éliminer les plastiques, les ETM, HAP, micro-plastiques, demeurent un problème potentiel. De même, la qualité pour le sol des digestats solides ou liquides est souvent remise en question.

Enfin, l'utilisation des biochars n'est pas soutenue par la preuve de gains de fertilité, alors que la provenance, la disponibilité et le coût et l'innocuité des biochars font question. De plus, comme pour tout autre déplacement de matière organique, il faudrait s'assurer qu'une éventuelle filière biochar devrait faire la preuve globalement de son efficacité climatique (par exemple : les mêmes matières apportées en amendement au champ pour maximiser les couverts ne permettent-elles pas de meilleures séquestrations ?), toutes questions qui restent très peu documentées<sup>10</sup>.

Une alternative au compost, et ayant le mérite d'être une source potentiellement endogène<sup>11</sup> à l'exploitation, est le Bois Raméal Fragmenté (BRF). Nous avons montré sur des cas d'exploitation agricole du Jura que le coût de la tonne de MO humifiée dans le sol est équivalent, partant de fumier ou de BRF (Arminjon, 2019).

**Le potentiel de séquestration par les couverts végétaux restitués au sol est, de loin, le levier principal.** Sur le canton de Vaud il s'exprime presque uniquement à travers les couverts « d'automne » (hivernants) qui sont obligatoires (exigences PER) et prennent place avant une culture de printemps. Mettre en place plus de couverts d'automne impliquerait donc d'augmenter la proportion de cultures de printemps dans la rotation, qui est déjà relativement importante, ce qui serait relativement contraignant et peu pertinent pour la dynamique du carbone. La mise en place

---

<sup>10</sup> Tandis que des expériences de réalisation de Technosols urbains multifonctionnels à base de biochars produits avec des matières organiques urbaines démontrent déjà la performance de cette application, ce qui représente un débouché très volumineux et cette fois vertueux, y compris du point de vue du bouclage des cycles.

<sup>11</sup> Produit sur l'exploitation, par opposition à exogène ou détourné.



de couverts dits «dérobés» prenant place avant une culture d'automne serait préférable. Cette pratique a montré son efficacité sur le canton de Genève où elle est en pleine expansion chez les agriculteurs en AC. Cependant elle nécessite une implantation en SD à la récolte (voire avant pour des conditions difficiles telle qu'altitude), donc un passage au non-labour. Dans les situations plus difficiles (e.g. altitude), l'expérience d'agriculteurs pionniers maîtrisant la technique est primordiale pour permettre aux autres de choisir cette pratique. Notons que le canton de Genève se distingue par des couverts dérobés fréquents et de grande efficacité pour la dynamique de la MO, ces couverts y faisant l'objet d'une subvention spécifique.

### LIMITER LES PERTES DE CARBONE (LIMITER LE TRAVAIL DU SOL ET LES EXPORTATIONS)

Les couverts et la fumure organique permettent de compenser l'impact négatif du travail du sol jusqu'à un rapport MO/A de 12 à 15%. **Nous avons vu ci-dessus que seuls les systèmes mettant en place un travail réduit du sol (TCS et SD) parviennent à séquestrer du carbone avec un rapport MO/A supérieur à 17%.** Pour séquestrer du carbone et continuer à le faire une fois une qualité de sol acceptable atteinte il est nécessaire d'adopter un travail réduit du sol. **La mise en place de couverts dérobés, très efficaces, n'est pas compatible avec le travail du sol estival** qui retarde le semis et surtout la levée en séchant les sols. **Les exports de paille sont à éviter.**

## 5.5 REVERSIBILITE DE LA SEQUESTRATION DE CARBONE

Deux questions sont fréquemment posées à propos de la séquestration de carbone organique dans les sols : celle de la réversibilité (le carbone séquestré se minéralise-t'il, réduisant ainsi à néant les efforts pour le séquestrer ?), et celle de la durée (combien de temps le carbone perdure-t'il dans le sol ?).

S'agissant de la durée, **on sait désormais qu'il est possible d'enrichir le sol en MO au moins jusqu'à des rapports MO/Argile de 24%, ce qui représenterait pour Vaud, pour les seules grandes cultures, et sur les 20 premiers cm de sol plus de  $6.10^6$  t de  $CO_2$ , l'objectif de  $2.10^6$  t étant triplé par rapport au seul de 17%. A un taux annuel de 10 ‰ cela prendrait 90 ans. Si un taux de 20 ‰ est obtenu, ce temps est réduit de moitié.**

Dans tous les cas, **la séquestration de C dans les sols a une limite temporelle. Elle est d'autant plus éloignée que la séquestration est lente et le plafond visé élevé. En cela, elle est un outil de la transition écologique et non pas un outil utilisable à l'infini. La mesure peut en tout cas fonctionner bien au-delà de 2050.**

S'agissant de la réversibilité, on peut à soulever les points suivants :

- Les chiffres produits sont un bilan. Ils incluent les pertes par minéralisation, et représentent bien un gain net. Ce gain est en réalité plus élevé, l'ACS permettant par exemple de gagner 40l de gasoil par hectare et par an (données Agrivulg, Genève).
- La question de la réversibilité se pose pour toutes les mesures de limitation des émissions ou de séquestration (sans exception), mais la question n'est pas toujours évoquée (elle est plus spécifiquement agitée sur la question agricole, pour des raisons qui semblent subjectives). Dans le cas des sols, il y a de solides arguments pour considérer ce risque comme faible (ci-dessous).
- Nos données montrent bien que les systèmes agricoles à rotation simplifiée, labour et exportation des résidus perdent de la MO (ce qui correspond à la médiane négative observée il y a plus de 20 ans, Figure 9). Bien



évidemment, si on devait séquestrer un certain temps pour ensuite revenir à ces méthodes, on reperdrat le carbone séquestré.

- Mais ceci ne pourrait se faire qu'en toute connaissance de cause. Ne pas séquestrer de carbone dans les sols sous forme de MO au motif qu'on risque de le perdre un jour reviendrait à dire qu'il ne faut pas gagner d'argent pour ne pas risquer de le dépenser, et ainsi continuer de puiser dans ses économies. Ou pour reprendre une image « carbonée » : cela reviendrait à ne pas fermer les mines de charbon pour ne pas risquer de les rouvrir un jour.
- Or, restaurer les teneurs en MO est en premier lieu une priorité agro-écologique, permettant notamment de « réparer » les pertes dues aux pratiques passées, et surtout « préparer » les sols aux effets du changement climatique (Baveye *et al.*, 2020), et par voie de conséquence préparer l'agriculture et protéger la sécurité alimentaire que les sols permettent. Revenir sur ces mesures après les avoir appliquées signifierait que la chaîne de valeur alimentaire et les pouvoirs publics ne souhaitent plus soutenir un modèle agricole durable. A l'exemple d'autres techniques qui se mettent en place au départ dans les projets pilotes, celles qui impliquent de réels bénéfices pour la société sont au fur et à mesures soutenues.
- Enfin, une fois adoptées, les mesures de séquestration relevant de l'AC permettent aux agriculteurs de mieux vivre. Il y a donc peu de chance – sauf contraintes externes (point ci-dessus) – que ces pratiques soient abandonnées. C'est bien au fond une affaire de politique publique et économique, au même titre que toute autre mesure.
- Les chiffres produits dans cette étude sont un bilan : ils intègrent les pertes de MO qui font partie des processus naturels (minéralisation secondaire). Les matières organiques accumulées sont de différentes formes dont la stabilité temporelle est variable. L'équilibre entre formes stables et formes dites labiles est important pour la vie du sol et pour son fonctionnement. Il ne serait pas écologiquement profitable ni économiquement supportable de n'accumuler que des formes stables (à l'exemple de certaines pratiques qui nécessitent des apports conséquents d'azote minéral pour compenser la consommation par l'activité biologique du sol).
- Le danger le plus conséquent pour la dynamique de séquestration des exploitations conventionnelles serait une interdiction brutale des herbicides. Les progrès vers l'ABC (agriculture biologique et de conservation) et des techniques non chimiques de désherbages sont actuellement rapides, un coup d'arrêt à cette recherche pour cause d'interdiction sans nuance du glyphosate serait dangereux. Une mesure de diminution graduelle serait productive car elle permettrait de capitaliser sur les progrès en cours et de les faire aboutir avec des échéances et un soutien.

## 5.6 RECOMMANDATIONS

### LES STRATEGIES AGRONOMIQUES DE SEQUESTRATION QUE CETTE ETUDE VALIDE ET PERMET DE SOUTENIR SONT :

- Les **couverts et la fumure organique** qui peuvent permettre de compenser l'impact négatif du travail du sol **jusqu'à un rapport MO/Argile de 12 à 15%**.



- **Le non-travail du sol pour les sols de rapport MO/Argile supérieur à 17%** : seuls les systèmes mettant en place un travail réduit du sol (TCS et SD) parviennent à séquestrer du carbone dans ce cas des sols ayant déjà atteints une qualité de sol acceptable. Il est évident que tout processus de dégradation du sol qui viendrait s'interposer doit être évité (e.g. compaction intense, pollution).
- La **mise en place de couverts dérobés** est très efficace dans tous les cas. Elle n'est pas compatible avec le travail du sol estival qui retarde le semis et surtout la levée en séchant les sols.
- Les **exports de paille sont à éviter**. L'utilisation pour l'élevage peut toutefois s'avérer inévitable, mais il faut savoir qu'un retour sous forme de fumier ne compensera que partiellement l'exportation.

**Si le passage à l'agriculture de conservation stricte, c'est à dire sans travail du sol (semis direct) et avec des couverts végétaux intenses, paraît être la voie la plus directe, il ressort de ces résultats qu'aucune règle et ou qu'aucun système n'est à exclure, à condition de respecter des seuils et d'avoir une démarche raisonnée se basant sur l'observation préalable de l'état du sol.**

**Les pratiques des groupes B et E** (Labour conventionnel STIR > 120 et Labour occasionnel STIR < 100, peu ou pas de couverts (< 3/10) ni d'apports de MO (< 10 t ha<sup>-1</sup>) **doivent progresser**. Si la pratique du groupe B est à éviter, celle du E peut évoluer. Corriger leur effet négatif pèserait puissamment dans le bilan cantonal en carbone car ils représentent l'essentiel des taux négatifs. Dans cette étude, ils représentent tout de même 30% des cas, et globalement les taux négatifs sont encore le cas de près de 50% des parcelles. Les transitions de systèmes de cultures peuvent être progressives pour autant que des critères quantitatifs d'efficacité soient respectés. Chaque exploitation doit choisir les leviers à activer, en respectant des objectifs quantitatifs sur les couverts végétaux et leur biomasse<sup>12</sup>, le STIR, les apports organiques.

**Pour les autres groupes, le progrès réside dans une amplification des effets cumulés** : réduire encore le travail du sol, introduire des couverts dérobés, intensifier les couverts (en durée, en nombre d'espèces et en biomasse) et les apports de MO.

Ainsi, des **objectifs par exploitation, avec par exemple un indice de progression et un soutien technique individuel** pourraient être envisagés. Il faut donc introduire des soutiens et incitations permettant de viser ces facteurs :

- Quantité de MO (produite sur l'exploitation ou sans usage concurrent) apportée (+)
- Biomasse ET diversité des couverts avant destruction (+++)
- Intensité de l'impact mécanique (STIR) (---)

## RECOMMANDATIONS TECHNIQUES SUR LES PRATIQUES DE SOUTIEN/REMUNERATION

**Tous ces facteurs peuvent être traités « au résultat », c'est à dire en soutenant l'application effective des différents facteurs positifs à proportion de leur intensité.** Ceci permet (i) de garantir un résultat sur une base annuelle tout en (ii) laissant le champ libre à l'agriculteur pour choisir ses méthodes et le poids qu'il leur accorde.

<sup>12</sup> A terme c'est évidemment le critère biomasse qui doit s'appliquer. Dans cette étude et faute de cette information, on fait apparaître l'importance des couverts avec d'autres critères (durée, fréquence).



**L'intensité des couverts** suppose dans l'idéal de disposer des biomasses, mais **des alternatives peuvent être étudiées**. Nous travaillons sur deux pistes parallèles : vols de drone avec évaluation de couverture et biomasse et évaluation par modélisation des biomasses en fonction des conditions d'implantation. Seul cet aspect nécessite donc un progrès technique, a priori atteignable, pour ne pas générer de lourde machinerie de contrôle. La fourniture aux praticiens de résultats concrets et objectifs, avec des progrès mesurés et atteignables en quelques saisons est un puissant facteur de motivation lorsqu'il est couplé à des rémunérations adaptées.

## MONITORING ET PILOTAGE ADAPTES

**La plupart des informations peuvent être recueillies via le carnet des champs électronique :**

- Dates des opérations (récoltes, semis, nature des couverts, destruction)
- Nature des opérations mécaniques : un STIR simplifié pourrait être proposé sur la base de la présente étude, de façon à le générer de façon simple.
- L'intensité végétale nécessite idéalement d'être mieux connue par les biomasses des couverts, ce qui repose sur les développements techniques évoqués plus haut. On pourrait s'inspirer ici des développements proposés sur Genève.

**Une analyse de type PER mais améliorée pour être compatible avec les protocoles reconnus au niveau international (IPCC, prélèvement sur 30 cm avec pesée selon méthode ESM, publication à venir) serait à appliquer tous les 5 ans pour le suivi des stocks effectifs de carbone.** Globalement la méthodologie resterait celle définie pour les PER par (Deluz *et al.*, 2020), soit prélèvement à la gouge par les agriculteurs, ce qui représente environ 30 mn de travail par parcelle une fois le protocole acquis.

**Attention :** les prélèvements aujourd'hui effectués par les entreprises qui vendent des crédits-carbone ne sont à notre connaissance pas respectueux des normes IPCC, il n'est pas possible de se baser sur ces techniques dans le cadre d'un programme soutenu par des fonds publics.



## 6 DIMENSION ECONOMIQUE DE LA SEQUESTRATION

Les marges brutes  $\text{ha}^{-1}$  ont été évaluées pour les parcelles faisant l'objet de cette étude. La méthodologie utilisée est celle développée par T. Lemaître dans son mémoire de Bachelor (HEPIA Agronomie, 2019) et validée par (Baranzini *et al.*, 2020). Les marges ont été comparées pour un blé d'automne, avec et sans contribution fédérale.

C'est la pratique de l'agriculture biologique (AB) qui maximise le plus la marge brute avec contributions (Figure 19). Il n'y a pas de relation significative entre la marge brute et le taux d'évolution de la teneur en MO des sols.

Notons que par ailleurs les exploitations en AB ne se distinguent pas des autres dans la relation entre pratiques et taux d'évolution de la teneur en MO du sol. Elles ont le plus souvent des STIR élevés, et vont donc présenter des performances moyennes à mauvaises selon leur rotation et les facteurs décrits plus haut, de façon identique aux exploitations dites conventionnelles. Leur conversion à l'AC demande une maîtrise technique non encore disponible : c'est une évolution en cours dite ABC (Agriculture Biologique de Conservation) dont il faut favoriser l'émergence (depuis AB et depuis AC, vers ABC) car cette agriculture du futur combine la prise en charge de la qualité du sol et l'abandon des pesticides de synthèse.

**Sur l'ensemble des exploitations analysées, la marge brute hectare n'est pas dépendante du caractère plus ou moins séquestrant des pratiques ou du taux d'évolution de la teneur en MO constaté** (Figure 20 et Figure 21). Parmi les pratiques vertueuses identifiées (réduction du travail du sol, fumure organique et couverts végétaux diversifiés), la seule à être encouragée par une contribution (fédérale) est la réduction du travail du sol. Les couverts dérobés sont peu pratiqués sur le canton de Vaud, ils le sont en revanche beaucoup plus à Genève où ils sont soutenus par une mesure cantonale, ce qui déplace l'équilibre économique en faveur de cette mesure. **Autrement dit, si sur Vaud les pratiques vertueuses n'impliquent pas de pertes financières, les contributions ne permettent pas non plus de soutenir particulièrement les agriculteurs mettant en place les pratiques de séquestration.**



Tableau 7: Marges brutes par ha en CHF avec contributions en fonction du système de culture

	Système SD et couvert		Système Labour sans couvert
	Culture principale	Couvert	Culture principale
Production	2524		2805
Paille			
IP-Suisse prime	237		237
Prime extenso	400		400
<b>Prestations</b>			
Semence culture principale	223		223
Semence couvert		204	
<b>Total semence</b>			
Fumure culture principale	195		195
Fumure couvert			
<b>Total fumure</b>			
Herbicide	65		65
Fongicide			
Insecticide			
<b>Total protection des plantes</b>			
Assurance grêle	73		73
Réception conditionnement	137		137
Séchage	63		63
Contributions diverses	154		154
<b>Total charges spécifiques divers</b>			
Frais variables de mécanisation	200	50	344
Frais de contrôle et label	14		14
<b>Marge brute</b>	<b>1781</b>		<b>2031</b>
Contribution au paysage cultivé			
Contribution à la sécurité de l'approvisionnement	1300		1300
Contribution biodiversité jachère tournante et florale			
Agriculture biologique			
Semis direct	250		
Semis en bandes			
Semis sous litière			
<b>Marge brute avec contributions</b>	<b>3331</b>		<b>3473</b>

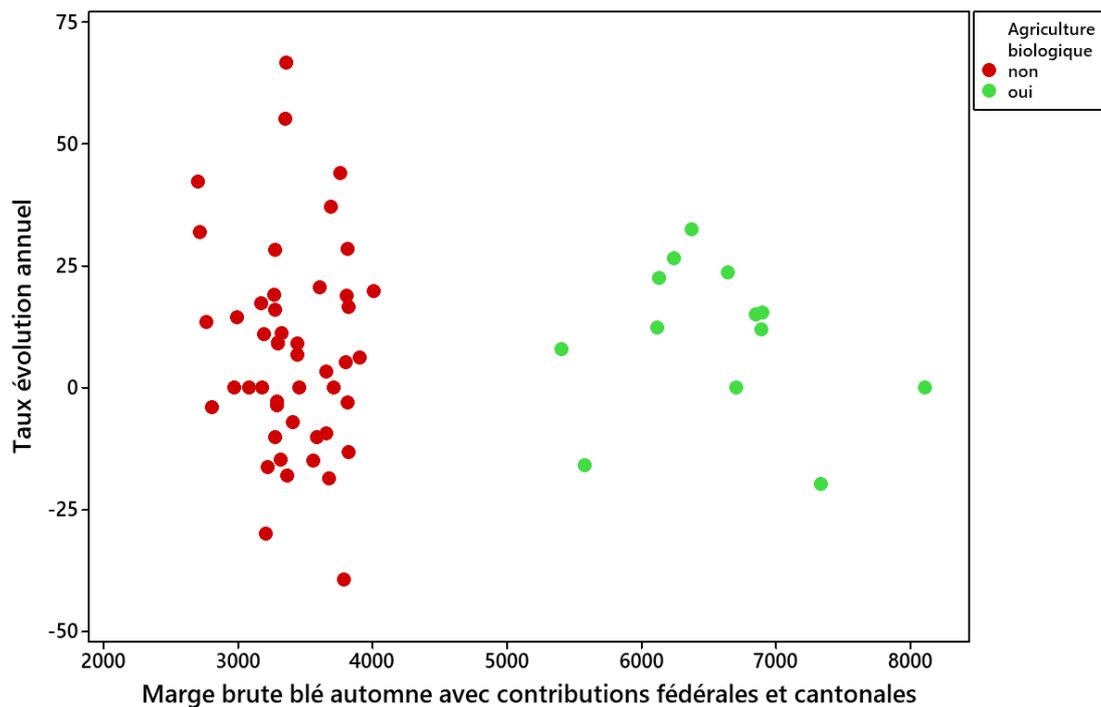


Figure 19: Relation entre marge brute en CHF ha<sup>-1</sup> et taux d'évolution annuel en % avec distinction de la pratique de l'agriculture biologique labélisée.

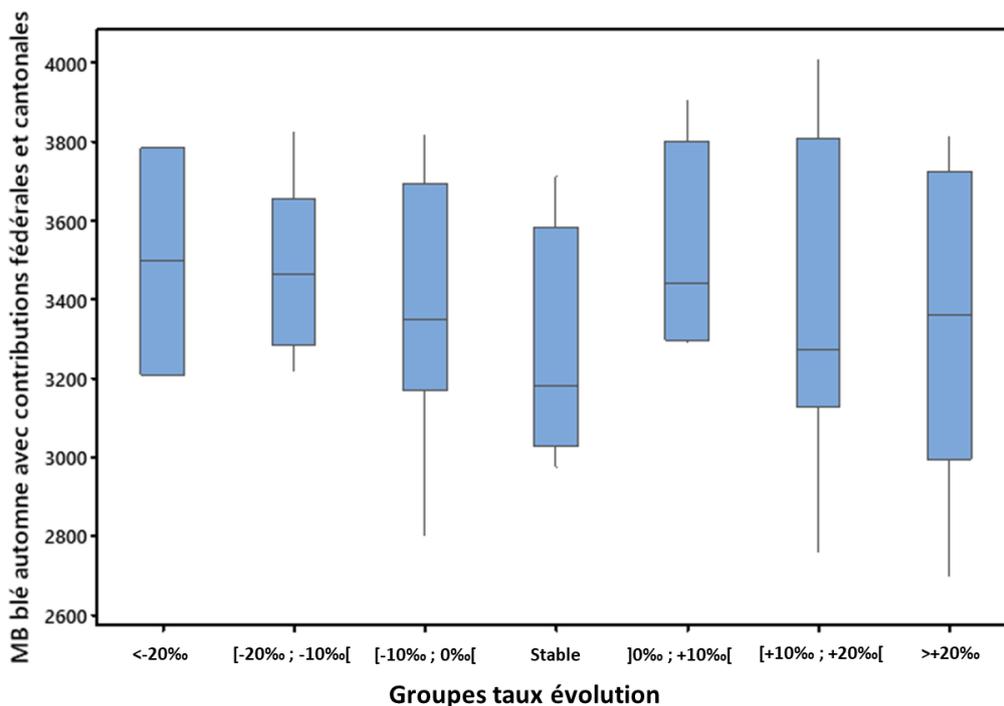


Figure 20: Relation entre marge brute et le taux d'évolution sans les parcelles en agriculture biologique (de A : < -20% à G : > 20%)

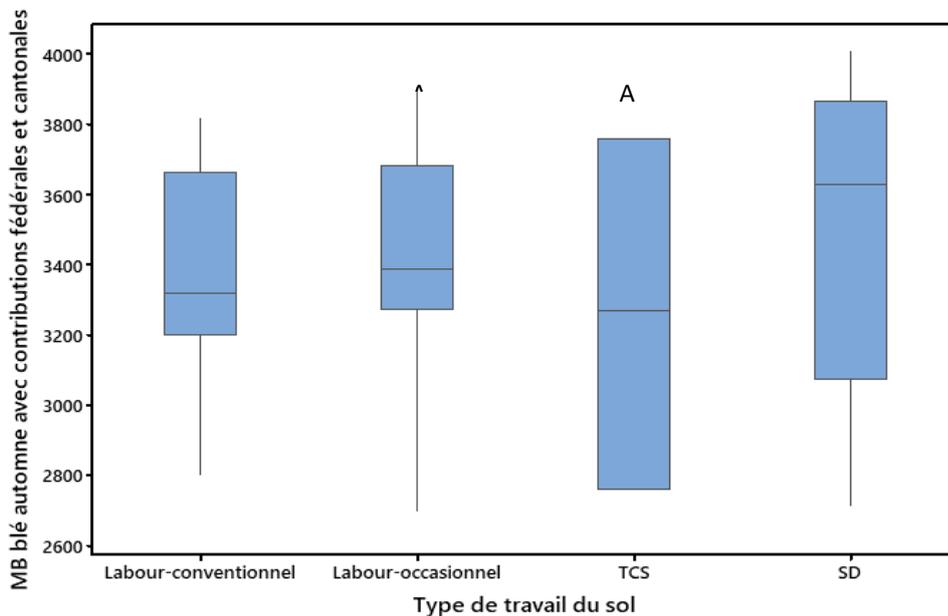


Figure 21: Relation entre marge brute et type de travail du sol sans les parcelles en agriculture biologique. TCS : Techniques Culturelles simplifiées. SD : Semis direct (STIR < 40). Labour conventionnel : STIR > 120. Labour occasionnel et TCDS : 60 < STIR < 120.



## 7 COMPARAISON AU SYSTEME GENEVOIS

Les particularités des systèmes de culture genevois sont nombreuses par rapport à ceux du canton de Vaud : sols plus pauvres en MO, disparition forte et ancienne de l'élevage, pratique de l'AC plus poussée, davantage de couverts dérobés et moins de cultures de printemps dans la rotation<sup>13</sup>.

Cependant, la structure des exploitations révélées sur le même nombre d'observations par l'ACP, et les facteurs principaux de la séquestration restent identiques, comme le montre l'ACP simplifiée obtenue en cumulant les deux cantons (Figure 22, à comparer la Figure 17). **Les conclusions proposées dans ce rapport sont strictement communes aux exploitations de ces deux cantons, malgré les différences importantes dans les sols et la structure des exploitations.**

En prenant en compte ces deux cas, la puissance des tests statistiques est augmentée ce qui renforce les conclusions. Sur Genève, le nombre de cultures de printemps dans la rotation est beaucoup moins variable que sur Vaud, et les couverts correspondants sont quasi-systématiques. De ce fait, c'est la fréquence des couverts dérobés qui conditionne l'expression de l'efficacité des couverts. Dans l'analyse ci-dessous, nous avons donc comptabilisé les nombre d'intercultures non couvertes, ce qui permet de traiter ensemble les informations sans distinguer les types de couverts, ainsi que d'inclure les cas des prairies temporaires importantes dans la rotation (qui décomptent peu de couverts, mais en fait peu d'intercultures non couvertes).

Le modèle AC strict se situe dans la partie gauche et supérieure du graphique de la Figure 22. Mais on constate de nouveau que ce modèle n'est pas le seul permettant de séquestrer du carbone. A l'instar du constat sur Vaud, les faibles rapports MO/Argile permettent de séquestrer malgré le travail du sol du moment que le rapport MO /Argile demeure faible (Figure 15).

---

<sup>13</sup> Rappelons que les couverts dérobés, si efficaces à Genève et semble-t-il peu pratiqués sur le canton de Vaud, sont soutenus par une mesure cantonale à Genève.

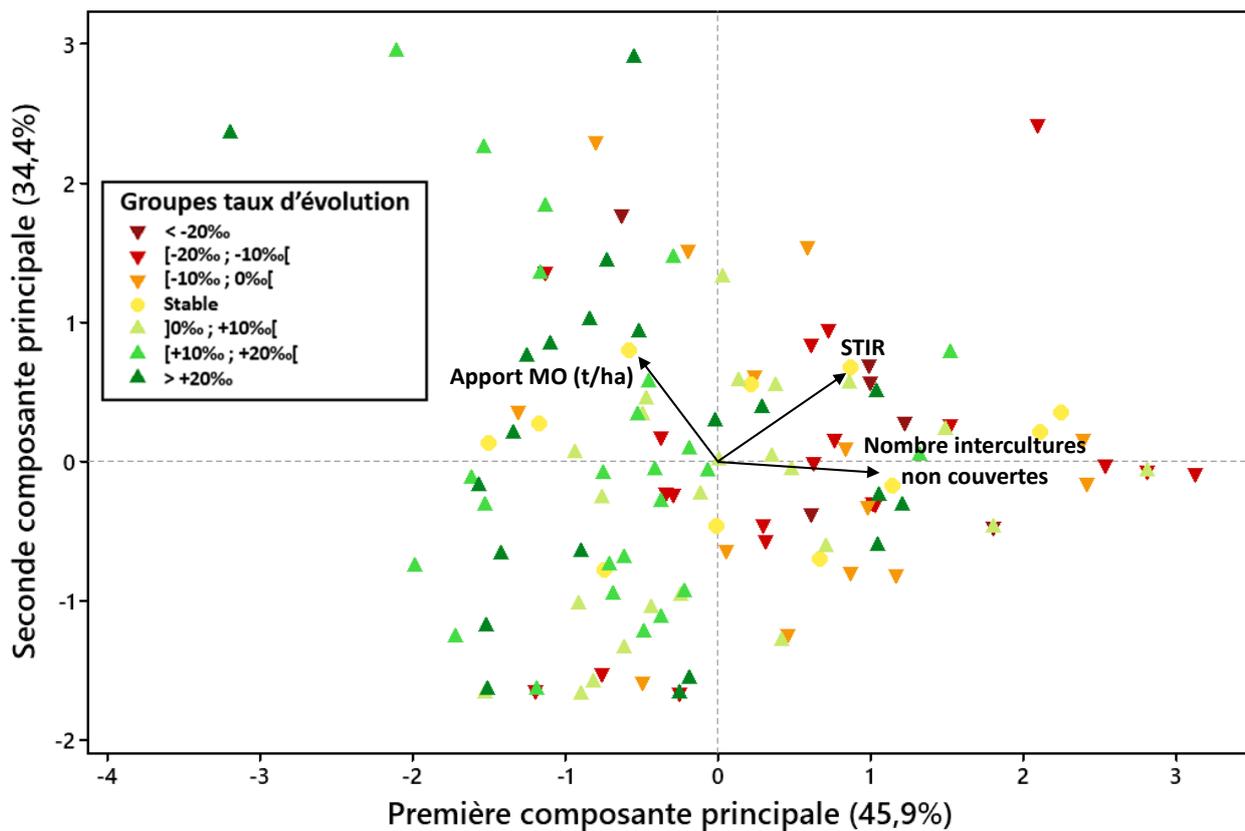


Figure 22 ACP sur les facteurs influençant la séquestration, Vaud et Genève. Sur l'axe horizontal se trouvent les impacts mécaniques (STIR) et les inter cultures non couvertes. L'axe vertical représente le bilan des importations et exportations de matière organique.



## 8 REFERENCES

- Agirinfo. L'agriculture en terre vaudoise 2016. (At: [https://www.agirinfo.com/fileadmin/agir/Agriculture/Documentation/En\\_terre/L\\_agriculture\\_en\\_terre\\_vaudoise\\_2016.pdf](https://www.agirinfo.com/fileadmin/agir/Agriculture/Documentation/En_terre/L_agriculture_en_terre_vaudoise_2016.pdf). Accessed: 4/12/2019).
- Arminjon, L. 2019. Etude de faisabilité de l'utilisation de Bois Raméal Fragmenté au sein d'exploitations Suisses. Thèse de bachelor HEPIA, HES-SO - HEPIA Agronomie.
- Baranzini, A., Maradan, D. & Brokley, J. 2020. Agriculture de conservation : Potentiel de séquestration de CO2 dans le Canton de Genève et mécanismes de financement. HEG-HESSO GENEVE, Genève.
- Baveye, P.C., Schnee, L.S., Boivin, P., Laba, M. & Radulovich, R. 2020. Soil Organic Matter Research and Climate Change: Merely Re-storing Carbon Versus Restoring Soil Functions. *Frontiers in Environmental Science*, **8**, (At: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2020.579904/full>. Accessed: 29/10/2020).
- Boivin, P., Lemaître, T., Dupla, X. et Gondret, K., 2021. Séquestration de carbone dans les sols agricoles genevois. Étude de mise en œuvre. Rapport d'études, mandat OCEN et OCAN. HEPIA, Jussy Genève.
- Deluz, C., Nussbaum, M., Sauzet, O., Gondret, K. & Boivin, P. 2020. Evaluation of the Potential for Soil Organic Carbon Content Monitoring With Farmers. *Frontiers in Environmental Science*, **8**, (At: [https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2020.00113/full?utm\\_source=Email\\_to\\_authors\\_&utm\\_medium=Email&utm\\_content=T1\\_11.5e1\\_author&utm\\_campaign=Email\\_publication&field=&journalName=Frontiers\\_in\\_Environmental\\_Science&id=553051](https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2020.00113/full?utm_source=Email_to_authors_&utm_medium=Email&utm_content=T1_11.5e1_author&utm_campaign=Email_publication&field=&journalName=Frontiers_in_Environmental_Science&id=553051). Accessed: 30/7/2020).
- Fleury, P., Chazoule, C. & Peigné, J. 2011. Agriculture biologique et agriculture de conservation : ruptures et transversalités entre deux communautés de pratiques. In: *Colloque SFER/RMT DevAB/Laboratoire Cultures et sociétés en Europe "Les transversalités de l'agriculture biologique,"* p. 12. Strasbourg.
- Jian, J., Du, X., Reiter, M.S. & Stewart, R.D. 2020. A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping. *Soil Biology and Biochemistry*, **143**, 107735.
- Johannes, A., Matter, A., Schulin, R., Weisskopf, P., Baveye, P. & Boivin, P. 2017. Corrigendum to "Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter?" [*Geoderma* 302 (2017) 14–21]. *Geoderma*.
- Kravchenko, A.N., Guber, A.K., Razavi, B.S., Koestel, J., Quigley, M.Y., Robertson, G.P. & Kuzyakov, Y. 2019. Microbial spatial footprint as a driver of soil carbon stabilization. *Nature Communications*, **10**, 3121.
- Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B.S., Field, D.J., Gimona, A., Hedley, C.B., Hong, S.Y., Mandal, B., Marchant, B.P., Martin, M., McConkey, B.G., Mulder, V.L., O'Rourke, S., Richer-de-Forges, A.C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C.-C., Vågen, T.-G., van Wesemael, B. & Winowiecki, L. 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, **292**, 59–86.
- Payen, F.T., Sykes, A., Aitkenhead, M., Alexander, P., Moran, D. & MacLeod, M. 2020. Soil organic carbon sequestration rates in vineyard agroecosystems under different soil management practices: A meta-analysis. *Journal*



*of Cleaner Production*, 125736.

Peatlands : Sustainable management of organic soils - NFP [Nr.]. 2018. (At: <http://www.nfp68.ch/en/projects/key-aspect-1-soil-organic-matter/peatlands>. Accessed: 2/1/2021).

OFAG. 2018. Système d'information de politique agricole. Office Fédéral de l'Agriculture (OFAG).

OFAG. 2020. Ordonnance sur le cadastre de la production agricole et la délimitation de zones. Office Fédéral de l'Agriculture (OFAG).

USDA-ARS-NSL. 2003. RUSLE1.06c and RUSLE2.

## 9 ANNEXES

### Annexe 1 – Calcul des Densités apparentes à -100 hPa

Afin d'estimer la densité apparente à capacité au champs des sols vaudois, nous avons utilisé une base de données interne (projets Strudel et BiodivSol) comprenant 75 analyses issues d'échantillons non remaniés dont celle de la densité apparente à -100 hPa (Da -100) (considérée comme proche de la capacité au champ). Nous avons estimé la densité apparente à capacité au champ Da<sub>-100</sub> pour la valeur médiane de MO/Argile que nous avons calculée sur Vaud. Pour ce faire nous avons utilisé la régression linéaire significative entre Da-100 et MO/ Argile de notre jeu de données interne de 75 analyses (Annexe 1). Ce qui nous donne une densité apparente de 1.333 g/cm<sup>3</sup> (= 1.333 t/m<sup>3</sup>) pour les GC et de 1.232 g/cm<sup>3</sup> (= 1.232 t/m<sup>3</sup>) pour le PP.

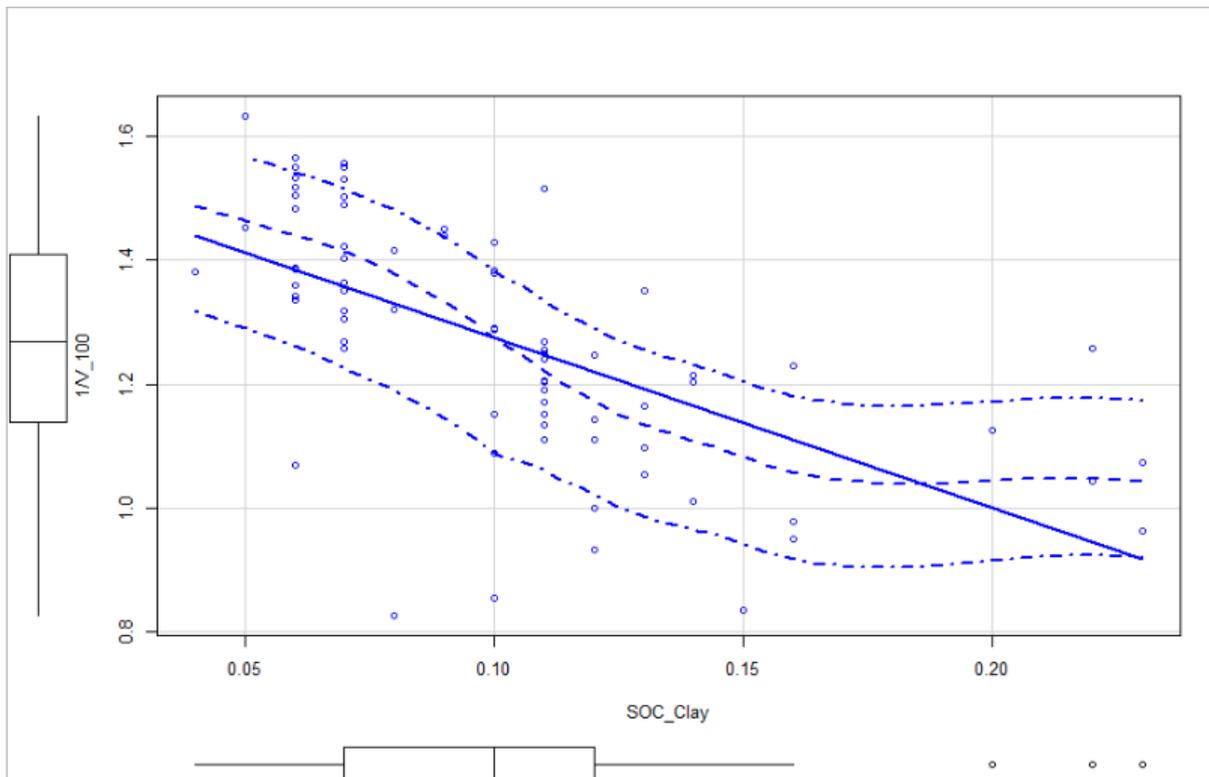


Figure 23 régression linéaire entre Da-100 et MO/Argile, La ligne en trait plein est la droite de régression linéaire (définie par la méthode des moindres carrés) entre les deux variables. La ligne centrale en pointillé est la courbe de régression locale de type lowess. Ici, la droite de régression est comprise dans l'intervalle de confiance de la courbe lowess, l'hypothèse de linéarité est donc acceptable. **Erreur ! Référence de lien hypertexte non valide.** . p-value: 0.00000003629



**Annexe 2 - Parcelles en Prairies Permanentes**

Teneurs en MO

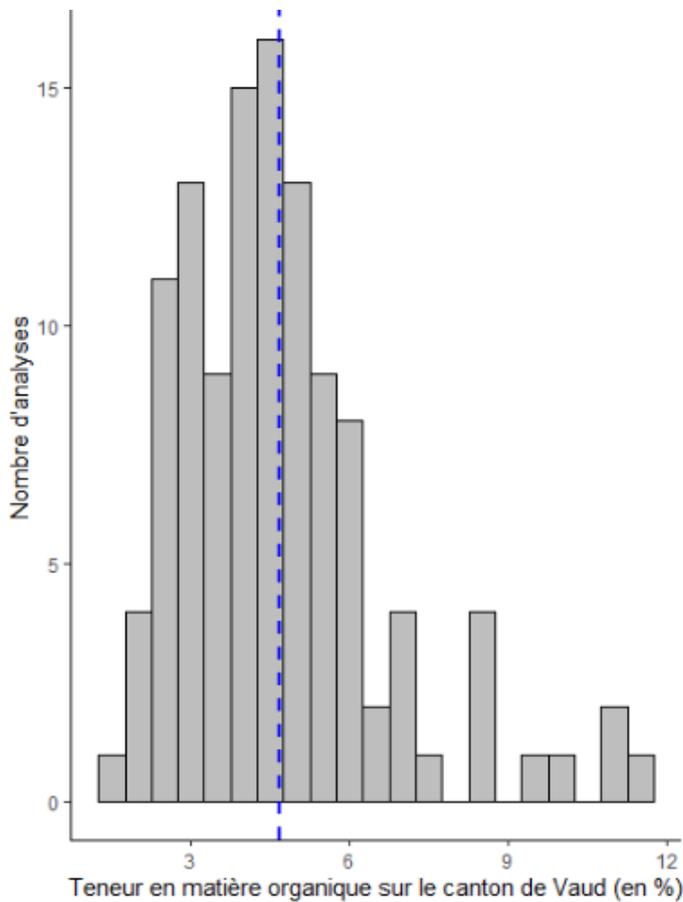


Figure 24 : histogramme de la distribution de la teneur en matière organique (%) sur Vaud en PP ( la ligne en pointillée bleu indique la moyenne : 4.67%) ( largeur barre = 0.5)

Tableau 8 : Distribution de la matière organique (en %) des prairies permanentes sur Vaud (115 analyses)

	minimum	1 <sup>er</sup> quartile	médiane	moyenne	3 <sup>ème</sup> quartile	maximum
Teneur en MO en %	1.70	3.25	4.40	4.67	5.50	11.50

Un total de 5 valeurs aberrantes sur 115 valeurs ont ainsi été détectées. Ces observations présentes des valeurs de MO supérieures à la valeur du 3<sup>ème</sup> quartile plus 1.5 fois l'intervalle inter-quartile. Nous les avons supprimées du jeu de données, ce qui revient à borner ce dernier à 9.3 % de MO et à conserver uniquement 111 analyses en PP dans notre étude.

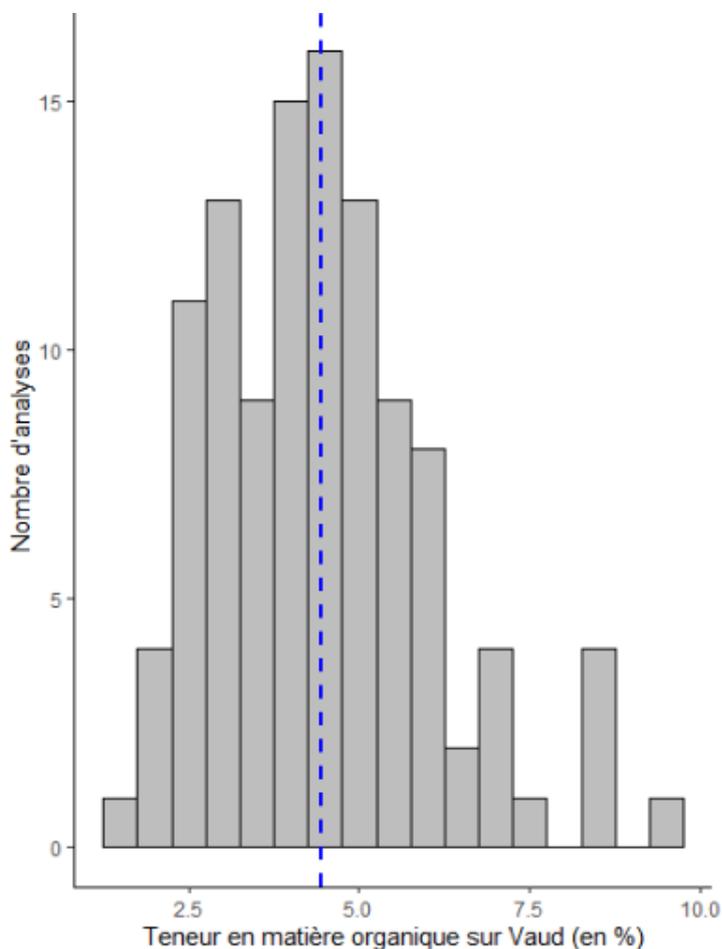


Figure 25 : histogramme de la distribution de la teneur en matière organique (%) sur Vaud en PP après avoir supprimé les valeurs aberrantes ( la ligne en pointillée bleu indique la moyenne : 4.443%) ( largeur barre = 0.5)

Tableau 9 : Distribution de la matière organique (en % ) des prairies permanentes sur Vaud après avoir supprimé les valeurs aberrantes (111 analyses)

	minimum	1 <sup>er</sup> quartile	médiane	moyenne	3 <sup>ème</sup> quartile	maximum
Valeur de MO en %	1.700	3.150	4.300	4.443	5.300	9.300



Prairies Permanentes : Rapport MO/ Argile

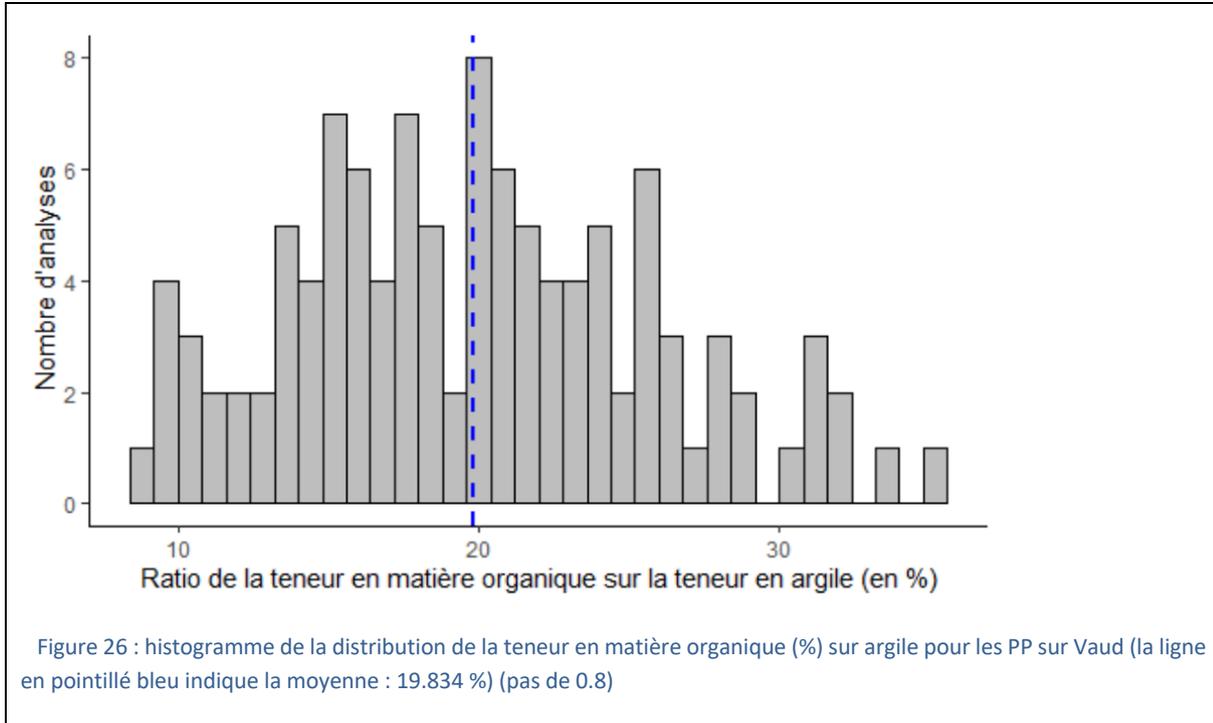


Tableau 10 : Distribution du rapport de matière organique (en % ) sur argile des prairies permanentes sur Vaud (111 analyses)

	minimum	1 <sup>er</sup> quartile	médiane	moyenne	3 <sup>ème</sup> quartile	maximum
Valeur de MO/ Argile en %	9.09	15.513	19.922	19.834	24.077	34.962



### Annexe 3 - détail du calcul d'Évaluation du déficit de carbone organique dans les sols (MO/Argile) sur le canton de Vaud

Le déficit de stockage de carbone sur le canton est calculé à partir de la différence entre la moyenne des rapports  $\frac{\text{teneur en MO}(\%)}{\text{teneur en argile}(\%)}$  inférieurs à 17% sur le canton et le rapport de MO/Argile égal à 17% qui est une valeur à cibler pour garantir une qualité structurale acceptable (Johannes *et al.*, 2017).

Noter que ce rapport de 17% est atteignable en grande culture sur le plateau suisse que ce soit en labour, SD ou AC d'après les travaux de (Johannes *et al.*, 2017).

Pour calculer le déficit, nous avons appliqué la formule ci-dessous en utilisant le rapport de MO/Argile moyen des 1660 analyses en GC présentant un taux inférieur à 0.17 ainsi que la valeur médiane de teneur en argile pour les 2202 parcelles initialement étudiées qui est de 19.9 pour les GC.

$$\text{Déficit} = \frac{\left( (0.17 - \text{moyenne des rapports } \frac{MO}{A} < \text{à } 0.17 \text{ pour Vaud}) \right) \times \text{teneur en argile médiane VD en } \%}{100}$$

Afin de calculer le déficit en Tonnes de MO par ha, nous avons multiplié le déficit par la hauteur de prélèvement (0.20 m) et la surface d'un hectare (10000 m<sup>2</sup>) et le pourcentage de terre fine moyen dans les sols vaudois a été estimé à 0.90 ainsi que par la Densité apparente à capacité au champ.

$$\text{Déficit en Tonne de MO par ha} = \text{Déficit} \times \text{hauteur de prélèvement en m} \times \text{surface d'un hectare en m}^2 \times \text{Da à capacité au champs (en Tonne. m}^{-3}) \times \text{pourcentage terre fine}$$

Afin d'estimer la densité apparente à capacité au champs des sols vaudois, nous avons utilisé une base de données interne (strudel et biodivaud) comprenant 75 analyses issues d'échantillons non remaniés dont celle de la densité apparente à -100 hPa (Da -100) (considérée comme proche de la capacité au champs). Nous avons estimé la densité apparente à capacité au champ pour Vaud de deux manières :

- 1) Nous avons pris la médiane de la Da -100 du jeu de données comprenant les 75 analyses. Ce qui nous donne une densité apparente de 1.269 g/cm<sup>3</sup> (= 1.269 t/m<sup>3</sup>) que ce soit pour les PP ou GC
- 2) Nous avons estimé la Da -100 pour la valeur médiane de MO/Argile que nous avons calculé sur Vaud à partir des 2090 analyses de Sol conseil (13.56 cf.)
- 3) Tableau 3). Pour ce faire nous avons utilisé la régression linéaire significative entre Da-100 et MO/Argile de notre jeu de données interne de 75 analyses (Annexe 1). Ce qui nous donne une densité apparente de 1.333 g/cm<sup>3</sup> (= 1.333 t/m<sup>3</sup>) pour les GC et de 1.232 g/cm<sup>3</sup> (= 1.232 t/m<sup>3</sup>) pour le PP.

Puis nous sommes passé du déficit en tonne de MO par hectare, au déficit en tonne de MO pour les surface agricoles en GC en multipliant ce dernier par la surface en GC sur Vaud (55423 ha de GC en et 47795 ha en herbage 2015 selon agirinfo (Agirinfo,))

$$\begin{aligned} \text{Déficit en Tonne de MO pour les surfaces agricoles (GC ou PP)} \\ = \text{Déficit en Tonne de MO par ha} * \text{total des surfaces agricoles ( GC ou PP)} \end{aligned}$$

Pour finir nous sommes passé des tonne de MO en tonne de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) en transformant la MO en carbone organique (CO) via le facteur utilisé par les laboratoires accrédités pour faire les analyses PER (1.725) puis en



multipliant le tout par le rapport entre la masse moléculaire du CO<sub>2</sub> et la masse moléculaire du carbone organique ( 44/12=3.667).

$$\text{Déficit en Tonne de } CO_2 \text{ pour les surfaces agricoles (GC ou PP)} = \text{Déficit en Tonne de MO pour les surfaces agricoles (GC ou PP)} \times 1.725 \times \left(\frac{\text{masse moléculaire du } CO_2}{\text{masse moléculaire du C}}\right)$$

Tableau 11 : Rappel des valeurs fixes utilisées dans les calculs de déficit

Rapport de MO/Argile à atteindre	0.17
Hauteur de prélèvement en m	0.20
Surface d'un ha en m <sup>2</sup>	10 000
Surface agricole en GC en ha	55423
Surface agricole en PP en ha	47795
Facteur de conversion MO → CO	1.725
Facteur de conversion C → CO <sub>2</sub>	3.667

Tableau 12 : Résultats des déficits en MO et en CO<sub>2</sub> pour les grandes cultures sur Vaud calculé avec la Da apparente médiane à capacité au champ

Moyenne des rapports MO/Argile (1660 analyses)	DA-100 VD médiane (75 analyses)	médiane de la teneur en argile % (2090 analyses)	déficit	déficit en Tonnes de MO par ha	déficit en Tonnes de MO pour toute les GC	total en Tonnes CO <sup>2</sup> pour les GC
0.12467	1.269	19.9	0.0090	20.605	915357.92	1'945 688.32



Tableau 13 : Résultats des déficits en MO et en CO<sub>2</sub> pour les grandes cultures sur Vaud avec la Da apparente à capacité au champs estimées à l'aide de la régression

rapport MO/Argile (1660 analyses)	Da apparente estimée à partir du ratio MO/Argile médian des 2090 analyses	médiane de la teneur en argile % (2090 analyses)	déficit	déficit en Tonnes de MO par ha	déficit en Tonnes de MO pour toute les GC	total en Tonnes CO <sup>2</sup> pour les GC
0.12467	1.333	19.9	0.0090	21.644	961522.54	2'043 816.03