CANTON DE VAUD

Indicateurs de développement durable

Matière organique et activité biologique dans les sols agricoles

Février 2014

pEaudSol
V Maître
P Du Pasquier
Teinture 11
1880 Bex

Véronique Maître, bureau pEaudSol, 079 780 65 00, veronique.maitre@peaudsol.ch

Résumé

Ce travail concerne l'évaluation de la fertilité des sols agricoles vaudois. Il est ciblé en particulier sur la caractérisation de l'état de la fonction biologique des terres assolées du canton. S'inscrivant dans une approche de développement durable, ce travail vise également à tester des indicateurs fiables et utilisables à long terme pour surveiller l'évolution des terres cultivées.

Mise en place du réseau d'observation 2012

A cet effet, un réseau d'observation a été mis sur pied en 2012. Celui-ci reprend les données de 30 parcelles cultivées en terres ouvertes décrites dans le cadre d'un ancien réseau plus vaste, mis en place dans les années 75 par la station fédérale de recherches agronomiques de Changins (Neyroud, 1978), en collaboration avec le SVVA et le SRVA[1].

Le taux de matière organique est comparé pour déterminer l'évolution de ce paramètre après plus de 35 ans de grandes cultures. La quantité de carbone stocké actuellement dans l'horizon de labour (horizon sur toute son épaisseur, à savoir entre 30 et 45 cm selon les sites) est calculée en utilisant des mesures de densité apparente. Enfin, certains paramètres biologiques (biomasse ATP et minéralisation du carbone organique selon le groupe de travail biologie des sols***)*** sont analysés en référence aux travaux réalisés sur les sols agricoles du canton de Fribourg (FRIBO).

Nous avons rencontré chacun des exploitants pour obtenir des informations sur la conduite des parcelles concernées (rotation, travail du sol et apport de fumier). Sur la base de cette enquête, un traitement statistique a pu être réalisé pour mettre en évidence l'influence éventuelle des pratiques agricoles sur le taux de matière organique et l'activité biologique du niveau 0-20 cm.

Résultats analytiques du réseau d'observation 2012

La valeur médiane du **taux de matière organique 2012** du niveau 0-20 cm est de 2.8 %. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celle des terres assolées du FRIBO (2.5 %, cycle 5 2007-2011). Sur 29 sites non tourbeux, 4 échantillons seulement se caractérisent par des teneurs en matière organique faibles selon les normes DBF (2009).
En utilisant des méthodes statistiques, on a mis en évidence que les taux mesurés en 2012 peuvent être considérées comme équivalentes à ceux mesurés lors de la campagne d'échantillonnage des années 1975.

La valeur médiane calculée des **stocks de carbone** est de l'ordre de 7.9 kg C/m^2, soit 79 T C/ha ou 13.6 kg de matière organique /m^2.

Les **densités apparentes pondérées** de l'horizon A sont assez variables, comprises entre 1.2 et 1.6. Aucun site ne présente de dépassement de la valeur indicative selon les références du groupe de travail „physique du sol" (2009).

La valeur médiane des concentrations en ***ATP*** pour les terres assolées est de l'ordre de 1000 ngATP/g. Cette valeur est supérieure à celle des terres assolées du FRIBO (658 ngATP/g, cycle 5 2007-2011).

La valeur médiane pour de la ***minéralisation du carbone organique*** les terres assolées est de l'ordre de 700 μgMO/g/15j, valeur du même ordre de grandeur que les terres assolées du FRIBO (567 μgMO/g/15j, cycle 5 2007-2011).

Ainsi, ce travail a permis d'établir une sorte de carte de visite 2012 de l'état de fertilité des terres assolées sélectionnées pour le réseau. Les taux de matière organique sont équivalents en 2012 et en 1975 : les sols ont probablement atteint un état d'équilibre. Comparés aux valeurs de référence définies à partir des terres assolées du canton de Fribourg, la plupart des sites présente une biomasse ATP suffisante (pauvre-3, médiocre-4, satisfaisant-12, riche-7, très riche-3). L'activité biologique (minéralisation du carbone organique) est également suffisante pour la plupart de sites (pauvre-3, médiocre-4, satisfaisant-14, riche -2, très riche-6) 3. Il est important de noter que les sols les plus riches en biomasse ATP ne sont pas nécessairement les plus actifs La comparaison avec d'autres réseaux d'observation, par exemple les travaux du NABO (Observatoire national des sols), est pour le moment délicate car ceux-ci utilisent d'autres méthodes de quantification de l'activité biologique,

[1] Service vaudois de vulgarisation agricole et service romand de vulgarisation agricole

Mise en évidence de l'impact des pratiques agricoles et recommandations

A partir des informations récoltées lors des enquêtes, les pratiques agricoles sont synthétisées pour chaque parcelle de prélèvement sous forme de quotient sur les 6 années renseignées (nombre d'années en prairie, nombre d'années en sarclées, nombre d'années avec interculture, nombre de fois où du fumier a été apporté, nombre de fois où le labour conventionnel a été pratiqué). Leur influence sur le taux de matière organique et sur les paramètres biologique a été testé de manière statistique.

Sur la base des résultats statistiques obtenus, on peut donner les conseils suivants pour préserver la fertilité des sols dans un système de grandes cultures :

Le taux de matière organique est significativement influencé par la proportion de cultures sarclées dans la rotation. Plus précisément, la teneur en matière organique diminue lorsque la part d'années cultivées en sarclées augmente. En outre, on constate un effet significatif de la part de prairies sur la minéralisation du carbone organique, au-delà des effets potentiels liés aux propriétés du sol. Tant que l'on reste dans un système de grandes cultures, il est donc conseillé de diminuer la part des sarclées au profit de la part et la durée des prairies temporaires qui favorisent l'activité biologique et de fait la fertilité des sols.

On constate un effet positif des apports de fumier sur le taux de matière organique, l'ATP et la minéralisation du carbone organique. L'apport de fumier est donc à privilégier. Dans ce sens, l'enfouissement des pailles devrait également être pratiqué.

Suivi de l'état de fertilité des sols agricoles vaudois, quels indicateurs de développement durable?

Sur la base de cette expérience, nous pouvons fournir les recommandations dans une perspective d'indicateurs de développement durable :

Même s'il est un facteur clé dans le fonctionnement d'un sol, le taux de matière organique est un paramètre insuffisant pour un tel type de suivi.

Dans l'objectif de surveillance de l'état de fertilité des sols, les paramètres les plus pertinents sont la minéralisation du carbone organique et le rapport CO_2/ATP, qui reflètent l'activité biologique des sols. En outre, étant donné la baisse de la biomasse microbienne inquiétante observée dans le réseau FRIBO, il faut continuer à suivre l'évolution de la biomasse ATP.

Pour raisonner en termes de développement durable, il faudrait élargir la base de données de référence à d'autres systèmes agro-écologiques, par exemple l'agriculture biologique ou des systèmes mettant en œuvre le semis direct.

Des essais au champ contrôlés et comparatifs seraient plus adaptés pour quantifier l'effet de telle ou telle pratique agricole donnée sur la fertilité des sols.

Table des matières

1. Introduction – Objectifs 1
2. Réseau d'observation 2
3. Méthodes 3
   3.1. Périodes d'échantillonnage 3
   3.2. Mesure des densités apparentes 4
   3.3. Mesure des paramètres chimiques et biologiques 4
   3.4. Pratiques agricoles sur les parcelles concernées 5
4. Teneur en matière organique 2012 6
   4.1. Teneurs en matière organique dans le niveau 0-20 cm 6
   4.2. Teneurs en matière organique de tout l'horizon A 7
5. Teneur en matière organique dans les sols - Evolution 1975-2012 8
   5.1. Méthode 8
   5.2. Elimination de certains sites 8
   5.3. Comparaisons statistiques de la population retenue - années 1975 et 2012 9
6. Calcul du stock de matière organique dans l'horizon A – 2012 9
   6.1. Méthode de calcul 9
   6.2. Stocks de carbone dans l'horizon A 10
7. Densité apparente – état de compaction des sols 12
   7.1. Méthode d'estimation 12
   7.2. Résultats 12
8. Caractérisation de l'activité biologique dans l'horizon A – 2012 13
   8.1. Signification agronomique des paramètres biologiques 13
   8.2. La biomasse vivante ATP 14
   8.3. La minéralisation du carbone organique 14
   8.4. Le rapport CO_2/ATP 15
   8.5. Discussion 16
9. Autres paramètres de la fertilité 17
   9.1. La valeur C/N 17
   9.2. Le pH 18
10. Pratiques agricoles 2012 19
   10.1. Exploitation avec ou sans bétail 19
   10.2. Exportation des pailles à l'échelle de l'exploitation 19
   10.3. Apport de produits organiques 20
   10.4. Travail du sol* 20
11. Impact des pratiques agricoles sur la matière organique et les paramètres biologiques – Traitement statistique des données 21
   11.1. Effet de biais 21
   11.2. Effet des pratiques agricoles 22
12. Impact des pratiques agricoles sur la matière organique et les paramètres biologiques – Cas des deux sites passés en prairie permanente 29
13. Les principaux résultats obtenus sur le réseau vaudois 30
14. Quels indicateurs de développement durable pour les sols agricoles vaudois ? 31
15. Quelles pratiques agricoles privilégier? 32

Bibliographie 33

Annexes 35

1. Introduction – Objectifs

Les sols sont une ressource limitée et non renouvelable soumise à de nombreuses menaces, notamment en agriculture. Il convient donc d'être particulièrement attentif à l'évolution des terres cultivées, en particulier des terres assolées car celles-ci sont soumises à de nombreuses contraintes et l'écosystème est mis à mal.

S'inscrivant dans une approche de développement durable, ce travail vise à sélectionner des indicateurs fiables et utilisables à long terme pour surveiller l'évolution des terres cultivées ; l'objectif final est de mettre en place un réseau d'observation des sols agricoles vaudois.

Les techniques culturales de l'agriculture intensive ont une influence reconnue sur les paramètres biologiques alors que ceux-ci conditionnent la fertilité d'un sol. Ce sont donc ces paramètres qui sont étudiés dans le cadre de ce travail. En outre, pour compléter cette approche de développement durable, le stock de carbone dans les sols a également été calculé.

Enfin, le mode de gestion des terres ayant des effets importants sur la nature des restitutions et sur un certain nombre de facteurs qui affectent les cycles biogéochimiques et les communautés microbiennes du sol, on a utilisé des méthodes statistiques pour mettre en évidence, s'il en est, des relations entre les pratiques agricoles et les paramètres biologiques.

Pour répondre à ces objectifs, 30 parcelles cultivées en terres ouvertes ont été sélectionnées. Chaque parcelle a fait l'objet de prélèvements en 2012 pour mesurer les paramètres biologiques et la densité apparente des sols. Ces observations ont été complétées par une discussion avec chaque exploitant, ciblée sur les rotations et les pratiques agricoles en cours sur ces parcelles. Les résultats ont été valorisés et interprétés comme suit :

- constat de l'état de fertilité des sols vaudois en 2012 basé sur
  - le taux de matière organique et les paramètres biologiques
  - l'état de compaction des sols
  - le calcul du stock de carbone
- constat des pratiques agricoles 2012, ciblé sur les facteurs reconnus comme ayant une influence (travail du sol, apport de fumier, rotation)
- utilisation de tests statistiques pour mettre en évidence, le cas échéant, le rôle des pratiques agricoles sur le taux de matière organique et les paramètres biologiques
- comparaison des teneurs en matière organique mesurées dans les années 1975 sur les mêmes parcelles, pour vérifier si celles-ci se maintiennent.

Je tiens tout particulièrement à remercier Pierre Julien pour son aide dans la conception/réalisation des enquêtes et ses remarques précieuses lors de l'interprétation des résultats.
Je n'oublie pas non plus l'accueil chaleureux des fameux pédologues du canton, Michel Gratier et Jean-Auguste Neyroud qui m'ont guidée dans la recherche des sites, et de Nicolas Rossier au moment de l'interprétation des paramètres biologiques.

Enfin, je suis reconnaissante aux exploitants agricoles concernés de m'avoir accordé du temps pour le questionnaire et d'avoir mis leur parcelle à disposition pour les prélèvements.

Cette étude a été entièrement financée par la DGE-DIRNA ; elle a été soutenue par le Service de l'agriculture.

2. Réseau d'observation

Le canton de Vaud dispose d'une base de données géoréférencée (PEDOLOGIE) qui comprend la description de plusieurs centaines de fosses pédologiques réparties sur tout le canton, à l'exception des districts de la Riviera, du Pays d'en Haut et d'Aigle.

Cette base contient notamment les données recueillies par la station fédérale de recherches agronomiques de Changins, en collaboration avec le SRVA[1] et le SVVA[2], dans le cadre d'une enquête sur la fertilité des sols vaudois dans les années 1975 (Neyroud, 1978). Nous y avons choisi 28 sites répartis sur l'ensemble du territoire cantonal couvert.

En outre, deux sites décrits en 1979 à l'occasion de la pose d'une conduite de gaz à Thierrens et à Suchy par le SESA (contact M. Gratier) ont également été sélectionnés.

Ainsi, on dispose pour chaque site de la description de fosses pédologiques ainsi que des analyses physicochimiques suivantes : pH_{eau}, pH_{KCl}, taux de matière organique (méthode Anne), granulométrie (%argile, %limons et %sables – méthode de la pipette de Robinson), teneur en carbonate de calcium.

Finalement, le réseau d'observation 2012 comprend 30 parcelles qui étaient cultivées en terres ouvertes dans les années 75. Celui-ci est présenté en figure 1.

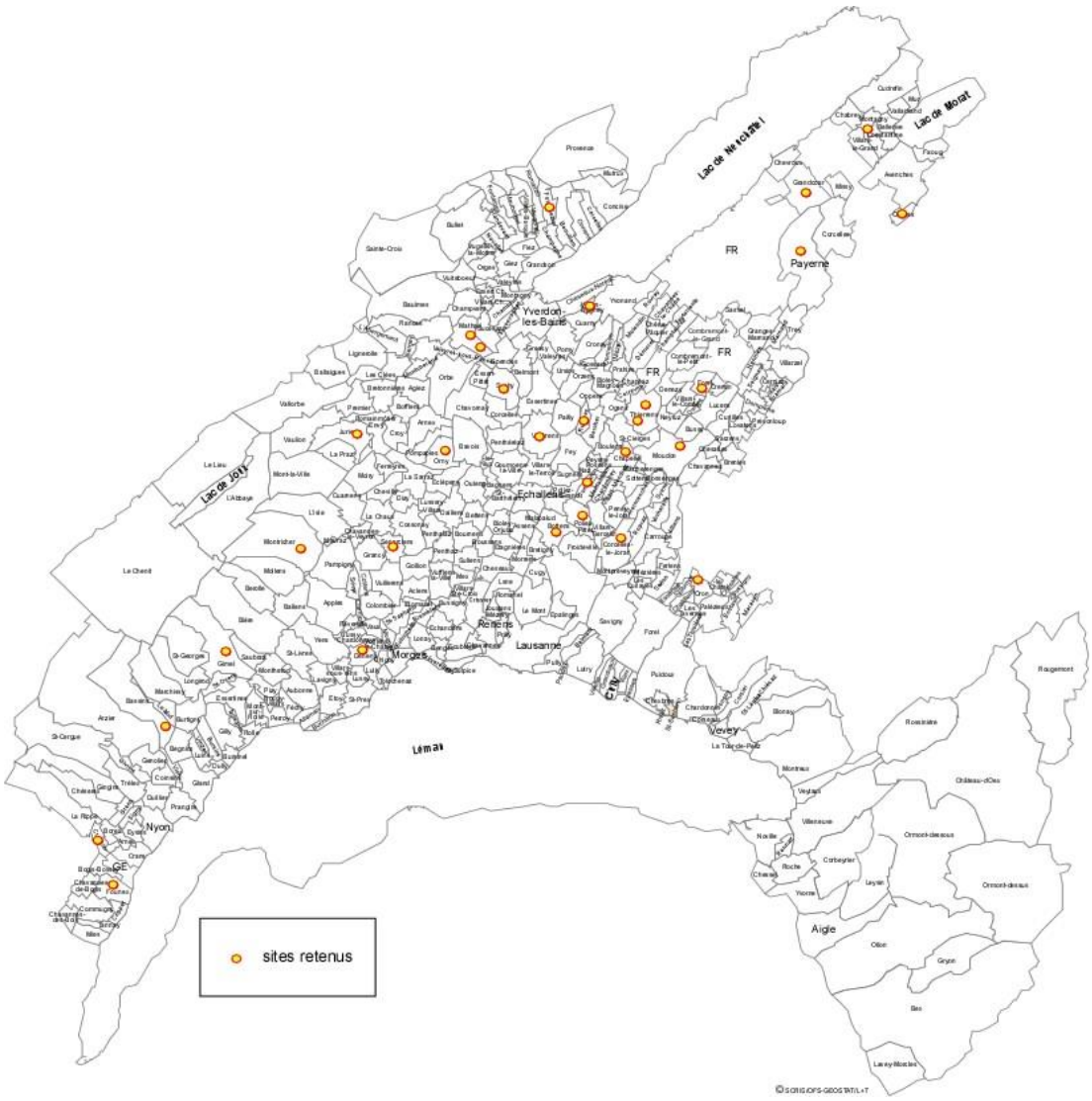

Figure 1 : Réseau d'observation 2012

[1] Service romand de vulgarisation agricole

[2] Service vaudois de vulgarisation agricole

3. Méthodes

Ces 30 sites ont été de nouveau échantillonnés pour analyses en 2012.

3.1. Périodes d'échantillonnage

Les échantillonnages ont été planifiés en fonction des cultures 2012 (voir détail dans tableau 1) :

- les parcelles prévues en sarclées en 2012 ont été échantillonnées l'hiver précédent avant les apports organiques, juste après le dégel ;
- les prairies temporaires ont été échantillonnées au printemps, après la première coupe et avant les apports suivant cette coupe ;
- les céréales et le colza ont été échantillonnés en été, après la récolte et avant le déchaumage.

site no	commune	X	Y	altitude ±5 m	date de prélèvement	conditions de prélèvement
Suchy-gaznat	Suchy	536013	175383	580	31.07.2012	été céréales après récolte
Thierrens-gaznat	Thierrens	547947	173735	765	31.07.2012	été céréales après récolte
VD010	Crassier	502720	136686	465	21.07.2012	été colza après récolte
VD013	Founex	503414	132997	425	02.03.2012	hiver, sol travaillé après maïs
VD015	Bassins	507977	146325	705	25.05.2012	printemps prairies avant apports
VD020	Gimel	512482	152287	800	01.06.2012	printemps prairies avant apports
VD027	Montricher	518430	160430	710	16.05.2012	printemps prairies avant apports
VD036	Vuarrens	539519	172253	660	30.07.2012	été colza après récolte
VD037	Dommartin	543609	166162	750	27.07.2012	été céréales après récolte
VD039	Bottens	541251	163096	750	24.07.2012	été céréales avant récolte
VD043	Montmagny	567075	196875	525	23.07.2012	été céréales après récolte
VD048	Villars-Epeney	543560	181797	525	30.07.2012	été céréales après récolte
VD052	Moudon	552665	170011	505	23.07.2012	été céréales après récolte
VD057	Thierrens	547358	173696	755	07.03.2012	hiver, sol travaillé après prairie
VD062	Oron-la-Ville	552508	159113	625	27.07.2012	été céréales après récolte
VD063	Senarclens	526571	160665	550	24.07.2012	été céréales après récolte
VD066	Chapelle/Moudon	546812	169591	790	12.07.2012	été céréales après récolte
VD076	Denens	523443	152989	510	21.07.2012	été colza après récolte
VD096	Juriens	524246	170349	800	07.08.2012	été céréales après récolte
VD101	Fontanezier	540417	189402	810	07.08.2012	été céréales après récolte
VD105	Mathod	533589	178322	435	28.02.2012	hiver sarclées avant apports
VD107	Mathod	533531	179278	435	30.07.2012	été céréales après récolte
VD117	Grandcour	560962	192056	490	02.05.2012	printemps prairies avant apports
VD140	Orny	530908	169737	450	28.02.2012	hiver prairie
VD200	Ruyeres	543359	171277	610	07.03.2012	hiver, sol travaillé après blé
VD205	Poliez-Pittet	542712	164633	780	31.07.2012	été céréales après récolte
VD218	Oleyres	569869	189300	550	01.08.2012	été céréales après récolte
VD220	Payerne	561294	186501	450	28.02.2012	hiver, sol travaillé après moutarde
VD221	Forel-sur-Lucens	553004	174723	675	29.02.2012	hiver, sur dérobée après pâture
VD246	Corcelles-le-Jorat	546600	161305	790	07.05.2012	printemps prairies avant apports

Tableau 1 : Réseau d'observation et conditions de prélèvement 2012

3.2. Mesure des densités apparentes

Pour chaque site, une mini-fosse a été creusée à la bêche jusqu'à la base de l'horizon A. Les échantillons prélevés pour mesure de densité apparente correspondent aux mottes de terre telles qu'elles se sont présentées (échantillon non remanié). Ainsi, les mottes sont de taille variable selon le site. On a prélevé 2 à 3 niveaux par site, en effectuant au moins 3 répétitions par niveau.

La densité apparente a été mesurée en laboratoire par la méthode de mesure du volume d'un échantillon de sol par la poussée d'Archimède (Boivin et al, 1990) après avoir imposé une humidité d'environ 1 cb (ou 10 cm d'eau) aux mottes par capillarité ascendante.

3.3. Mesure des paramètres chimiques et biologiques

Les paramètres chimiques et biologiques ont pour leur part été mesurés sur des échantillons composites prélevés avec une tarrière manuelle sur une placette de 100 m^2 (dont un coin correspond à la mini-fosse) selon la méthode préconisée par l'OFEV (2003). Chaque échantillon est composé du mélange de 12 à 15 prélévements répartis de façon aléatoire dans la placette ; chaque échantillon a été conservé en glaciaire avant d'être apporté au laboratoire.

Pour chaque site, nous avons prélevé le niveau 0-20 cm (niveau 1) de façon à pouvoir comparer nos résultats à ceux d'autres études en Suisse, notamment ceux du réseau fribourgeois d'observation des sols (FRIBO). Ce réseau a été mis en place en 1987 (Julien et Morand, 1995) et fournit actuellement les résultats de 5 cycles d'analyse de sols agricoles (Rossier et al, 2012). En outre, comme un des objectifs est de calculer le stock de carbone présent sur toute l'épaisseur de l'horizon A, nous avons également échantillonné le reste de cet horizon (20 cm-le reste de l'horizon A, niveau 2).

Les paramètres classiques ont été analysés par le Laboratoire Sol-Conseil à Changins, selon les méthodes de référence des Stations Agroscope sur fraction tamisée à 2 mm et séchée à 40 °C pendant 48 heures :

- pH eau
- pH KCl
- carbone organique par méthode au bichromate de potassium (méthode Anne), facteur de conversion du carbone en matière organique de 1,725
- azote total par la méthode Kjeldhal
- 3 fractions granulométriques par la méthode de la pipette de Robinson pour tous les échantillons du niveau 1 (0-20 cm)
- taux de carbonate de calcium par volumétrie (attaque HCl, dil.1 :1)

Les paramètres biologiques ont été dosés selon les méthodes standardisées (Maire, 1987) adaptées par l'OFEV (OFEV, 1996) :

- mesure de la teneur en adénosine triphosphate (ATP),
- mesure de la respiration via la mesure du dégagement de CO_2 (mesures à 4 jours, 9 jours et 15 jours d'incubation), qui résulte de la dégradation des substances organiques facilement disponibles et minéralisables

A partir de ces mesures expérimentales sont calculés (voir méthode en annexe 1 et résultats complets en annexe 3) :

- l'activité potentielle, qui correspond au niveau d'activité spécifique maximum (mesure du dégagement de CO_2 au jour j=0)
- la réactivité biologique, qui correspond à la capacité des microorganismes à maintenir une activité élevée
- la minéralisation du carbone organique, qui représente la quantité de matière organique minéralisée durant les 15 jours d'incubation (Min. C org.)
- le rapport CO_2/ATP, qui correspond à la minéralisation horaire moyenne du carbone organique pendant les 9 premiers jours d'incubation, rapportée à l'unité de biomasse ATP

Les paramètres biologiques interprétés dans ce rapport sont l'ATP, la minéralisation du carbone organique et le rapport CO_2/ATP.

3.4. Pratiques agricoles sur les parcelles concernées

Nous avons rencontré les exploitants agricoles des 30 parcelles concernées pour obtenir des informations d'ordre général au niveau de l'exploitation, ainsi que des détails sur les cultures et les pratiques agricoles mises en œuvre sur chaque parcelle.

Le questionnaire était ciblé sur les points suivants (voir modèle en annexe 2) :

- au niveau de l'exploitation
  - rotation type, part de prairies artificielles
  - exploitation avec ou sans bétail
  - utilisation d'engrais organique
  - enfouissement des pailles
- conduite de la parcelle concernée de 2008 à 2012
  - succession de cultures
  - travail du sol
  - apport d'engrais organique (si oui, lequel)
  - chaulage

RESULTATS

Tous les résultats bruts obtenus en 2012 dans le cadre de ce travail figurent en annexes 3 et 4. Les données des années 1975 sont listées en annexe 5.

Les calculs statistiques sont réalisés pour le niveau 0-20 cm, de façon à pouvoir comparer nos résultats à ceux d'autres études agronomiques, notamment à ceux du dernier cycle de mesure du FRIBO (2007-2011).

Le site VD105 est un site tourbeux atypique par rapport au reste de la population. Les calculs statistiques sont toujours faits avec et sans ce site tourbeux. En outre, deux sites se distinguent car ils sont exploités en prairie pâturée depuis plus de 10 ans (labourée en 2011 pour mettre en place une céréale de nettoyage pour le site VD39, encore en place pour le site VD246). Les calculs statistiques sont également effectués en retirant ces deux sites qui ne sont plus représentatifs de terres assolées.

Les outils d'interprétations, à savoir les normes DBF 2009 et la grille d'interprétation des paramètres biologiques selon FRIBO, sont également utilisés pour les résultats obtenus dans ce niveau 0-20 cm.

Néanmoins, les résultats bruts obtenus pour les deux niveaux sont donnés pour chaque site sous forme de diagramme en bâton pour chaque paramètre.

4. Teneur en matière organique 2012

4.1. Teneurs en matière organique dans le niveau 0-20 cm

La teneur en matière organique est interprétée en terme agronomique en tenant compte du taux d'argile, selon les normes DBF 2009 (Sinaj S et al., 2009).

Un échantillon correspond à un sol tourbeux typique des sols de la plaine de l'Orbe (VD 105). Pour les 29 autres sites, 26 échantillons se caractérisent par des teneurs en matière organique satisfaisantes (normales - 22 et élevés - 4). Seulement 3 échantillons sur 30 sont pauvres en matière organique (figure 2).

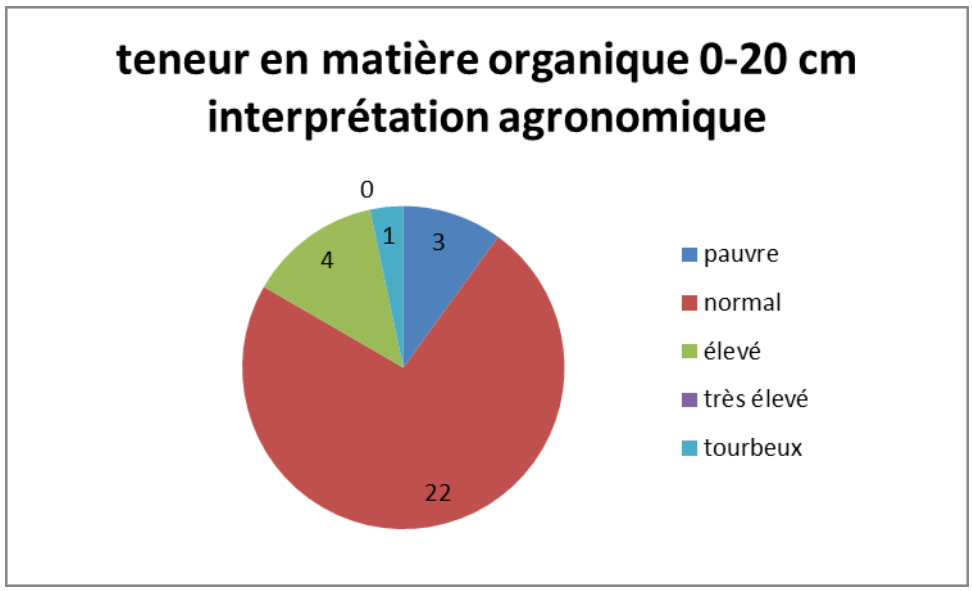

Figure 2 : Interprétation des teneurs en matière organique - 2012

Les résultats statistiques calculés sur les teneurs en matière organique du niveau 0-20 cm figurent dans le tableau 2. La médiane des terres assolées est de l'ordre de 2.8 % ; cette valeur est du même ordre de grandeur que celle du FRIBO (2.5 %, cycle 5 2007-2011).

MO % 0-20 cm	moyenne	médiane	min	max	n	écart type	erreur standard
Tous les sites	4.1	2.9	1.2	39.6	30	6.8	1.2
Tous les sites sans le sol tourbeux	2.9	2.8	1.2	6.8	29	1.3	0.2
Toutes les terres assolées sans le sol tourbeux	**2.8**	**2.8**	**1.2**	**6.8**	**27**	**1.3**	**0.2**

Tableau 2 : Données statistiques calculées pour la teneur en matière organique - 2012

4.2. Teneurs en matière organique de tout l'horizon A

La figure 3 représente les teneurs en matière organique mesurées dans les deux niveaux de prélèvements (0-20 cm et le reste de l'horizon A) pour chaque site. Les deux sites exploités en prairie pâturée depuis plus de 10 ans (retournée en 2011 pour mettre en place une céréale pour le site VD39, encore en place pour le site VD246) sont repérés en vert.

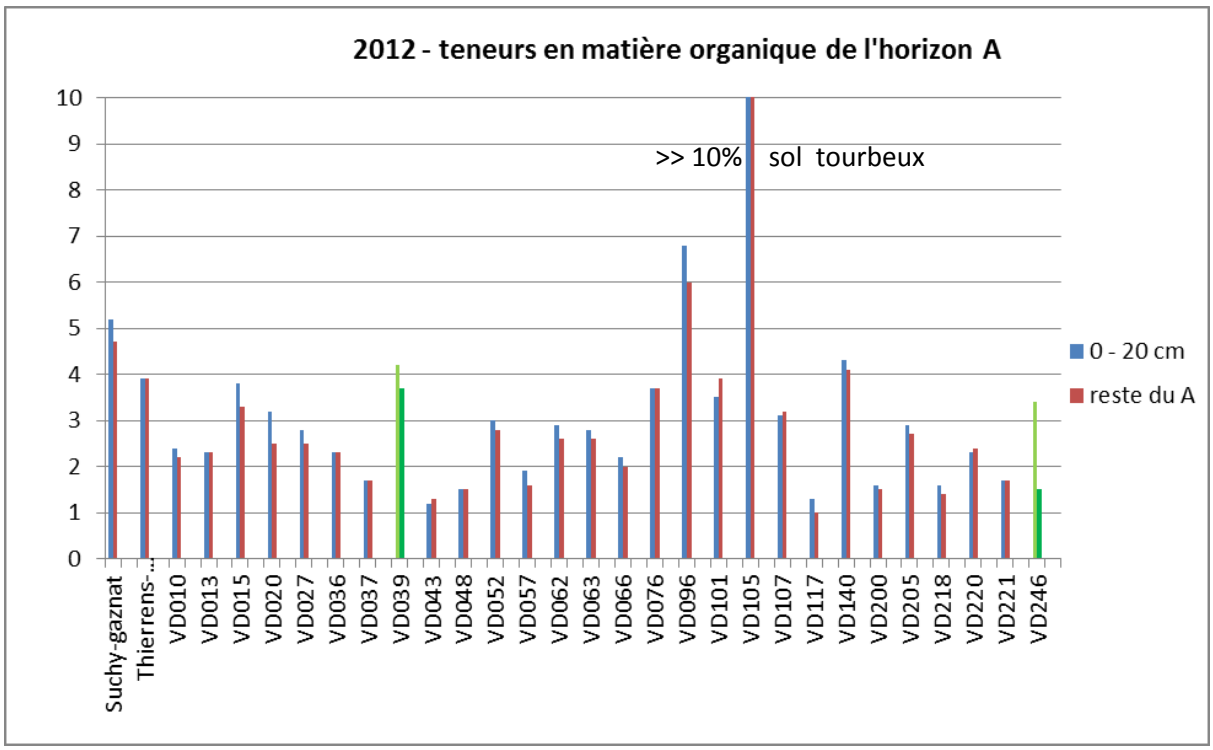

Figure 3 : Teneurs en matière organique dans les deux niveaux de l'horizon A - 2012

Les teneurs en matière organique sont du même ordre de grandeur dans les deux niveaux, souvent supérieures dans le niveau 0-20 cm (différence inférieure à 0,5%).

Les deux sites occupés par une prairie longue durée ne se distinguent pas du reste de la population. On observe une plus grande différence entre les deux niveaux pour le site qui est encore cultivé en prairie au moment des prélèvements (VD246), probablement car le site n'a pas été labouré depuis longtemps.

5. Teneur en matière organique dans les sols - Evolution 1975-2012

5.1. Méthode

Les données obtenues dans les années 75 correspondent à des échantillons prélevés dans des fosses pédologiques sur la totalité de l'horizon A. Les données 2012, quant à elles, correspondent à deux niveaux de prélèvements à la tarière : 0-20 cm et le reste de l'horizon A. Pour pouvoir comparer les deux séries de données, nous avons calculé, pour la donnée 2012, la moyenne pondérée en fonction de l'épaisseur de chaque niveau.

Sur cette base, les teneurs en matière organique représentatives de l'ensemble de l'horizon A sont comparées par des traitements statistiques (bureau EcoStats, Aurélie Thébault, http://ecostats34.free.fr/).

5.2. Elimination de certains sites

Comme nous l'avons déjà fait remarquer, l'échantillon VD105 est un sol tourbeux de la plaine de l'Orbe, atypique par rapport au reste de la population.

Au moment des prélèvements 2012, nous avons eu un doute sur la représentativité de 4 sites (par rapport aux sols décrits dans les années 1975 ou par rapport à la localisation de la parcelle enquêtée). Ce sont les sites Thierrens gaznat, Suchy gaznat, VD 101 (Fontanezier) et VD117 (Grandcour).

La figure 4 correspond à la représentation sous forme de régression réalisée pour tous les sites, pour tous les sites sans le sol tourbeux et pour tous les sites sans les 4 sites douteux et le sol tourbeux

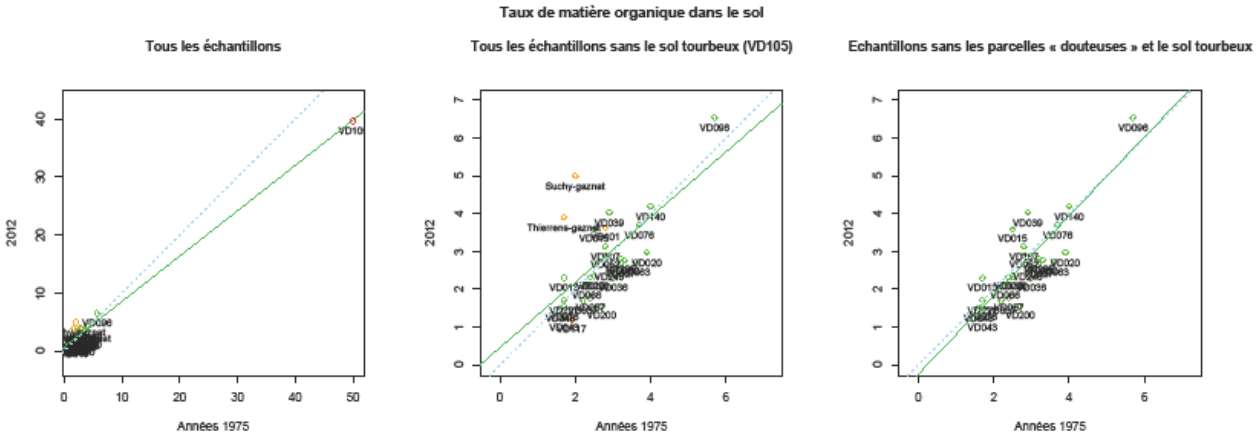

Figure 4 : Régressions linéaires des teneurs en matière organique (%) entre les données obtenues dans les années 1975 et 2012 - à gauche, tous les échantillons (sol tourbeux en rouge) - au milieu, tous les échantillons sans le sol tourbeux (en orange, les 4 sites douteux) - à droite, les échantillons sans sol tourbeux et sites douteux

On voit bien que la représentation sous forme de régression avec tous les sites n'est pas interprétable car le site tourbeux tire la relation. La représentation graphique avec tous les autres sites (figure. 4b), montre que les sites douteux (représentés en orange) se distinguent du reste de la population. En définitive, si on élimine le sol tourbeux et les 4 sites douteux, la droite de régression linéaire entre l'échantillonnage de 1975 et 2012 est proche de la droite 1 :1 (R^2 de corrélation : 0.73, $p < 0.001$).

Il semble donc que pour ces 25 sites retenus, les teneurs en matière organique sont équivalentes entre 1975 et 2012.

5.3. Comparaisons statistiques de la population retenue - années 1975 et 2012

La représentation sous forme d'histogrammes des 25 sites retenus montre que les teneurs moyennes ne semblent globalement pas différentes entre l'échantillonnage de 1975 et celui de 2012 (figure 5).

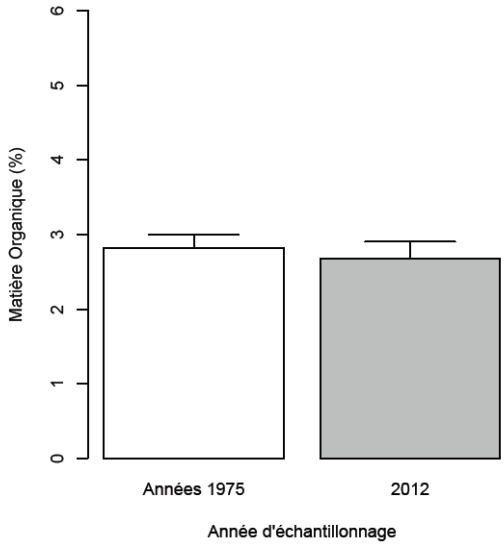

Figure 5 : Histogrammes des teneurs en matière organique (%) pour les 25 sites retenus

Pour confirmer cette observation, nous avons fait un test statistique. La distribution des valeurs de teneur en matière organique ne suivent pas une loi normale, nous avons dû utiliser un test non paramétrique de type Test de Wilcoxon.

Wilcoxon test	p-value
Tous les échantillons (n=30)	0.495
Sans l'échantillon de tourbe (n=29)	0.701
Sans les 5 échantillons douteux (n=25)	0.191

Tableau 3 : résultats des tests appariés de Wilcoxon pour l'analyse des teneurs en MO des sols échantillonnés dans les années 1975 et 2012

Les valeur P (p-value) calculées sont toujours supérieures à 0.05 (tableau 3). Ceci confirme qu'il n'existe pas de différence significative de teneur en matière organique entre l'échantillonnage de 1975 et celui de 2012 pour les 25 sites retenus. A noter que les résultats sont comparables si on teste les 30 sites.

Comme le montraient les représentations graphiques sous forme de régression (figure.3) ou d'histogramme (figure. 4), les teneurs en matière organique mesurées en 2012 peuvent être considérées comme équivalentes aux teneurs mesurées lors de la campagne d'échantillonnage des années 1975.

Pour information, la teneur moyenne en matière organique calculée sur les 765 échantillons de sols prélevés sur 250 parcelles du réseau des années 1975 s'élevait à 3.38 % (Neyroud et Zuodar, 1981).

6. Calcul du stock de matière organique dans l'horizon A – 2012

6.1. Méthode de calcul

Le calcul du stock de carbone a été réalisé en considérant toute l'épaisseur de l'horizon A. C'est à dire que l'on a pris en compte la densité apparente et l'épaisseur de chacun des 2 niveaux (0-20 cm et le reste du A) :

$$Stock\ carbone_{(horizon\ A)} = \sum p_i da_i MO_i (1-ch_i)\ pour\ les\ deux\ niveaux$$

p_i = épaisseur en cm - da_i = densité apparente (masse totale sec / volume total)

MO_i taux de matière organique exprimé en % C

chi = charge en cailloux (mesurée sur chaque motte prélevée)

6.2. Stocks de carbone dans l'horizon A

Pour les 29 sites non tourbeux, les quantités stockées au mètre carré varient entre 3 kg C/m^2 et 14 kg C/m^2. Le site tourbeux présente un stock de 57 kg C/m^2 (figure 6).

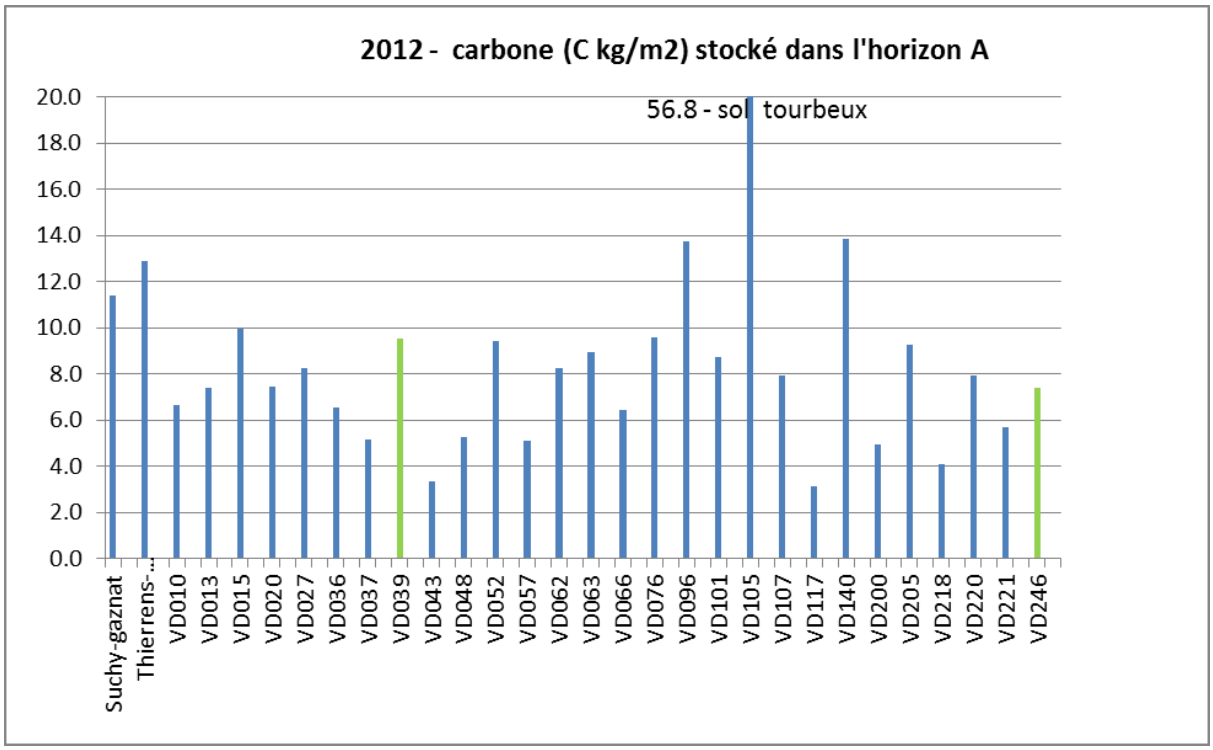

Figure 6 : Stock de carbone dans l'horizon A - 2012

Les résultats statistiques calculés pour les stocks de carbone dans l'horizon A figurent sous différentes unités dans le tableau 4. La valeur médiane est de l'ordre de 7.9 kg C/m^2, soit 79 T C/ha ou 13.6 kg de matière organique/m^2.

Stock de carbone dans l'horizon A	moyenne	médiane	min	max	n	écart type	erreur standard
en kg C/m^2							
Tous les sites	9.52	7.91	3.10	56.83	30	9.35	1.71
Tous les sites sans le sol tourbeux	7.88	7.90	3.10	13.83	29	2.81	0.52
En tonnes C/ha							
Tous les sites	95	79	31	568	30	94	17
Tous les sites sans le sol tourbeux	79	79	31	138	29	28	5
en kg de matière organique /m^2							
Tous les sites	16.42	13.65	5.36	98.03	30	16.13	2.95
Tous les sites sans le sol tourbeux	13.60	13.63	5.36	23.85	29	4.84	0.90

Tableau 4 : Données statistiques calculées pour le stock de matière organique dans l'horizon A - 2012

Pour rappel, ce stock est calculé en prenant en compte toute l'épaisseur de l'horizon A (entre 30 et 45 cm selon les sites).

Il est délicat de comparer nos résultats avec d'autres travaux car certains auteurs ramènent leur résultat à une épaisseur donnée de sol, ou à une masse de sol.

En Suisse, Geiger et Kieser (2011) calculent un stock de carbone de 49 et 60 tonnes C/ha sur 40 cm pour 2 sites occupés par des terres ouvertes dans la région de Wartau (Vallée du Rhin, Saint-Gall). Ces valeurs correspondent aux valeurs les plus basses rencontrées dans notre réseau vaudois. Dans les parcelles expérimentales de Zollikofen, la moyenne obtenue sur 6 parcelles est de l'ordre de 12 kg de matière organique / m^2, calculée pour une masse de 500 kg de sol sec (Müller et al., 2007). La moyenne de nos résultats rapportée à la même masse de sol correspond à 14 kg de matière organique /m^2, ce qui est du même ordre de grandeur.

Dans le bassin de Paris (Boigneville, Essone, France), Oorts et al (2006) comparent des sols cultivés avec ou sans labour en utilisant une valeur rapportée à une masse de 3900 tonnes de sol sec à l'hectare. Les résultats sont de 37.9 tonnes C/ha en labour conventionnel et 43.5 tonnes C/ha sans labour. La moyenne de nos résultats rapportée à la même masse de sol correspond à 63 tonnes C/ha. Cette différence provient du fait que les teneurs en carbone organique sont plus faibles (de l'ordre de 1 %) dans les parcelles françaises. Toujours en France, les nombreuses données du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS) ont été utilisées par Martin et al (2011) pour calculer un stockage d'environ 5 kg C/m^2 sur 30 cm (817 sites cultivés en terres ouvertes, répartis sur tout le territoire de la France métropolitaine). La comparaison est hasardeuse en raison de la diversité pédologique et agricole du réseau français. Globalement, les stockages de carbone en France semblent plus faibles que ceux du réseau vaudois, ceci est probablement dû à des systèmes d'exploitation différents, notamment des rotations simplifiées.

7. Densité apparente – état de compaction des sols

7.1. Méthode d'estimation

Le groupe de travail „physique du sol" (2009) fixe des valeurs seuil de compaction en calculant des valeurs de densité apparente pondérées en fonction du taux d'argile.

Densité apparente pondérée = densité apparente* + 0.009 x (%argile)
(*s'applique à la densité apparente fraction fine si sol caillouteux)

Selon ce groupe de travail, on peut considérer pour les sols agricoles que les sols sont durablement compactés si les valeurs de densité apparente pondérée dépassent la valeur indicative de 1.7 g/cm^3. Au-dessus de 1.85, les sols nécessiteraient des mesures d'amélioration.

7.2. Résultats

La figure 7 représente les densités apparentes pondérées calculées pour les niveaux 1 (0-20 cm) et 2 (le reste du A) en fonction du type de culture en place au moment du prélèvement (sans le sol tourbeux (VD105) de la plaine de l'Orbe).

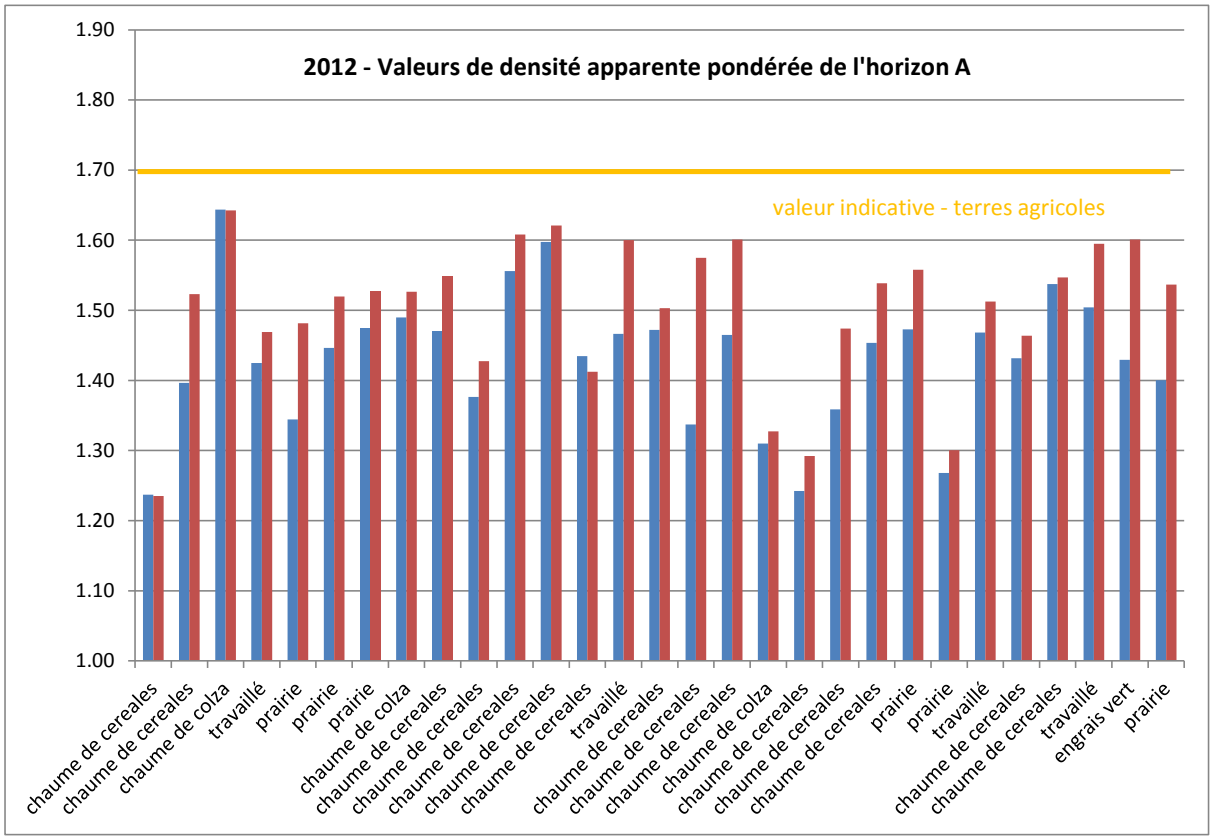

Figure 7 : Valeurs de densité apparente pondérée selon la culture en place au prélèvement 2012 (sites classés comme les autres figures sans le site tourbeux VD105)

Les densités apparentes pondérées de l'horizon A sont comprises entre 1.24 et 1.64. En général, la valeur du niveau inférieur de l'horizon A est plus élevée que celle qui caractérise les 20 premiers centimètres du profil.

Aucun site ne présente de dépassement de la valeur indicative : selon les références du groupe de travail « physique du sol » (2009), on ne constate pas de compaction notable qui porterait atteinte à la fertilité à long terme de l'horizon A.

Toutefois, certaines pratiques agricoles (le passage d'engins lourds et le travail de la charrue) peuvent compacter l'horizon sous-jacent (ou horizon B) et cet impact est beaucoup plus grave et durable. Ce travail n'ayant porté que sur l'horizon de surface travaillé, il serait erroné d'en conclure que la fertilité des sols n'est pas menacée à long terme.

La densité apparente est un paramètre difficile à mesurer, surtout pour les terres agricoles travaillées et soumises à des passages d'engins. Il dépend à la fois de la taille de l'échantillon (différentes tailles de porosité), de la période de prélèvement par rapport au travail du sol et aux différentes interventions agricoles et des conditions climatiques avant le prélèvement. De ce fait, nous avons choisi de ne pas pousser plus loin les interprétations de ce paramètre.

8. Caractérisation de l'activité biologique dans l'horizon A – 2012

Comme pour les teneurs en matière organique, ce sont les paramètres mesurés dans le niveau 0-20 cm qui sont exploités dans ce chapitre 8.

Les résultats sont interprétés selon la grille d'interprétation FRIBO (voir annexe 6), utilisable pour notre réseau vaudois puisqu'elle est valable pour les sols de la partie ouest du Plateau Suisse situés entre 400 et 900m d'altitude.
Notons que l'estimation des paramètres biologiques (qualifiés de pauvre, médiocre, satisfaisante, riche ou très riche) est donnée en fonction de valeurs statistiques de référence obtenues pour les terres assolées du réseau FRIBO (voir définition dans BSA, 2009). Il ne s'agit donc pas là d'une appréciation des valeurs absolues qu'il faudrait atteindre en termes de protection des sols ou de développement durable mais plutôt d'une comparaison avec d'autres terres assolées suisses.
Pour les deux sites exploités en prairie pâturée depuis plus de 10 ans (VD39 et VD246), on a utilisé les valeurs références des prairies permanentes du FRIBO puisque des différences significatives ont été obtenues entre les 3 utilisations (terres assolées-prairies permanentes-alpages) pour les valeurs de référence du FRIBO (Rossier et .Dessureault-Rompré, 2003).
En outre, nous n'avons pas interprété le site tourbeux atypique.

Enfin, les valeurs médianes obtenues sur notre réseau vaudois en 2012 sont comparées aux valeurs obtenues dans la même période sur le réseau FRIBO : 5ème cycle de mesure 2007-2011 (Rossier et al., 2012).

8.1. Signification agronomique des paramètres biologiques

Le fonctionnement biologique d'un sol conditionne sa fertilité. De fait, la connaissance des paramètres biologiques est fondamentale en termes de gestion durable de la fertilité des sols.

Nous allons examiner plus particulièrement les 3 paramètres suivants :

- **la biomasse vivante ATP** est un bon marqueur des microorganismes vivants présents dans un sol. Elle est exprimée en masse totale des microorganismes vivants par unité de sol ;
- **la minéralisation du carbone organique (min Corg)** donne une évaluation de la quantité de matière organique minéralisée au cours de l'incubation. Ce paramètre est calculé à partir des mesures de l'activité respiratoire. La valeur mesurée est la somme de CO_2 libéré durant 15 jours d'incubation. Cette valeur est ensuite transformée mathématiquement en équivalent carbone, puis en équivalent de matière organique pour être exprimée en µg MO/g /15 j. C'est un paramètre assez stable relativement facile à interpréter. En effet, la respiration du sol est un bon indicateur de l'état de la fonctionnalité biologique du sol (Bispo et al., 2009).Il représente bien l'activité des microorganismes, ainsi que la qualité de la matière organique présente dans le sol étant donné que la respiration du sol pendant les 15 jours d'incubation reflète la dégradation des substances organiques facilement disponibles et minéralisables.
- **le rapport CO_2/ATP** reflète l'activité spécifique moyenne de la biomasse, il correspond à la minéralisation horaire moyenne du carbone organique.

8.2. La biomasse vivante ATP

En terme agronomique, 22 échantillons sur 29 se caractérisent par une biomasse microbienne suffisante (satisfaisante - 12, riche – 7 et très riche - 3) alors que 7 sites présentent une biomasse microbienne insuffisante (médiocre - 4 et pauvre - 3).

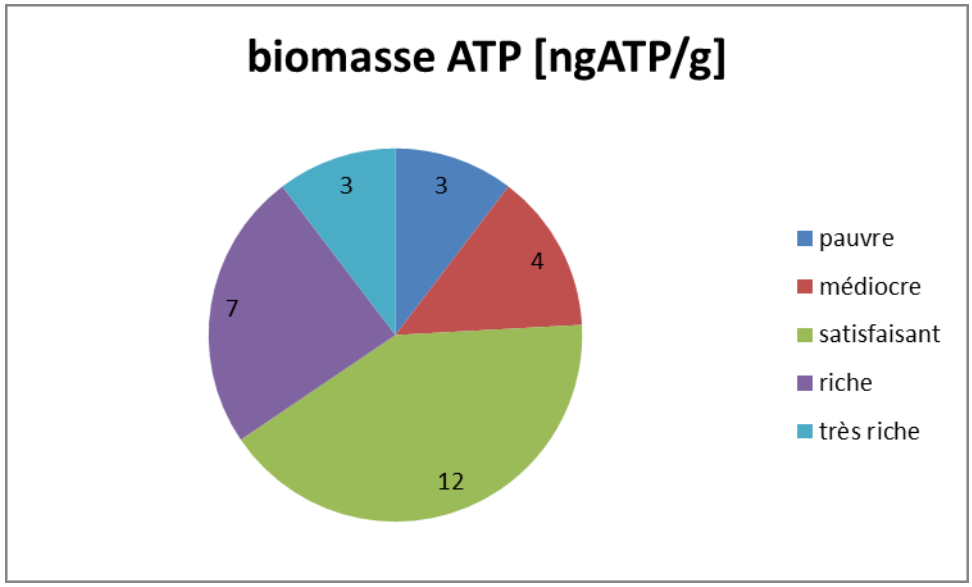

Figure 8 : Interprétation des teneurs ATP (0-20 cm) - 2012

Les résultats statistiques calculés sur les teneurs en matière organique du niveau 0-20 cm figurent dans le tableau 5. La médiane des terres assolées (sans le sol tourbeux) est de l'ordre de 1000 ngATP/g.

ATP ngATP/g	moyenne	médiane	min	max	n	écart type	erreur standard
Tous les sites	1187	1053	259	3266	30	694	127
Tous les sites sans le sol tourbeux	1174	1021	259	3266	29	703	130
Toutes les terres assolées sans le sol tourbeux	**1172**	**1008**	**259**	**3266**	**27**	**729**	**140**

Tableau 5 : Données statistiques calculées pour l'ATP (0-20 cm) - 2012

Cette valeur est supérieure à la valeur médiane du 5ème cycle de mesure (2007-2011) du FRIBO (658 ngATP/g).

Il est à noter qu'une baisse significative de la biomasse microbienne a été observée au cours des cinq cycles de mesures du FRIBO. Pour le moment, cette baisse inquiétante n'est pas explicable, plusieurs hypothèses sont avancées par les auteurs (Rossier et al, 2012). Nous remarquons que les teneurs observées en 2012 sur notre réseau vaudois sont proches des teneurs observées lors des deux premiers cycles de mesure FRIBO (940 ngATP/g cycle 1987-1991 ; 954 ngATP/g cycle 1992-1996).

8.3. La minéralisation du carbone organique

En terme agronomique, 22 échantillons sur 29 se caractérisent par une minéralisation du carbone organique suffisant (satisfaisante - 14, riche - 2 et très riche - 6) alors que 7 sites sont caractérisés par une minéralisation insuffisante (médiocre - 4 et pauvre - 3).

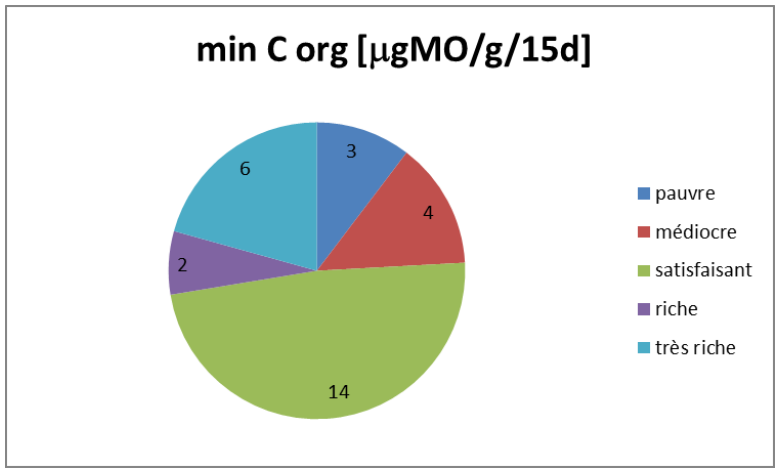

Figure 9 : Interprétation de la minéralisation du carbone organique (0-20 cm) - 2012

Les résultats statistiques calculés sur la minéralisation du carbone organique du niveau 0-20 cm figurent dans le tableau 6. La médiane des terres assolées est de 700 µgMO/g/15j, valeur du même ordre de grandeur mais un peu plus élevée que la valeur médiane du FRIBO (567 µgMO/g/15 jours).

Minéralisation C organique µgMO/g/15jours	moyenne	médiane	min	max	n	écart type	erreur standard
Tous les sites	806	725	406	2095	30	377	69
Tous les sites sans le sol tourbeux	762	721	406	1813	29	293	54
Toutes les terres assolées sans le sol tourbeux	**703**	**705**	**406**	**1038**	**27**	**187**	**36**

Tableau 6 : Données statistiques calculées pour la minéralisation du carbone organique (0-20 cm) - 2012

8.4. Le rapport CO_2/ATP

En terme agronomique, 16 échantillons sur 29 se caractérisent par un rapport CO_2/ATP satisfaisant à très riche alors que 13 sites sont caractérisés par rapport CO_2/ATP médiocre à pauvre.

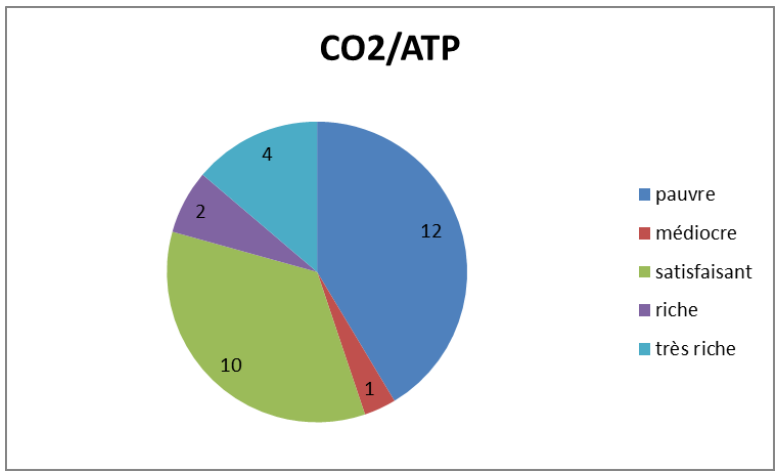

Figure 10 : Interprétation du rapport CO_2/ATP (0-20 cm) - 2012

CO_2/ATP	moyenne	médiane	min	max	n	écart type	erreur standard
Tous les sites	5.3	5.1	1.5	14.1	30	3.2	0.6
Tous les sites sans le sol tourbeux	5.1	5.0	1.5	14.1	29	3.2	0.6
Toutes les terres assolées sans le sol tourbeux	**4.9**	**3.9**	**1.5**	**14.1**	**27**	**3.2**	**0.6**

Tableau 7 : Données statistiques calculées pour le rapport CO_2/ATP (0-20 cm) - 2012

Un faible rapport CO_2/ATP exprime la présence de matière organique sous forme difficilement minéralisable, autrement dit une activité à tendance humificatrice avec accumulation de matière organique dans le sol, alors qu'un rapport élevé reflète une tendance minéralisatrice (Rossier et Dessureault Rompré, 2003).

Une activité minéralisatrice correspond à une libération rapide d'éléments nutritifs disponibles à court terme (carbone mais également azote et phosphore, ainsi que tous les oligoéléments). En termes de fertilité, une activité minéralisatrice (donc un rapport CO_2/ATP élevé) est donc préférable.

A notre avis, une analyse plus approfondie des valeurs CO_2/ATP à l'échelle du réseau n'est pas pertinente. Le rapport est évolutif et dépend fortement des conditions pédologiques, des cultures et des pratiques agricoles.

8.5. Discussion

Ces 3 paramètres biologiques sont liés. Pour être bien valorisés, ils doivent être interprétés ensemble dans le cadre d'un diagnostic individuel de conseil agricole.

Néanmoins, on peut remarquer que les sols les plus riches en matière organique (hormis le site tourbeux VD 105) se caractérisent par de faibles rapports CO_2/ATP (figure 11). La figure 12 illustre bien le fait qu'un sol à biomasse élevée (ATP) n'est pas nécessairement un sol plus actif (min C org.).

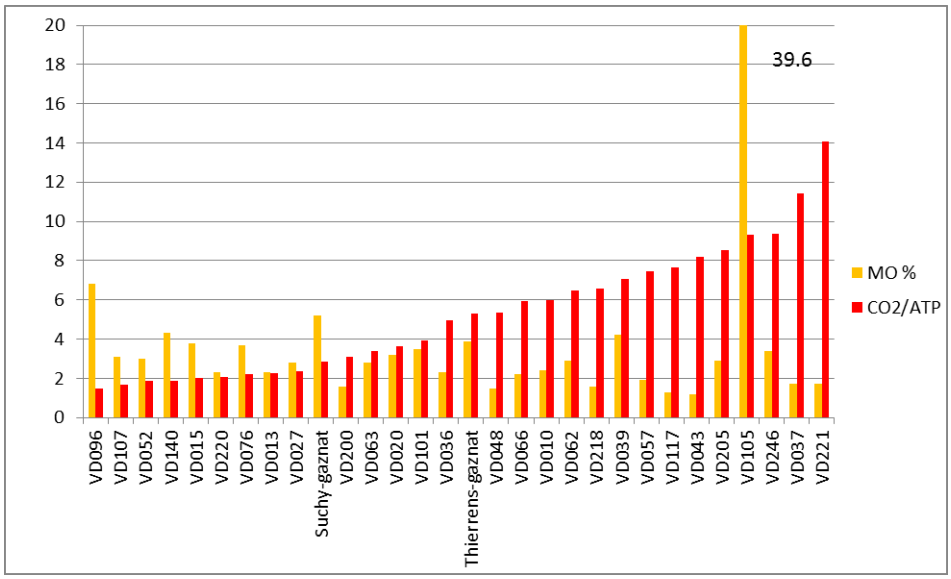

Figure 11 : Teneurs en matière organique et rapport CO_2/ATP (0-20 cm) - 2012
(sites classés par ordre croissant du rapport CO_2/ATP)

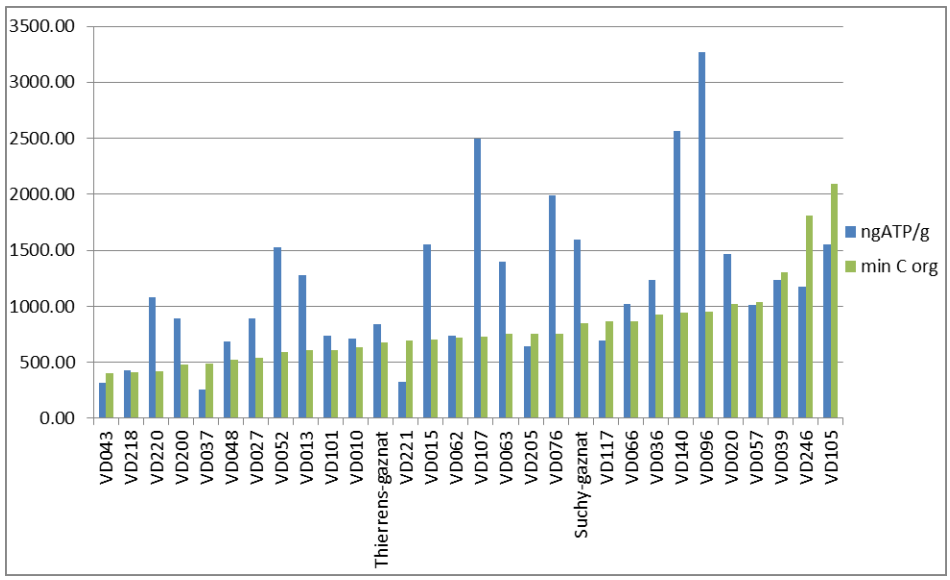

Figure 12 : Valeurs d' ATP et de minéralisation du carbone organique (0-20 cm) - 2012
(sites classés par ordre croissant des valeurs de min C org)

9. Autres paramètres de la fertilité

9.1. La valeur C/N

Le rapport C/N est donné en figure 13 et les valeurs statistiques sont calculées dans le tableau 8.

Si on exclue le sol tourbeux, les rapports C/N sont du même ordre de grandeur pour tous les sites : moyenne de 7.5 (max 8.7 ; min 5.8).

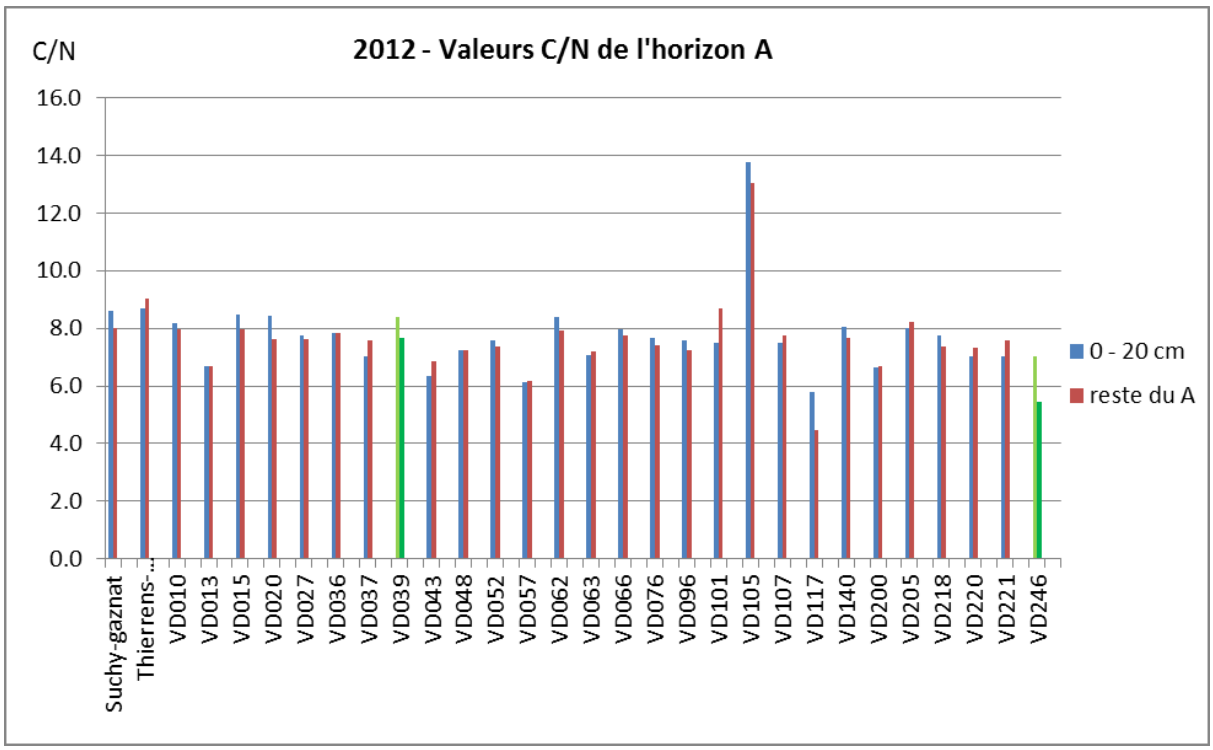

Figure 13 : Rapports C/N dans les deux niveaux de l'horizon A - 2012

1

C/N 0-20 cm	moyenne	médiane	min	max	n	écart type	erreur standard
Tous les sites	7.7	7.6	5.8	13.7	30	1.4	0.2
Tous les sites sans le sol tourbeux	7.5	7.6	5.8	8.7	29	0.8	0.1
Toutes les terres assolées sans le sol tourbeux	7.5	7.6	5.8	8.7	27	0.8	0.1

Tableau 8 : Données statistiques calculées pour le rapport C/N (0-20 cm) - 2012

Le rapport C/N est un bon critère de caractérisation des trois formes d'humus aérés existant dans les « sols naturels ». Pour les terres ouvertes agricoles, d'une part l'horizon supérieur n'est pas un humus pur mais un mélange de l'humus et des horizons sous-jacent (labour); d'autre part, la matière organique fraîche n'est pas laissée sur place et on apporte d'autres matières organiques pour conserver la fertilité des sols. Ce rapport donne néanmoins une indication sur l'activité biologique du sol, un C/N inférieur à 10 étant plus favorable (Soltner, 2005). A l'exception du sol tourbeux, les rapports C/N témoignent de sols cultivés présentant une activité biologique normale. Le sol tourbeux est beaucoup moins actif que les autres.

9.2. Le pH

Le pH $_{(H2O)}$ est donné en figure 14 et 15 ; et les valeurs statistiques sont calculées dans le tableau 9.

Il n'y a pas de sol fortement acide ; 6 sols sont acides, c'est-à-dire que le chaulage est nécessaire pour les grandes cultures selon les normes DBF ; 16 parcelles nécessitent un chaulage d'entretien (faiblement acides - 12 et pH neutre - 4). Enfin, le chaulage est inutile pour les 8 parcelles restantes (faiblement alcalins - 2 et alcalins - 6).

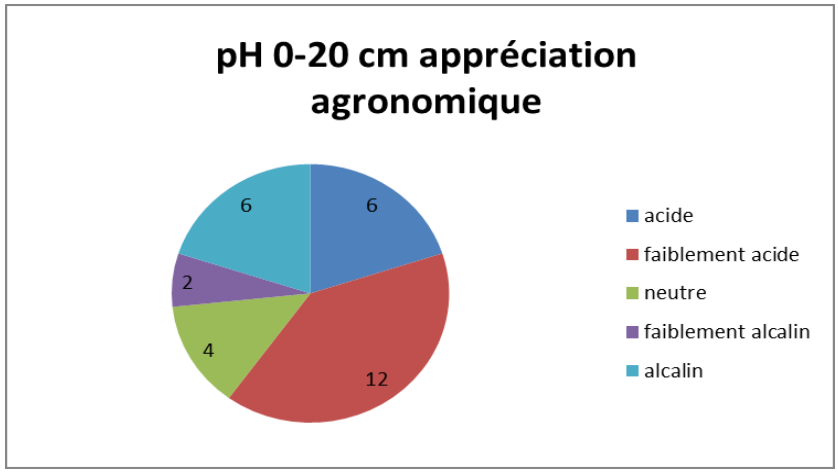

Figure 14 : Interprétation du pH $_{H2O}$ (0-20 cm) - 2012

Les résultats statistiques calculés sur les valeurs de pH du niveau 0-20 cm figurent dans le tableau 9. La moyenne est de 6.7 et le sol tourbeux ne se distingue pas du reste de la population (figure 15).

pH $_{(H2O)}$ 0-20 cm	moyenne	médiane	min	max	n	écart type	erreur standard
Tous les sites	6.7	6.6	5.3	8.1	30	0.8	0.2
Tous les sites sans le sol tourbeux	6.7	6.6	5.3	8.1	29	0.8	0.2
Toutes les terres assolées sans le sol tourbeux	6.8	6.6	5.3	8.1	27	0.8	0.2

Tableau 9 : Données statistiques calculées pour le pH $_{H2O}$ (0-20 cm) – 2012

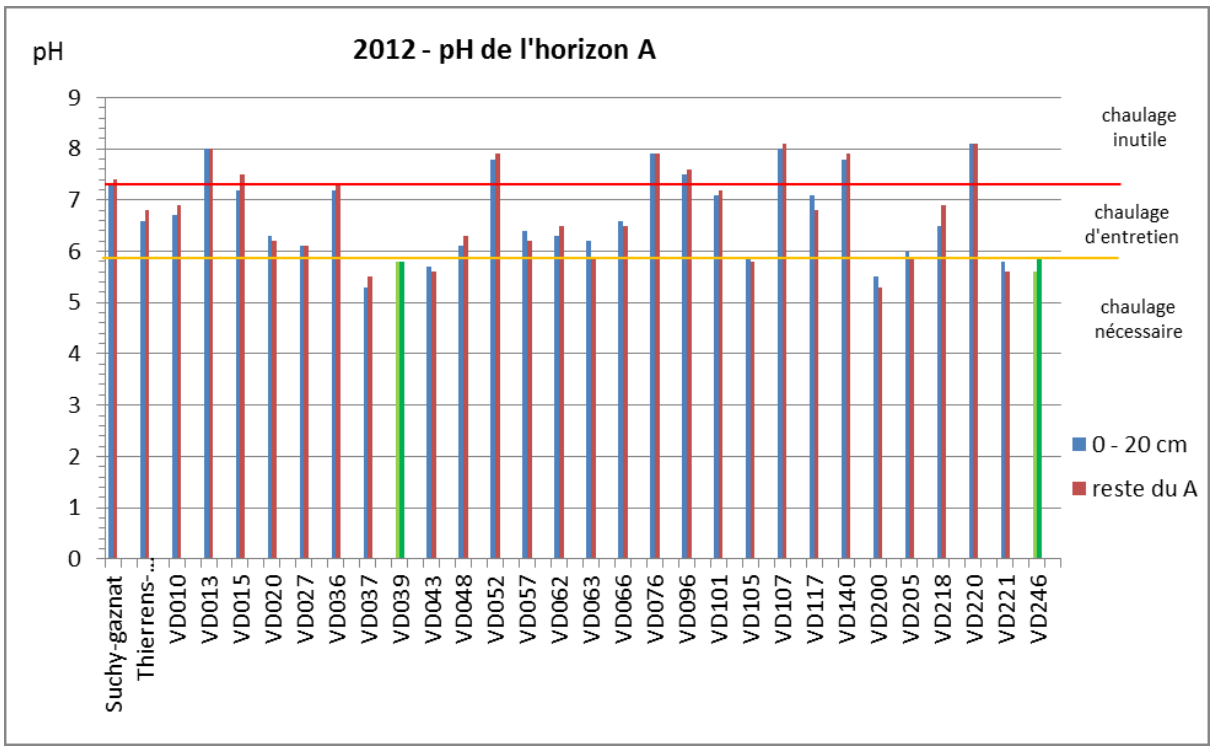

Figure 15 : pH $_{H2O}$ dans les deux niveaux de l'horizon A - 2012

10. Pratiques agricoles 2012

10.1. Exploitation avec ou sans bétail

Sur les 30 exploitations, 21 ont encore du bétail (parfois très peu). Ce sont essentiellement des bovins (1 élevage de porcs et 2 élevages de chevaux). Pour les exploitations sans bétail, le changement est très récent pour 4 exploitations (2011 et 2012).

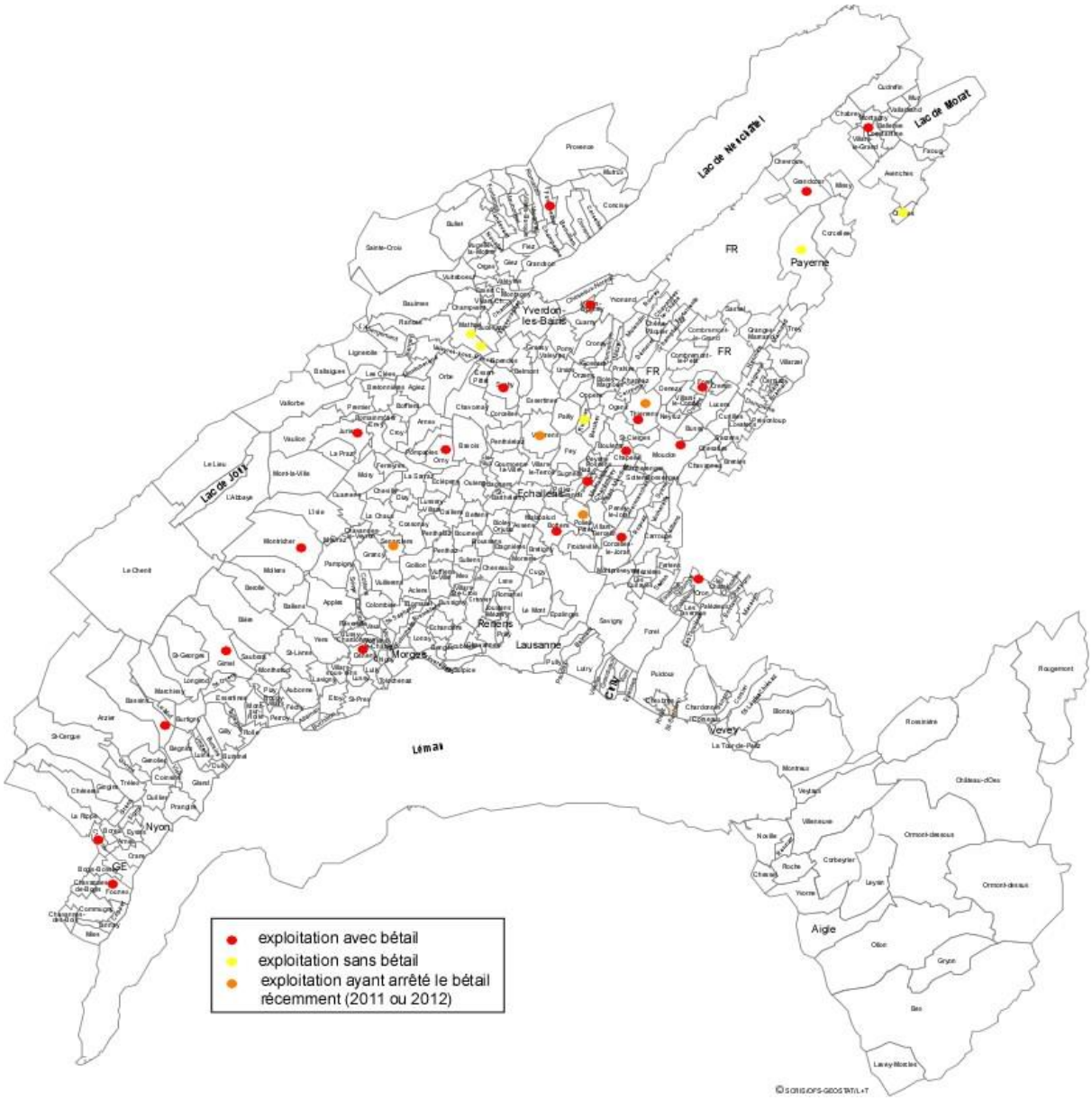

Figure 16 Type d'exploitation agricoles

10.2. Exportation des pailles à l'échelle de l'exploitation

L'exportation des pailles peut avoir une influence importante, à long terme, sur la teneur en matière organique dans les sols.

A l'heure actuelle, aucun des agriculteurs interrogés n'enfouit les pailles de céréales : elles sont utilisées pour l'exploitation ou vendues. En ce qui concerne les 9 exploitations sans bétail du réseau, une partie des pailles est échangée contre du fumier dans 3 cas, 2 exploitations envisagent de le faire.

Les pailles de colza sont parfois enfouies.

10.3. Apport de produits organiques

Aucun agriculteur interrogé n'utilise de compost.

Un agriculteur chaule avec de la chaux d'Aarberg. Cet apport correspond à un faible apport en carbone organique.

23 agriculteurs sur 30 épandent du fumier sur l'exploitation, avec des fréquences d'apport variables. Les apports sont le plus souvent amenés avant les sarclées (15 exploitants) ou avant les sarclées et les céréales (2 exploitants) Deux agriculteurs épandent du fumier sur des céréales et 3 sur des prairies. Ce paramètre important sera repris aux chapitres suivants, à l'aide d'une approche statistique.

10.4. Travail du sol*

Aucun exploitant ne pratique le véritable semis direct sur les parcelles enquêtées.

Par contre, beaucoup d'agriculteurs réduisent le labour conventionnel au profit de techniques sans retournement de la terre, le plus souvent le pseudolabour au chisel. Ce paramètre sera repris au chapitre suivant à l'aide d'une approche statistique.

*Les termes utilisés répondent aux définitions des fiches techniques Agridea.

11. Impact des pratiques agricoles sur la matière organique et les paramètres biologiques – Traitement statistique des données

Un traitement statistique a été réalisé par le bureau EcoStats (Aurélie Thébault, http://ecostats34.free.fr/) pour mettre en évidence, s'il en est, l'influence des pratiques agricoles sur le taux de matière organique et l'activité biologique (ATP, rapport CO_2/ATP, minéralisation du carbone organique) du niveau 0-20 cm.

Les principaux résultats sont résumés dans ce chapitre et le rapport complet se trouve en annexe 7. Les pratiques agricoles retenues sont données en annexe 8.

Etant donné que les objectifs de cette étude sont ciblés sur la fertilité de terres assolées, nous avons retiré les sites VD 39 et VD246 puisqu'ils correspondent maintenant à des prairies permanentes pour ne pas biaiser les résultats obtenus quant à la part de prairies dans la rotation. En outre, le site VD105 atypique ne fait pas partie non plus de la population testée.

Dans les tableaux présentant les résultats des tests statistiques, nous avons choisi d'indiquer les relations significatives (p valeurs > 0.05 en gras) et les relations marginalement significatives (p valeurs > 0.1). Les discussions, quant à elles, sont ciblées essentiellement sur les relations significatives.

Malgré le nombre restreint de réplicats (27), les relations mises en évidence (p valeurs > 0.05) dans ce rapport sont robustes car les tests statistiques tiennent compte du nombre d'échantillons. Ceci dit, une étude sur un plus grand nombre d'échantillons permettrait de conforter ces résultats et éventuellement de mettre en évidence d'autres relations.

11.1. Effet de biais

Etant donné que les conditions de prélèvement n'étaient pas identiques pour tous les sites, nous avons testé l'effet de la période de prélèvement, de l'altitude et de la culture en place au moment du prélèvement) sur les 4 paramètres d'intérêt (chapitre 1, paragraphes a, b et c du rapport complet annexé). Une analyse de variance à un facteur (ANOVA) montre :

- qu'il n'y a pas d'effet significatif de la période de prélèvement sur les 4 paramètres testés ;
- qu'il n'y a pas d'effet significatif de l'altitude sur les 4 paramètres testés ;
- qu'il n'y a pas d'effet significatif la culture en place au moment du prélèvement (céréales, engrais verts, prairies ou sol nu). En revanche, on constate que la minéralisation du C. organique est marginalement plus élevée dans les parcelles occupées par des prairies au prélèvement (p=0.053). Ces résultats sont confirmés visuellement par les graphiques de la figure 17.

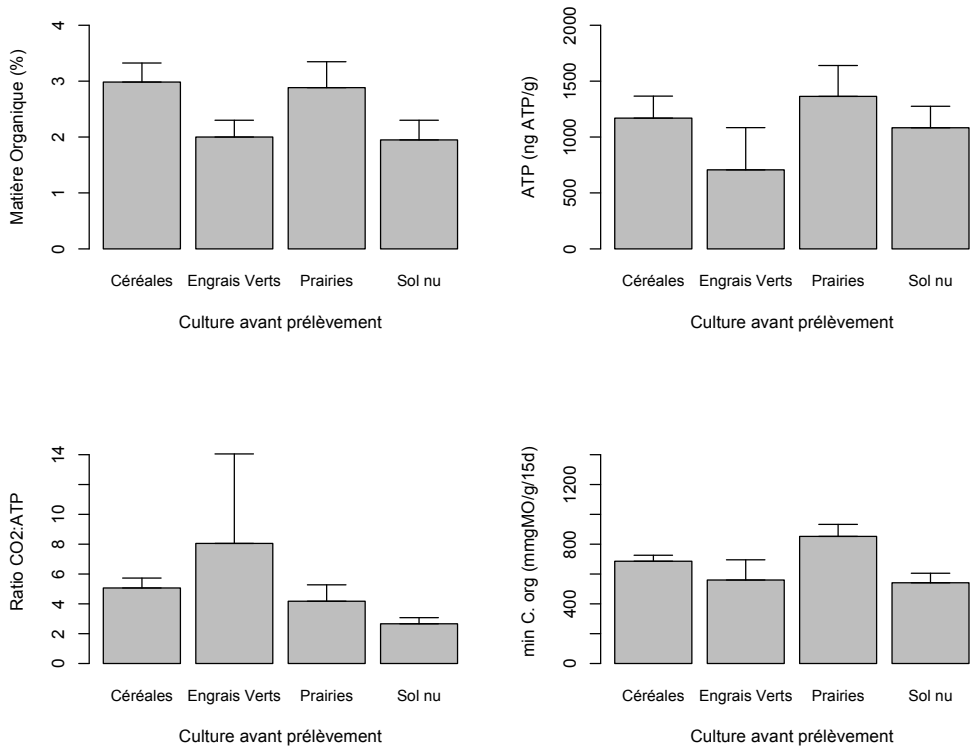

Figure 17 : Effet de la culture en place au prélèvement sur les teneurs en mo et les paramètres biologiques

11.2. Effet des pratiques agricoles

A partir des informations récoltées lors des enquêtes, les pratiques agricoles sont synthétisées pour chaque parcelle de prélèvement sous forme de quotient sur les 6 années renseignées (de la culture principale 2007 à la culture principale 2012) :

- nombre d'années en prairie
- nombre d'années en sarclées (à savoir sur le réseau :colza, maïs, betteraves, pommes de terre, pois, tournesol et endives)
- nombre d'années avec interculture (engrais vert et culture dérobée)
- nombre de fois où du fumier a été apporté
- nombre de fois où le labour conventionnel (retournement de la terre à la charrue) a été pratiqué.

Les propriétés du sol connus, à savoir % argile, % silts, pH et rapport C/N du niveau 1 (0-20 cm) ont également été pris en compte afin de mettre en évidence, cas échéant, un effet concomittant sur le taux de matière organique et les paramètres biologiques. Dans la suite de ce travail, ils sont appelés paramètres du sol.

Analyse de variance à un facteur.

Dans une première étape, on a utilisé une analyse de variance à un facteur (ANOVA) (chapitre 2 du rapport complet annexé).

Le résultat (tableau 10) montre que :

- Le taux de matière organique du sol est significativement influencé par la part de sarclées (p=0.032). Plus précisément, la teneur en MO du sol diminue lorsque la part d'années sarclées augmente (figure.18) ;
- Aucune des pratiques agricoles n'influence significativement l'ATP et le ratio CO_2/ATP du sol ;
- La minéralisation du C. organique est significativement influencée par la part de prairies, (figure 19).

Matière organique		
	F-value	p-value
Labour	0.0084	0.928
Prairies	0.5890	0.450
Sarclées	**5.1803**	**0.032**
Interculture	0.8555	0.364
Fumier	2.7181	0.112
ATP		
	F-value	p-value
Labour	0.4998	0.486
Prairies	0.2955	0.592
Sarclées	0.7581	0.392
Interculture	0.4343	0.516
Fumier	1.0287	0.320
CO2/ATP		
	F-value	p-value
Labour	0.2312	0.635
Prairies	0.0078	0.930
Sarclées	0.2097	0.651
Interculture	0.0199	0.889
Fumier	0.4723	0.498
Minéralisation C. org		
	F-value	p-value
Labour	1.1971	0.284
Prairies	**5.6399**	**0.026**
Sarclées	3.7316	0.065
Interculture	4.0858	0.054
Fumier	1.9196	0.178

Tableau 10 : résultat des analyses de variance pour l'étude des effets des pratiques agricoles sur le taux de matière organique et les paramètres biologiques des sols.

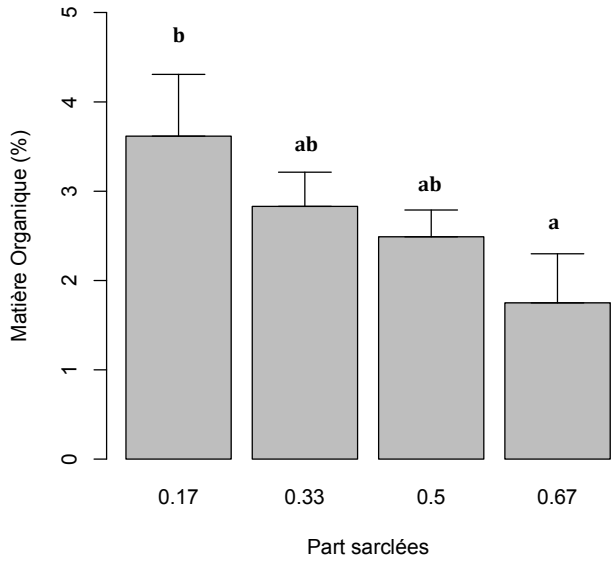

Figure 18 : Effet de la part de sarclées sur la teneur en matière organique du sol. Les lettres différentes indiquent une différence significative à p=0.05

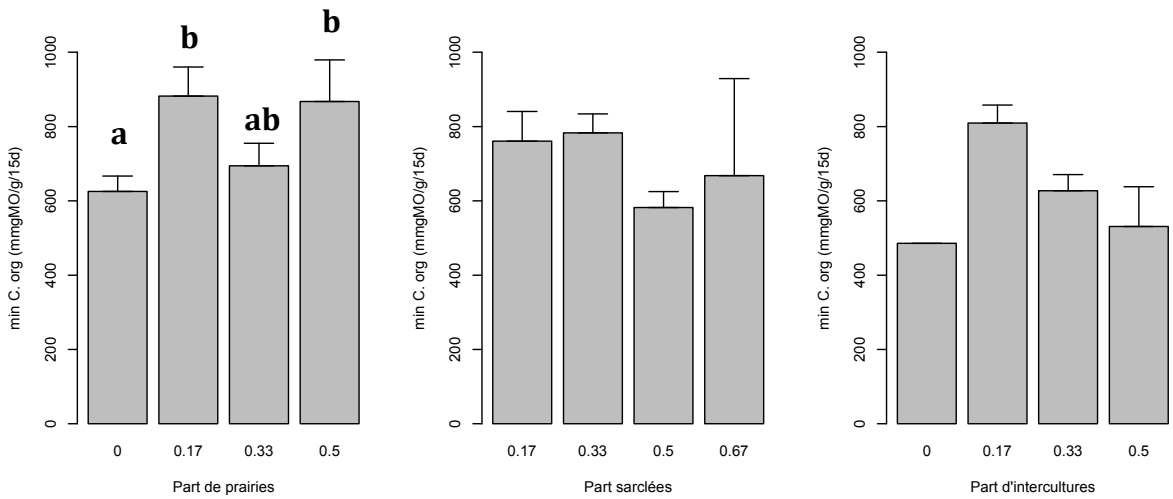

Figure 19 : Effet de la part de prairies, de la part de sarclées et de la part d'intercultures sur la minéralisation du C. organique du sol. Les lettres différentes indiquent une différence significative à p=0.05.

Régression linéaire multiple suivie de la sélection de variables

La régression linéaire multiple suivie de la sélection de variables permet de voir si les paramètres mis en évidence par les analyses de variance à un facteur sont effectivement responsables des variations de minéralisation du C. organique ou si les effets sont concomitants (tableau 11) - chapitre 2 du rapport complet annexé.

	Sélection de variables		
	d.f.	F-value	p-value
Matière organique			
Labour	1	0.011	0.918
Prairies	1	0.970	0.336
Sarclées	**1**	**6.663**	**0.017**
Interculture	1	0.556	0.464
Fumier	1	3.472	0.076
Résidus	21		
Minéralisation C. Org			
Interculture	**1**	**4.4601**	**0.046**
Fumier	1	3.7617	0.065
Résidus	24		

Tableau 11 : résultat du test de sélection de variables pour l'analyse de la teneur en MO et de la minéralisation du C. organique du sol.

De la même façon, on peut effectuer une régression linéaire multiple suivie d'une sélection de variables en mettant en variables explicatives les pratiques agricoles et les paramètres du sol (pH, ratio C/N, teneurs en argiles et silts). La sélection de variables permet de dire si l'effet des pratiques agricoles mis en évidence dans le tableau 11 est lié à des effets des paramètres du sol ou non - chapitre 3 du rapport complet annexé.

	Sélection de variables		
	d.f.	F-value	p-value
Matière organique			
pH	1	40.293	**< 0.001**
Ratio C :N	1	55.316	**< 0.001**
Argiles	1	15.647	**< 0.001**
Part sarclées	1	17.211	**< 0.001**
ATP			
pH	1	51.836	**<0.001**
Part de prairies	1	6.156	**0.021**
Résidus	22		
CO2/ATP			
pH	1	34.010	**<0.001**
Argiles	1	6.346	**0.019**
Résidus	24		
Minéralisation C. Org			
pH	1	2.144	0.157
Part prairies	1	8.040	**0.009**
Part Intercultures	1	3.459	0.076
Résidus	23		

Tableau 12 : résultat du test de sélection de variables pour l'analyse de l'effet des propriétés du sol (pH, texture, ratio C/N) et des pratiques agricoles sur les paramètres biologiques du sol.

Les résultats obtenus peuvent être résumés ainsi:

- la part de sarclées a toujours un effet significatif sur la teneur en matière organique du sol, au-delà de potentiels effets liés aux propriétés du sol (pH, C/N ou teneur en argile).
- On constate un effet marginalement significatif des apports de fumier sur la teneur en matière organique du sol et l'ATP. Cet effet n'est pas très net et il n'y a pas d'augmentation proportionnelle à la fréquence d'apport (figure 20)
- la régression multiple met en évidence un effet significatif de la part de prairies sur la teneur en ATP du sol, avec une tendance vers une augmentation de la teneur en ATP dans le sol avec l'augmentation de la part de prairies (figure. 21).
- la régression multiple met en évidence un effet significatif de la part de prairies sur la minéralisation du carbone organique, au-delà de potentiels effets liés aux propriétés du sol (pH, C/N ou teneur en argile) (figure. 22).

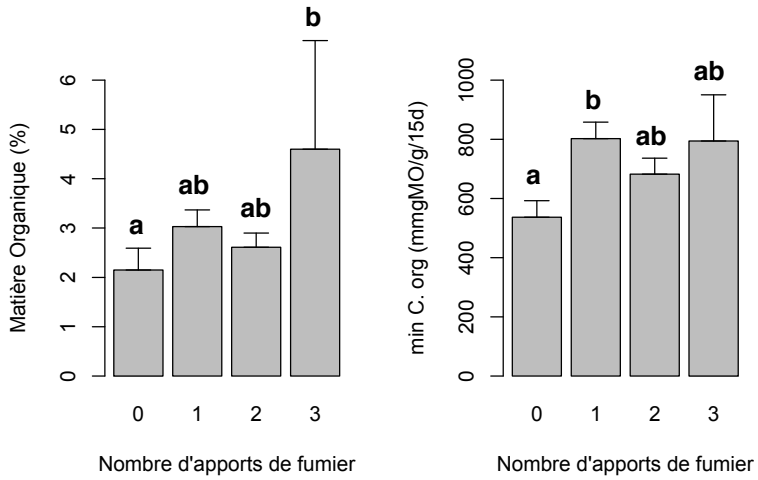

Figure 20 : Effet de la fréquence d'apports de fumier sur la teneur en matière organique dans le sol et la minéralisation du C. organique du sol. Les lettres différentes indiquent une différence significative à p=0.05.

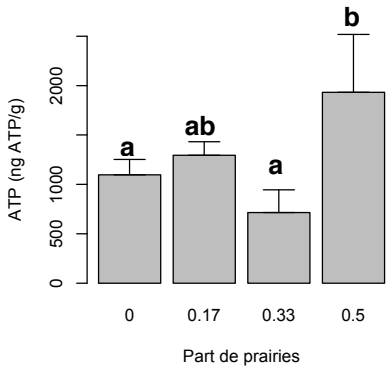

Figure 21: Effet de la part de prairies sur l'ATP. Les lettres différentes indiquent une dif. significative à p=0.05.

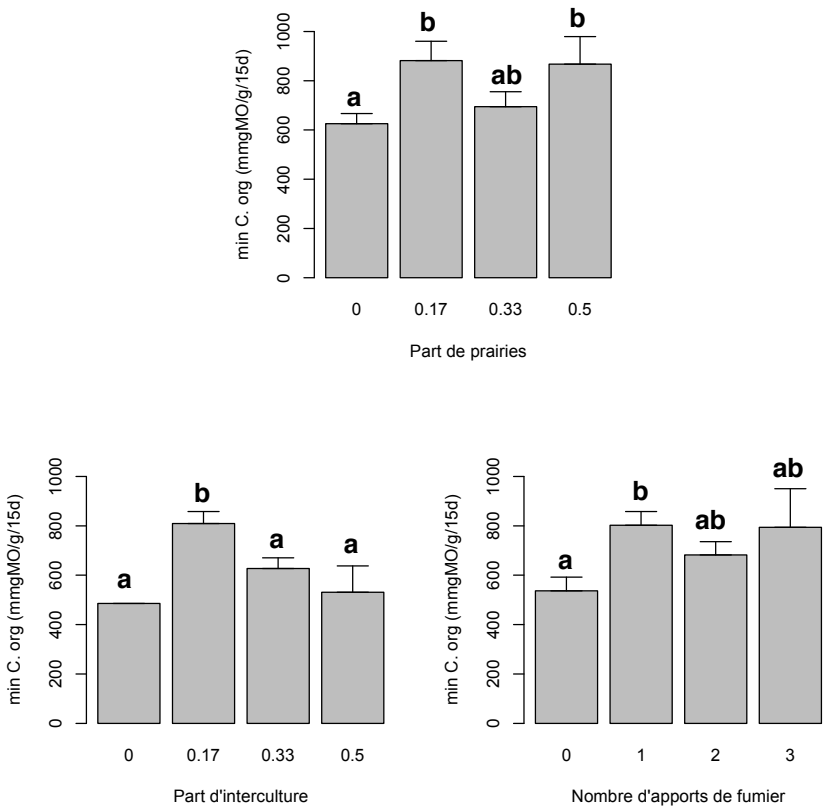

Figure 22: Effet de la part de prairies, de la part d'intercultures et de la fréquence d'apports de fumier sur la minéralisation du C. organique du sol. Les lettres différentes indiquent une différence significative à p=0.05.

Analyses multivariées sous contraintes ou analyse de redondance (RDA)

Enfin, l'effet des pratiques agricoles a été examiné par le biais d'analyses multivariées sous contraintes (analyses de redondance) qui permettent de différencier l'effet concomitant des paramètres du sol (pH, rapport C/N, teneur en argile, teneur en silts) - chapitre 4 du rapport complet annexé

L'effet des pratiques agricole est bien visible sur la figure 23:

- Le taux de matière organique est toujours clairement corrélé négativement à la part des sarclées, tout comme l'ATP et la minéralisation du carbone organique de façon moins nette
- La minéralisation du carbone organique est clairement corrélée à la part des prairies, tout comme l'ATP et le taux de matière organique de façon moins nette
- le rapport CO_2/ATP est corrélé positivement avec les apports de fumier et le labour conventionel

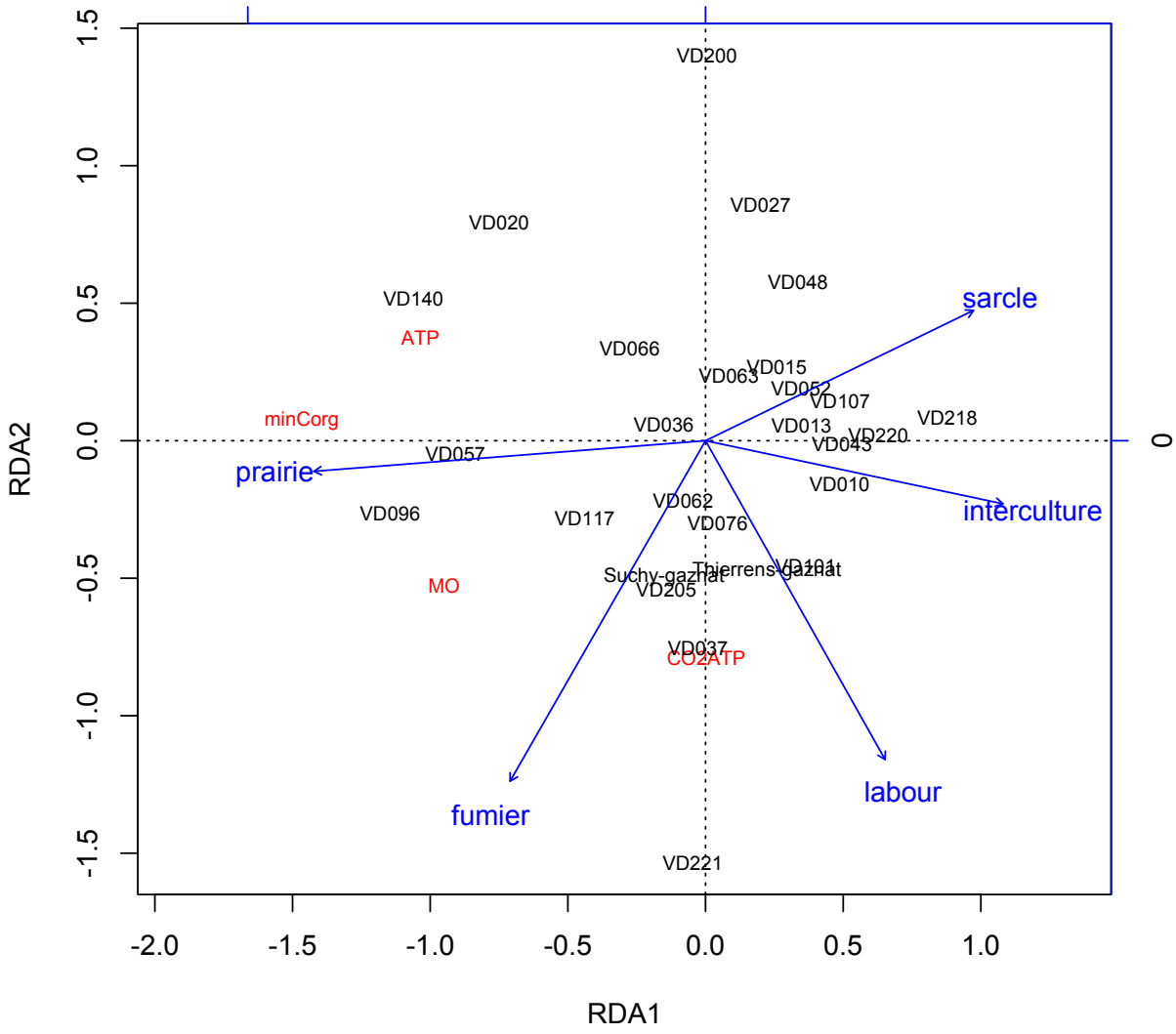

Figure 23 : Effet des pratiques agricoles en tenant compte des effets concomitants des paramètres du sol

12. Impact des pratiques agricoles sur la matière organique et les paramètres biologiques – Cas des deux sites passés en prairie permanente

Examinons plus en détail les deux sites qui ont été exploités en prairie longue durée après les années 1975. Ce sont les sites VD39 (prairie depuis plus de 10 ans, rompue en 2011 pour des problèmes de rumex) et VD246 (prairie depuis plus de 20 ans, encore en place). A noter que les deux prairies sont régulièrement pâturées.

Le tableau 12 résume les résultats obtenus pour les deux niveaux sur ces deux sites et donne les interprétations agronomiques selon FRIBO dans un système de terres assolées et dans un système de prairies permanentes :

- en 2012, les deux sites ne se distinguent pas des autres en ce qui concerne leur teneur en matière organique (figure 3). On note que ces deux sites présentent les valeurs de minéralisation du carbone organique les plus élevées (figure 11, site tourbeux exclu) ;
- par rapport aux années 75, il semble que les teneurs en matière organique aient augmenté dans les premiers 20 cm du sol. Toutefois, cette tendance n'est pas confirmée statistiquement car les ces deux sites ne se distinguent pas du reste de la population (figure 24, extrait de la figure 4) ;
- pour les deux sites, le taux de minéralisation du carbone organique est très élevé si on se rapporte aux références du FRIBO dans les terres assolées.

Ici encore, l'effet positif des prairies sur l'activité organique est mis en évidence.

	VD 39		VD 246	
1975	0-25 cm		0-30 cm	
MO %	2.9		2.9	
Interprétation agronomique (DBF 2009)	normal		normal	
2012	0-20 cm	20-30 cm	0-20 cm	20-35 cm
MO %	4.2	3.7	3.4	1.5
Interprétation agronomique (DBF 2009)	élevé	normal	normal	pauvre
ATP ng/g	1237	1318	1178	488
Interprétation/terres assolées (FRIBO)	satisfaisant	satisfaisant	très riche	pauvre
Interprétation/prairiespermanentes (FRIBO)	médiocre	médiocre	satisfaisant	pauvre
Min C org µgMO/g/15d	1306	1054	1813	867
Interprétation/terres assolées (FRIBO)	très riche	très riche	très riche	très riche
Interprétation/prairiespermanentes (FRIBO)	satisfaisant	pauvre	très riche	pauvre

Tableau 12 : Matière organique et paramètres biologiques pour les deux sites passés en prairie permanente

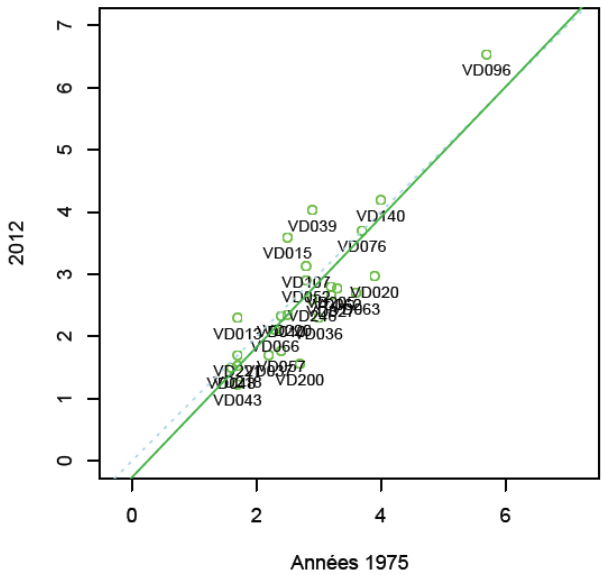

Figure 24 : Teneurs en matière organique 2012 et 1975 - Extrait de la figure 4 (tous les échantillons sans les parcelles douteuses et le sol tourbeux)

DISCUSSIONS - CONCLUSION

13. Les principaux résultats obtenus sur le réseau vaudois

Nous rappelons que les résultats et conclusions ci-dessous concernent des terres assolées. les discussions portent en particulier sur l'effet de la part des sarclées et des prairies temporaires dans la rotation.

Taux de matière organique

En 2012, la valeur médiane des teneurs en **matière organique** du niveau 0-20 cm est de l'ordre de 2.8 %. Cette valeur est du même ordre de grandeur que celles des terres assolées FRIBO. Sur les 29 sites du réseau, 26 échantillons se caractérisent par des teneurs en matière organique satisfaisantes (normales - 22 et élevés – 4), selon les normes DBF (2009).

Les teneurs mesurées en 2012 peuvent être considérées comme équivalentes aux teneurs mesurées lors de la campagne d'échantillonnage des années 1975. Pour rappel, en 1975, ces sites étaient déjà cultivés en terres ouvertes depuis de nombreuses années. On connaît l'effet drastique de l'ouverture de prairies naturelles ou de la mise en culture de sols forestiers sur le taux de matière organique dans les sols. Toutefois, il semble que les teneurs se stabilisent ensuite à un état d'équilibre.

La valeur médiane calculée des stocks de carbone dans l'horizon A est de l'ordre de 7.9 kg C/m^2, soit 79 T C/ha ou 13.6 kg de matière organique /m^2.

Le taux de matière organique est significativement influencé par la proportion de cultures sarclées dans la rotation. Plus précisément, la teneur en matière organique diminue lorsque la part d'années cultivées en sarclées augmente. Les sarclées regroupent des modes de culture très différents, il aurait été intéressant de différencier les sarclées. Toutefois, nous avons constaté que chaque exploitant a une rotation spécifique et il aurait donc fallu avoir beaucoup plus d'exploitations pour aller plus loin dans l'interprétation statistique.

On constate un effet marginalement significatif des apports de fumier sur le taux de matière organique des sols.

Paramètres biologiques

La médiane des concentrations en ***ATP*** pour les terres assolées est de l'ordre de 1000 ngATP/g. Cette valeur est supérieure à la valeur médiane du 5ème cycle de mesure (2007-2011) des terres assolées du FRIBO (658 ngATP/g).

En terme agronomique, 22 échantillons sur 29 se caractérisent par une biomasse microbienne suffisante. On observe une influence significative de la part des prairies dans la rotation sur les concentrations en ATP et celles-ci sont négativement corrélées avec la fréquence du labour conventionel.

La médiane pour les terres assolées de la ***minéralisation du carbone organique*** est de l'ordre de 700 μgMO/g/15j, valeur du même ordre de grandeur que la valeur médiane du 5ème cycle de mesure du FRIBO (de 567 μgMO/g/15 jours).

En terme agronomique, 22 échantillons sur 29 se caractérisent par une minéralisation du carbone organique suffisante. Les tests statistiques mettent en évidence un effet significatif de la part de prairies sur la minéralisation du carbone organique, au-delà de potentiels effets liés aux propriétés du sol (pH, C/N ou teneur en argile). En outre, on constate un effet marginalement significatif avec l'apport de fumier.

Le rapport **CO_2/ATP** est corrélé positivement avec l'apport de fumier et le labour conventionel.

Compaction

Les densités apparentes pondérées de l'horizon A sont comprises entre 1.2 et 1.6. Aucun site ne présente de dépassement de la valeur indicative définie par le groupe de travail „physique du sol" (2009).

Toutefois, il n'est pas possible d'interpréter ces mesures de densité apparente en termes de fertilité des sols. En effet, la densité apparente est un paramètre difficile à mesurer pour les terres agricoles

travaillées et soumises à des passages d'engins ; ce paramètre dépend à la fois de la taille de l'échantillon, de la période de prélèvement par rapport au travail du sol et aux différentes interventions agricoles et des conditions climatiques avant le prélèvement. D'autre part, ce travail concerne uniquement l'horizon A travaillé alors que les compactions durables sont en général observées dans l'horizon B sous-jacent.

Pratiques agricoles

Aucun des agriculteurs interrogés n'enfouit les pailles de céréales : elles sont utilisées sur l'exploitation ou vendues. En ce qui concerne les 9 exploitations sans bétail du réseau, une partie des pailles est échangée contre du fumier dans 3 cas, 2 exploitations envisagent de le faire.

Aucun agriculteur interrogé n'utilise de compost.
21 agriculteurs sur 30 épandent du fumier, essentiellement avant les sarclées.
Aucun exploitant ne pratique le véritable semis direct sur les parcelles enquêtées. Par contre, beaucoup d'agriculteurs réduisent le labour conventionnel au profit de techniques sans retournement de la terre, le plus souvent le pseudolabour au chisel.

14. Quels indicateurs de développement durable pour les sols agricoles vaudois ?

La mise en place d'un réseau d'observation de terres assolées vaudoise vise à suivre l'évolution d'indicateurs fiables de fertilité des sols à long terme dans le domaine des grandes cultures. L'objectif est également de fournir des indicateurs qui permettent de suivre l'effet de certaines pratiques agricoles

Suivi de l'état de fertilité des sols

Le taux de matière organique est un paramètre global non interprétable en terme d'activité biologique des sols. En outre, si l'effet d'un changement brutal (déforestation, retournement de prairie permanente) peut se voir rapidement sur le taux de matière organique d'un sol, des changements inverse provoqueront des évolutions beaucoup moins importantes et beaucoup plus lentes (Attard *et al*, 2011). Ce paramètre n'est donc pas suffisant pour apprécier la fertilité d'un sol et non adapté pour évaluer l'impact de changements de pratiques agricoles.

La concentration en ATP représente la biomasse vivante qui est présente au moment de l'observation, mais qui n'est pas forcément active. Par contre, la minéralisation du carbone organique reflète l'activité respiratoire du sol, qui est un bon indicateur de l'état du fonctionnement biologique d'un sol (Bispo et al, 2009).

A notre avis, les paramètres à utiliser comme indicateur de développement durable en termes de fertilité des sols sont la minéralisation du carbone organique et le rapport CO_2/ATP. Pour le second paramètre, une approche individuelle est plus adaptée qu'une approche statistique de type réseau.

Etant donné la baisse de la biomasse microbienne observée dans le réseau FRIBO, il nous semble également intéressant de continuer à suivre les concentrations en ATP.

Pour raisonner en termes de développement durable, il faudrait élargir la base de données de référence à des systèmes agro-écologiques plus équilibrés pour fixer des valeurs seuil à atteindre pour chaque indicateur retenu. Par exemple en Suisse, Oberholzer et al, 1999, ont différencié des sites en exploitation biologiques dans l'élaboration d'un modèle d'évaluation de la qualité microbiologique des sols. Cependant, ces travaux, tout comme les travaux de référence nationale du NABO (Hug et al, 2014) utilisent d'autres méthodes de quantification de l'activité biologique répertoriées par le Groupe de travail "Biologie du sol » (2009). La comparaison entre les différentes références reste donc délicate. Des travaux comparatifs existent mais les résultats ne sont pas encore généralisables (Kaufmann et al, 2010) ; ceux-ci représentent une perspective intéressante à utiliser si on poursuit ce réseau.

Stock de carbone

Le stock de matière organique est un calcul délicat car il nécessite la mesure d'un paramètre difficile à mesurer de façon fiable en terres cultivées : la densité apparente. En effet, d'une part, celle-ci est très variable dans l'espace et dans le temps (en fonction des pratiques agricoles), d'autre part, elle dépend du volume de l'échantillon (différentes formes de porosité). En outre, Arrouays et al. (2003) ont montré que des changements de stock de carbone relatifs inférieurs à 5% sont difficilement

détectables dans les stocks de carbone. Par exemple, sur 11 ans de suivi de parcelles expérimentales à Zollikofen, il n'y a pas de différence significative pour le stock de carbone entre labour et semis direct (Muller et al, 2007).

A notre avis, le suivi du stock de carbone dans les sols n'est pas pertinent dans l'optique de suivre une évolution dans un réseau d'observation suite à des changements de pratique agricole

Quantification de l'effet du changement de pratiques agricoles sur la fertilité des sols

Si on reste dans le domaine des grandes cultures intensives, le réseau n'est à notre avis pas adapté pour quantifier l'effet de changements de pratiques agricoles sur la fertilité des sols. Une approche de type réseau est trop globale : elle fait intervenir beaucoup trop de paramètres interdépendants (paramètres pédologiques, météorologiques, agricoles …) ; d'autre part, les mesures devraient être beaucoup plus rapprochées dans le temps pour comprendre l'évolution des paramètres. En outre, les enquêtes auprès des exploitants ne donnent qu'une idée globale des pratiques agricoles utilisées.

Des essais au champ contrôlés et comparatifs seraient plus adaptés pour quantifier l'effet d'une pratique agricole donnée sur la fertilité des sols

15. Quelles pratiques agricoles privilégier?

→La proportion de sarclées dans la rotation joue un rôle négatif sur le taux de matière organique. En outre, les traitements statistiques font apparaître l'effet bénéfique des prairies sur l'ATP et sur la minéralisation du carbone organique.

Tant que l'on reste dans un système de rotation de culture, il est conseillé de diminuer la part des sarclées au profit de la part et la durée des prairies temporaires qui favorisent l'activité biologique

Cette mesure est également bénéfique en terme de protection contre l'érosion et de réduction des pertes en nitrates vers les eaux souterraines (sous condition que la rompue des prairies soit bien gérée). Cette mesure étant difficile à mettre en œuvre pour les exploitations sans bétail, des subventions sont proposées par le projet Sol Vaud 2014-2019 (Programme de maintien de la fertilité des sols du canton de Vaud) récemment mis en œuvre (voir programme détaillé sous www.prometerre.ch/sols).

→On constate un effet positif, certes peu net, des apports de fumier sur le taux de matière organique, l'ATP et la minéralisation du carbone organique. Cet effet peu net est très certainement masqué par des effets inverse puisque le fumier est surtout apporté sur les sarclées.

L'apport de fumier est à privilégier

Cette mesure contribue à la restitution de matière organique dans les sols. L'enfouissement des pailles, qui n'est pas du tout pratiquée par les exploitations du réseau, pourrait également être privilégié. Dans ce sens de restitution de matière organique, notons la mesure no1 du projet Sol Vaud, qui favorise l'implantation d'engrais verts.

→Aucun effet du labour conventionnel n'a été mis clairement en évidence, essentiellement car notre réseau n'est pas adapté. Nous recommandons toutefois, en référence à de nombreux travaux, d'utiliser des techniques sans labour (travail superficiel et semis direct), qui respectent mieux les propriétés naturelles d'un sol et optimalisent les différentes fonctions du sol.

Bibliographie

Agridea. (s.d.). Machinisme et bâtiment, fiches techniques., chapitre 2.2.1.

Arbeitshilfe der Bodenschutzfachstellen der Kantone AG, AI, AR, BE, BL, BS, FR, GE, GR, JU, LU, NE, NW, OW, SG, SH, SO, SZ, TG, TI, VD und ZG sowie des Fürstentums Liechtenstein. (2009). Arbeitshilfe zur Erfassung und Beurteilung von Bodenschadverdichtungen.

Arrouays D, Feller C, Jolivet C, Saby N, Andreux F, Bernoux M et Cerri C. (2003). Estimation de stocks de carbone organique des sols à différentes échelles d'espace et de temps. *Etude et gestion des sols, 10*, pp. 347-365.

Attard E, Le Roux X, Laurent F, Chabbi A, Nicolardot B et Recous S. (2011). Impact de changements d'occupation et de gestion des sols sur la dynamique des matières organiques, les communautés microbiennes et les flux de carbone et d'azote. *Etude et gestion des sols, 18*, pp. 147-159.

Bispo A, Cluzeau D, R Creamer R, Dombos M, Graefe U, Krogh Ph, Sousa JP, Peres G, Rutgers M, Winding A et Rombke J. (2009). Indicators for monitoring soil biodiversity. *Integrated Environmental Assessment and Management, 5*, pp. 717-719.

Boivin P, Brunet D, Gascuel-Odoux C. (1990). Densité apparente d'échantillon de sol : méthode de la poche plastique. *Bulletin du groupe français d'humidité neutronique et des techniques associées*, pp. 57-71.

Geiger A, Kieser E. (2011). Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf den Kohlenstoffpool und die vertikale Kohlenstoffverteilung im Boden – Untersuchung am Beispiel Wartau SG. *Masterarbeit 2011, ETH Zurich*.

Groupe de travail "Biologie du sol - Application" (BSA). (2009). Guide à l'utilisation et à l'interprétation des paramètres biologiques du sol.

Hug AS, Widmer F et Frey B. (2014). Bodenbiologie im Referenzmessnetz der Nationalen Bodenbeobachtung NABO. *SSP congrès annuel Changins.*

Julien P, Morand D. (1995). *FRIBO Réseau d'observation des sols agricoles 1987-1994. IAG.*

Kaufmann K, Rossier N, Oberholzer HR et v. Niederhäusern A. (2010). Vergleich dreier Methoden zur Langzeitbeobachtung der biologischen Bodenaktivität. *Bulletin BGS, 30*, pp. 75-80.

Maire N. (1987). Evaluation de la vie microbienne dans les sols par un système d'analyses biochimiques standardisées. *Soil Biol. Biochem.*, pp. 19, 491-500.

Martin MP, Wattenbach M, Smith P, Meersmans J, Jolivet C., Boulonne L, Arrouays D. (2011). Spatial distribution of soil organic carbon stocks in France. *Biogeosciences, 8*, pp. 1053-1065.

Mueller M, Schaffluetzel R, Chervet A, Sturny WG, Zihlmann U, Wuisskopf P. (2007). Humusgehalte nach 11 Jahren Direktsaat und Pflug. *AGRARForschung, 14*, pp. 394-399.

Neyroud J A et Zuodar L. (1981). Enquête sur la fertilité des sols. IIe partie: étude critique des relations entre les fumures pratiquées et l'évolution correspondante des indices de fertilité du sol. *Revue suisse d'agriculture, 13*, pp. 221-228.

Neyroud J-A. (1978). Enquête sur la fertilité des sols vaudois. Ie partie: présentation des données. *Revue suisse d'agriculture, 10*, pp. 79-85.

Oberholzer H R, Rek J, Weisskopf P et Walther U. (1999). Evaluation of soil quality by means of microbiological parameters related to the characteristics of individual arable sites. *Agribiol. Res.,52*, pp. 113-125.

OFEV. (1996). Microbiologie - principe, interprétation et utilisation en agronomie. *Documents et environnement 57*.

OFEV. (2003). Prélèvement et préparation d'échantillons de sols pour l'analyse de substances polluantes. *L'environnement pratique*.

Oorts K, Bossuyt H, Labreuche J, Merckx R, Nicolardot B. (2007). Carbon and nitrogen stocks in relation to organic matter fractions, aggregation and pore size distribution in no-tillage and conventional tillage in northern France. *European Journal of Soil Science, 58*, pp. 248-259.

Rossier N, Bongard L, von Niedeerhausern N. (2012). FRIBO - réseau fribourgeois d'observation des sols 1987-2011. IAG.

Rossier N, Dessureault-Rompré J. (2003). FRIBO : réseau d'observation des sols agricole 1987-2001 biologie. IAG.

Sinaj S, Richner W, Flisch R, Charles R. (2009). Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages (DBF 2009). *Revue Suisse d'Agriculture*, p. 98 pages.

Soltner. (2005). Les bases de la production végétale. Tome I LE SOL et son amélioration, ed.24. *Collection Sciences et techniques agricoles*.

Annexes

Liste des annexes

Annexe 1 - Schéma général du système d'analyses biologiques standardisé
Annexe 2 - Modèle de questionnaire utilisé avec les exploitants agricoles
Annexe 3 - Paramètres physicochimiques et biologiques, données 2012
Annexe 4 - Paramètres physicochimiques, données des années 75 (extrait de la base de données PEDOLOGIE)
Annexe 5 - Densité apparente, données 2012
Annexe 6 - Grille d'interprétation des paramètres biologiques selon FRIBO
Annexe 7 - Rapport complet du traitement statistique des résultats (Ecostats, A.Thébault, nov. 2013)
Annexe 8 – Pratiques agricoles testées dans le traitement statistique, données 2007-2012

ANNEXE 1

Schéma général du système d'analyses biologiques standardisées

Schéma général du système d'analyses biologiques standardisées
(FRIBO, 2003 d'après OFEV, 1996 adapté de Maire, 1987)

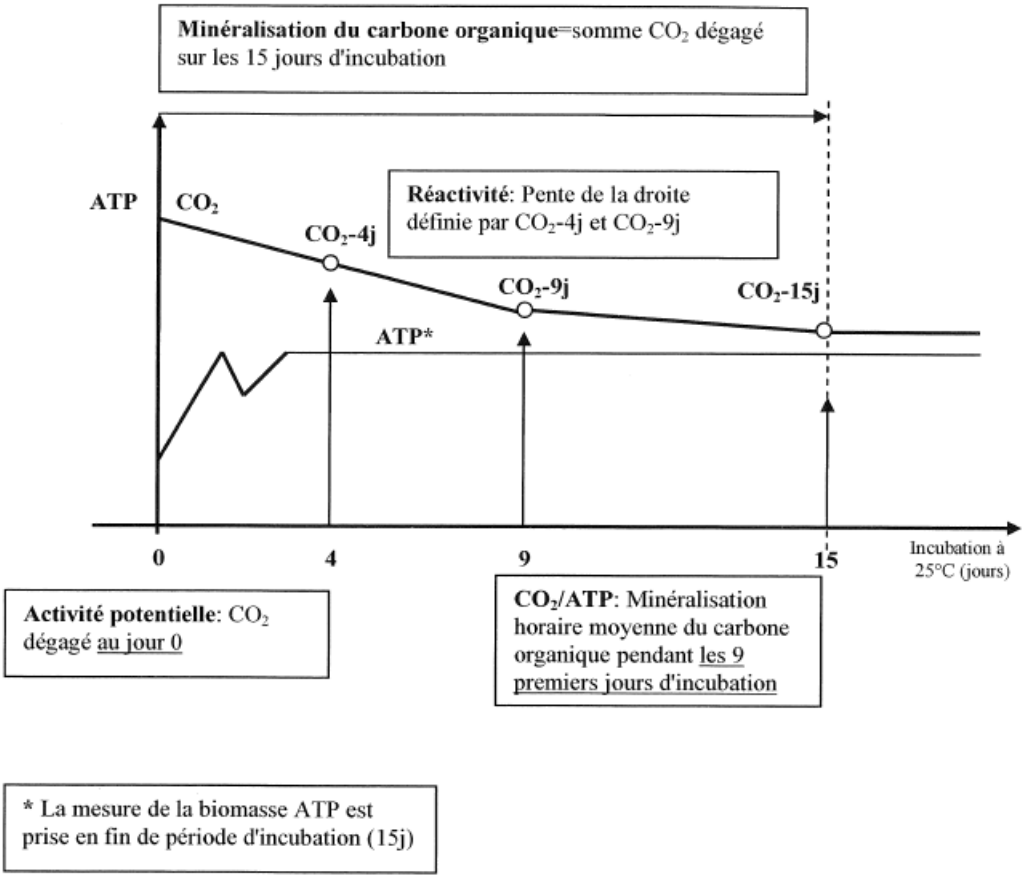

Figure 3.1 Schéma général du système d'analyses biologiques standardisé

Source: OFEFP, 1996 adapté de Maire, 1987.

ANNEXE 2
Modèle de questionnaire utilisé avec les exploitants agricoles

Agriculteur

Adresse

Exploitation **avec** **sans** **bétail**

Cultures

Apport de fertilisants organiques ? (lisier, purin, fumier en tas, fumier de stabulation, compost, autre…)

Enfouissement des pailles ?

préleveur:	N°SESA	**Nom du champ**	coordonnées point prélèvement

Date du prélèvement:	Exposition:	Pente:	Altitude:	Etat au jour du prélèvement

parcelle exploitée depuis

plan de situation du prlvt

Ne pas oublier : travail du sol, fumure organique, enfouissement des pailles, chaulage

Culture principale 2007

---

interculture

Culture principale 2008

---

interculture

Culture principale 2009

---

interculture

Culture principale 2010

---

interculture

Culture principale 2011

---

interculture

Culture principale 2012

interculture prévue	Quelle étape à ce jour ?

ANNEXE 3
Paramètres physicochimiques et biologiques
données 2012

Données 2012												
site no	commune	profondeur		m o	pH eau	pH KCl	CaCO3	N kjeldahl	C	C/N	argiles	silts
		cm		%	[-]	[-]	%	%	%	[-]	%	%
Suchy-gaznat	Suchy	0	20	5.2	7.3	6.8	0	0.35	3.0	8.6	28	34
		20	33	4.7	7.4	6.9	0	0.34	2.7	8.0		
Thierrens-gaznat	Thierrens	0	20	3.9	6.6	5.8	0	0.26	2.3	8.7	22	35
		20	40	3.9	6.8	6	0	0.25	2.3	9.1		
VD010	Crassier	0	20	2.4	6.7	6	0	0.17	1.4	8.2	20	32
		20	30	2.2	6.9	6.2	0	0.16	1.3	8.0		
VD013	Founex	0	20	2.3	8	7.3	5	0.2	1.3	6.7	26	42
		20	38	2.3	8	7.3	5	0.2	1.3	6.7		
VD015	Bassins	0	20	3.8	7.2	6.6	0	0.26	2.2	8.5	26	33
		20	35	3.3	7.5	6.8	0	0.24	1.9	8.0		
VD020	Gimel	0	20	3.2	6.3	5.2	0	0.22	1.9	8.5	20	35
		20	30	2.5	6.2	5.1	0	0.19	1.5	7.6		
VD027	Montricher	0	20	2.8	6.1	5	0	0.21	1.6	7.8	18	33
		20	35	2.5	6.1	4.8	0	0.19	1.5	7.6		
VD036	Vuarrens	0	20	2.3	7.2	6.5	traces	0.17	1.3	7.9	24	39
		20	33	2.3	7.3	6.7	0	0.17	1.3	7.9		
VD037	Dommartin	0	20	1.7	5.3	4.1	0	0.14	1.0	7.1	13	39
		20	35	1.7	5.5	4.2	0	0.13	1.0	7.6		
VD039	Bottens	0	20	4.2	5.8	4.7	0	0.29	2.4	8.4	30	34
		20	30	3.7	5.8	4.7	0	0.28	2.2	7.7		
VD043	Montmagny	0	20	1.2	5.7	4.4	0	0.11	0.7	6.3	14	23
		20	30	1.3	5.6	4.3	0	0.11	0.8	6.9		
VD048	Villars-Epeney	0	20	1.5	6.1	5	0	0.12	0.9	7.3	16	32
		20	38	1.5	6.3	5.2	0	0.12	0.9	7.3		
VD052	Moudon	0	20	3	7.8	7.2	traces	0.23	1.7	7.6	25	41
		20	40	2.8	7.9	7.3	traces	0.22	1.6	7.4		
VD057	Thierrens	0	20	1.9	6.4	5.3	0	0.18	1.1	6.1	18	31
		20	35	1.6	6.2	5	0	0.15	0.9	6.2		
VD062	Oron-la-Ville	0	20	2.9	6.3	5.2	0	0.2	1.7	8.4	19	42
		20	35	2.6	6.5	5.5	0	0.19	1.5	8.0		

Données 2012												
site no	commune	profondeur		m o	pH eau	pH KCl	CaCO3	N kjeldahl	C	C/N	argiles	silts
		cm		%	[-]	[-]	%	%	%	[-]	%	%
VD063	Senarclens	0	20	2.8	6.2	5.1	0	0.23	1.6	7.1	35	42
		20	40	2.6	5.9	4.7	0	0.21	1.5	7.2		
VD066	Chapelle/Moudon	0	20	2.2	6.6	5.7	0	0.16	1.3	8.0	16	31
		20	35	2	6.5	5.6	0	0.15	1.2	7.8		
VD076	Denens	0	20	3.7	7.9	7.3	8	0.28	2.2	7.7	36	53
		20	35	3.7	7.9	7.3	8	0.29	2.2	7.4		
VD096	Juriens	0	20	6.8	7.5	7.1	2	0.52	4.0	7.6	32	30
		20	30	6	7.6	7.2	2	0.48	3.5	7.27		
VD101	Fontanezier	0	20	3.5	7.1	6.5	traces	0.27	2.0	7.5	23	33
		20	30	3.9	7.2	6.7	traces	0.26	2.3	8.7		
VD105	Mathod	0	20	39.6	5.9	4.9	0	1.67	23.0	13.8	tourbeux	
		20	40	39.8	5.8	5	0	1.77	23.1	13.1		
VD107	Mathod	0	20	3.1	8	7.3	18	0.24	1.8	7.5	40	40
		20	30	3.2	8.1	7.4	17	0.24	1.9	7.8		
VD117	Grandcour	0	20	1.3	7.1	6.5	0	0.13	0.8	5.8	14	29
		20	30	1	6.8	6.1	0	0.13	0.6	4.5		
VD140	Orny	0	20	4.3	7.8	7.3	55	0.31	2.5	8.1	21	43
		20	45	4.1	7.9	7.4	56	0.31	2.4	7.7		
VD200	Ruyeres	0	20	1.6	5.5	4.1	0	0.14	0.9	6.6	15	31
		20	35	1.5	5.3	4.3	0	0.13	0.9	6.7		
VD205	Poliez-Pittet	0	20	2.9	6	4.8	0	0.21	1.7	8.0	17	31
		20	40	2.7	5.9	4.8	0	0.19	1.6	8.3		
VD218	Oleyres	0	20	1.6	6.5	5.7	0	0.12	0.9	7.8	14	23
		20	30	1.4	6.9	6.2	0	0.11	0.8	7.4		
VD220	Payerne	0	20	2.3	8.1	7.3	10	0.19	1.3	7.0	22	47
		20	38	2.4	8.1	7.3	9	0.19	1.4	7.3		
VD221	Forel-sur-Lucens	0	20	1.7	5.8	4.5	traces	0.14	1.0	7.1	16	31
		20	38	1.7	5.6	4.3	0	0.13	1.0	7.6		
VD246	Corcelles-le-Jorat	0	20	3.4	5.6	4.7	0	0.28	2.0	7.1	18	32
		20	35	1.5	5.9	4.6	0	0.16	0.9	5.5		

Données 2012									
site no	commune	ngATP/g	CO_2 j4	CO_2 j9	CO_2 j15	act. Pot.	Reacti	min C org	CO2/ATP
		[ngATP/g]	[µgCO2/g/h]	[µgCO2/g/h]	[µgCO2/g/h]	[µgCO2/g/h]	[%]	µgMO/g/15d	[-]
Suchy-gaznat	Suchy	1598	4.2	7.4	4.1	1.7	175	848	2.8
		1107	4.2	5.7	5.4	3.1	134	820	4.0
Thierrens-gaznat	Thierrens	841	4.5	4.3	2.3	4.6	96	674	5.3
		662	4.0	2.9	1.7	4.8	72	544	5.8
VD010	Crassier	707	4.3	3.6	2.5	4.9	84	638	6.0
		801	3.6	4.4	3.1	3.0	121	632	4.6
VD013	Founex	1275	2.7	4.7	4.5	1.1	175	605	2.3
		1773	3.5	4.3	3.4	2.9	123	624	2.0
VD015	Bassins	1556	2.7	6.8	4.6	0.1	247	705	2.0
		1400	2.1	3.6	3.2	0.9	170	461	1.6
VD020	Gimel	1466	4.8	10.0	4.1	0.7	207	1023	3.7
		901	3.1	4.0	2.7	2.3	130	549	3.5
VD027	Montricher	891	1.9	4.5	5.1	0.1	241	538	2.4
		773	6.5	4.4	2.7	8.2	67	877	8.1
VD036	Vuarrens	1235	6.2	5.4	3.7	6.9	86	929	5.0
		928	4.2	5.6	4.6	3.0	135	786	4.7
VD037	Dommartin	259	2.9	3.2	2.2	2.7	111	486	11.4
		329	2.7	4.6	2.1	1.2	169	518	8.8
VD039	Bottens	1237	8.9	7.3	5.2	10.1	82	1306	7.0
		1318	7.2	6.3	3.5	7.9	88	1054	5.4
VD043	Montmagny	315	2.6	2.4	1.9	2.8	92	406	8.2
		416	2.6	1.9	1.8	3.2	71	381	6.1
VD048	Villars-Epeney	683	3.8	2.3	2.3	5.0	61	526	5.3
		574	2.5	2.8	2.2	2.2	115	425	4.4
VD052	Moudon	1529	2.6	5.2	3.7	0.5	200	591	1.9
		1285	4.8	4.6	4.3	5.0	95	787	3.7
VD057	Thierrens	1008	7.8	4.6	3.6	10.4	58	1039	7.5
		924	4.9	3.8	2.4	5.8	77	696	5.2
VD062	Oron-la-Ville	735	4.8	4.6	2.4	4.9	97	721	6.5
		667	3.7	4.1	2.6	3.4	110	608	5.6

Données 2012									
site no	commune	ngATP/g	CO_2 j4	CO_2 j9	CO_2 j15	act. Pot.	Reacti	min C org	CO2/ATP
		[ngATP/g]	[µgCO2/g/h]	[µgCO2/g/h]	[µgCO2/g/h]	[µgCO2/g/h]	[%]	µgMO/g/15d	[-]
VD063	Senarclens	1395	4.7	5.1	2.9	4.4	109	752	3.4
		739	4.2	3.4	1.9	4.8	80	596	5.6
VD066	Chapelle/Moudon	1021	6.2	4.6	2.9	7.6	73	870	5.9
		729	4.8	3.2	1.7	6.0	67	633	6.3
VD076	Denens	1987	4.2	5.6	3.8	3.1	132	758	2.2
		1295	5.2	5.4	4.1	5.0	104	845	4.0
VD096	Juriens	3266	4.5	7.4	6.4	2.1	165	950	1.5
		2646	3.9	5.1	5.9	3.0	129	783	1.5
VD101	Fontanezier	741	2.7	4.4	4.9	1.4	163	612	3.9
		1944	2.9	5.1	3.2	1.2	172	600	1.6
VD105	Mathod	1549	15.0	8.7	9.9	20.1	58	2095	9.3
		2194	10.8	7.9	7.7	13.2	73	1593	4.8
VD107	Mathod	2493	4.1	4.5	4.6	3.8	109	728	1.7
		2338	2.9	4.7	4.3	1.5	162	623	1.3
VD117	Grandcour	695	5.3	5.7	3.9	5.0	107	865	7.7
		541	4.4	3.4	2.5	5.2	77	638	8.0
VD140	Orny	2564	4.5	7.1	6.3	2.5	156	943	1.9
		2050	7.5	5.8	5.4	8.8	78	1121	3.6
VD200	Ruyeres	890	2.7	3.3	2.6	2.1	125	478	3.1
		1087	2.6	4.2	3.0	1.4	158	528	2.6
VD205	Poliez-Pittet	646	5.7	3.5	2.2	7.5	62	755	8.5
		408	4.2	2.9	2.8	5.3	69	609	10.0
VD218	Oleyres	427	2.9	1.7	1.9	3.9	59	408	6.6
		345	2.9	1.3	1.3	4.1	46	362	7.8
VD220	Payerne	1084	2.2	2.8	3.0	1.7	129	424	2.1
		1368	2.3	4.6	4.2	0.5	197	557	1.9
VD221	Forel-sur-Lucens	328	4.7	3.6	3.1	5.6	77	695	14.1
		312	3.3	3.6	2.9	3.1	108	560	10.7
VD246	Corcelles-le-Jorat	1178	10.8	12.8	7.7	9.2	119	1813	9.4
		488	6.4	4.0	3.1	8.4	61	867	12.7

ANNEXE 4
Paramètres physicochimiques
données des années 1975

Données des années 1975 (base de données PEDOLOGIE)						
site no	commune	profondeur		mo	pH eau	pHKCl
		cm		%		
Suchy-gaznat	Suchy	0	30	2	7.4	
		30	80		8	
Thierrens-gaznat	Thierrens	0	30	1.7	5.5	
		30	50	1.3	5.4	
VD010	Crassier	0	25	2.4	6.4	5.7
VD013	Founex	0	30	1.7	7.7	7.2
VD015	Bassins	0	25	2.5	7.5	6.8
VD020	Gimel	0	20	3.9	6.3	5.4
VD027	Montricher	0	30	3.2	6.2	5.5
VD036	Vuarrens	0	25	3	7.1	6.3
VD037	Dommartin	0	28	2.2	6.3	5.4
VD039	Bottens	0	25	2.9	6	5.2
VD043	Montmagny	0	20	1.7	6.2	5.2
VD048	Villars-Epeney	0	20	1.6	5.5	4.9
VD052	Moudon	0	25	2.8	7.5	7
VD057	Thierrens	0	35	2.4	6.2	5.5
VD062	Oron-la-Ville	0	30	3.3	6.3	5.5
VD063	Senarclens	0	30	3.6	7.9	7.2
VD066	Chapelle/Moudon	0	25	2.3	6.3	5.7
VD076	Denens	0	25	3.7	7.2	6.4
VD096	Juriens	0	20	5.7	7.9	7
VD101	Fontanezier	0	25	2.8	7.7	7
VD105	Mathod	0	35	50	6.3	5.5
VD107	Mathod	0	30	2.8	7.9	7.3
VD117	Grandcour	0	20	1.9	6.4	5.5
VD140	Orny	0	25	4	8.3	7.6

Données des années 1975 (base de données PEDOLOGIE)						
site no	commune	profondeur		mo	pH eau	pHKCl
		cm		%		
VD200	Ruyeres	0	25	2.7	6.3	5.8
VD205	Poliez-Pittet	0	25	3.2	5.9	5.2
VD218	Oleyres	0	25	1.7	6.2	5.6
VD220	Payerne	0	25	2.5	8	7.5
VD221	Forel-sur-Lucens	0	25	1.7	6.6	6.1
VD246	Corcelles-le-Jorat	0	30	2.9	6.1	5.5

ANNEXE 5
Densités apparentes
données 2012

NUMERO		densité apparente brute	densité apparente fraction fine	niveau	moyenne da brute	moyenne da fraction fine
Thierrens gaz	5-20-1	1.40	1.40	5-20	1.36	1.36
	5-20-2	1.35	1.35			
	5-20-3	1.35	1.34			
	5-20-4	1.35	1.35			
	25-40-1	1.38	1.38	25-40	1.49	1.49
	25-40-2	1.39	1.38			
	25-40-3	1.69	1.69			
	25-40-4	1.49	1.49			
Suchy gaz	5-20-1	1.22	1.22	5-20	1.19	1.19
	5-20-2	1.16	1.16			
	5-20-3	1.18	1.18			
	5-20-4	1.21	1.20			
	20-35-2	1.24	1.24	20-35	1.19	1.19
	20-35-3	1.14	1.13			
	20-35-4	1.20	1.20			
VD 10	5-15-1	1.65	1.63	5-15	1.63	1.61
	5-15-2	1.61	1.58			
	5-15-3	1.63	1.60			
	15-25-1	1.62	1.59	15-25	1.64	1.58
	15-25-2	1.60	1.55			
	15-25-3	1.72	1.60			
VD 13	5-15 -1	1.37	1.24	5-15	1.45	1.34
	5-15 -2	1.52	1.43			
	5-15 -3	1.48	1.34			
	5-15 -4	1.49	1.32			
	5-15 -5	1.41	1.37			
	20-35-1	1.44	1.39	20-35	1.48	1.41
	20-35-3	1.50	1.41			
	20-35-4	1.49	1.43			
VD15	0-10 -1	1.25	1.25	0-20	1.31	1.31
	0-10 -2	1.34	1.34			
	0-10 -3	1.39	1.39			
	10-20 -1	1.43	1.43			
	10-20 -2	1.38	1.38			
	10-20 -3	1.06	1.06			
	20-30 -1	1.45	1.44	20-30	1.45	1.45
	20-30 -2	1.44	1.43			
	20-30 -3	1.47	1.47			
VD20	5-15 -1	1.39	1.39	5-15	1.42	1.41
	5-15 -2	1.42	1.41			
	5-15 -3	1.45	1.44			
	20-30 -1	1.52	1.51	20-30	1.49	1.49
	20-30 -2	1.49	1.48			
	20-30 -3	1.48	1.47			
	20-30 -5	1.53	1.52			
	20-30 -6	1.49	1.48			

VD27	0-20-1	1.49	1.43	0-20	1.50	1.38
	0-20-2	1.51	1.35			
	0-20-3	1.47	1.40			
	0-20-4	1.51	1.36			
	30-35-1	1.50	1.38	30-35	1.55	1.44
	30-35-3	1.57	1.53			
	30-35-4	1.54	1.36			
	30-35-5	1.58	1.49			
VD 36	0-20-1	1.51	1.51	0-20	1.47	1.46
	0-20-2	1.50	1.49			
	0-20-3	1.40	1.39			
	20-30-1	1.54	1.50	20-30	1.52	1.49
	20-30-2	1.51	1.49			
	20-30-3	1.50	1.47			
VD 37	5-20-1	1.55	1.54	5-20	1.46	1.45
	5-20-2	1.42	1.41			
	5-20-3	1.41	1.40			
	20-30-1	1.60	1.59	20-30	1.54	1.53
	20-30-2	1.47	1.45			
	20-30-3	1.54	1.53			
VD39	0-20-1	1.25	1.25	0-20	1.34	1.34
	0-20-2	1.43	1.43			
	0-20-3	1.31	1.31			
	0-20-4	1.37	1.36			
	20-30-1	1.42	1.42	20-30	1.39	1.39
	20-30-2	1.33	1.33			
	20-30-3	1.45	1.45			
	20-30-4	1.38	1.38			
VD 43	0-20-1	1.62	1.61	0-20	1.55	1.54
	0-20-2	1.52	1.52			
	0-20-3	1.50	1.50			
	20-30-1	1.59	1.59	20-30	1.60	1.60
	20-30-2	1.33	1.33			
	20-30-3	1.79	1.79			
	20-30-4	1.67	1.67			
VD48	0-20-1	1.55	1.54	0-20	1.59	1.58
	0-20-2	1.61	1.61			
	0-20-3	1.60	1.60			
	20-30-1	1.67	1.67	20-30	1.61	1.61
	20-30-2	1.57	1.57			
	20-30-3	1.63	1.62			
	20-30-4	1.56	1.56			
VD 52	0-10-1	1.50	1.50	0-10	1.41	1.41
	0-10-2	1.40	1.39			
	0-10-3	1.33	1.33			
	10-30-1	1.35	1.35	10-30	1.39	1.39
	10-30-2	1.46	1.46			
	10-30-3	1.34	1.34			
	10-30-4	1.39	1.39			

VD 57	0-15 -1	1.60	1.46	0-15	1.50	1.38
	0-15 -2	1.51	1.40			
	0-15 -3	1.37	1.29			
	25-30 -1	1.60	1.49	25-30	1.62	1.47
	25-30 -2	1.61	1.56			
	25-30 -3	1.64	1.53			
VD62	5-20-1			5-20	1.46	1.43
	5-20-2	1.43	1.40			
	5-20-3	1.48	1.47			
	20-30-1	1.53	1.52	20-30	1.49	1.47
	20-30-2	1.44	1.43			
	20-30-3	1.48	1.46			
VD63	5-20-1	1.35	1.35	5-20	1.31	1.31
	5-20-2	1.29	1.29			
	5-20-3	1.30	1.30			
	20-30-1	1.50	1.50	20-30	1.55	1.55
	20-30-2	1.54	1.54			
	20-30-3	1.59	1.59			
	20-30-4	1.57	1.57			
VD 66	0-20-1	1.49	1.49	0-20	1.45	1.44
	0-20-2	1.35	1.34			
	0-20-3	1.50	1.50			
	20-30-1	1.55	1.54	20-30	1.59	1.58
	20-30-2	1.59	1.59			
	20-30-3	1.61	1.61			
VD 76	0-20-1	1.27	1.27	0-20	1.28	1.27
	0-20-3	1.29	1.29			
	0-20-4	1.27	1.27			
	20-30-1	1.24	1.24	20-30	1.29	1.29
	20-30-2	1.34	1.34			
	20-30-3	1.31	1.30			
VD96	5-20-1	1.10	1.08	5-20	1.19	1.17
	5-20-2	1.34	1.30			
	5-20-3	1.19	1.17			
	5-20-4	1.15	1.14			
	20-28-1	1.30	1.28	20-28	1.25	1.23
	20-28-2	1.19	1.18			
	20-28-3					
VD101	0-20-1	1.22	1.20	0-20	1.33	1.32
	0-20-2	1.40	1.39			
	0-20-3	1.32	1.31			
	0-20-4	1.39	1.38			
	20-28-1	1.37	1.35	20-28	1.47	1.40
	20-28-2	1.51	1.31			
	20-28-3	1.54	1.52			
VD 105	20-45 -1	0.61	0.61	20-45	0.62	0.62
	20-45 -2	0.60	0.60			
	20-45 -3	0.65	0.65			
	20-45 -4	0.61	0.61			

VD 107	5-20-1	1.44	1.44	5-20	1.43	1.43
	5-20-2	1.34	1.34			
	5-20-3	1.47	1.47			
	5-20-4	1.45	1.45			
	20-28-1	1.49	1.49	20-28	1.51	1.51
	20-28-2	1.48	1.48			
	20-28-3	1.47	1.47			
	20-28-4	1.59	1.59			
VD 117	0-20-1	1.40	1.40	0-20	1.46	1.46
	0-20-2	1.47	1.47			
	0-20-3	1.44	1.43			
	0-20-4	1.52	1.52			
	0-20-5	1.49	1.48			
	20-30-1	1.54	1.54	20-30	1.55	1.54
	20-30-2	1.46	1.46			
	20-30-3	1.54	1.49			
	20-30-4	1.68	1.68			
VD 140	5-20 -1	1.29	1.26	5-20	1.24	1.22
	5-20 -2	1.16	1.15			
	5-20 -3	1.28	1.25			
	25-30 -1	1.32	1.29	25-30	1.29	1.24
	25-30 -2	1.31	1.29			
	25-30 -3	1.28	1.17			
	25-30 -4	1.24	1.22			
VD 200	0-10 -1	1.50	1.33	0-10	1.55	1.31
	0-10 -2	1.71	1.26			
	0-10 -3	1.52	1.34			
	0-10 -4	1.48	1.32			
	15-25 -1	1.49	1.29	25-25	1.59	1.36
	15-25 -2	1.57	1.31			
	15-25 -4	1.71	1.47			
VD 205	10-20-1	1.38	1.37	10-20	1.41	1.40
	10-20-2	1.45	1.44			
	10-20-3	1.42	1.41			
	10-20-4	1.40	1.38			
	10-20-5	1.40	1.39			
	20-35-2	1.43	1.42	20-35	1.44	1.43
	20-35-3	1.58	1.56			
	20-35-4	1.32	1.31			
VD 218	0-20 -1	1.48	1.48	0-20	1.52	1.52
	0-20 -2	1.55	1.55			
	0-20 -3	1.52	1.52			
	0-20 -4	1.55	1.54			
	20-30 -1	1.53	1.53	20-30	1.54	1.53
	20-30 -2	1.41	1.41			
	20-30 -3	1.56	1.56			
	20-30 -4	1.64	1.63			

VD 220	0-20 -1	1.61	1.61	0-20	1.49	1.48
	0-20 -2	1.42	1.42			
	0-20 -3	1.47	1.45			
	0-20 -4	1.45	1.45			
	20-40 -1	1.59	1.59	20-40	1.57	1.57
	20-40 -2	1.58	1.58			
	20-40 -3	1.54	1.54			
	20-40 -4	1.58	1.58			
VD 221	2-6-1	0.99	0.95	0-20	1.43	1.39
	2-6-2	1.59	1.56			
	2-6-3	1.57	1.54			
	10-20 -1	1.51	1.46			
	10-20 -2	1.48	1.45			
	10-20 -3	1.44	1.41			
	20-30 -1	1.55	1.46	20-30	1.61	1.55
	20-30 -2	1.61	1.60			
	20-30 -3	1.66	1.63			
	20-30 -4	1.61	1.52			
VD246	0-15-1	1.41	1.40	0-15	1.37	1.37
	0-15-2	1.33	1.33			
	0-15-3	1.38	1.38			
	20-30-1	1.47	1.46	20-30	1.54	1.50
	20-30-2	1.56	1.49			
	20-30-3	1.57	1.50			
	20-30-4	1.54	1.54			

ANNEXE 6
Grille d'interprétation des paramètres biologiques selon FRIBO

Valeurs de référence pour les analyes biologiques selon N. Maire, interprétées selon FRIBO, IAG

Cultures	Classe	Argile	Biomasse ATP				
		%	< pauvre	< médiocre	satisfaisant	riche >	très riche >
Terres assolées	1	0 -10	244	310	395	504	641
	2	10 - 20	426	543	691	880	1121
	3	20 - 30	644	820	1044	1330	1694
	4	> 30	1207	1538	1959	2495	3178
Prairies permanentes	2	10 - 20	857	1067	1328	1653	2057
	3	20 - 30	1142	1421	1769	2202	2741
	4	> 30	1846	2298	2860	3561	4431

Cultures	Classe	Humus	CO2 j4				
		%	< pauvre	< médiocre	satisfaisant	riche >	très riche >
Terres assolées	1	<2	2.2	2.6	3.0	3.6	4.3
	2	2 - 4.9	3.1	3.7	4.3	5.2	6.1
	3	5 - 9.9	5.0	5.9	7.1	8.4	10.0
	4	10 - 19.9	8.2	9.8	11.6	13.8	16.4
Prairies permanentes	2	2 - 4.9	6.3	7.4	8.8	10.4	12.2
	3	5 - 9.9	9.4	11.1	13.0	15.4	18.2

Cultures	Classe	Humus	CO2 j9				
		%	< pauvre	< médiocre	satisfaisant	riche >	très riche >
Terres assolées	1	<2	1.7	2.1	2.5	3.0	3.6
	2	2 - 4.9	2.7	3.3	3.9	4.7	5.7
	3	5 - 9.9	5.0	6.0	7.2	8.7	10.5
	4	10 - 19.9	10.0	12.0	14.4	17.3	20.8
Prairies permanentes	2	2 - 4.9	5.2	6.2	7.4	8.8	10.5
	3	5 - 9.9	6.9	8.2	9.8	11.7	14.0

Cultures	Classe	Humus	Minéralisation Carbone organique				
		%	< pauvre	< médiocre	satisfaisant	riche >	très riche >
Terres assolées	1	<2	347	398	458	526	604
	2	2 - 4.9	533	613	704	808	929
	3	5 - 9.9	953	1095	1258	1445	1661
	4	10 - 19.9	1820	2091	2402	2759	3170
Prairies permanentes	2	2 - 4.9	1070	1196	1337	1495	1670
	3	5 - 9.9	1521	1700	1900	2124	2374
	4	10 - 19.9	2114	2362	2640	2951	3298

Cultures	Classe	pH	Rapport CO2/ATP				
		%	< pauvre	< médiocre	satisfaisant	riche >	très riche >
Terres assolées	1	<5.9	3.9	4.9	6.1	7.6	9.4
	2	5.9 - 6.7	3.5	4.4	5.4	6.7	8.4
	3	6.8 - 7.2	3.2	3.9	4.9	6.1	7.6
	4	> 7.2	2.9	3.6	4.5	5.6	6.9
Prairies permanentes	1	<5.9	5.2	6.4	7.8	9.5	11.7
	2	5.9 - 6.7	3.8	4.6	5.7	6.9	8.5
	3	6.8 - 7.2	2.8	3.4	4.2	5.1	6.3
	4	> 7.2	2.3	2.8	3.4	4.2	5.2

ANNEXE 7

Traitement statistique de l'effet des pratiques agricoles sur le taux de matière organique et les paramètres biologiques

rapport complet

Traitement statistique des données pEaudSol
Novembre 2013

Etape 2 : Influence des pratiques agricoles sur les paramètres biologiques du sol

1° - Biais dans les données ?

a - Influence de la date de prélèvement sur les paramètres biologiques :

La date de prélèvement à été divisée en 3 groupes : printemps (Mai-Juin), été (Juillet-Aout) et hiver (Février-Mars). Nous avons ensuite étudié l'effet de la saison (printemps, été, hiver) de prélèvement sur le taux de matière organique, l'ATP, la minCorg et le rapport CO_2/ATP

Matière organique (MO)

On doit prendre le logarithme de la teneur en matière organique pour pouvoir faire une analyse de variance à un facteur (ANOVA)

Effet de la date de prélèvement : $F_{2,24} = 0.487$, p=0.620

⇨ pas d'effet significatif de la date de prélèvement

ATP

On doit prendre le logarithme de la teneur en ATP pour pouvoir faire une analyse de variance à un facteur (ANOVA)

Effet de la date de prélèvement : $F_{2,24} = 0.091$, p=0.913

⇨ pas d'effet significatif de la date de prélèvement

CO2/ATP

On doit prendre le logarithme du rapport CO2/ATP pour pouvoir faire une analyse de variance à un facteur (ANOVA)

Effet de la date de prélèvement : $F_{2,24} = 0.260$, p= 0.773

⇨ pas d'effet significatif de la date de prélèvement

Minéralisation C org.

On peut réaliser une analyse de variance à un facteur (ANOVA) de la minéralisation du C. organique sans avoir à passer par le logarithme

Effet de la date de prélèvement : $F_{2,24} = 0.420$, p=0.662

⇨ pas d'effet significatif de la date de prélèvement

=> La date de prélèvement n'a aucun effet significatif sur les teneurs en Matière organique, ATP, min C. org et CO2/ATP du sol. Ces résultats sont confirmés visuellement par les graphiques de la figure 1.

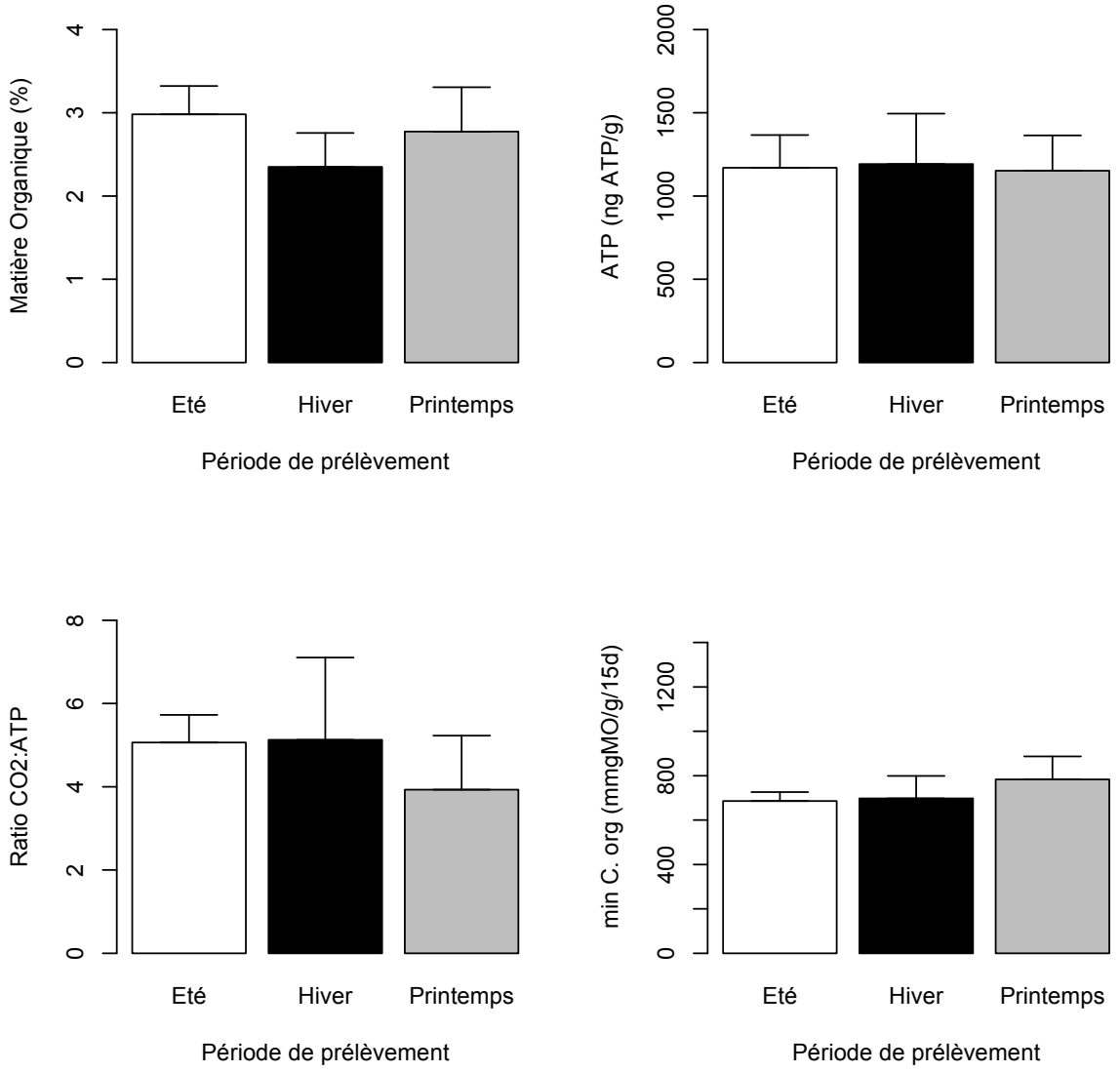

Figure 1 : Teneurs en matière organique, ATP, rapport CO2/ATP et taux de minéralisation du C. organique dans les sols échantillonnés en été (blanc), en hiver (noir) et au printemps (gris)

b - Influence de l'altitude sur les paramètres biologiques :

Matière organique (MO)

On doit prendre le logarithme de la teneur en matière organique pour pouvoir faire une analyse de variance à un facteur (ANOVA)

Effet de la date de l'altitude: $F_{1,25} = 1.365$, $p=0.254$

⇨ pas d'effet significatif de l'altitude

ATP

On doit prendre le logarithme de la teneur en ATP pour pouvoir faire une analyse de variance à un facteur (ANOVA)

Effet de la date de prélèvement : $F_{1,25} = 0.539$, $p=0.470$

⇨ pas d'effet significatif de l'altitude

CO2/ATP

On doit prendre le logarithme du rapport CO2/ATP pour pouvoir faire une analyse de variance à un facteur (ANOVA)

Effet de la date de prélèvement : $F_{1,25} = 2.329$, $p= 0.139$

⇨ pas d'effet significatif de l'altitude sur le rapport CO2/ATP

Minéralisation C org.

On peut réaliser une analyse de variance à un facteur (ANOVA) de la minéralisation du C. organique sans avoir à passer par le logarithme

Effet de la date de prélèvement : $F_{1,25} = 2.765$, $p=0.109$

⇨ pas d'effet significatif de l'altitude sur la minéralisation du C. organique

=> L'altitude n'a pas effet significatif sur les teneurs en Matière organique et ATP du sol, la minéralisation du C. organique et le rapport CO2/ATP du sol. Ces résultats sont confirmés visuellement par les graphiques de la figure 2.

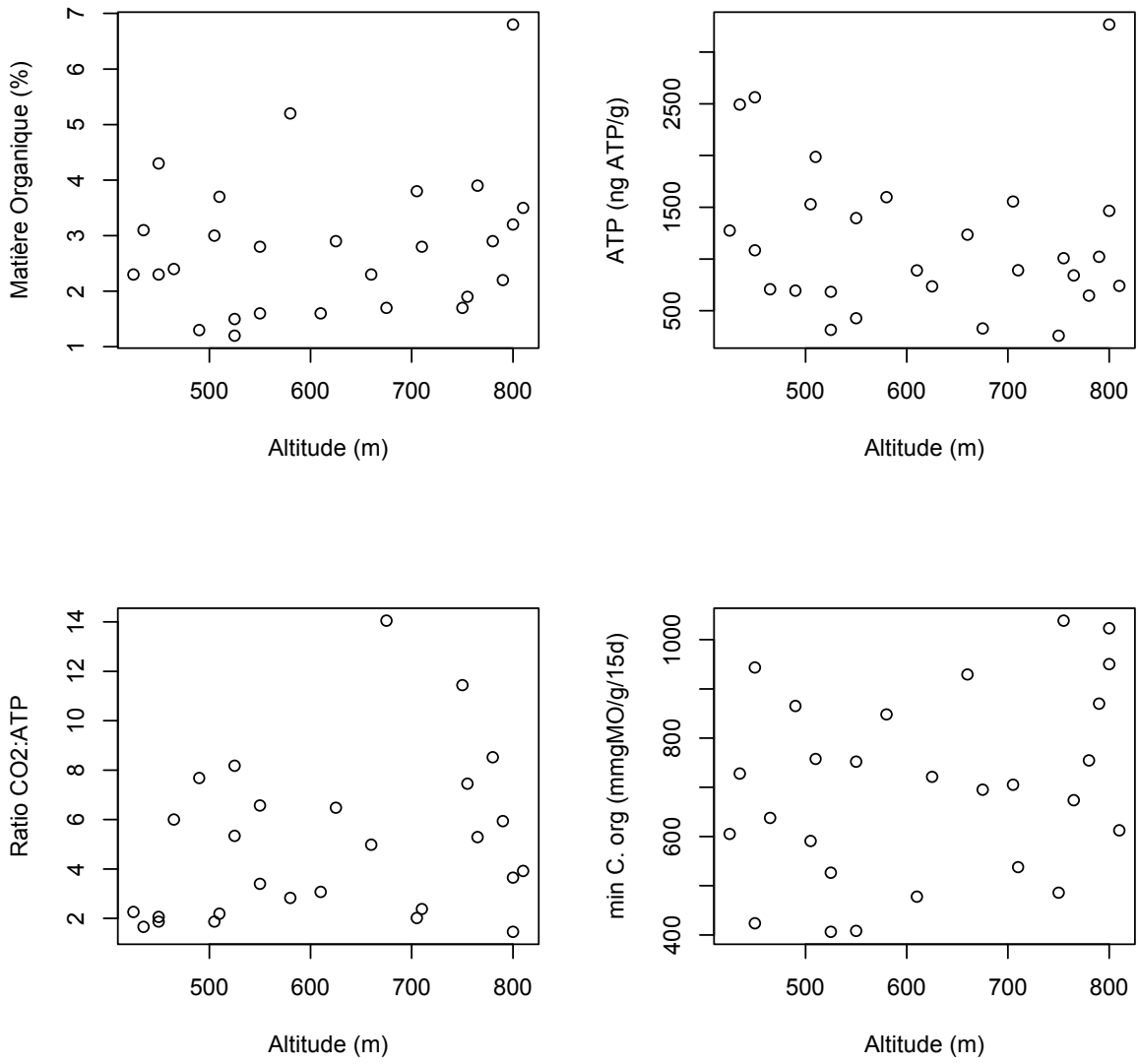

Figure 2 : Evolution des teneurs en matière organique, ATP, rapport CO2/ATP et taux de minéralisation du C. organique dans les sols en fonction de l'altitude

c - Influence de la culture avant le prélèvement sur les paramètres biologiques :

Le type de culture avant le prélèvement à été divisée en 4 groupes : céréales (blé, orge, triticale, colza), engrais verts, prairies temporaires et sol nu. Nous avons ensuite étudié l'effet du type de culture avant prélèvement (céréales, engrais verts, prairies ou sol nu).

Matière organique (MO)

On doit prendre le logarithme de la teneur en matière organique pour pouvoir faire une analyse de variance à un facteur (ANOVA)

Effet du type de culture avant prélèvement: $F_{3,23} = 0.649$, p=0.592

⇨ pas d'effet significatif du type de culture avant prélèvement sur la teneur en Matière organique

ATP

On doit prendre le logarithme de la teneur en ATP pour pouvoir faire une analyse de variance à un facteur (ANOVA)

Effet du type de culture avant prélèvement: $F_{3,23} = 0.693$, p=0. 566

⇨ pas d'effet significatif du type de culture avant prélèvement sur la teneur en ATP

CO2/ATP

On doit prendre le logarithme du rapport CO2/ATP pour pouvoir faire une analyse de variance à un facteur (ANOVA)

Effet du type de culture avant prélèvement: $F_{3,23} = 0.561$, p= 0.646

⇨ pas d'effet significatif du type de culture avant prélèvement sur le rapport CO2/ATP

Minéralisation C. org.

On peut réaliser une analyse de variance à un facteur (ANOVA) de la minéralisation du C. organique sans avoir à passer par le logarithme.

Effet du type de culture avant prélèvement: $F_{3,23} = 2.611$, **p=0.076**

⇨ Il y a un effet marginalement significatif du type de culture avant prélèvement sur la minéralisation du C. organique.

=> Le type de culture avant prélèvement n'a pas effet significatif sur les teneurs en Matière organique et ATP du sol, ni sur le rapport CO2/ATP. En revanche, elle a un effet marginalement significatif sur la minéralisation du C. organique. En effet, la minéralisation du C. organique est marginalement plus élevée dans les parcelles ayant été en prairies avant prélèvement (p=0.053) que sur les autres parcelles. Ces résultats sont confirmés visuellement par les graphiques de la figure 3.

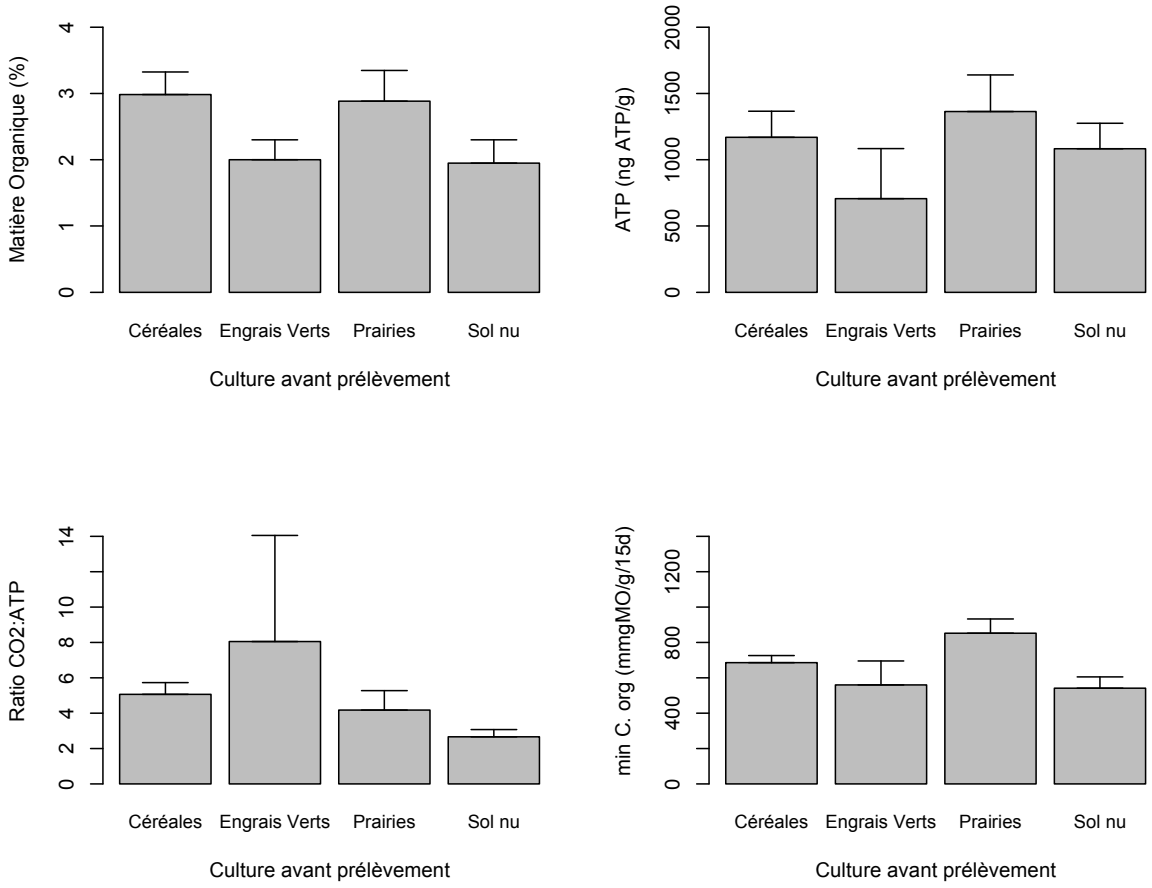

Figure 3 : Effet de la culture avant le prélèvement sur les teneurs en matière organique et ATP, le rapport CO2/ATP et le taux de minéralisation du C. organique dans les sols.

2° - Influence des pratiques agricoles sur les paramètres biologiques :

L'étude de l'influence des pratiques agricoles (part de labour, part de prairies, part d'intercultures, part sarclées et nombre d'apports de fumier) peut se faire de deux façons différentes : (i) tester chaque pratique agricole une par une par une analyse de variance à un facteur (ANOVA) ou (ii) tester l'ensemble des pratiques agricoles, en tenant compte de leurs éventuelles corrélations avec une régression linéaire multiple suivie d'une sélection de variables. Cette deuxième méthode permet d'avoir dans le modèle final uniquement les variables pertinentes pour le paramètre biologique en question. Les résultats des analyses de variance à un facteur sont présentés dans le tableau 1 et les résultats des régressions linéaires multiples suivies de la sélection de variables sont présentés dans le tableau 2.

Analyse de variance à un facteur.

Le taux de matière organique du sol est significativement influencé par la part de sarclées du sol (p=0.032, Tab. 1). Plus précisément, la teneur en MO du sol diminue lorsque la part de sarclées augmente (Fig.4).

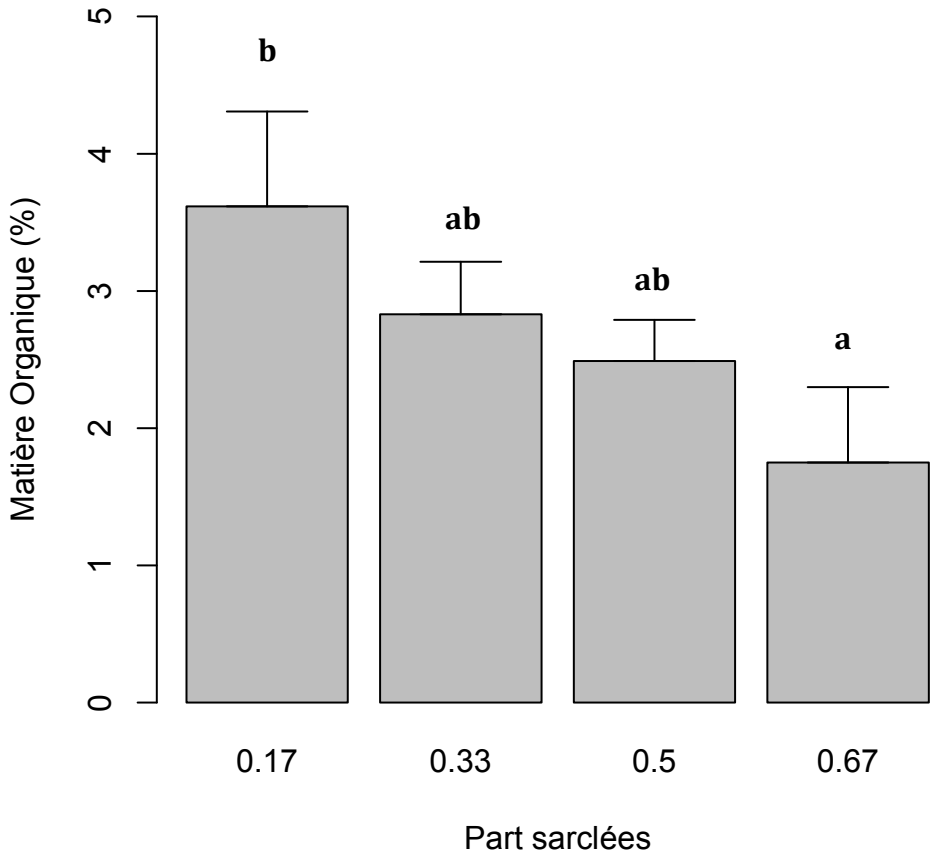

Figure 4 : Effet de la part de sarclées sur la teneur en matière organique du sol. Les lettres différentes indiquent une différence significative à p=0.05.

Aucune des pratiques agricoles n'influence significativement les concentrations en ATP et le rapport CO2/ATP du sol (Tab. 1, p-values >0.05).

Le taux de minéralisation du C. organique est significativement influencé par la part de prairies, marginalement influencé par la part d'intercultures et la part de sarclées. (Tab. 1). Il n'est cependant pas évident de voir une relation claire entre l'usage passé des terres et la minéralisation du C. organique (Fig. 5). Il semblerait que l'augmentation des intercultures diminue la minéralisation du carbone organique (Fig. 5).

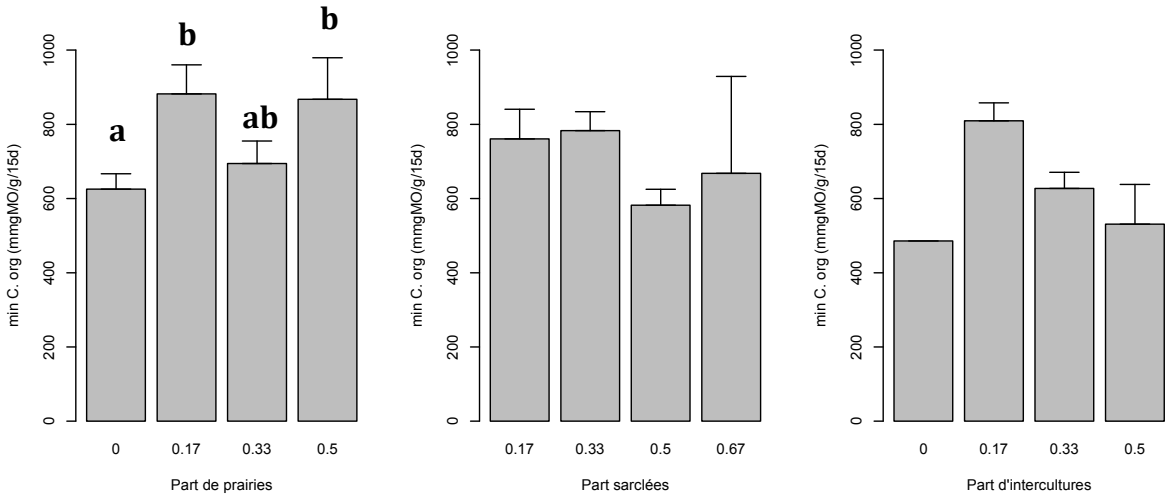

Figure 5 : Effet de la part de prairies, de la part de sarclées et de la part d'intercultures sur la minéralisation du C. organique du sol. Les lettres différentes indiquent une différence significative à p=0.05.

Matière organique		
	F-value	p-value
Labour	0.0084	0.928
Prairies	0.5890	0.450
Sarclées	**5.1803**	**0.032**
Interculture	0.8555	0.364
Fumier	2.7181	0.112
ATP		
	F-value	p-value
Labour	0.4998	0.486
Prairies	0.2955	0.592
Sarclées	0.7581	0.392
Interculture	0.4343	0.516
Fumier	1.0287	0.320
CO2/ATP		
	F-value	p-value
Labour	0.2312	0.635
Prairies	0.0078	0.930
Sarclées	0.2097	0.651
Interculture	0.0199	0.889
Fumier	0.4723	0.498
Minéralisation C. org		
	F-value	p-value
Labour	1.1971	0.284
Prairies	**5.6399**	**0.026**
Sarclées	3.7316	0.065
Interculture	4.0858	0.054
Fumier	1.9196	0.178

Tableau 1 : résultat des analyses de variance pour l'étude des effets des pratiques agricoles sur les paramètres biologiques des sols.

Régression linéaire multiple suivie de la sélection de variables

La régression linéaire multiple présente un intérêt par exemple dans l'étude des facteurs influençant le taux de minéralisation du C. organique du sol. Elle permet notamment de voir si les parts de prairies, d'intercultures et de sarclées sont effectivement tous trois responsables des variations de minéralisation du C. organique ou si les effets sont concomitants.

	Sélection de variables		
	d.f.	F-value	p-value
Matière organique			
Labour	1	0.011	0.918
Prairies	1	0.970	0.336
Sarclées	**1**	**6.663**	**0.017**
Interculture	1	0.556	0.464
Fumier	1	3.472	0.076
Résidus	21		
Minéralisation C. Org			
Interculture	**1**	**4.4601**	**0.046**
Fumier	1	3.7617	0.065
Résidus	24		

Tableau 2 : résultat du test de sélection de variables pour l'analyse de la teneur en MO et de la minéralisation du C. organique du sol.

Les résultats de cette étape confirment l'effet des sarclées sur la teneur en MO du sol (p=0.017, Tab. 2) et l'absence d'effet des pratiques agricoles sur les teneurs en ATP et le rapport CO2/ATP du sol. La régression linéaire multiple permet également de mettre en évidence un effet marginalement significatif des apports de fumier sur la teneur en matière organique du sol (p=0.076, Tab. 2). La teneur en Matière organique tendrait à augmenter avec le nombre d'apports de fumier (Fig. 6).

Concernant la minéralisation du C. organique du sol, la sélection de variables conduit à un modèle à deux variables : le nombre d'apports de fumier et la part d'intercultures (Tab. 2). Il semble donc que les effets de la part des sarclées et de la part de prairies soient concomitants avec l'effet de la part d'intercultures ou de la fréquence d'apport de fumier.

- ⇨ Les tests de corrélation nous permettent de mettre en évidence que les corrélations entre la fréquence d'apport de fumier et la part d'années sarclées (r= -0.418, p=0.030) et la fréquence d'apports de fumier et la part de prairies (r=0.417, p=0.030) sont significatives.
- ⇨ D'autre part, la part de prairies est significativement négativement corrélée à la part sarclées (r= -0.706, p<0.001), ce qui explique la relation opposée entre fréquence d'apports de fumier et part de prairies et entre fréquence d'apport de fumier et part d'années sarclées.

⇨ Il semble donc que les effets de la part de prairies et d'années sarclées visibles dans l'analyse de variance (Tab. 1) étaient en fait étroitement liés à l'effet du nombre d'apports de fumier sur les parcelles.

La minéralisation du C. organique du sol est donc avant tout liée à la part d'intercultures ainsi que, plus marginalement, au nombre d'apports de fumier réalisés sur la parcelle (Tab. 2). Même si la relation n'est pas complètement nette, la minéralisation du C. organique tend à augmenter avec la fréquence d'apports de fumier (Fig. 6).

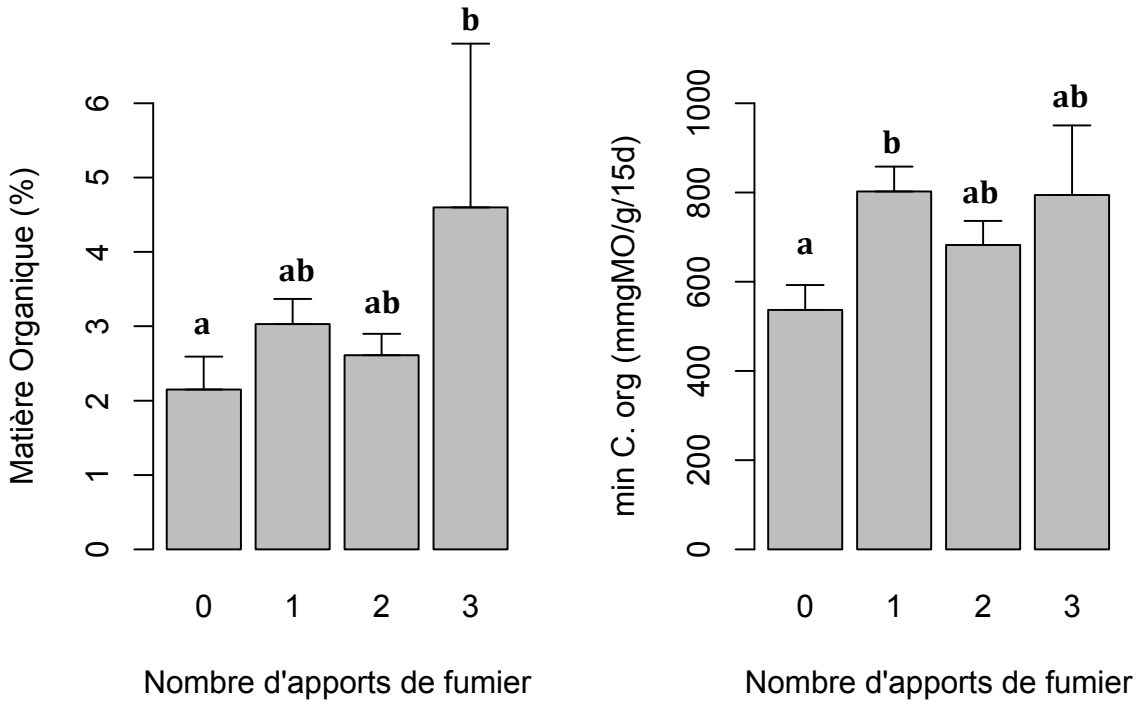

Figure 6 : Effet de la fréquence d'apports de fumier sur la teneur en matière organique dans le sol et la minéralisation du C. organique du sol. Les lettres différentes indiquent une différence significative à p=0.05.

3° - Biais dans les données ? Influence des paramètres du sol (pH, texture, …) sur les paramètres biologiques :

De la même façon que dans le point 2, on peut effectuer une régression linéaire multiple suivie d'une sélection de variables en mettant en variables explicatives les pratiques agricoles et les paramètres du sol (pH, rapport C/N, teneurs en argiles et silts). La sélection de variables permet de dire si l'effet des pratiques agricoles trouvé en (2) est lié à des effets des paramètres du sol ou non.

	Sélection de variables		
	d.f.	F-value	p-value
Matière organique			
pH	1	40.293	**< 0.001**
Rapport C/N	1	55.316	**< 0.001**
Argiles	1	15.647	**< 0.001**
Part sarclées	1	17.211	**< 0.001**
Résidus	22		
ATP			
pH	1	51.836	**<0.001**
Rapport C/N	1	3.939	0.060
Argiles	1	12.614	**0.002**
Part de prairies	1	6.156	**0.021**
Résidus	22		
CO2/ATP			
pH	1	34.010	**<0.001**
Argiles	1	6.346	**0.019**
Résidus	24		
Minéralisation C. Org			
pH	1	2.144	0.157
Part prairies	1	8.040	**0.009**
Part Intercultures	1	3.459	0.076
Résidus	23		

Tableau 3 : résultat du test de sélection de variables pour l'analyse de l'effet des paramètres du sol (pH, texture, rapport C/N) et des pratiques agricoles sur les paramètres biologiques du sol.

Matière organique (MO)

Le pH, le rapport C/N et la teneur en argiles ont des effets significatifs sur la teneur en MO du sol (Tab. 3, Fig. 7). Néanmoins, l'effet des sarclées sur cette teneur en MO mentionné plus haut (Tab. 1 et 2, Fig. 4) n'est pas uniquement un effet de lié aux paramètres du sol comme le montre le résultat de la sélection de variable sur la régression multiple (Tab. 3) : la part de sarclées a toujours un effet significatif sur la teneur en MO du sol (Fig. 4), au delà de potentiels effets liés aux paramètres du sol (pH, C/N ou teneur en argile).

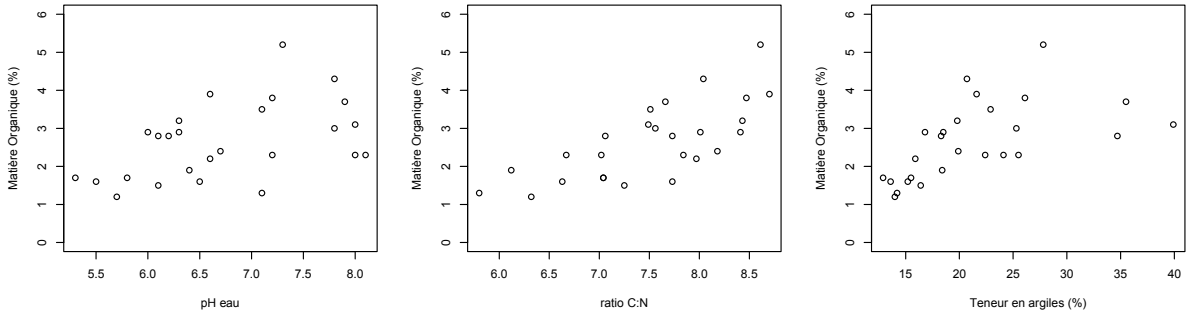

Figure 7: Effet des paramètres du sol (pH, rapport C/N, teneur en argiles) sur la teneur en matière organique du sol

ATP

Le pH, et la teneur en argiles ont des effets significatifs sur la teneur en ATP du sol. Le rapport C/N du sol a un effet marginal sur sa teneur en ATP (Tab. 3, Fig. 8). La teneur en ATP du sol augmente avec l'augmentation du pH et de la teneur en argiles dans le sol (Fig. 8). L'effet du rapport C/N est moins clair mais il semblerait que la teneur en ATP augmente avec l'augmentation du rapport C/N du sol (Fig. 8). La régression multiple met également en évidence un effet significatif de la part de prairies sur la teneur en ATP du sol, avec une tendance vers une augmentation de la teneur en ATP dans le sol avec l'augmentation de la part de prairies (Fig. 8).

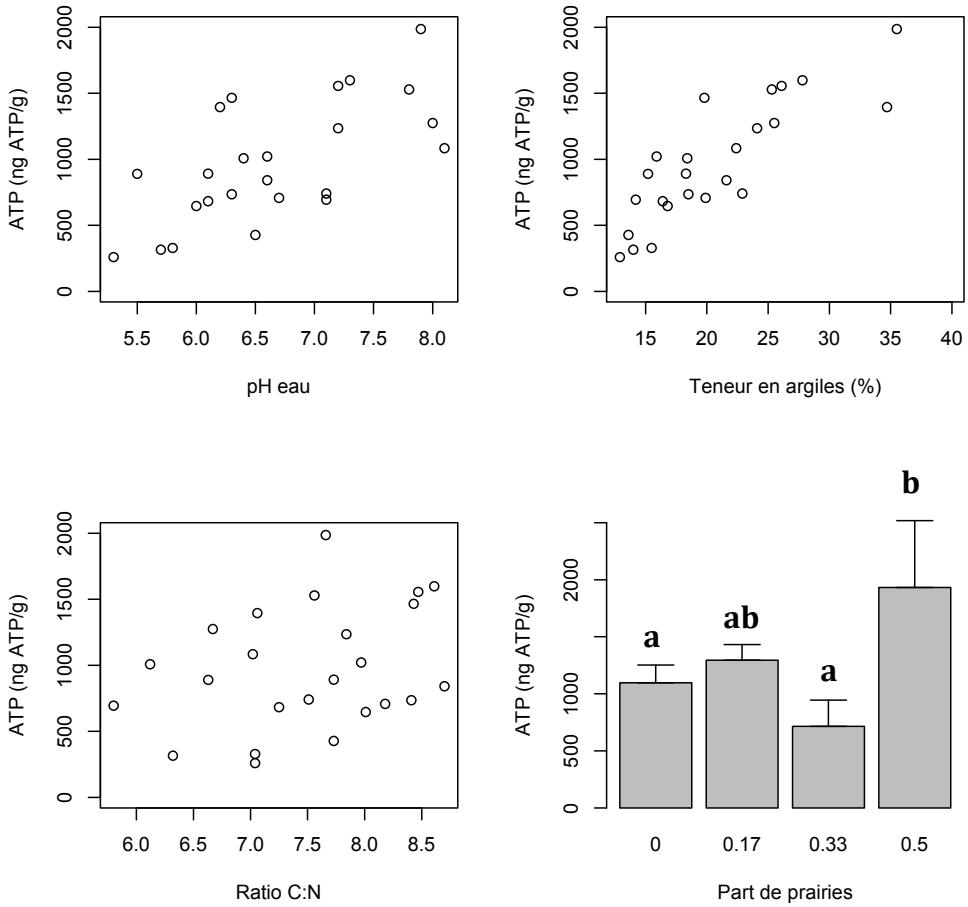

Figure 8: Effet des paramètres du sol (pH, teneur en argiles et rapport C/N) et des pratiques agricoles (part de prairies) sur la teneur en ATP du sol. Les lettres différentes indiquent une différence significative à p=0.05.

CO2/ATP

Comme pour la teneur en ATP dans le sol, le pH et la teneur en argiles ont des effets significatifs sur le rapport CO2/ATP du sol (Tab. 3). Cependant, à l'opposé de la teneur en ATP, la rapport CO2/ATP décroit avec l'augmentation du pH et de la teneur en argiles dans le sol (Fig. 9). La régression multiple ne met pas en évidence un quelconque effet significatif des pratiques agricoles sur ce rapport.

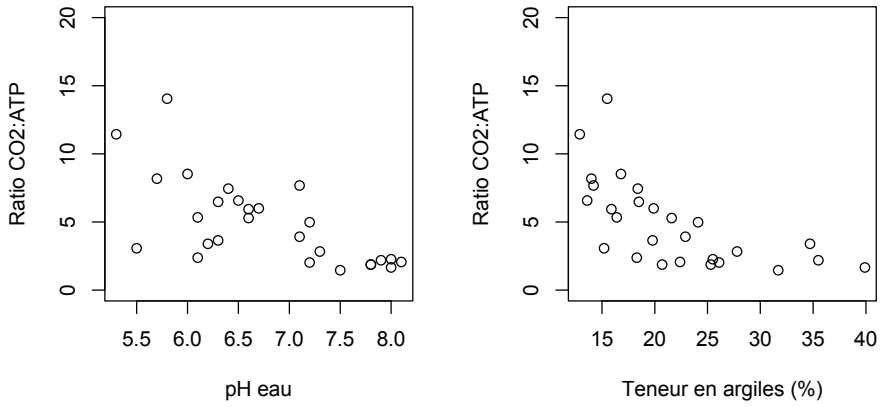

Figure 9: Effet des paramètres du sol (pH et teneur en argiles) sur le rapport CO2/ATP du sol

Minéralisation C org.

La prise en compte de l'effet des paramètres du sol sur le taux de minéralisation du C. organique du sol ne change que très peu les conclusions de la première partie (Tab. 3). En effet, même si le pH joue un rôle dans le modèle, il n'a pas d'effet significatif sur le taux de minéralisation du C. organique du sol. On retrouver un effet significatif de la part de prairies et dans une moindre mesure la part d'intercultures sur le taux de minéralisation du C. organique dans le sol (Tab. 3, Fig. 10), comme dans les premières analyses par ANOVA (Tab. 1).

Ici, le nombre d'apports de fumier ne sort pas significatif, par contre, il est très clairement visible que la relation entre apports de fumier et minéralisation du C. organique et entre part de prairies et minéralisation du C. organique est très similaire ce qui pourrait expliquer pourquoi le nombre d'apport de fumier ne sort pas significativement lorsque la part de prairies apparait significative. D'autre part, le fait que le nombre d'apport de fumier n'apparaisse plus influencer significativement la minéralisation du C. organique lorsque l'on prend en compte les paramètres du sol pourrait s'expliquer par le fait que l'impact des apports de fumier sur la minéralisation du C. organique passe par un effet sur les paramètres du sol.

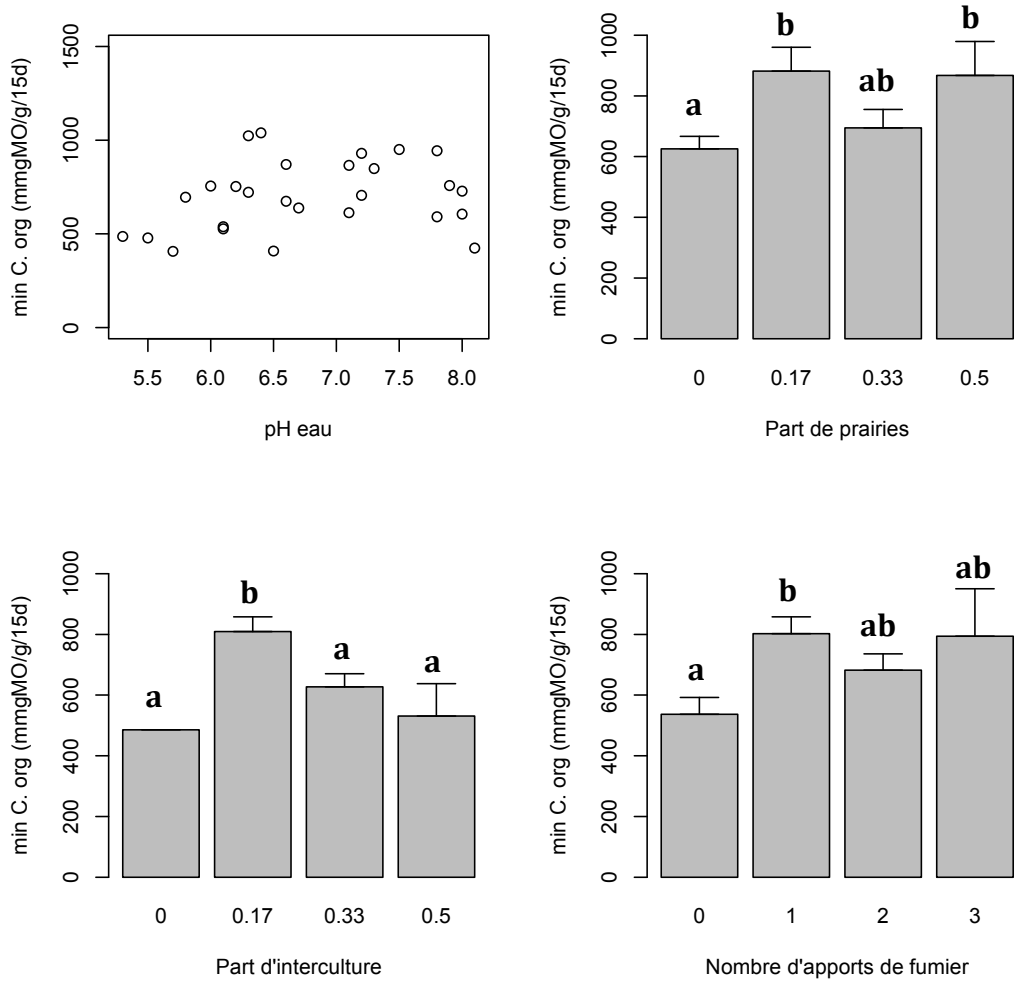

Figure 10: Effet des paramètres du sol (pH) et des pratiques agricoles (part de prairies et part d'intercultures et nombre d'apports de fumier) sur la minéralisation du C. organique du sol. Les lettres différentes indiquent une différence significative à p=0.05

4° - Analyse multivariée pour l'étude des paramètres biologiques du sol: analyse de redondance (RDA)

Il est possible d'étudier l'effet de l'ensemble des pratiques agricoles et/ou paramètres du sol (pH, texture, rapport C/N) sur l'ensemble des paramètres biologiques du sol. Cela se fait par le biais d'analyses multivariées sous contraintes appelées analyse de redondance (RDA). Cela permet d'avoir une vue d'ensemble de tous ces paramètres et de voir notamment les corrélations entre paramètres.

Effet des pratiques agricoles sur les paramètres biologiques du sol

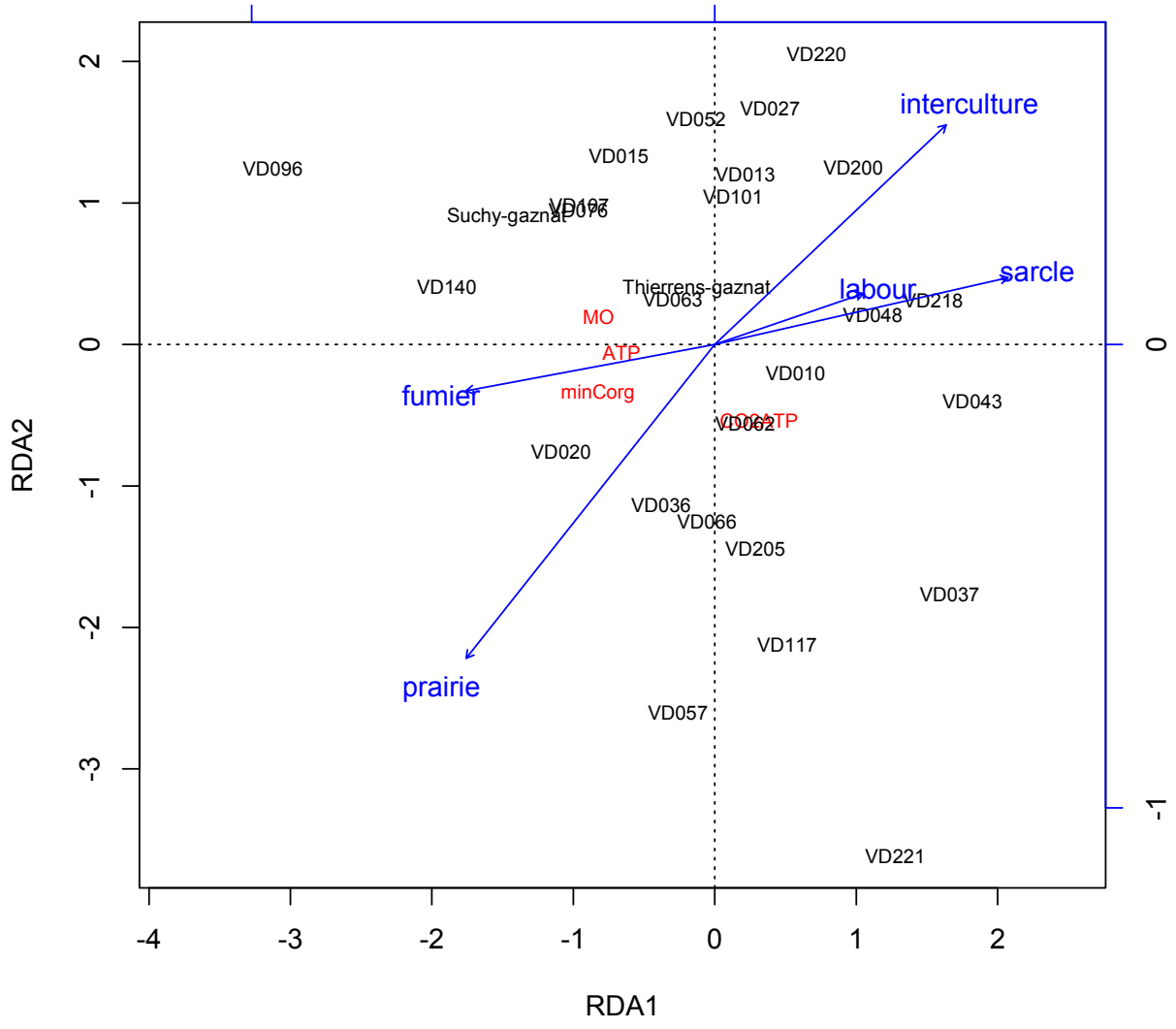

Figure 11: Effet des pratiques agricoles sur les paramètres biologiques du sol

Cette analyse montre que le taux de minéralisation du C. organique dans le sol est lié positivement à la part de prairies et aux apports de fumier (Fig. 11). Les teneurs en ATP et Matières organiques apparaissent également liés au nombre d'apports de fumier : les sols sont plus riches en Mat. Organique et en ATP lorsque le nombre d'apports de fumier augmente, ce qui coïncide également avec une diminution de la part d'années sarclées et labourées. Tout comme le taux de minéralisation du carbone organique, le rapport CO2/ATP tend à augmenter avec la part de prairies. Enfin cette analyse nous permet également de voir que les parts de labour et la part d'années sarclées sont fortement positivement corrélées, et que ces caractéristiques sont fortement négativement corrélées au nombre d'apports de fumier (Fig. 11). La part de prairies est négativement corrélée avec la part d'intercultures.

Effet des paramètres du sol sur les paramètres biologiques

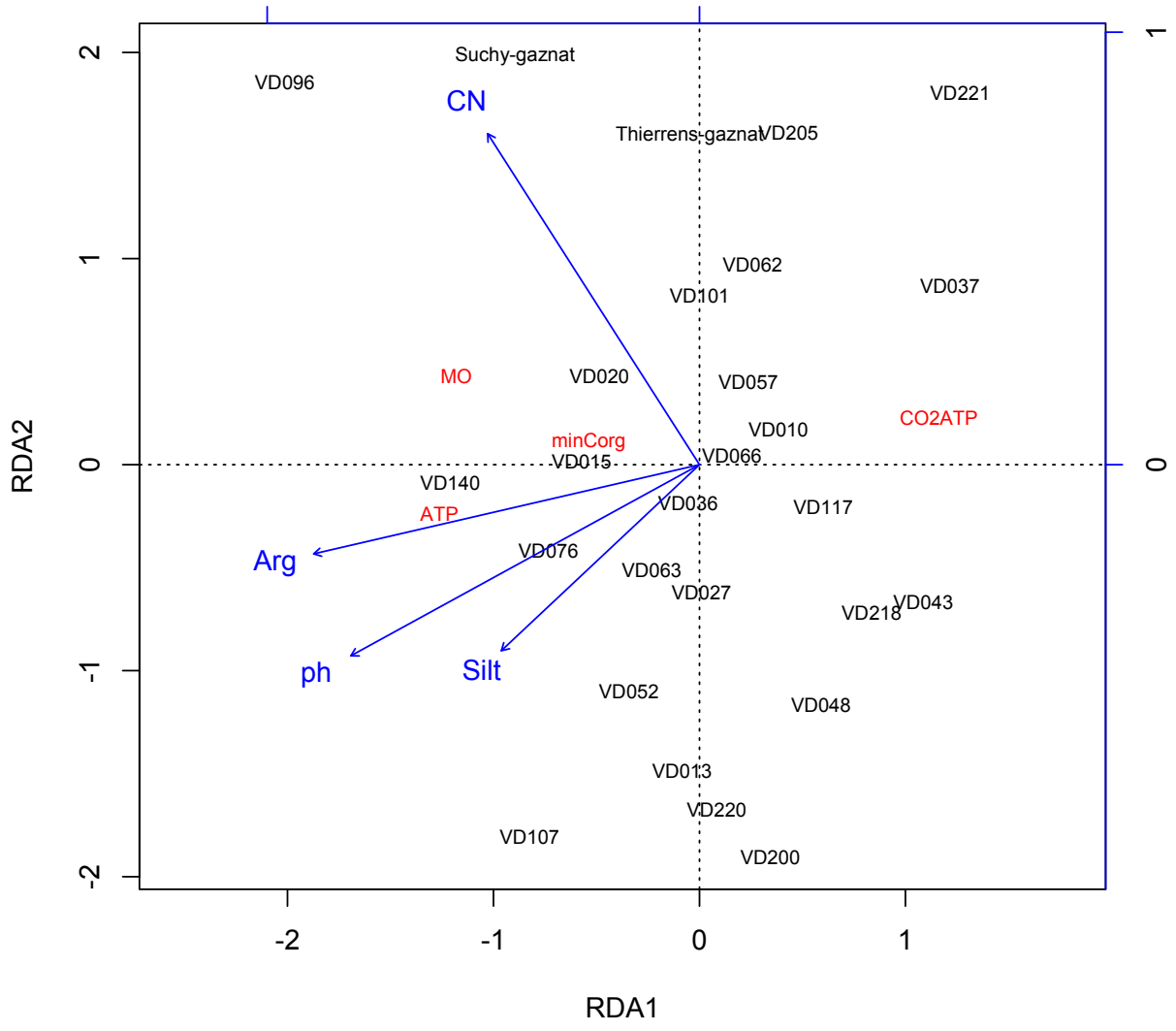

Figure 12: Effet des paramètres du sol (pH, rapport C/N, teneur en argiles et en silt) sur les paramètres biologiques du sol

Cette analyse confirme les résultats portant sur les effets des paramètres du sol sur les paramètres biologiques, avec de fortes teneurs en matière organique et en ATP et de faibles valeurs de rapport CO2/ATP liées à de fortes teneurs en argiles (Fig. 12, Tab. 3).
Le rapport C /N est positivement corrélé à la teneur en MO dans le sol, et dans une moindre mesure à la minéralisation du C. organique.

Effet des pratiques agricoles sur les paramètres biologiques, en tenant compte des paramètres du sol.

Il est possible de « mixer » les deux analyses précédentes et de voir l'effet des pratiques agricoles sur les paramètres biologiques, en tenant compte de l'effet potentiellement concomitant des paramètres du sol (Fig. 13).

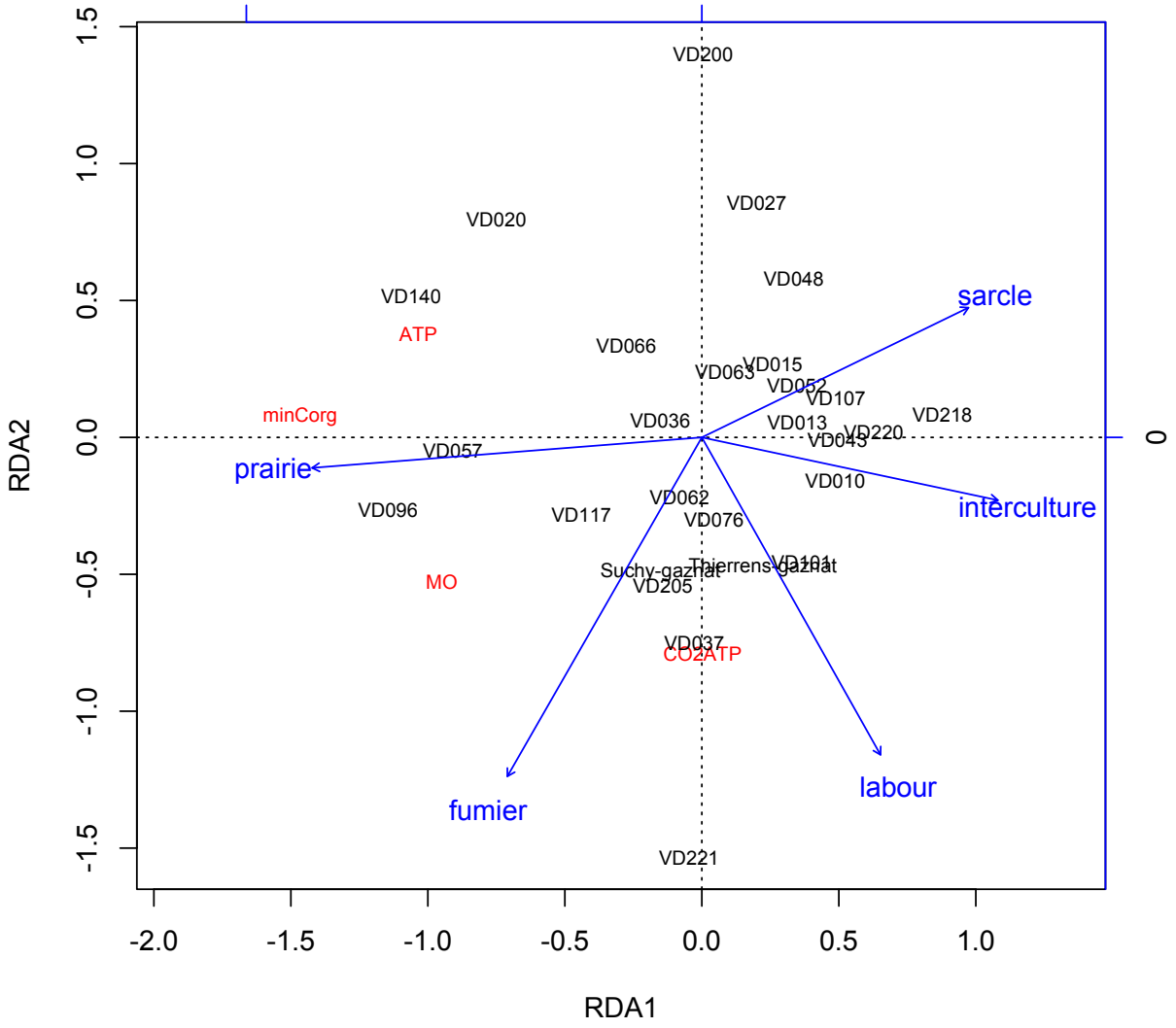

Figure 13: Effet des pratiques agricoles sur les paramètres biologiques en tenant compte des effets concomitants des paramètres du sol.

Les différences entre les figures 11 et 13 permettent de voir que les paramètres du sol (pH, texture, rapport C/N) interfèrent dans l'effet des pratiques agricoles sur les paramètres biologiques du sol. Le fait que les pratiques agricoles « labour » et « fumier » ne soient plus corrélés avec la part d'années sarclées dans la figure 13, c'est-à-dire lorsque l'on tient compte de la variabilité des paramètres du sol (pH, texture, rapport C/N) montre qu'il semble y avoir un lien fort entre les effets du labour et des apports de fumier et les effets des paramètres du sol sur les paramètres biologiques du sol (Comparaison entre les figures 11 et 13).

Les teneurs en matière organique (MO) et ATP dans le sol et la minéralisation du C. organique sont toujours fortement positivement corrélées à la part de prairies et négativement à la part d'intercultures et d'années sarclées. Le rapport CO2/ATP et la teneur en matières organiques augmentent avec le nombre d'apports de fumier. Le rapport CO2/ATP semble également augmenter avec la part d'années en labour.

ANNEXE 8
Paramètres agricoles testés dans le traitement statistique

Paramètres agricoles testés							
NUMERO	part de labour conventionnel	Apport fumier (nbre de fois)	part prairies	part sarclées	part interculture	culture au prlvt	travail du sol au prélévement
Suchy-gaznat	0.67	1	0.00	0.33	0.17	cereales	chaume de cereales
Thierrens-gaznat	0.33	0	0.00	0.50	0.33	cereales	chaume de cereales
VD010	0.50	3	0.00	0.50	0.50	cereales	chaume de colza
VD013	0.33	2	0.00	0.50	0.33	sol nu	travaillé
VD015	0.33	1	0.33	0.17	0.33	prairie	prairie
VD020	0.00	1	0.17	0.33	0.17	prairie	prairie
VD027	0.33	2	0.50	0.17	0.17	prairie	prairie
VD036	0.67	1	0.00	0.67	0.17	colza	chaume de colza
VD037	0.33	1	0.33	0.33	0.00	cereales	chaume de cereales
VD039	0.17	0	0.83	0.00	0.00	cereales	chaume de cereales
VD043	0.17	0	0.00	0.67	0.33	cereales	chaume de cereales
VD048	0.67	0	0.00	0.50	0.17	cereales	chaume de cereales
VD052	1.00	2	0.00	0.33	0.17	cereales	chaume de cereales
VD057	0.17	1	0.50	0.17	0.17	prairie	travaillé
VD062	0.50	2	0.33	0.17	0.33	cereales	chaume de cereales
VD063	0.50	1	0.17	0.33	0.17	cereales	chaume de cereales
VD066	0.50	1	0.17	0.33	0.17	cereales	chaume de cereales
VD076	0.17	1	0.00	0.50	0.17	colza	chaume de colza
VD096	0.33	3	0.50	0.17	0.17	cereales	chaume de cereales
VD101	0.83	1	0.00	0.17	0.33	cereales	chaume de cereales
VD107	0.33	0	0.00	0.50	0.33	cereales	chaume de cereales
VD117	0.33	2	0.33	0.33	0.33	prairie	prairie
VD140	0.17	2	0.50	0.33	0.17	prairie	prairie
VD200	0.50	0	0.00	0.50	0.33	sol nu	travaillé
VD205	0.83	2	0.00	0.33	0.17	cereales	chaume de cereales
VD218	0.33	0	0.00	0.50	0.33	cereales	chaume de cereales
VD220	0.50	2	0.00	0.50	0.50	engrais vert	travaillé
VD221	0.67	2	0.33	0.33	0.33	engrais vert	chaume d'engrais vert
VD246	0.00	0	1.00	0.00	0.00	prairie	prairie