

Influence de la gestion organique sur certaines caractéristiques du sol en contexte viticole

Résultats d'un réseau national d'expérimentations

L. Gontier^(1*), M. Bonnisseau⁽²⁾, X. Delpuech⁽⁴⁾, F. Thévenot⁽⁵⁾, J.-Y. Cahurel⁽³⁾

1) IFV Pôle Sud-Ouest, 1920 route de Lisle-sur-Tarn, 81310 Peyrole, France

2) IFV Pôle Val de Loire-Centre, 42 rue Georges Morel, BP 60057, 49071 Beaucouzé, France

3) IFV Pôle Bourgogne-Beaujolais-Jura-Savoie, 210 Boulevard Vermorel, 69400 Villefranche-sur-Saône, France

4) IFV Pôle Rhône-Méditerranée, 361 rue J.F. Breton, BP 5095, 34196 Montpellier, France

5) Chambre d'Agriculture de Vaucluse, 2260 route du Grès, 84100 Orange, France

* Auteur correspondant : laure.gontier@vignevin.com

RÉSUMÉ

Le manque de références concernant la gestion de la matière organique des sols viticoles a conduit à la mise en place d'un réseau d'expérimentations national, de façon à acquérir des données sur l'impact de la gestion organique sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol. L'objectif à terme est d'améliorer le conseil de gestion de la matière organique en viticulture, par une meilleure connaissance du type de produit à apporter en liaison avec les besoins du sol et les effets attendus.

L'étude a porté sur un réseau de 7 parcelles d'expérimentation aux conditions pédoclimatiques contrastées. Les modalités testées comportaient toutes un témoin sans apport de matière organique exogène, les autres modalités variant en fonction des parcelles : apport de compost de déchets verts, apport de compost de marcs de raisin, apport de compost du commerce et/ou mise en place d'un enherbement.

Les données acquises sur ce réseau sur 8 ans, ont permis de mettre en évidence l'importance de la gestion organique sur les caractéristiques du sol. Tout d'abord sur la teneur en carbone (augmentation moyenne de 19 % par rapport au témoin), même si les différences enregistrées sont rarement significatives, notamment du fait de la durée limitée de l'expérimentation (2 apports à dose modérée) et de l'hétérogénéité des parcelles. Également sur la capacité d'échange cationique (augmentation moyenne de 16 % par rapport au témoin), en lien avec cette amélioration du statut carboné du sol. Les apports d'amendements organiques permettent également l'enrichissement en éléments minéraux, ce qui signifie qu'il est important d'en tenir

Comment citer cet article :

Gontier L., Bonnisseau M., Delpuech X, Thévenot F., Cahurel J.-Y., 2026 - Influence de la gestion organique sur certaines caractéristiques du sol en contexte viticole. Résultats d'un réseau national d'expérimentations - Étude et Gestion des Sols, 33, 31-62

compte dans le plan de fumure. Ils ont eu un effet d'amendement basique sur les parcelles à sol acide. Ils ont donc un double intérêt amendant en sol acide. Les paramètres biologiques mesurés montrent également l'effet de la gestion organique sur le sol, en particulier sur le carbone microbien (augmentation moyenne de 39 % par rapport au témoin).

Mots-clés

Compost, enherbement, paramètres physiques et chimiques du sol, carbone organique du sol, microbiologie du sol, vigne, type de sol.

SUMMARY

INFLUENCE OF ORGANIC MANAGEMENT ON SOIL CHARACTERISTICS IN A WINE-GROWING CONTEXT.

Results from a national network of trials

The lack of references concerning organic matter management in wine-growing soils has motivated the implementation of a national network of trials, in order to obtain data on the impact of organic amendments on soil physical, chemical and biological characteristics. The ultimate aim of this study is to improve advice on organic matter management in winegrowing, through better knowledge of organic product type to be applied in relation to the needs of the soil and the expected effects.

The study focused on a network of seven experimental plots with contrasting soil and climate conditions. The methods tested all included a control without the addition of exogenous organic matter, with the other methods varying according to the plots: addition of green waste compost, addition of grape marc compost, addition of commercial compost an/or the use of grass cover. The data acquired from this network of experimental plots over 8 years has highlighted the importance of organic management on soil characteristics. Firstly, on carbon content (average increase of 19% compared to the control), even if the differences recorded are rarely significant, particularly due to the limited duration of the experiment (two moderate applications) and the heterogeneity of the plots. Organic amendments also have an impact on cation exchange capacity (average increase of 16% compared to the control), in line with this improved carbon status of the soil. They also enrich the soil in mineral elements, which means it is important to take this into account in the fertilizer plan. The composts tested had a basic soil amendment effect on plots with acidic soil. They therefore have a dual amending effect on acid soils. The biological parameters measured also show the effect of organic management on the soil, particularly microbial carbon (average increase of 39% compared to the control).

Key-words

Compost, grass cover, soil physical and chemical parameters, soil organic carbon, soil microbiology, vine, soil type.

RESUMEN

INFLUENCIA DE LA GESTIÓN ORGÁNICA SOBRE CIERTAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO EN UN CONTEXTO VITICOLA.

Resultados de una red nacional de experimentaciones

La falta de referencias sobre la gestión de la materia orgánica de los suelos vitícolas ha llevado a la creación de una red nacional de experimentación con el fin de recopilar datos sobre el impacto de la gestión orgánica en las características físicas, químicas y biológicas del suelo. El objetivo a largo plazo es mejorar el asesoramiento de la gestión de la materia orgánica en la viticultura, mediante un mejor conocimiento del tipo de producto que se debe aportar en función de las necesidades del suelo y de los efectos esperados.

El estudio se centró en una red de siete parcelas experimentales con condiciones edafoclimáticas contrastadas. Todas las modalidades probadas incluían un testigo sin aporte de materia orgánica exógena, mientras que las demás modalidades variaban en función de las parcelas: aporte de compost de residuos verdes, aporte de compost de orujo de uva, aporte de compost comercial, y/o implantación de una cubierta vegetal.

Los datos recopilados en esta red durante ocho años han permitido poner de relieve la importancia de la gestión orgánica en las características del suelo. En primer lugar, en lo que respecta el contenido de carbono (aumento medio del 19 % con respecto al testigo), aunque las diferencias registradas son raramente significativas, sobre todo debido a la duración limitada del experimento (2 aportes en dosis moderadas) y a la heterogeneidad de las parcelas. También sobre la capacidad de intercambio catiónico (aumento medio del 16 % con respecto al testigo), en relación con esta mejora del estado del carbono del suelo. Los aportes de enmiendas orgánicas también permiten el enriquecimiento en elementos minerales, lo que significa que es importante tenerlos en cuenta en el plan de fertilización. Han tenido un efecto de enmienda básica en las parcelas con suelo ácido. Por lo tanto, tienen un doble interés como enmienda en suelos ácidos. Los parámetros biológicos medidos también muestran el efecto de la gestión orgánica sobre el suelo, en particular el carbono microbiano (aumento medio del 39 % con respecto al testigo).

Palabras clave

Compost, cubierta herbácea, parámetros físicos y químicos del suelo, carbono orgánico del suelo, microbiología del suelo, vid, tipo de suelo.

1. INTRODUCTION

Les matières organiques jouent un rôle important dans le fonctionnement global du sol, au travers de ses composantes physique, chimique et biologique. En particulier, leurs propriétés confèrent au sol des aptitudes plus ou moins importantes d'infiltration des eaux de pluie, de limitation de l'érosion ou du tassement, tout en permettant le stockage et la fourniture d'éléments minéraux. Elles jouent également un rôle majeur dans la fonction épuratrice du sol en améliorant la rétention des micropolluants organiques et des pesticides (Calvet *et al.*, 2011). Enfin, elles permettent de stocker du carbone dans les sols et ainsi de participer à la réduction de l'émission des gaz à effet de serre et à lutter contre le changement climatique (cf. Initiative 4/1000).

La gestion de ce patrimoine organique du sol est donc primordiale pour la conservation des propriétés des sols et s'inscrit dans les actions prioritaires à mener (cf. Directive européenne sur la surveillance des sols, 2025).

Toutefois, la complexité de ces matières organiques, liée à leur diversité (composition chimique, propriétés physiques et chimiques, granulométrie, dégradabilité/durée de vie) rend le diagnostic de statut et de fonctionnement organique du sol assez délicat et, en conséquence, leur gestion pratique reste difficile.

A cela, il convient d'ajouter l'extrême diversité des produits organiques exogènes à disposition sur le marché, pour comprendre les difficultés auxquelles sont confrontés les acteurs de développement pour apporter un conseil éclairé : les outils permettant de prédire les effets des produits organiques sur le sol en viticulture, en fonction de leurs caractéristiques, sont de fait limités (même si l'indication de l'ISMO - Indice de Stabilité de la Matière Organique - sur les produits à partir d'un certain tonnage de production a apporté un plus significatif).

Ces problèmes sont d'autant plus importants en viticulture que les niveaux de Matière Organique (MO) des sols viticoles sont souvent faibles, variant en moyenne de 0,5 à 2,5 %. Un taux de MO inférieur à 1 % n'est pas rare et se révèle souvent préoccupant dans les sols sensibles à l'érosion et alors que les pentes des parcelles viticoles favorisent particulièrement ce phénomène. En comparaison, le taux moyen est de 2,9 % dans les terres labourables (Ehrard et Arrouays, 2012).

Les références expérimentales de l'effet des modalités (apport de composts, enherbement) de gestion organique sur les sols viticoles sont limitées. C'est pourquoi le projet OAD MO, financé par FranceAgriMer sur la période 2017-2019 (<https://www.vignevin.com/wp-content/uploads/2026/02/Gestion-de-la-matiere-organique-des-sols-viticoles-270226.pdf>) a été mené. Son objectif principal est d'améliorer le conseil de gestion de la matière organique, par une meilleure connaissance du type de produit à apporter en liaison avec les besoins du sol et

les effets attendus, tout en prenant en compte les conditions pédoclimatiques et les conditions d'entretien du sol ainsi que les exigences régionales en termes de vin à élaborer.

De façon à parvenir à cet objectif, un réseau national d'expérimentations a été mis en place, avec des objectifs généraux et des protocoles de suivi communs. Les intérêts principaux de ce mode de fonctionnement résident d'une part dans la prise en compte de conditions pédoclimatiques variées, et d'autre part, dans la collaboration entre organismes à différents échelons de la R&D (IFV, INRAE, Agro-Transfert RT, Chambre d'Agriculture) qui doit permettre à terme une bonne diffusion des résultats de cette étude (en particulier auprès des acteurs du développement).

Le deuxième objectif du projet est l'acquisition de références sur des indicateurs biologiques, références qui restent rares en viticulture. Les indicateurs choisis sont en lien avec la microbiologie du sol qui, si elle n'est pas la seule à jouer un rôle dans l'évolution de la matière organique du sol, présente une certaine facilité à être analysée, ainsi qu'un lien important avec la fourniture en éléments minéraux par le sol.

L'objectif de cet article est de présenter les résultats obtenus sur ce réseau en termes de diversité des produits épandus et de leurs effets sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols.

De façon à faciliter la lecture, des abréviations et des sigles ont été utilisés. Ils sont listés en *annexe 1*.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Méthodologie

2.1.1. Suivi réalisé sur le sol

Les mesures et analyses réalisées sont communes aux différentes parcelles, de même que les protocoles de prélèvements. Elles sont effectuées par parcelle élémentaire (soit 3 ou 4 répétitions par modalité, suivant la parcelle).

2.1.1.1. Périodicité et localisation des prélèvements de terre

Pour les analyses physiques et chimiques, les prélèvements sont réalisés à la tarière tous les 4 ans (t0, t+4 ans, t+8 ans) en hiver, avant un nouvel apport et avant tout travail du sol, sur les couches 0-15 cm et 15-30 cm, la couche 0-15 cm correspondant en viticulture à la couche de travail des outils (enfouissement, désherbage mécanique).

Pour les analyses biologiques, les prélèvements de terre ont été réalisés au printemps en fin d'expérimentation, à la tarière

sur la couche 0-20 cm (profondeur du référentiel d'interprétation des analyses biologiques).

Les prélèvements ont été réalisés au milieu de l'inter-rang, en évitant le cas échéant les zones de passage des roues. L'échantillon analysé est un échantillon composite de 8 à 10 prélèvements élémentaires.

2.1.1.2. Analyses de terre

Pour les analyses physiques et chimiques, les déterminations suivantes sont réalisées :

- granulométrie (uniquement au point 0) dont refus à 2 mm : norme NF X31-107
- carbone organique (C) : norme NF ISO 10694
- azote total (N) : norme NF ISO 13878
- CEC Metson (CECm) : norme NF X 31-130
- pH eau et pH KCl : norme NF X 31-117
- calcaire total et calcaire actif : normes NF ISO 10693 et Nfx 31-106
- éléments minéraux : CaO assimilable, K₂O assimilable, MgO assimilable (norme NF X31-108), phosphore assimilable (P₂O₅) [Dyer (norme NF X31-160) sur sol acide, Joret-Hébert (norme NF X31-161) sur sol basique].

Concernant les analyses biologiques, les déterminations sont les suivantes :

- carbone microbien (Cm) : déterminé par fumigation-extraction (Jenkinson et Powlson, 1976 ; Chaussod *et al.*, 1986). Il peut être exprimé en pourcentage du carbone organique du sol (Cmc).
- azote biologiquement minéralisable (ABM) : azote minéralisable en incubation anaérobie sur 7 jours à 40 °C (Keeney et Bremner, 1966). Il peut être exprimé en pourcentage de l'azote total du sol (ABMc).
- carbone actif (C actif - MOL dans les figures) : carbone oxydable au permanganate (Culman *et al.*, 2012 ; Weil *et al.*, 2003). Il peut être exprimé en pourcentage du carbone organique du sol (MOLc).
- biodiversité fonctionnelle (Nouaïm et Chaussod, 2015) : par test BioDiF sur des plaques Biolog® EcoPlates™. Ces plaques sont constituées de 3 répétitions de 32 puits, correspondant à 31 substrats carbonés différents et une référence (eau). Les plaques sont inoculées par une suspension de sol obtenue dans des conditions standardisées, puis incubées à température constante, la densité optique des puits étant enregistrée toutes les 24 h. Les résultats des mesures sont restitués sous deux formes complémentaires : une activité métabolique moyenne (AWCD) correspondant à la densité optique moyenne calculée sur l'ensemble des puits, et un Indice de Biodiversité Fonctionnelle (IBF) calculé à l'aide d'un algorithme spécifique.

2.1.1.3. Densité de terre fine

Le poids de terre correspondant à un volume de terre mesuré soit par un densitomètre à membrane, soit par un cylindre pour les parcelles où la proportion de cailloux est faible, est évalué au laboratoire après séchage et pesée. Le poids des éléments grossiers (> 2 mm) présents dans ce volume est mesuré puis retiré du poids sec de terre de façon à obtenir le poids de terre fine. Le rapport entre ce poids et le volume mesuré correspond à la densité de terre fine.

2.1.2. Caractéristiques des produits apportés

Les produits apportés à t0 et t+4 ans ont été prélevés au moment des apports et caractérisés analytiquement par un laboratoire d'analyses de végétaux sur les paramètres suivants :

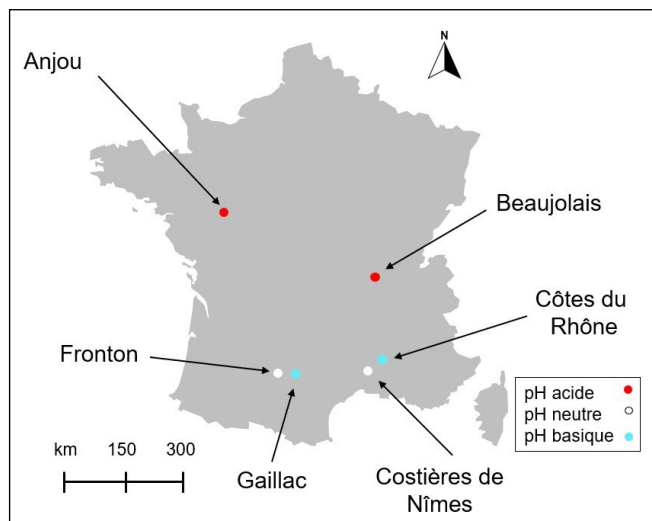
- matière sèche (MS) : séchage 48 h à 60 °C
- carbone (C) : oxydation sulfochromique
- azote (N) : méthode Kjeldahl
- phosphore (P), potassium (K), calcium (Ca), magnésium (Mg) : minéralisation acide et dosage par spectrométrie à plasma à couplage inductif
- Indice de Stabilité de la Matière Organique (ISMO) : analyses séquentielles des fractions biochimiques et cinétique de minéralisation à 3 jours, norme XP U44-162 (Lashermes *et al.*, 2009).

Le carbone stable (C stable) est calculé en multipliant la teneur en C par l'ISMO.

2.1.3. Analyses statistiques

Les analyses statistiques sont réalisées à l'aide du logiciel R (R Development Core Team, version 3.5.0) sur les différents paramètres mesurés. Des analyses de variance (Anova) à un facteur (modalité de gestion organique du sol) sont réalisées pour chaque variable (analyses de terre présentées en 2.2.4.2 et 3.2.2, densités de terre fine) et chaque parcelle, et pour t0 et t+8 ans, suivies par un test de comparaison multiple de moyennes HSD de Tukey package agricolae (de Mendiburu, 2023) : S p<0,05 ; HS p<0,01. Si les conditions de l'analyse de variance ne sont pas respectées, un test non paramétrique de comparaison multiple de moyennes de Kruskal-Wallis est réalisé, suivi par un test de comparaison multiple de moyennes LSD de Fisher.

Des Analyses en Composantes Principales (ACP) sont également réalisées, toujours à l'aide du logiciel R, package FactoMineR (Lê *et al.*, 2008), sur les moyennes des analyses de terre à t+8 ans. Seuls les résultats sur les deux premiers axes seront présentés.

Figure 1 : Localisation des parcelles du réseau MO**Figure 1:** Location of OM network plots

2.2. Présentation du réseau et des dispositifs expérimentaux

Le réseau d'expérimentations (Réseau MO) comporte sept parcelles réparties dans 5 régions viticoles : Beaujolais, Côtes du Rhône, Languedoc-Roussillon, Sud-Ouest et Vallée de la Loire (figure 1).

Les parcelles d'expérimentation ont été mises en place l'hiver 2008-2009 pour certaines et l'hiver 2009-2010 pour d'autres.

2.2.1. Description des parcelles

Les caractéristiques générales des parcelles sont données dans le *tableau 1*. Elles sont très variables entre les parcelles sur le matériel végétal, en lien avec le vignoble pour le cépage et les conditions pédoclimatiques pour le porte-greffe.

La plupart des parcelles sont désherbées sous le rang et sur l'inter-rang. La parcelle 81G était désherbée chimiquement sous le rang et un inter-rang sur 2, l'autre inter-rang étant désherbé mécaniquement avec une alternance annuelle, jusqu'en 2013 (sauf la modalité E, voir 2.2.2) puis un enherbement permanent un inter-rang sur deux a été mis en place sur toutes les modalités, l'autre inter-rang étant désherbé mécaniquement.

Le site du 49 est composé de deux parcelles situées l'une à côté de l'autre, l'une désherbée mécaniquement sur toute la surface à la mise en place de l'expérimentation (49t), l'autre enherbée sur l'inter-rang depuis 2003 (50 % de la surface totale) et désherbée mécaniquement sous le rang (49e).

La description générale des sols des différentes parcelles est donnée dans le *tableau 2*. Les caractéristiques complètes sont données dans la *partie 2.2.4*.

2.2.2. Modalités étudiées

Les modalités sont présentées pour chaque parcelle dans le *tableau 3*. Les PRO utilisés peuvent varier d'une région à une autre (en fonction de la disponibilité du PRO dans la région considérée) mais le témoin de référence (T), sans apport de MO exogène, est commun à toutes les situations. La restitution des sarments broyés sur l'inter-rang est réalisée sur toutes les modalités. Les PRO utilisés sont les suivants : composts de déchets verts (DV) locaux, composts de marc de raisin (M) locaux, compost du commerce (CC). Ces derniers ont été choisis du fait de leur utilisation importante dans les vignobles

Tableau 1 : Caractéristiques culturelles des parcelles du réseau (IR : inter-rang)**Table 1:** Cultural characteristics of network plot (IR: inter-row)

Orga-nisme	Mise en place de l'essai	Vignoble	Code	Année plantation	Cépage	Porte-greffe	Entretien du sol
IFV	Hiver 2008-2009	Costières de Nîmes	30	1998	Syrah	110R	Désherbage mécanique
		Beaujolais-Villages	69	2002	Gamay	SO4	Désherbage chimique
		Fronton	81F	1970	Négrette	420A	Désherbage chimique
		Gaillac	81G	2003	Braucol	41B	Désherbage mécanique 1 IR/2 et désherbage chimique 1 IR/2 puis à partir de 2013 désherbage mécanique 1 IR/2 et enherbement 1 IR/2
	Hiver 2009-2010	Anjou Villages Brissac	49t	2000	Cabernet franc	3309	Désherbage mécanique
			49e	2000	Cabernet franc	3309	Désherbage mécanique rang et enherbement inter-rang
CA 84		Côtes du Rhône	84	2001	Syrah (cl. 300)	140 Ru	Désherbage mécanique

Tableau 2 : Caractéristiques des sols des parcelles du réseau (0-30 cm)**Table 2:** Soil characteristics of network plot (0-30 cm)

Parcelle	30	69	81F	81G	49t et 49e	84
Type de sol (RPF)	FERSIALSOL	ARENOSOL	LUVISOL- REDOXISOL	RENDOSOL	BRUNISOL	CALCOSOL
Pierrosité (%)	71	36	37	50	11	18
pH eau	7,5	5,8	7,2	8,4	6,8	8,4
Teneur en MO (%)	1,2	0,9	1,2	1,2	1,6	2,6

Tableau 3 : Modalités expérimentées par parcelle**Table 3:** Treatments by plot

		Parcelles					
Modalité		30	69	81F	81G	49t et 49e	84
Apport de PRO	témoin sarments broyés	X	X	X	X	X	X
	compost de déchets verts	X	Tous les 2 ans Tous les 4 ans	X	X	X	X
	compost de marc	X		X	X	X	X
	produit du commerce		Tous les 2 ans Tous les 4 ans	X	X	X	X
Enherbement de l'inter-rang				X	X		
Nb modalités		3	5	5	5	4	4
Nb répétitions		3	4	3	3	3	3
Surface des parcelles élémentaires		3 rangs x 25 ceps 177 m ²	4 rangs x 14 ceps 65 m ²	3 rangs x 12 ceps 72 m ²	3 rangs x 12 ceps 79 m ²	3 rangs x 13 ceps 74 m ²	3 rangs x 20 ceps 90 m ²

considérés et leurs caractéristiques générales sont précisées en annexe 2. Les caractéristiques analytiques des PRO apportés sont données en 3.1.1. Les quantités apportées sont précisées en 3.1.2.

Les apports sont réalisés tous les 4 ans, sauf sur la parcelle 69, où les deux produits sont épandus soit tous les 4 ans (CC et DV), soit tous les 2 ans à demi-dose (CC2 et DV2).

Sur la plupart des parcelles, aucune autre fertilisation n'a été apportée pendant la durée de l'expérimentation. En cas d'apport, ce dernier a été appliqué sur l'ensemble des modalités.

Des modalités enherbées sur l'inter-rang (E) et sans apport de MO exogène ont également été intégrées dans certaines

expérimentations de façon à évaluer l'impact de cette pratique sur les caractéristiques du sol, notamment le carbone. Ainsi sur 81F, la modalité E consiste en un enherbement naturel sur l'inter-rang (60 % de la surface totale) alors que sur 81G, elle consiste en un enherbement semé (Fétuque ovine Blues) sur l'inter-rang (60 % de la surface totale). Le semis a échoué en 2009 et 2010 mais celui de 2011 s'est développé correctement.

2.2.3. Calcul des doses d'apport

Le calcul des quantités de produit à apporter a été réalisé de façon à augmenter la teneur en MO des sols, hormis sur la parcelle 84, où l'objectif est le maintien de cette teneur. Les augmentations recherchées (exprimées en pourcentage par rapport au taux de MO initial) varient suivant les parcelles de 6-7 %, pour 81F et 81G, à 20 % pour 30, 49t et 49e, en passant par 8-10 % pour 69.

Dans tous les cas, la quantité de MO minéralisée par le sol est prise en compte, de même que la quantité de MO liée à la restitution des bois de taille. Pour la première, un coefficient de minéralisation du sol (k_2) théorique est calculé pour chaque parcelle à partir de la formule de Rémy et Marin-Lafleche (1976) ou de Girard *et al.* (2011) pour les vignobles méditerranéens (prise en compte des taux d'argile et de calcaire, et de la température moyenne annuelle). La part de MO minéralisée est ensuite calculée en multipliant ce k_2 par la teneur en MO du sol sur 0-30 cm. La quantité de MO stable fournie par la restitution des bois de taille est calculée à partir de la quantité de matière sèche (MS) des bois de taille et en appliquant un coefficient isohumique (k_1) de 0,25 (Delas, 2000).

Pour maintenir le taux de MO, il faut compenser la minéralisation du sol, tout en prenant en compte l'apport lié aux bois de taille.

La quantité de PRO à apporter est ensuite déduite, à partir de ces valeurs (avec en plus l'augmentation souhaitée, hormis pour la parcelle 84), et en prenant en compte la teneur en MO du PRO et son k_1 ou son ISMO (Indice de Stabilité de la Matière Organique). La teneur en MO a pu être évaluée à partir des données des fabricants et le k_1 ou l'ISMO, à partir des données des fabricants, des données bibliographiques ou des valeurs accumulées avec les années. Il convient de noter qu'un certain

nombre d'incertitudes sont inévitables mais que ces calculs permettent d'avoir une base de calcul commune aux différentes parcelles.

2.2.4. Analyses au point 0

2.2.4.1. Densité de terre fine au point 0

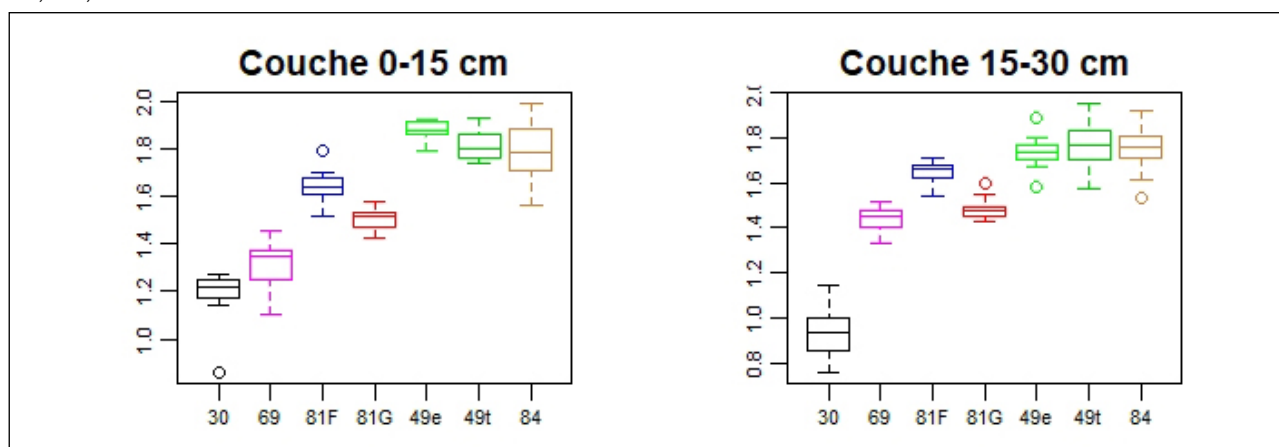
La figure 2 montre que les densités de terre fine sont plus faibles sur les parcelles 30 et 69 (1,2-1,4 en moyenne), plus élevées sur les parcelles 49e, 49t et 84 (autour de 1,8), les parcelles 81F et 81G étant intermédiaires (autour de 1,6). Ces différences s'expliquent principalement par le taux d'éléments grossiers (la densité diminue avec ce taux) et la texture (la densité augmente avec le taux d'argile) (voir 2.2.4.2). Sur les deux couches, la mesure de la densité apparente sur la parcelle 30 donne des résultats plus hétérogènes (coefficients de variation de 11 et 14 % respectivement pour les couches 0-15 et 15-30 cm) par rapport aux autres parcelles, principalement du fait d'une teneur en éléments grossiers très importante. Les coefficients de variations sur les autres parcelles sont inférieurs à 10 %.

2.2.4.2. Analyses physiques et chimiques au point 0

Les résultats par parcelle et par paramètre montrent une certaine hétérogénéité des parcelles, ce qui est fréquent en viticulture. Cependant aucune différence significative n'est observée entre modalités, les blocs ayant été disposés de façon à prendre en compte cette hétérogénéité. Les différences se font d'ailleurs d'abord entre blocs : bloc 3 sur la parcelle 30, bloc 2 sur la parcelle 69, plus riches en C. Ceci n'empêche pas une hétérogénéité entre modalités sur certaines parcelles. L'exemple de la teneur en carbone organique du sol sur 0-15 cm est donné dans l'annexe 3. Les modalités T des parcelles 69 et 81F, M des

Figure 2 : Densité apparente (g/cm3) en fonction de la couche de sol – Point 0. Densitomètre à membrane pour les parcelles 30, 69 et 84 ; cylindres pour les parcelles 49t, 49e, 81F et 81G

Figure 2: Bulk density (g/cm3) as a function of soil layer – Point 0. Membrane densitometer for plots 30, 69 and 84; cylinders for plots 49t, 49e, 81F and 81G



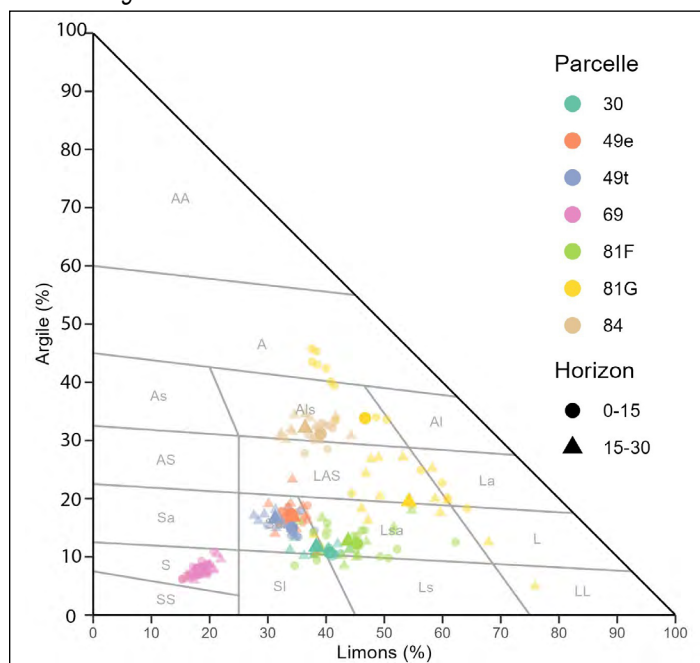
parcelles 81F, 49e et 49t, CC de la parcelles 49t, présentent des variabilités particulièrement importantes. Les teneurs en carbone sont faibles, représentatives des parcelles de vigne, avec un minimum pour la parcelle 69 (4,5 g C/kg, arène granitique) et un maximum pour la parcelle 84 (16,7 g C/kg, argilo-calcaire).

De façon plus générale, sur la couche 0-15 cm, la parcelle 81G présente une variabilité importante sur la granulométrie ainsi que sur le refus à 2 mm (*annexes 4A, 4B, 4C, 4D*). C'est également le cas pour ce dernier paramètre pour la parcelle 84. La teneur en C varie également de façon non négligeable pour la parcelle 69 (*annexe 4E*). Certaines parcelles peuvent présenter des teneurs en éléments minéraux relativement variables, comme 49t et 49e pour P_2O_5 (*annexe 4G*) ou 81F et 81G pour MgO (*annexe 4H*).

Sur la couche 15-30 cm, on retrouve la variabilité plus importante de la parcelle 81G sur la granulométrie (*annexes 5B, 5C, 5D*), ainsi que de la parcelle 69 sur les teneurs en C (*annexe 5E*) et des parcelles 81F et 81G sur la teneur en MgO (*annexe 5H*). Une hétérogénéité très importante est enregistrée sur le refus à 2 mm pour la parcelle 84 (*annexe 5A*). Enfin, les parcelles 69 et 84 montrent une variabilité non négligeable sur la teneur en P_2O_5 . Elles présentent également les valeurs les plus élevées pour ce paramètre, notamment la parcelle 69 (*annexe 5G*).

Figure 3 : Répartition des données granulométriques des parcelles sur le triangle des textures GEPPA

Figure 3: Distribution of granulometric data for plots on the GEPPA texture triangle



Ces résultats montrent également la grande variété de sols du réseau, que ce soit sur la couche 0-15 ou la couche 15-30 cm (*figure 3*) : sols argilo-calcaires (81G et 84), sols sableux (69), sols à texture moyenne (30, 81F, 49e et 49t). Sur Brissac, des différences existent entre 49t et 49e (pH eau, teneur en argile, teneur en azote total).

3. RÉSULTATS

Les résultats portent sur la période 2009-2010 à 2017-2018. Toutes les données issues de ces expérimentations sont présentées et disponibles sur [dataverse.gouv.fr \(https://doi.org/10.57745/N0ZZUL\)](https://doi.org/10.57745/N0ZZUL).

3.1. Caractéristiques des produits épandus, quantités apportées et quantités d'éléments minéraux apportés

3.1.1. Caractéristiques analytiques des produits épandus

La composition des produits épandus est très variable d'une parcelle à l'autre, avec également des variations pour un même type de produit entre les deux apports (t0 et t+4 ans).

Le taux de matière sèche diminue de façon conséquente de CC (82,6 % en moyenne) à M (36,5 % en moyenne) en passant par DV (*figure 4a*). CC et M ont des valeurs de C, N et C/N assez proches (respectivement en moyenne 410 g/kg, 25 g/kg et 16,5), DV présentant des valeurs plus faibles (277 et 16 g/kg pour C et N respectivement - *figures 4b à 4d*), sauf pour le C/N, proche sur les trois types de produit mais avec des variations importantes, notamment pour M. C'est d'ailleurs le produit présentant en général le plus de variation sur ces critères (MS, C et N). Les teneurs en phosphore sont supérieures sur CC et inférieures sur DV (*figure 5a*). M est plus riche en potassium (*figure 5b*) mais moins riche en calcium (*figure 5c*) que les deux autres types de produit. CC est très riche en magnésium (27 g MgO/kg en moyenne - *figure 5d*). Enfin, l'ISMO est supérieur sur M (78 en moyenne) et inférieur sur CC (60 en moyenne), DV étant intermédiaire (72 en moyenne) mais plus proche de M (*figure 6*).

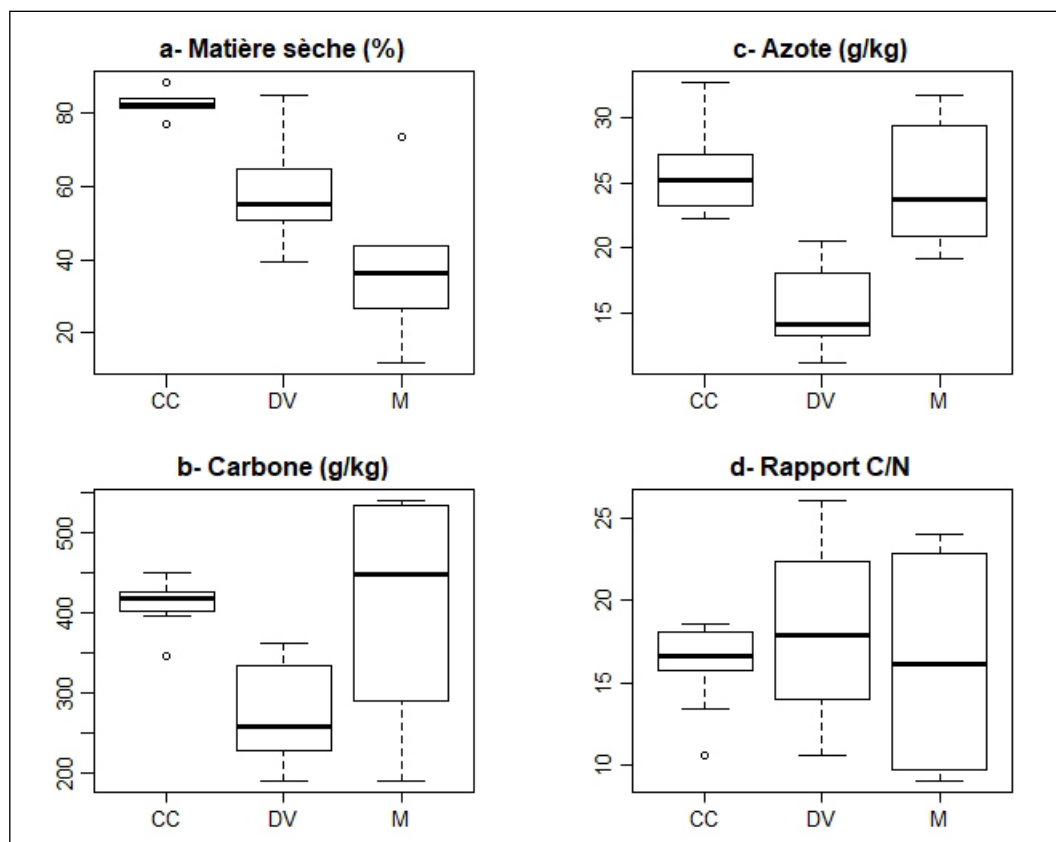
3.1.2. Quantités épandues

Les quantités de produit appliquées (*tableau 4*) sont très variables (de 5,2 t MS/ha à 56,6 t MS/ha sur les 8 années) en fonction :

- du type de PRO, du fait de la prise en compte de la teneur en C et de l'ISMO,
- de la parcelle, en fonction de la stratégie (redressement ou entretien), des teneurs initiales du sol en MO et du type de sol (influence du coefficient de minéralisation).

Figure 4 : Répartition de MS (% MF), C, N et C/N (sur MS) en fonction du type de produit, sur l'ensemble des années et des parcelles. Voir abréviations en *annexe 1* (nombre d'échantillons : CC=12 ; DV=14 ; M=10)

Figure 4: Distribution of DM (% FM), C, N and C/N (on DM) according to type of organic amendment, over all years and plots. See abbreviations in appendix 1 (number of samples: CC=12; DV=14; M=10)



Les quantités apportées sur la parcelle 81G sont notamment globalement plus faibles, en raison du type de sol (sol argilo-calcaire) qui minéralise peu la matière organique (peu de pertes de C par minéralisation). A l'inverse celles apportées sur 49t et 49e sont nettement supérieures, en lien avec l'objectif d'augmentation (20 %, voir 2.2.3).

3.1.3. Quantités d'éléments apportées

Les quantités d'éléments majeurs apportées sur les 8 années sont données par parcelle dans le *tableau 5*. Les quantités de C et C stable sont faibles dans le cas de la parcelle 84, du fait de l'objectif de maintien du taux de carbone du sol et du type de sol, et 81G, du fait du type de sol. Elles sont à l'inverse importantes, notamment vis-à-vis des apports réalisés classiquement sur vigne en place, dans le cas des parcelles 49t et 49e, en lien avec la remontée importante de la teneur en C visée sur ces parcelles. Elles varient entre modalités pour une même parcelle du fait de l'incertitude sur les données utilisées pour le calcul de la dose (à la fois % MS, teneur en C et ISMO

ou k1). Ces variations entre modalités pour une même parcelle vont au maximum de 13 % pour la parcelle 30 jusqu'à 93 % pour la parcelle 69, en passant par 40-50 % pour les autres parcelles.

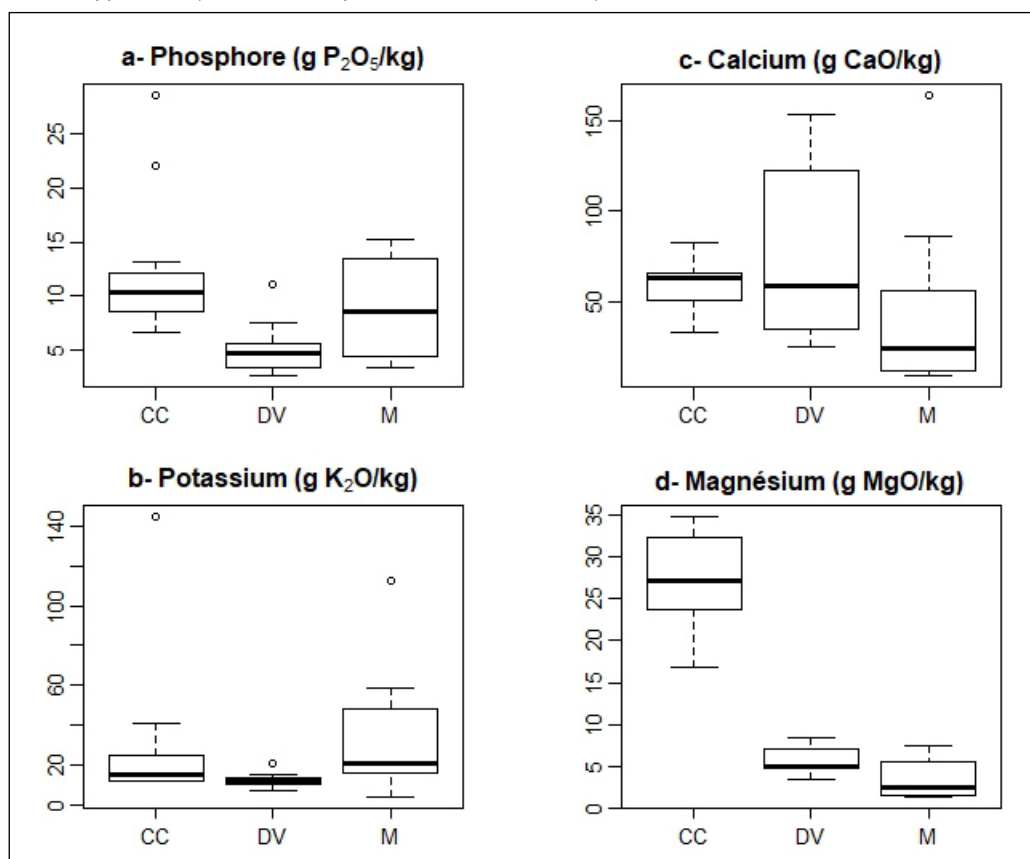
Les quantités apportées en éléments minéraux sont importantes sur 49t et 49e, en lien avec les apports de PRO réalisés : par exemple, environ deux fois plus de potassium ou 5 fois plus de phosphore que les besoins de la vigne pour DV. C'est également le cas sur la parcelle 30 pour le potassium (M) et le calcium (DV), sur la parcelle 69 pour le phosphore (CC), le potassium (CC) et le calcium (DV), sur 81F pour le calcium (CC et DV) et le magnésium (CC), sur la parcelle 84 pour le potassium (M) et le calcium (DV et M). De façon générale sur l'ensemble du réseau, la modalité DV a donc tendance à apporter beaucoup de calcium et la modalité CC beaucoup de magnésium.

3.2. Evolution des analyses de terre

Seuls les résultats du point t+8 ans seront présentés par souci de simplification et les résultats du point t+4 ans présentant très peu de différences significatives entre modalités.

Figure 5 : Répartition de P, K, Ca et Mg en fonction du type de produit (sur MS), sur l'ensemble des années et des parcelles. Voir abréviations en *annexe 1* (nombre d'échantillons : CC=12 ; DV=14 ; M=10)

Figure 5: Distribution of P, K, Ca and Mg according to type of organic amendment (on DM), over all years and plots. See abbreviations in appendix 1 (number of samples: CC=12; DV=14; M=10)



3.2.1. Densité de terre fine après 8 ans d'étude

La seule parcelle où les densités apparentes se différencient entre modalités est la parcelle 81G (*figure 7*). La modalité E donne des valeurs supérieures aux autres modalités, que ce soit sur la couche 0-15 cm ou la couche 15-30 cm (la modalité CC est intermédiaire sur cette dernière couche).

3.2.2. Analyses physiques et chimiques du sol après 8 ans d'étude

Au niveau statistique, les différences significatives sont très rares sur la teneur en carbone du sol (*tableau 6*) : E (14,3 g/kg) par rapport à DV (8,9 g/kg) sur 81G, CC (12,2 g/kg) par rapport à T (9,7 g/kg) sur 49t, DV (21,3 g/kg) par rapport à T (12,5 g/kg) sur 49e, malgré des teneurs en carbone souvent inférieures sur T.

La variabilité des données explique ces résultats, comme le montre la *figure 8*. Les variations par rapport à t0 peuvent être importantes (parcelles 30 et 49e) ou faibles (parcelles 81F, 49t et 84). La parcelle 69 donne des résultats intermédiaires. La parcelle 81G présente des résultats difficilement

compréhensibles entre T et les apports de PRO (diminution avec les apports).

Une augmentation de la CEC est constatée à Brissac sur les 2 parcelles (par exemple, 115 méq/kg pour DV contre 95 pour T sur 49e) et sur la parcelle 30 (91 méq/kg sur M contre 65 sur T). C'est également le cas sur la parcelle 69 mais sans différence significative.

Par contre, l'effet de l'apport des PRO sur l'enrichissement en éléments nutritifs est plus souvent significatif : pour N sur la parcelle 30 (DV et M), sur 49t (CC et DV), 49e (DV) et 84 (M) ; pour P sur la parcelle 30 (M) et sur 49e (DV) ; pour K sur les parcelles 30 (DV et M), 69 (CC), sur 49t (CC et DV), 49e (CC, DV et M) et 84 (M) ; pour Ca sur les parcelles 30 (DV), 69 (DV), sur 49t (CC et DV) et 49e (DV) ; pour Mg sur les parcelles 30 (M), 69 (CC) et 49e (CC).

Enfin, toujours sur cet horizon 0-15 cm, l'apport des PRO a eu un effet basique sur le pH du sol, excepté en sol calcaire, bien évidemment : DV et M (7,81 et 6,94 respectivement contre 6,41 pour T) sur la parcelle 30, CC sur la parcelle 69 (6,87 contre 6,30 pour T), CC sur 49t et CC et DV sur 49e.

Figure 6 : Répartition de ISMO (% MO) en fonction du type de produit, sur l'ensemble des années et des parcelles.
Voir abréviations en *annexe 1* (nombre d'échantillons : CC=12 ; DV=14 ; M=10)

Figure 6: Distribution of IROC (% OM) according to type of organic amendment, over all years and plots. See abbreviations in appendix 1 (number of samples: CC=12; DV=14; M=10)

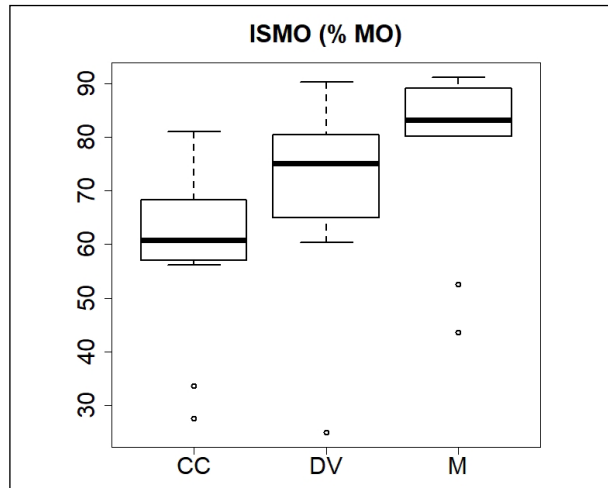


Tableau 4 : Quantités de produits apportés sur les 8 années (2 apports à pleine dose à t0 et t4 ou 4 apports à demi-dose à t0, t2, t4 et t6)

Table 4: Amount of organic amendments applied over 8 years (2 full-dose applications at t0 and t4 or 4 half-dose applications at t0, t2, t4 and t6)

Parcelle	Produit	Quantité apportée t/ha	MS apportée t/ha
30	DV	31,6	19,9
	M	34,2	14,2
69	CC2	14,9	12,9
	CC	14,9	12,7
	DV2	49,4	26,9
	DV	49,4	26,5
81F	CC	24,7	20,0
	DV	48,9	26,5
	M	57,8	17,8
81G	CC	12,8	10,3
	DV	26,5	14,1
	M	26,4	5,2
49t et 49e	CC	51,2	41,8
	DV	127,2	56,6
	M	73,9	22,4
84	CC	10,7	8,8
	DV	20,0	15,8
	M	26,7	17,0

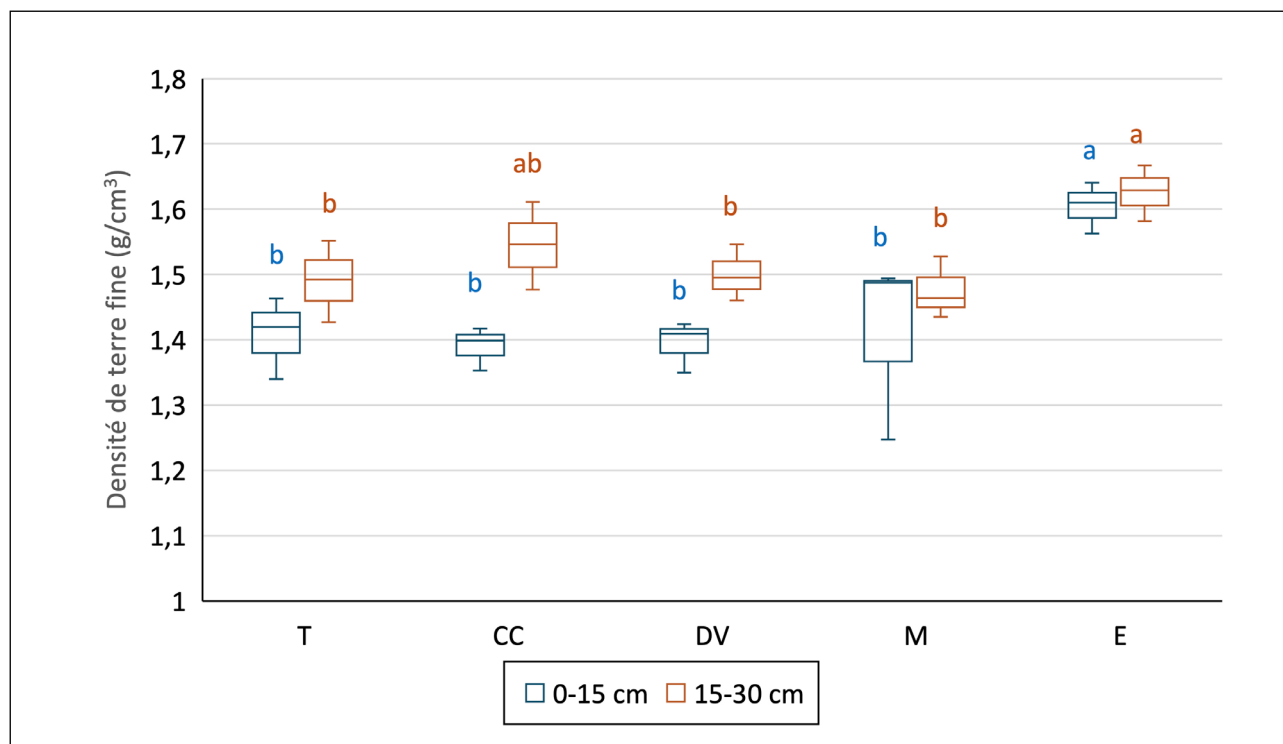
Tableau 5 : Quantités d'éléments apportés sur les 8 années

Table 5: Amount of elements added over 8 years

Parcelle	Produit	Carbone kg/ha	Carbone stable kg/ha	Azote kg/ha	P ₂ O ₅ kg/ha	K ₂ O kg/ha	CaO kg/ha	MgO kg/ha
30	DV	4009	3256	305	92	174	2483	97
	M	4220	3670	349	166	655	736	71
69	CC2	5136	3279	359	215	605	853	296
	CC	4842	3037	391	308	851	969	240
	DV2	8022	5411	457	140	344	1199	122
	DV	9076	5864	402	123	325	1386	111
81F	CC	8622	5339	523	199	241	1219	613
	DV	7566	5840	358	98	280	1496	171
	M	9043	7641	388	69	164	179	27
81G	CC	4423	2750	266	100	124	617	310
	DV	4159	3195	192	51	152	763	89
	M	2703	2241	117	19	39	50	8
49t et 49e	CC	17923	11094	1029	469	743	2921	1299
	DV	15776	13389	1160	520	1049	2000	439
	M	10951	9405	677	212	477	509	53
84	CC	3557	1049	219	85	133	507	250
	DV	4088	1449	209	60	183	2378	81
	M	3516	1625	389	210	1066	2484	118

Figure 7 : Densité apparente (g/cm^3) en fonction des modalités et de la couche de sol - t+8ans - Parcelle de Gaillac. Test statistique S pour les 2 couches (voir abréviations en *annexe 1*)

Figure 7: Bulk density (g/cm^3) as a function of modality and soil layer - t+8 years - Gaillac plot. Statistical test S for the 2 layers (see abbreviations in appendix 1)



Les ACP ont été réalisées à partir des données des analyses de terre, excepté la granulométrie (non modifiable par les pratiques expérimentées) et le pH KCl (corrélé au pH eau). Les résultats de l'ACP sur les moyennes à t+8 ans sur 0-15 cm pour toutes les parcelles sont donnés dans l'*annexe 6*, où le graphe des individus met en évidence les modalités en couleur. L'inertie des 2 premiers axes représente les trois quarts de l'inertie totale. Ce premier plan représente donc bien la variabilité des données. Il met en évidence essentiellement les différentes parcelles, les types de PRO n'étant pas ou très peu différenciés. Cela signifie que la parcelle est un facteur primordial et que l'apport de PRO ne bouleverse pas les caractéristiques générales du sol.

Ainsi les 2 parcelles à pH basique (81G et 84) se situent côté positif de l'axe 1, se différenciant au niveau MgO (81G plus riche) et C et K_2O (84 plus riche). Du côté opposé, se situe la parcelle 69 en lien avec son pH acide, les quatre autres parcelles se distinguant peu ou légèrement au niveau de l'axe 2 : 81F et 49t moins riches en C et N.

De façon à masquer l'effet parcelle, une transformation des données a été réalisée en les centrant et en les réduisant : pour chaque parcelle et par variable, l'écart à la moyenne (moyenne de toutes les modalités) est calculé et divisé par l'écart-type

(écart-type de toutes les modalités). Une nouvelle ACP est réalisée sur ces données transformées (nommée ACPcr par la suite). Les résultats sur 0-15 cm sont représentés dans la *figure 9*. L'inertie des 2 premiers axes représente un peu moins des deux tiers de l'inertie totale. Les Témoins des différentes parcelles se situent sur le côté négatif de l'axe 1 (pH plus faibles, moins riches en K_2O et MgO et en C) excepté le Témoin de 81G. Il est difficile en revanche de distinguer les différents types de PRO, même si M a tendance à être plus proche de T (sauf pour les parcelles 30 et 84). Les modalités E se situent vers le côté positif de l'axe 2 (rapport C/N plus important).

Les résultats de l'ACP sur les moyennes à t+8 sur 15-30 cm (non présentés) mettent également en évidence la différence entre les parcelles avec à peu près les mêmes caractéristiques que sur 0-15 cm (moins de différences pour les parcelles 30, 81F, 49t et 49e). Le passage à l'ACPcr ne permet pas, en revanche, de distinguer les modalités d'apport (*annexe 7*).

3.2.3. Analyses biologiques

Il convient d'être prudent dans l'interprétation de ces résultats entre parcelles (ainsi d'ailleurs que dans ceux des ACP présentés plus bas) car les prélèvements n'ont pas été

Tableau 6 : Analyses physiques et chimiques du sol à t+8 ans. 0-15 cm (écarts-types entre parenthèses en italique ; les tests statistiques sont indiqués entre traitements au sein d'un même essai)

Table 6: Statistical results of soil physical and chemical analysis at t+8 years. 0-15 cm (standard deviations in italics in brackets; statistical tests are indicated between treatments within the same trial)

Parcelle	Modalité	Carbone g/kg	pHeau	CEC Metson méq/kg	P ₂ O ₅ g/kg	K ₂ O g/kg	CaO g/kg	MgO g/kg
30	Test stat	ns	S	S	S	S	S	S
	T	15,3 (2,5)	6,41 (0,13) c	65 (5) b	0,110 (0,000) b	0,181 (0,004) b	1,88 (0,134) b	0,157 (0,010) b
	DV	21,9 (2,3)	7,81 (0,14) a	89 (3) a	0,199 (0,030) ab	0,238 (0,017) a	4,02 (0,713) a	0,182 (0,018) ab
	M	18,8 (1,2)	6,94 (0,05) b	91 (7) a	0,342 (0,092) a	0,275 (0,017) a	2,80 (0,215) ab	0,200 (0,009) a
69	Test stat	ns	S	ns	ns	S	S	S
	T	4,6 (0,6)	6,30 (0,16) b	40 (4)	0,484 (0,038)	0,233 (0,023) b	0,84 (0,171) b	0,161 (0,019) b
	CC2	6,0 (1,6)	6,87 (0,06) a	63 (11)	0,533 (0,036)	0,277 (0,014) ab	1,20 (0,118) ab	0,248 (0,031) a
	CC	6,1 (2,0)	6,61 (0,20) ab	65 (9)	0,599 (0,051)	0,321 (0,016) a	1,14 (0,268) ab	0,274 (0,040) a
	DV2	6,0 (2,3)	6,64 (0,18) ab	62 (7)	0,488 (0,045)	0,274 (0,023) ab	1,41 (0,257) a	0,221 (0,041) ab
	DV	6,5 (2,0)	6,66 (0,17) ab	63 (6)	0,527 (0,063)	0,265 (0,021) b	1,35 (0,194) ab	0,203 (0,018) ab
81F	Test stat	ns	S	ns	ns	ns	ns	ns
	T	9,8 (0,2)	7,47 (0,02) ab	87 (13)	0,264 (0,029)	0,230 (0,053)	2,64 (0,172)	0,248 (0,063)
	CC	10,6 (0,3)	7,33 (0,08) ab	89 (4)	0,335 (0,030)	0,252 (0,020)	2,42 (0,063)	0,281 (0,003)
	DV	12,4 (1,9)	7,61 (0,10) a	99 (12)	0,319 (0,012)	0,300 (0,027)	3,04 (0,323)	0,321 (0,099)
	M	9,6 (0,6)	7,17 (0,14) b	83 (3)	0,403 (0,120)	0,207 (0,022)	2,38 (0,037)	0,237 (0,003)
	E	11,9 (1,1)	7,32 (0,09) ab	94 (13)	0,278 (0,026)	0,287 (0,036)	2,65 (0,305)	0,292 (0,080)
81G	Test stat	S	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	T	12,3 (2,0) ab	8,29 (0,02)	234 (10)	0,143 (0,007)	0,452 (0,045)	12,28 (0,481)	0,599 (0,218)
	CC	10,2 (0,3) ab	8,30 (0,04)	224 (15)	0,153 (0,012)	0,440 (0,048)	12,30 (0,360)	0,639 (0,201)
	DV	8,9 (0,6) b	8,34 (0,07)	229 (12)	0,127 (0,019)	0,426 (0,038)	11,92 (0,420)	0,584 (0,089)
	M	9,3 (0,5) ab	8,30 (0,06)	230 (6)	0,118 (0,010)	0,410 (0,059)	12,41 (0,351)	0,581 (0,143)
	E	14,3 (3,0) a	8,18 (0,01)	232 (7)	0,125 (0,008)	0,367 (0,013)	11,72 (0,283)	0,541 (0,016)
49t	Test stat	S	S	S	ns	S	S	S
	T	9,7 (0,6) b	6,80 (0,16) b	86 (2) ab	0,077 (0,034)	0,210 (0,028) b	1,85 (0,169) b	0,240 (0,008) ab
	CC	12,2 (0,8) a	7,23 (0,09) a	92 (1) a	0,130 (0,041)	0,293 (0,024) a	2,17 (0,059) a	0,357 (0,039) a
	DV	10,9 (0,4) b	6,97 (0,12) ab	92 (4) a	0,102 (0,036)	0,267 (0,019) a	2,13 (0,197) a	0,270 (0,014) ab
	M	10,4 (0,3) b	6,83 (0,12) b	81 (1) b	0,074 (0,013)	0,217 (0,005) b	1,84 (0,099) b	0,223 (0,005) b
	Test stat	S	S	S	S	S	S	S
	T	12,5 (3,3) b	6,53 (0,12) b	95 b	0,081 (0,022) b	0,267 (0,042) c	2,01 (0,155) b	0,270 (0,029) b
	CC	15,9 (3,6) ab	7,00 (0,00) a	104 ab	0,177 (0,089) ab	0,367 (0,053) b	2,22 (0,361) ab	0,430 (0,106) a
49e	DV	21,3 (1,8) a	6,90 (0,00) a	115 a	0,260 (0,042) a	0,467 (0,009) a	2,71 (0,271) a	0,390 (0,014) ab
	M	17,9 (3,5) ab	6,47 (0,09) b	99 ab	0,137 (0,038) ab	0,383 (0,048) ab	2,01 (0,230) b	0,267 (0,031) b
	Test stat	ns	ns	ns	ns	S	ns	ns
	T	15,1 (1,4)	8,30 (0,00)	167 (4)	0,034 (0,004)	0,533 (0,031) b	9,70 (0,081)	0,183 (0,018)
84	CC	18,0 (1,6)	8,27 (0,05)	163 (3)	0,042 (0,012)	0,535 (0,101) b	9,51 (0,089)	0,199 (0,016)
	DV	16,2 (1,1)	8,33 (0,05)	167 (2)	0,039 (0,011)	0,626 (0,066) ab	9,75 (0,095)	0,210 (0,010)
	M	17,1 (1,6)	8,37 (0,05)	166 (8)	0,035 (0,002)	0,838 (0,112) a	9,59 (0,105)	0,212 (0,007)

Figure 8 : Répartition de la teneur en carbone organique du sol (g/kg) par modalité et par parcelle à t0 et t+8 ans - 0-15 cm (voir abréviations en annexe 1) - Les croix représentent les médianes.

Figure 8: Distribution of soil organic carbon content (g/kg) by modality and plot at t0 and t+8 years - 0-15 cm (see abbreviations in appendix 1) - Cross marks represent the medians.

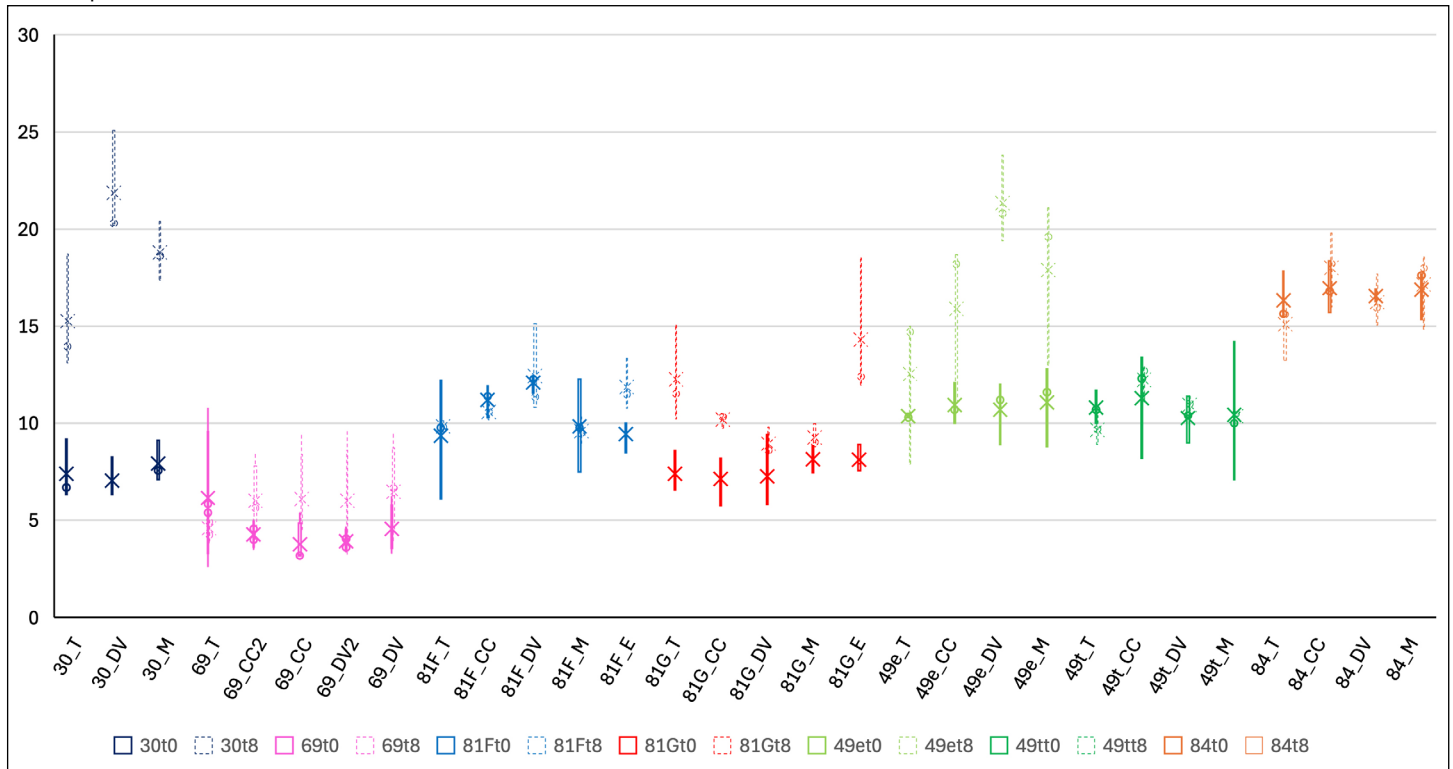


Figure 9 : Résultats de l'ACP sur les moyennes des données sol 0-15 cm à t+8 ans (modalité) : projection des variables (à gauche) et projection des individus (à droite) sur les deux premières dimensions de l'ACP

Figure 9: Results of PCA on averages of 0-15 cm soil data at t+8 years (modalities): projection of variables (left) and projection of individuals (right) on the first two dimensions of PCA

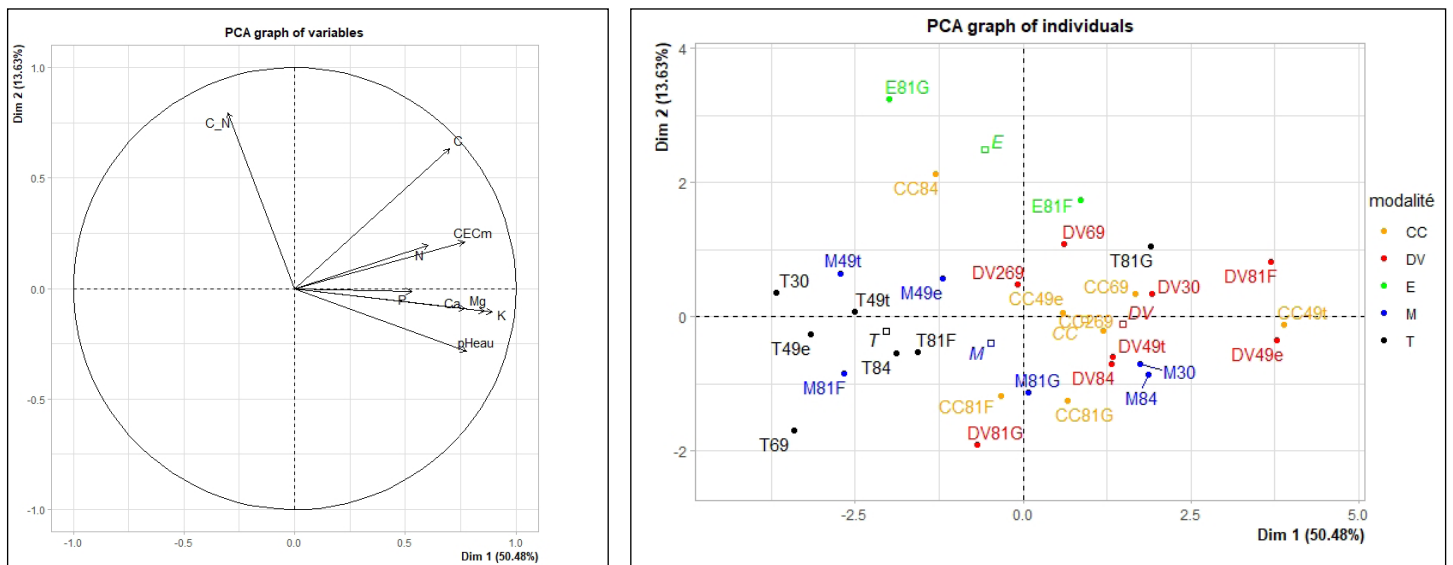


Figure 10 : Résultats de l'ACP sur les moyennes des données biologiques de terre (modalités) : projection des variables (à gauche) et projection des individus (à droite) sur les deux premières dimensions de l'ACP

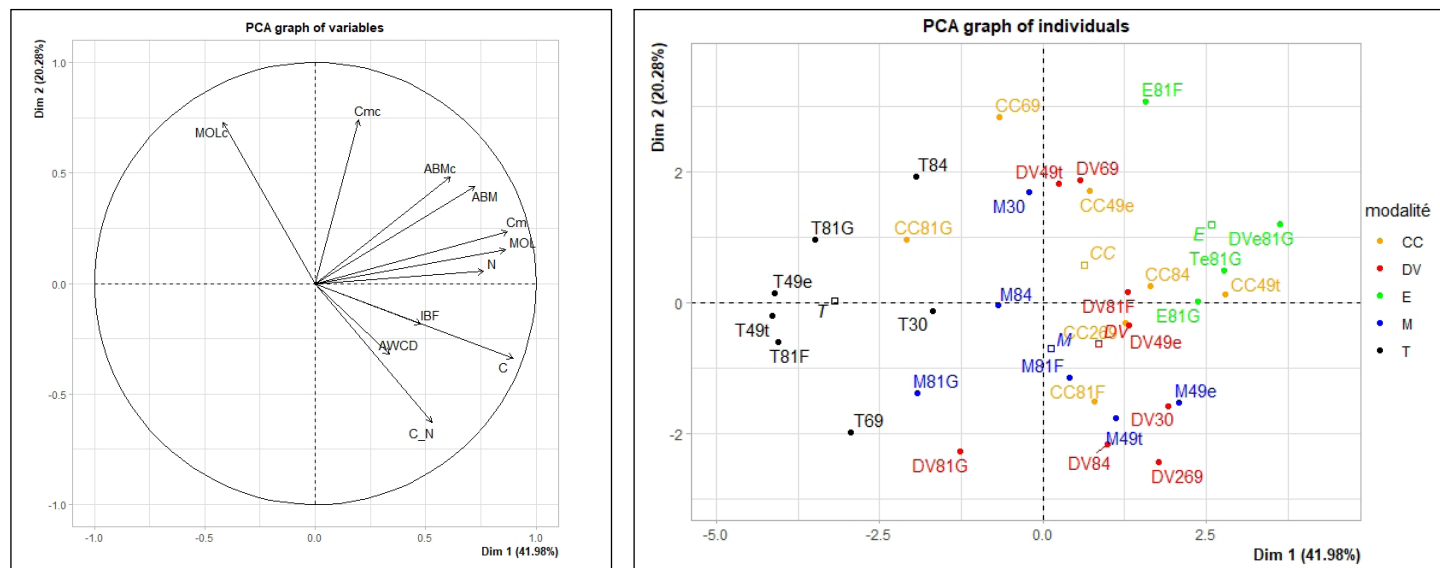
Cmc, MOLc et ABMc sont les valeurs relatives par rapport au C ou au N respectivement pour Cm, MOL et ABM

Sur la parcelle 81G, des prélèvements supplémentaires ont été réalisés sur l'inter-rang enherbé des modalités T (Te) et DV (DVe), en plus des prélèvements réalisés sur la partie désherbée mécaniquement.

Figure 10: Results of PCA on average biological soil data (modalities): projection of variables (left) and projection of individuals (right) on the first two dimensions of PCA

Cmc, MOLc and ABMc are the relative values with respect to C or N respectively for Cm, MOL and ABM

On plot 81G, additional samples were taken from the grassed inter-row areas of treatments T (Te) and DV (DVe), in addition to the samples taken from the mechanically weeded area.



réalisés au même moment par rapport aux apports pour toutes les parcelles : au printemps 2019 pour les parcelles 30, 69, 81F, 81G, 49t et 49e, donc après le 3^e apport, et au printemps 2017 pour la parcelle 84, donc avant le 3^e apport. Cette différence entre parcelles est liée au fait que les analyses précédentes n'ont pu être faites au même moment et qu'il paraissait logique de conserver cette différence, en particulier pour éviter de prélever juste après un apport de produit résiduaire organique (PRO). Ceci peut expliquer en partie les différences enregistrées entre parcelles.

Sur la majorité des parcelles (sauf 49e et 84), la teneur en carbone est plus faible statistiquement sur le Témoin par rapport à au moins une autre modalité (annexe 8). Ceci était rarement le cas sur les analyses de terre classiques (voir 3.2.2) mais s'explique par les apports plus importants (3 apports au lieu de 2 la plupart du temps, les prélèvements ayant été réalisés après le 3^e apport en général, alors qu'ils ont été réalisés avant ce 3^e apport pour les analyses chimiques). La profondeur de prélèvement (0-20 cm pour les analyses biologiques, 0-15 cm pour les analyses chimiques) est également une source de difficulté pour comparer ces valeurs.

Concernant les parcelles 49e et 84, les différences sont également très rares sur les autres paramètres mesurés.

Sur les autres parcelles, le Témoin présente en général des Cm, C actifs et ABM inférieurs. Par exemple, sur la parcelle 69, le Cm est de 105 mg C/kg pour DV contre 51 pour T, soit moitié moins ; sur la parcelle 49t, le C actif est de 922 mg C/kg contre 698 pour T. C'est également souvent le cas si ces paramètres sont exprimés en pourcentage mais de façon moins systématique. On note l'effet positif de l'enherbement sur ces paramètres : parcelle 81G (487 mg C/kg pour E contre 266 pour T) et, dans une moindre mesure, parcelle 81F. Concernant les apports de PRO, il est difficile de différencier les types de produit, le comportement étant différent d'une parcelle à l'autre (à mettre en lien avec les quantités apportées et le positionnement temporel du prélèvement par rapport aux apports). Les indices de biodiversité présentent rarement des différences significatives.

Des corrélations avec des coefficients de détermination supérieurs à 0,6, toujours positives, sont observées entre différents paramètres mesurés en prenant en compte toutes les données (répétitions et parcelles) : entre C et N ($r^2 : 0,87$),

C et C actif ($r^2 : 0,71$), C et ABM ($r^2 : 0,72$), Cm et Cmc ($r^2 : 0,75$), Cm et ABM ($r^2 : 0,80$), ABM et ABMc ($r^2 : 0,78$), ACWD et IBF ($r^2 : 0,64$). La relation entre Cm et ABM montre que les parcelles 30, 49t et, dans une moindre mesure, 84 ont tendance à se différencier des autres avec des ABM supérieurs à Cm identiques (*annexe 9*), ce qui peut s'expliquer par une stimulation de l'activité microbienne du fait du travail du sol (aération notamment).

De même, ces parcelles où l'inter-rang est travaillé ont tendance à présenter des C actifs supérieurs à teneurs identiques en Cm (*annexe 10*), pour les mêmes raisons. Ça n'est cependant pas le cas pour la parcelle 81G mais où le désherbage mécanique a été mis en place plus tard et alternativement un inter-rang sur deux.

La relation entre C et Cm est également bonne si on ne prend pas en compte la parcelle 30 ($r^2 : 0,78$, *Annexe 11*). Sur cette dernière, pour des teneurs de carbone identiques mais assez importantes, les valeurs de Cm sont très faibles par rapport aux autres parcelles (c'était déjà le cas dans la relation précédente entre Cm et C actif). Les caractéristiques du sol n'expliquent pas cette différence (pH, teneur en cuivre par exemple). En revanche, les échantillons étaient très secs du fait des conditions météorologiques moins favorables lors des prélèvements (plus sèches notamment), ce qui peut expliquer les différences.

Les mêmes types d'ACP que sur les analyses classiques de terre (*voir 3.2.2*) ont été réalisées sur ces données.

Pour l'ACP classique, l'inertie des 2 premiers axes représente un peu moins des trois quarts de l'inertie totale. Ce premier plan représente donc bien la variabilité des données. Comme pour les analyses de terre, cette ACP distingue essentiellement les parcelles et pas le type de PRO (*annexe 12*). Cela signifie que la parcelle est un facteur primordial et que l'apport de PRO ne bouleverse pas les caractéristiques biologiques, très dépendantes des caractéristiques classiques du sol. Ainsi les parcelles à pH basique et plus riches en argile présentent des Cm, ABM et C actifs supérieurs (axe 1), en lien également avec la teneur en carbone, comme vu plus haut. Cependant les modalités enherbées sur l'inter-rang (49e et 81G) se distinguent avec des valeurs élevées pour ces paramètres, combinées à des Cm et des C actifs exprimés en pourcentage du C total également plus élevés (axe 2).

Pour l'ACPcr (*figure 10*), l'inertie des 2 premiers axes représente un peu moins des deux tiers de l'inertie totale. Les Témoins des différentes parcelles se situent sur le côté négatif de l'axe 1 (C, Cm, C actif et ABM plus faibles), opposés aux modalités enherbées sur l'inter-rang. Il est difficile en revanche de distinguer les différents types de PRO sur les axes 1 et 2. Pour 81G, seules les modalités enherbées se distinguent du Témoin.

L'axe 3, même s'il ne représente que 14 % de l'inertie totale, permet de distinguer les modalités CC des modalités M, ces dernières présentant des Cm et C actifs, exprimés en pourcentage du C total, plus faibles (résultats non présentés).

4. DISCUSSION

Les différences statistiques entre modalités sont très rares sur le carbone organique du sol. Or le principal objectif de ces apports de PRO était justement d'augmenter la teneur en carbone du sol.

Ces résultats confirment ceux obtenus par Fermond *et al.* (2014) avec différents amendements organiques ou dans la revue bibliographique de Buchmann *et al.* (2025) sur le marc de raisin, même si une majorité rapporte un effet des amendements organiques sur sols viticoles (Pinamonti, 1998 ; Korboulewsky *et al.*, 2001 ; Morlat et Chaussod, 2008 ; Priori *et al.*, 2018). Plusieurs raisons peuvent être avancées pour expliquer ce résultat. La première est le faible nombre d'années de recul (8 ans) couplé aux quantités relativement modérées apportées : le taux de carbone dans le sol évolue lentement et 8 années correspondent à un délai court à l'échelle des transformations dans le sol. De plus les apports réalisés sont relativement faibles par rapport à ce qui est constaté en grandes cultures par exemple, où il est déjà difficile de mettre en évidence des différences sur ce laps de temps (Houot *et al.*, 2009). D'ailleurs les effets sont bien plus marqués sur les parcelles 49t et 49e où les apports ont été conséquents.

La deuxième explication est la grande hétérogénéité spatiale du carbone dans le sol, qui rend difficile la mise en évidence de différence significative, malgré le soin pris à la réalisation des prélèvements. Les parcelles présentent également une hétérogénéité initiale, assez fréquente en viticulture, que la mise en place des blocs a permis de réduire mais uniquement pour certaines parcelles. De plus, il s'est avéré que les résultats d'analyse peuvent varier suivant les laboratoires et que l'incertitude de l'analyse peut rendre délicate la mise en évidence de faibles différences (Mary *et al.*, 2017).

Enfin, les témoins bénéficient de la restitution des bois de taille et donc d'un apport de carbone, ce qui peut tamponner les écarts vis-à-vis des autres modalités par rapport à des témoins sans restitution.

L'objectif d'augmentation du taux de matière organique est tout de même effectif, même si les différences ne sont pas souvent significatives, pour 5 parcelles sur 6. La parcelle 81G donne en effet des résultats décevants au bout de 8 ans (2 apports). L'hétérogénéité importante de cette parcelle (*voir 2.2.4.2*) explique la difficulté à mettre en évidence des différences. Toutefois la prise en compte du 3^e apport dans les analyses biologiques permet de répondre à l'objectif d'augmentation du taux de matière organique. Les quantités apportées sur les 2 apports n'étaient donc pas suffisantes pour

atteindre ce but. C'est d'ailleurs la parcelle où les apports en carbone stable sont les plus faibles, avec la parcelle 84. Mais, dans le cas de cette dernière, l'objectif était un maintien du taux de matière organique, ce qui correspond au résultat obtenu.

Il est difficile de distinguer les différents PRO utilisés sur les résultats obtenus en termes d'augmentation du taux de matière organique. Ceci peut s'expliquer par le raisonnement de la dose d'apport à partir du carbone stable apporté par les PRO, qui permet de s'affranchir du type de PRO, tout du moins pour son effet sur le taux de matière organique.

L'augmentation de la CEC constatée sur certaines de ces expérimentations (parcelles 30, 49t, 49e) est liée à une augmentation de la teneur en carbone du sol (Berry *et al.*, 2005) et peut donc être considérée indirectement comme une amélioration de cette teneur en carbone.

L'enrichissement en éléments nutritifs du sol lié aux PRO est compréhensible du fait des apports parfois importants réalisés en ces éléments via l'épandage des PRO (*tableau 5 en 3.1.3*) et a déjà été montré, que ce soit en grandes cultures (Houot *et al.*, 2014) ou en viticulture (Pinamonti, 1998 ; Morlat et Chaussod, 2008).

De façon globale, les parcelles à pH fortement basique (81G, 84) sont moins sensibles aux apports de PRO, ce qui est logique car les apports sont moins importants, en lien avec la plus faible minéralisation du sol.

L'effet de l'apport des PRO sur le pH du sol a déjà été mis en évidence en grandes cultures (Bouthier *et al.*, 2017) et est confirmé ici en viticulture, comme Perez-de-los-Reyes *et al.* (2012) ont pu également le constater. Une relation assez correcte, mais qui peut varier suivant les parcelles, est constatée entre le pH du sol et sa teneur en CaO. L'enrichissement en CaO lié à l'apport des PRO (*voir tableau 5 en 3.1.3*) expliquerait donc en particulier cette augmentation du pH du sol.

Les différences plus marquées entre modalités constatées sur les teneurs en C des analyses biologiques par rapport aux analyses classiques, peuvent provenir du fait que les prélèvements microbiologiques ont été réalisés après le 3^e apport (avant ce 3^e apport pour les prélèvements de terre classiques), excepté pour la parcelle 84 (où, d'ailleurs, on ne constate quasiment aucune différence significative). Les apports de carbone ont donc été supérieurs par rapport aux analyses classiques (uniquement 2 apports pour ces dernières).

L'augmentation de la teneur en carbone organique du sol se traduit notamment par une augmentation du carbone microbien, comme cela a pu être montré dans d'autres études (Morlat et Chaussod, 2008 ; Fermond *et al.*, 2014).

Le peu de différences rencontrées sur les autres paramètres mesurés sur la parcelle 84, peut s'expliquer par

le fait du prélèvement avant le 3^e apport (donc éloigné du 2^e apport). Dans le cas de la parcelle 49e, les valeurs de Cm et de C actif sont tout de même inférieures pour le Témoin. On peut penser que l'enherbement a eu un effet « tampon », étant donné son action favorable sur les micro-organismes et gomme quelque peu les écarts entre le Témoin et les apports de PRO.

Cet effet bénéfique de l'enherbement sur le carbone organique du sol et sur le carbone microbien, visible sur nos expérimentations, a été montré dans de nombreuses études sur sols viticoles (Doledec *et al.*, 2002 ; Whitelaw-Weckert *et al.*, 2007 ; Strickland *et al.*, 2019 ; Novara *et al.*, 2020).

Cette action positive de l'enherbement est particulièrement mise en évidence sur la parcelle 81G alors que la teneur en C du sol n'est pas forcément très supérieure à celles des autres modalités. L'enherbement permet de fournir du carbone plus labile et donc plus facilement métabolisable par les micro-organismes que le carbone apporté par les PRO expérimentés (composts). Il joue donc de façon plus intense sur la biomasse microbienne que les PRO, comme cela a pu être montré dans d'autres expérimentations (Lejon *et al.*, 2007 ; Germain *et al.*, 2010).

Sur les autres parcelles, les plus faibles teneurs enregistrées sur le Témoin pour le Cm, le C actif et l'ABM peuvent être mises directement en lien avec les faibles apports en C reçus par cette modalité (uniquement les bois de taille).

Le comportement de la parcelle 30, différent des autres parcelles vis-à-vis du Cm (*annexes 9, 10 et 11*), peut s'expliquer par des conditions de prélèvement en conditions sèches, ce qui a probablement sous-évalué cette biomasse microbienne, les microorganismes étant très sensibles à l'humidité du sol.

La densité de sol plus importante enregistrée sur la modalité E de la parcelle 81G à t+8 ans est surprenante car l'enherbement a plutôt tendance à augmenter la porosité et donc diminuer la densité (Ruiz-Colmenero *et al.*, 2013). Le fait que les autres modalités soient désherbées mécaniquement peut l'expliquer sur la couche 0-15 cm, qui est la couche de travail des outils, mais pas sur 15-30 cm. La densité est d'ailleurs inférieure sur 0-15 cm sur ces modalités alors qu'elle est très proche entre 0-15 et 15-30 cm pour E. Cependant Neyroud et Christinet (1983) ont constaté le même phénomène sur leurs expérimentations en Suisse. L'hétérogénéité globale plus importante de cette parcelle (*voir 2.2.4.2*) peut également en être une explication.

De façon globale sur le réseau, l'apport de PRO ne se répercute pas sur cette densité de sol alors que Pinamonti (1998), par exemple, a montré un effet positif de l'apport de produits organiques sur la porosité du sol sur sol viticole. Là encore, on peut penser que 8 ans et/ou les quantités apportées ne sont pas suffisantes pour modifier de façon significative cette densité.

Outre les résultats techniques, le coût fait partie intégrante du choix de la matière organique par les viticulteurs. Un calcul a été réalisé sur la base des moyennes des teneurs en C et des ISMO de chaque type de produit (voir 3.1.1.) et des prix indiqués dans le Coût des fournitures en viticulture 2026. A titre indicatif, les prix pouvant varier de façon importante en fonction du fournisseur du produit, l'ordre de grandeur du prix HT de la tonne de carbone stable est le suivant : 150 € pour le compost de marcs de raisin, 450 € pour le compost de déchets verts et 1650 € pour le compost du commerce.

Outre ces résultats sur le sol, un suivi a également été réalisé sur la vigne, pour étudier l'effet de la gestion organique du sol sur cette dernière, (Cahurel *et al.*, 2026).

Ce réseau a permis également d'acquérir des données qui ont été utilisées pour paramétrer et valider pour la viticulture le modèle AMG (Andriulo *et al.*, 1999), qui calcule l'évolution du stock de carbone organique (et donc de matière organique) du sol sur le long terme (Mouny *et al.*, 2021).

5. CONCLUSION

L'apport de PRO ne bouleverse pas les caractéristiques générales du sol. En revanche il joue de façon positive sur différentes caractéristiques du sol. Tout d'abord sur le carbone organique et donc la MO, même si les différences sont rarement significatives. Cela peut s'expliquer par le faible nombre d'années de recul (8 ans) couplé aux quantités relativement modérées apportées et à l'hétérogénéité des parcelles. Cependant l'augmentation de la CEC constatée sur plusieurs parcelles est liée à une augmentation de la teneur en carbone du sol et peut donc être considérée indirectement comme une amélioration de cette teneur en carbone.

En revanche, l'effet de l'apport des PRO sur l'enrichissement en éléments nutritifs est plus souvent significatif : ceci est compréhensible du fait des apports parfois importants réalisés en ces éléments du fait de l'épandage des PRO. Il est donc important de prendre en compte les apports d'éléments minéraux liés aux apports de PRO dans le plan de fumure d'une parcelle.

Enfin, l'apport des PRO a entraîné une augmentation du pH du sol (effet basique), qui serait expliqué par l'enrichissement en CaO lié à cet apport.

Il est en revanche difficile de distinguer l'effet du type de PRO sur les paramètres mesurés. L'enherbement se distingue par des valeurs élevées sur les paramètres biologiques du sol. De ce fait, il a également un effet « tampon » qui peut gommer quelque peu l'effet des apports de PRO.

Les effets sont beaucoup plus marqués sur l'horizon 0-15 cm que sur l'horizon 15-30 cm.

Les analyses biologiques montrent de nombreuses différences entre le témoin et les modalités testées, avec une

augmentation des différents paramètres pour ces dernières. Les indices de biodiversité présentent rarement des différences significatives.

A carbone microbien identique, le désherbage mécanique, du fait de son action stimulante sur l'activité microbienne, induit des ABM et des C actifs supérieurs. En lien avec le carbone plus labile qu'il fournit, l'enherbement a un effet plus prononcé que l'apport de PRO sur la biomasse microbienne, indépendamment du taux de MO.

REMERCIEMENTS

Les auteurs adressent leurs remerciements à Annie Duparque, Bruno Mary et Bernard Nicolardot pour leur aide dans l'établissement des protocoles de suivi.

La mise en place du réseau, son suivi et les données acquises ont bénéficié de l'aide financière de FranceAgriMer, ainsi que des différentes régions où sont situées les parcelles : région Languedoc-Roussillon, région Midi-Pyrénées, région Pays de la Loire, région Provence-Alpes-Côte d'Azur, SICAREX Beaujolais.

BIBLIOGRAPHIE

- Andriulo A., Mary B., Guerif J. (1999). Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. *Agronomie*, 19, 5, pp 365-377.
- Berry D., Demarle O., Vian J-F., Gautronneau Y., Roger-Estrade J. (2005). Amendements organiques. Bilan de 10 années d'apport de différents produits en cultures légumières à la SERAIL. *Echo MO*, 53, pp 3-8.
- Bouthier A., Cambier P., Felix-Faure B., Houot S. (2017). Effet des produits résiduels organiques sur le statut acido-basique du sol. 13èmes Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse. COMIFER-GEMAS, Nantes, 8-9 novembre 2017.
- Buchmann C., Korz S., Moraru A., Richling E., Sadzik S., Scharfenberger-Schmeer M., Munoz K. (2025). From winery by-product to soil improver? A comprehensive review of grape pomace in agriculture and its effects on soil properties and functions. *Science of the Total Environment*, 982, 179611.
- Cahurel J.Y., Bonnisseau M., Delpuech X., Gontier L., Thévenot F. (2026). Impacts de la gestion organique du sol sur les performances de la vigne. Résultats d'un réseau national d'expérimentations. *Revue des Œnologues*, 53, 199, pp 16-18.
- Calvet R., Chenu C., Houot S. (2011). Les matières organiques des sols. Rôles agronomiques et environnementaux. Ed. La France Agricole, Coll. AgriProduction, 366 pages.
- Chambre d'Agriculture des Pyrénées Orientales, Institut Français de la Vigne et du Vin (2026). Le Coût des Fournitures en Viticulture 2026. Ed. Chambre d'Agriculture des Pyrénées Orientales, 115 pages.
- Chaussod R., Nicolardot B., Catroux G. (1986). Mesure en routine de la biomasse microbienne des sols par la méthode de fumigation au chloroforme. *Science du Sol*, 1986, 2, pp 201-211.
- Culman, S.W., Snapp S.S., Schipanski M.E., Freeman M.A., Beniston L.E., Drinkwater L.E., Franzluebbers A.J., Glover J.D., Grandy A.S., Lal R., Lee J., Maul J.E., Mirsky S.B., Six J., Spargo J.T., Wander M.M. (2012). Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management. *Soil Science Society of American Journal*, 76, 2, pp 494-504.

- Delas J. (2000). Fertilisation de la vigne. Ed. Féret, 160 pages.
- Directive (UE) 2025/2360 du Parlement européen et du Conseil du 12 novembre 2025 relative à la surveillance et à la résilience des sols (directive sur la surveillance des sols). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=OJ:L_202502360.
- Doledec A-F., Panigai L., Descotes A., Moncomble D., Cluzeau D., Pérès G., Chaussod R. (2002). Enherbement permanent et préservation des terroirs en Champagne. Mondiaiviti. ITVFrance, Bordeaux, 4 et 5 décembre 2002.
- Ehrard F., Arrouays D. (2012). Peu de matière organique dans les sols viticoles. *La Vigne*, 239, pp 40-41.
- Fermond N., Mejean I., Vallier, A., Malet O. (2014). Impact de différents apports organiques sur la fertilité des sols en viticulture biologique. *Revue des Cénologues*, 41, 153, pp 17-20.
- Germain C., Georget C., Garcia O., Descotes A., Panigai L., Moncomble D., Perraud A. (2010). Fertilisation et entretien des sols. Quelles sont les conséquences agronomiques de nos pratiques sur le long terme ? *Le Vigneron Champenois*, 131, 3, pp 28-63.
- Girard M.-C., Schwartz C., Jabiol, B. (2011). Etude des sols : description, cartographie, utilisation. Ed. Dunod, Coll. Sciences Sup, 404 pages.
- Houot S., Cambier P., Deschamps M., Benoit P., Bodineau G., Nicolardot B., Morel C., Linères M., Le Bissonnais Y., Steinberg C., Leyval C., Beguiristain T., Capowiez Y., Poitrenaud M., Lhoutellier C., Francou C., Brochier V., Annabi M., Lebeau T. (2009). Compostage et valorisation par l'agriculture des déchets urbains. *Innovations Agronomiques*, 5, pp. 69-81.
- Houot S., Pons M.-N., Pradel M., Savini I., Tibi A. (2014). Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier. Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques. INRA, CNRS, IRSTEA (Expertise scientifique collective).
- Jenkinson D.S., Powlson D.S. (1976). The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V. A method for measuring soil biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 8, pp 209-213.
- Keeney D.R., Bremner, J.M. (1966). Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability. *Agronomy journal*, 58, 5, pp 498-503.
- Korboulewsky N., Masson G., Bonin G., Massiani C., Prone A. (2001). Effets d'un apport de compost de boues de station d'épuration dans un sol d'un vignoble du Sud de la France. *Etude et Gestion des sols*, 8, 3, pp 203-210.
- Lashermes G., Nicolardot B., Parnaudeau V., Thuriès L., Chaussod R., Guillotin M.-L., Linères M., Mary B., Metzger L., Morvan T., Tricaud A., Villette C., Houot S. (2009). Indicator of potential residual carbon in soils after exogenous organic matter application. *European Journal of Soil Science*, 60, pp 297-310.
- Lê S., Josse J., Husson F. (2008). FactoMineR: A Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25, 1, pp 1-18. [doi:10.18637/jss.v025.i01](https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01).
- Lejon D.P.H., Sebastia J., Lamy I., Chaussod R., Ranjard L. (2007). Relationships between soil organic status and microbial community density and genetic structure in two agricultural soils submitted to various types of organic management. *Microbial Ecology*, 53, 4, pp 650-663.
- Mary B., Ferchaud F., Autret B., Chlébowski N., Beaudoin N. (2017). Sait-on quantifier les stocks d'éléments en sol calcaire ? Proposition d'amélioration des protocoles de prélèvement et d'analyse. 13èmes Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse. COMIFER-GEMAS, Nantes, 8-9 novembre 2017.
- de Mendiburu F. (2023). agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research. R package version 1.3-7, <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>.
- Morlat R., Chaussod R. (2008). Long-term additions of organic amendments in a Loire Valley vineyard. I. Effects on properties of a calcareous sandy soil. *American Journal of Enology and Viticulture*, 59, 4, pp 353-363.
- Mouny J.-C., Duparque A., Cahurel J.-Y. (2021). Vers un outil de simulation pour améliorer le conseil sur la gestion du patrimoine organique des sols viticoles : Adaptation du modèle AMG à la vigne. 15èmes Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse. COMIFER-GEMAS, Clermont-Ferrand, 24-25 novembre 2021.
- Neyroud J. A., Christinet G. (1983). Risques de tassement dans les sols viticoles en relation avec l'application de diverses techniques culturales. *Revue suisse de Viticulture Arboriculture Horticulture*, 15, 2, pp 113-117.
- Nouaïm R., Chaussod R. (2015). Biodiversité microbienne et qualité du sol : des indicateurs à portée agronomique. 12èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse, COMIFER-GEMAS, Lyon, 18-19 novembre 2015.
- Novara A., Catania V., Tolone M., Gristina L., Laudicina V. A., Quatrini P. (2020). Cover crop impact on soil organic carbon, nitrogen dynamics and microbial diversity in a Mediterranean semiarid vineyard. *Sustainability*, 12, 3256. DOI: 10.3390/su12083256.
- Perez-de-los-Reyes C., Amoros J. A., Garcia Navarro F. J., Bravo S., Jimenez Ballesta R., Chacon J. L., Martinez J. (2012). Effects of sugar foam amendment on the properties of an acid vineyard soil. 9e Congrès des terroirs vitiviniques. Université de Bourgogne, Institut Jules Guyot, Bureau Interprofessionnel des Vins de Bourgogne et Comité Interprofessionnel du Vin de Champagne, Dijon-Reims, 25-29 juin 2012.
- Pinamonti F. (1998). Compost mulch effects on soil fertility, nutritional status and performance of grapevine. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 51, 3, pp 239-248.
- Priori S., Agnelli A.E., Valboa G., Knapic M., Schroers H.-J. et al. (2018). Effect of organic treatments on soil carbon and nitrogen dynamics in vineyard. EQA (Imola) : environmental quality ; qualité de l'Environnement ; qualità ambientale, 31, pp 1-9.
- Rémy J. C., Marin-Lafèche A. (1976). L'entretien organique des terres. Coût d'une politique de l'humus. *Entreprises agricoles*, novembre 1976, pp 63-67.
- Ruiz-Colmenero M., Bienes R., Eldridge D. J., Marques M. J. (2013). Vegetation cover reduces erosion and enhances soil organic carbon in a vineyard in the central Spain. *Catena*, 104, pp 153-160.
- Strickland M.S., Thomason W.E., Avera B., Franklin J., Minick K., Yamada S., Badgley B.D (2019). Short-Term Effects of Cover Crops on Soil Microbial Characteristics and Biogeochemical Processes across Actively Managed Farms. *Agrosyst. Geosci. Environ.*, 2.
- Weil R. R., Islam K.R., Stine M.A., Gruver J.B., Samson-Liebig S.E. (2003). Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture*, 18, 1, pp 3-17.
- Whitelaw-Weckert M. A., Rahman, L., Hutton R. J., Coombes N. (2007). Permanent swards increase soil microbial counts in two Australian vineyards. *Applied Soil Ecology*, 36, 2-3, pp 224-232.

Annexe 1 : Liste des sigles et abréviations utilisés dans l'article

Appendix 1: List of acronyms and abbreviations used in the article

C : carbone organique
MO : matière organique
PRO : produit résiduaire organique
ISMO : indice de stabilité de la matière organique
MS : matière sèche
MF : matière fraîche
N : azote
CECm : capacité d'échange cationique Metson

Parcelles :

30 : parcelle de Costières de Nîmes
69 : parcelle de Beaujolais-Villages
81F : parcelle de Fronton
81G : parcelle de Gaillac
49t : parcelle de Anjou Villages Brissac travaillée sur la totalité
49e : parcelle de Anjou Villages Brissac enherbée sur l'inter-rang
84 : parcelle de Côtes du Rhône

Modalités :

T : témoin désherbé, sans apport de MO exogène
DV : compost de déchets verts, apport tous les 4 ans
DV2 : compost de déchets verts, apport tous les 2 ans
M : compost de marcs de raisins, apport tous les 4 ans
CC : compost du commerce, apport tous les 4 ans
CC2 : compost du commerce, apport tous les 2 ans
E : enherbement de l'inter-rang
Te : inter-rang enherbé du témoin de la parcelle 81G
DVe : inter-rang enherbé du compost de déchets verts de la parcelle 81G

Analyses biologiques :

Cm : carbone microbien
Cmc : carbone microbien, exprimé en % du C organique total
ABM : azote biologiquement minéralisable
ABMc : azote biologiquement minéralisable, exprimé en % du N total
MOL : carbone actif
MOLc : carbone actif, exprimé en % du C organique total
AWCD : activité métabolique moyenne
IBF : indice de biodiversité fonctionnelle

Pour la représentation graphique des ACP, la codification présentée ci-dessus pour les modalités et les parcelles a été reprise en juxtaposant les deux dans cet ordre. Pour la parcelle 81G, un « e » a été ajouté à la fin du code pour indiquer les prélèvements réalisés sur la partie enherbée pour T et DV

Annexe 2 : Caractéristiques des composts du commerce utilisés

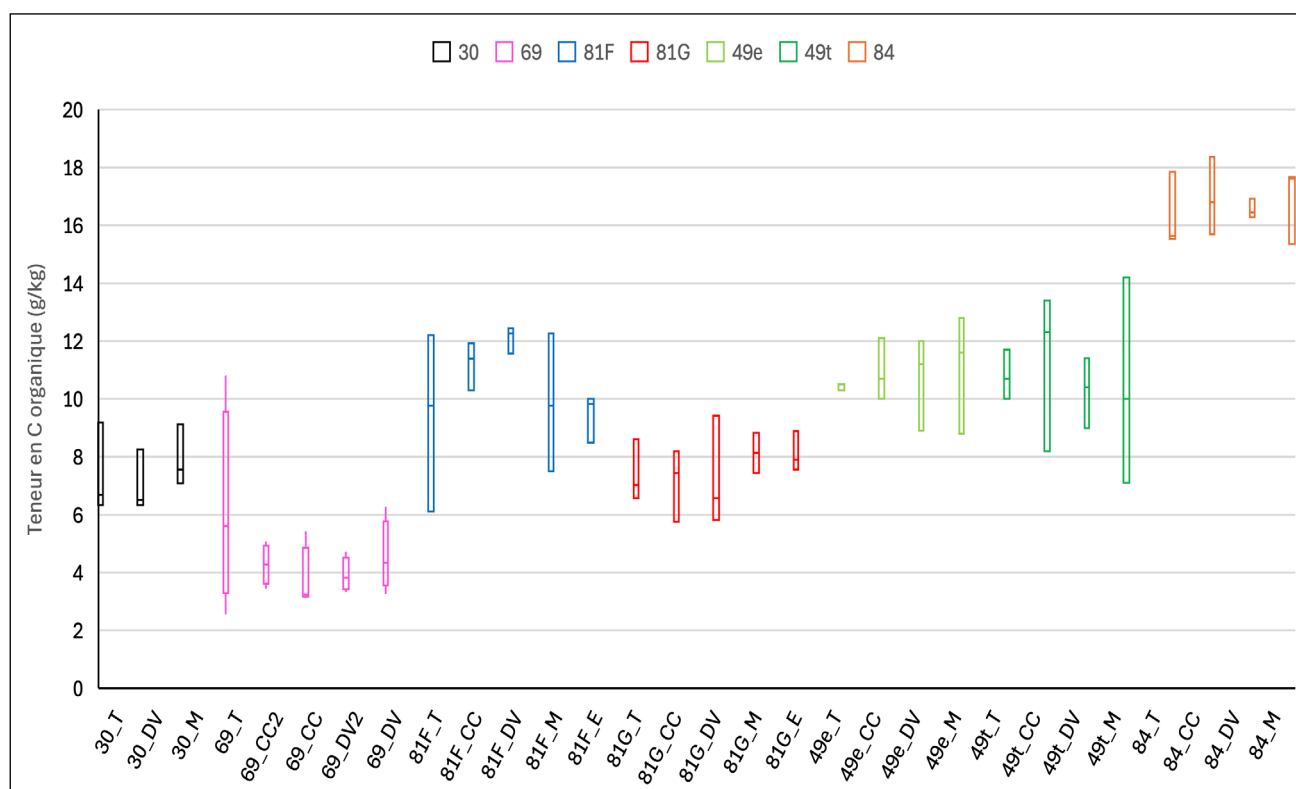
Appendix 2: Characteristics of commercial composts

Le compost du commerce (CC) utilisé sur la parcelle 69 est un amendement organique issu du compostage d'un mélange de fumier de mouton, de pulpes végétales et de coques de cacao.

Le compost du commerce utilisé sur les autres parcelles est un amendement organique issu du compostage pendant au moins 6 mois d'un mélange de fumier de mouton, de tourteaux végétaux, de pulpes de fruits et de bourres de laine, additionné d'un stimulateur de croissance racinaire et enrichi en magnésium.

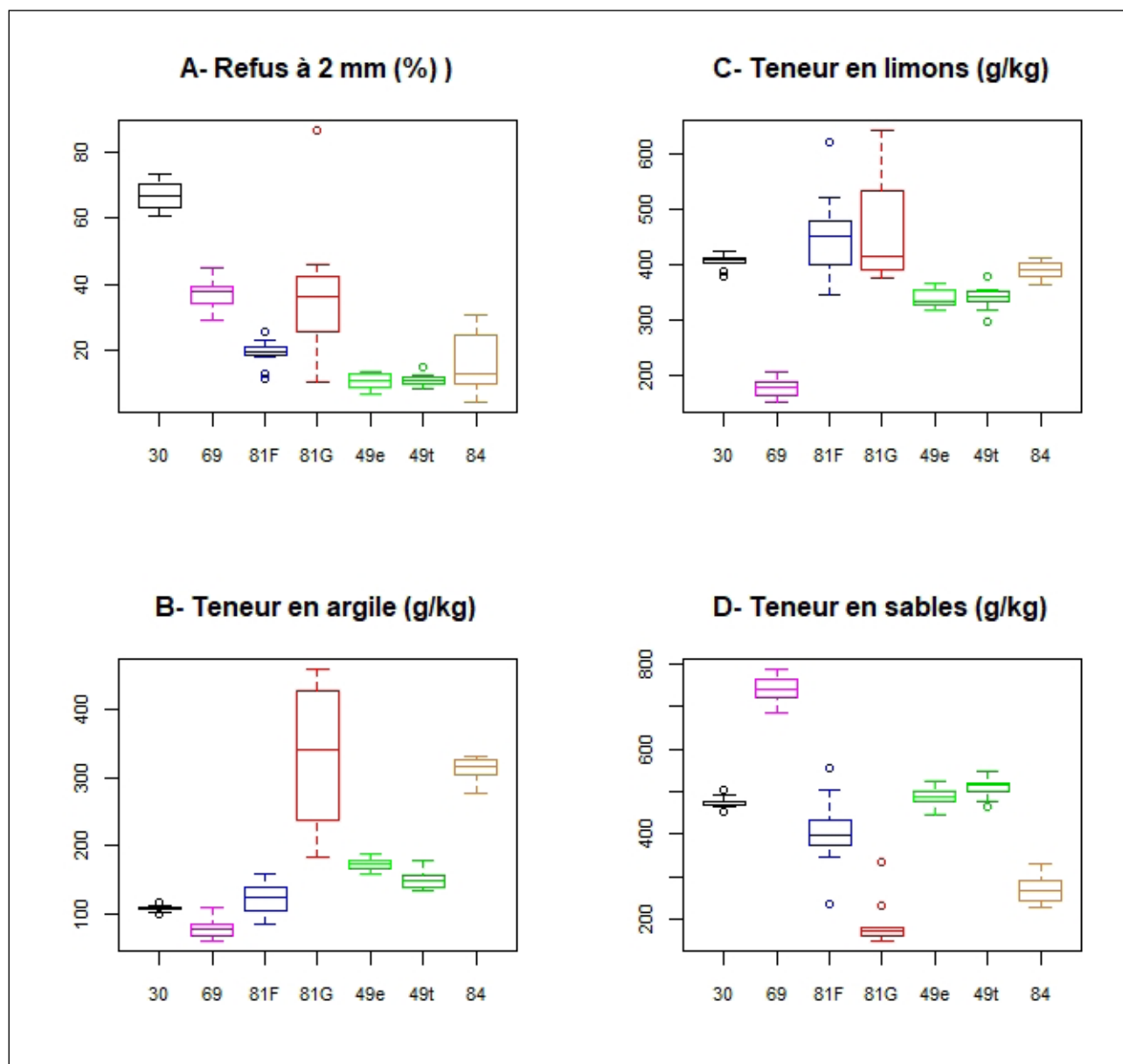
Annexe 3 : Répartition de la teneur en carbone organique du sol (g/kg) par modalité et par parcelle - Point 0 – 0-15 cm

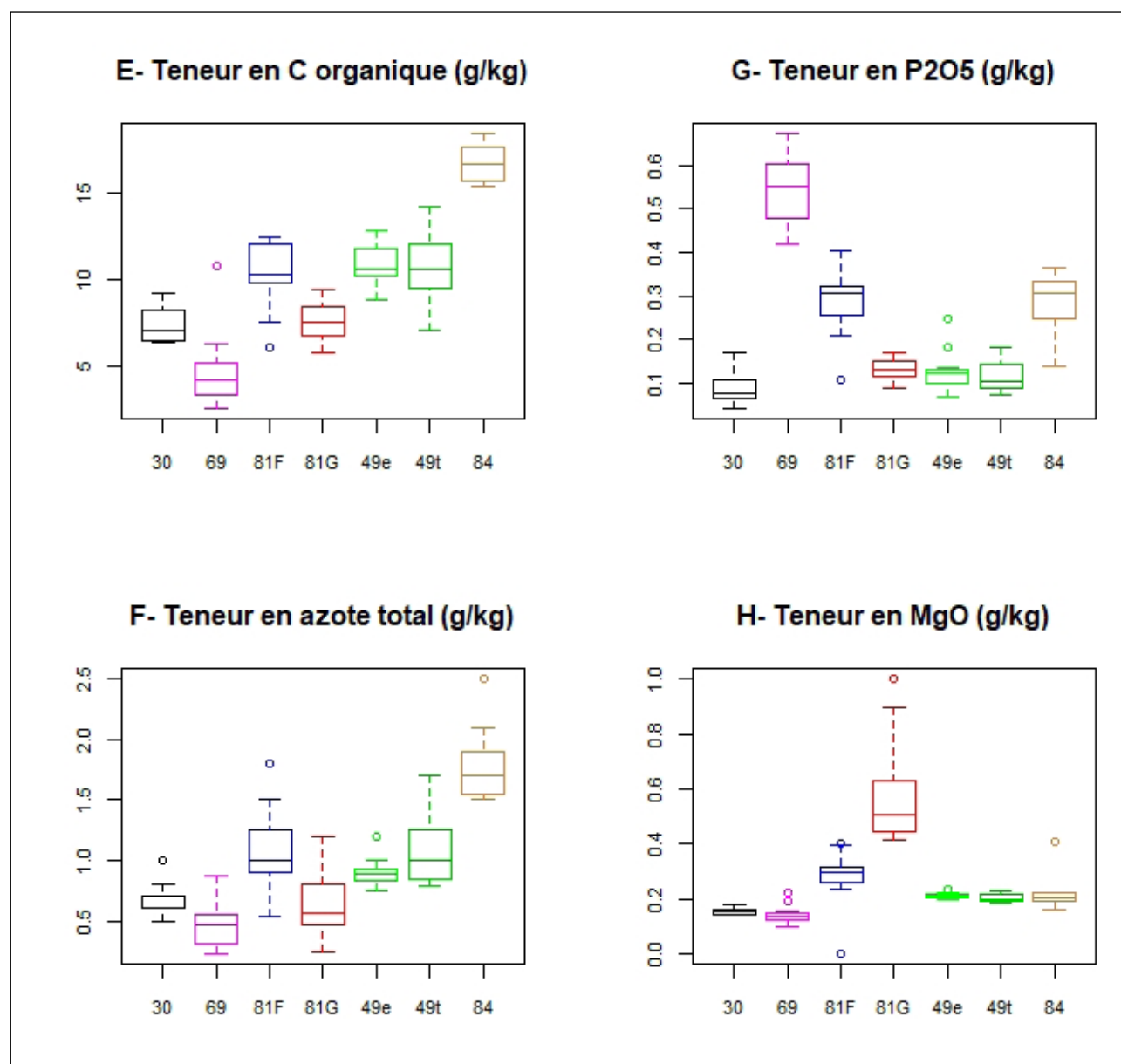
Appendix 3: Distribution of soil organic carbon content (g/kg) by modality and plot - Point 0 – 0-15 cm



Annexe 4 : Répartition des différents paramètres mesurés par parcelle - Point 0 – 0-15 cm

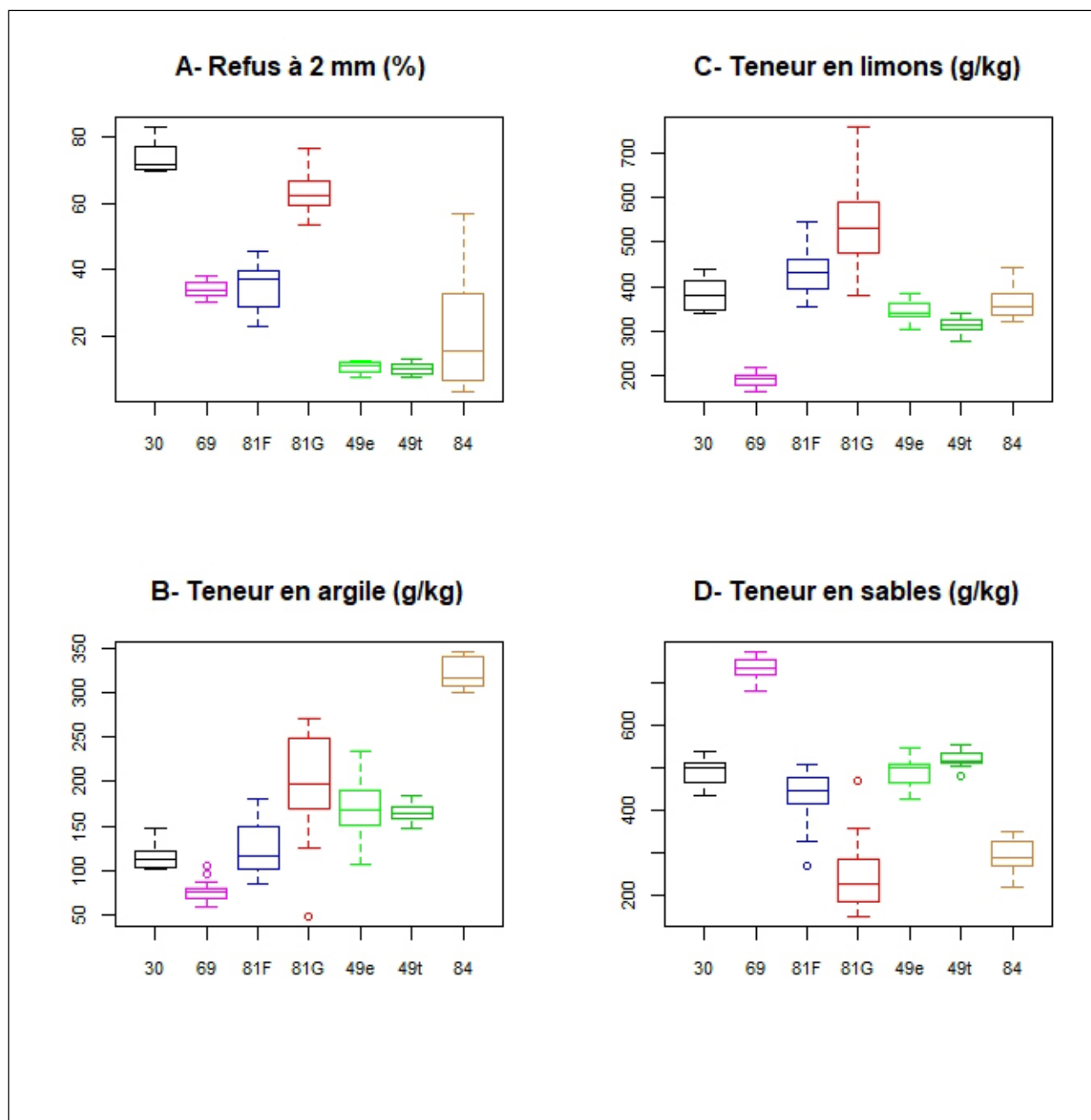
Appendix 4: Distribution of the different parameters measured by plot - Point 0 - 0-15 cm

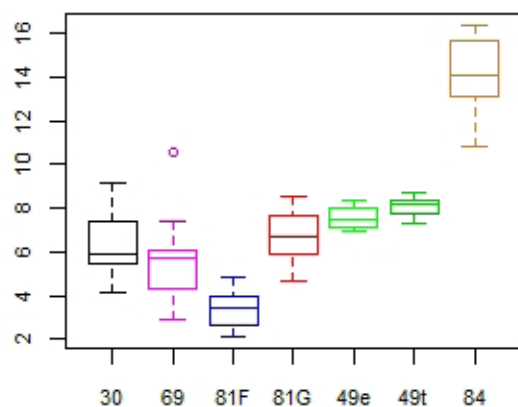
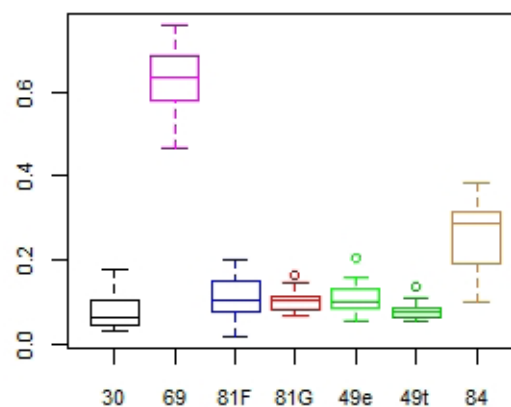
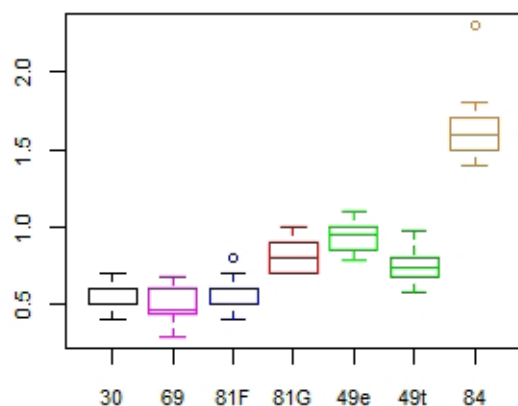
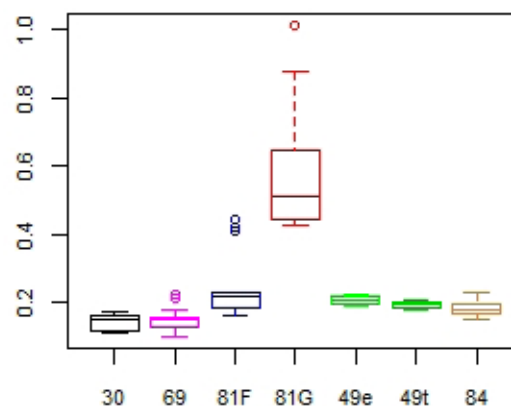


Annexe 4 : Répartition des différents paramètres mesurés par parcelle - Point 0 – 0-15 cm*Appendix 4: Distribution of the different parameters measured by plot - Point 0 - 0-15 cm*

Annexe 5 : Répartition des différents paramètres mesurés par parcelle – Point 0 – 15-30 cm

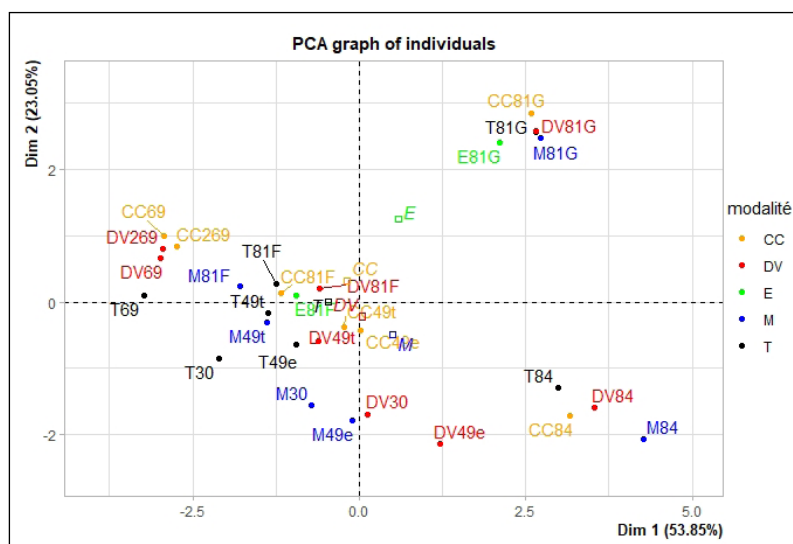
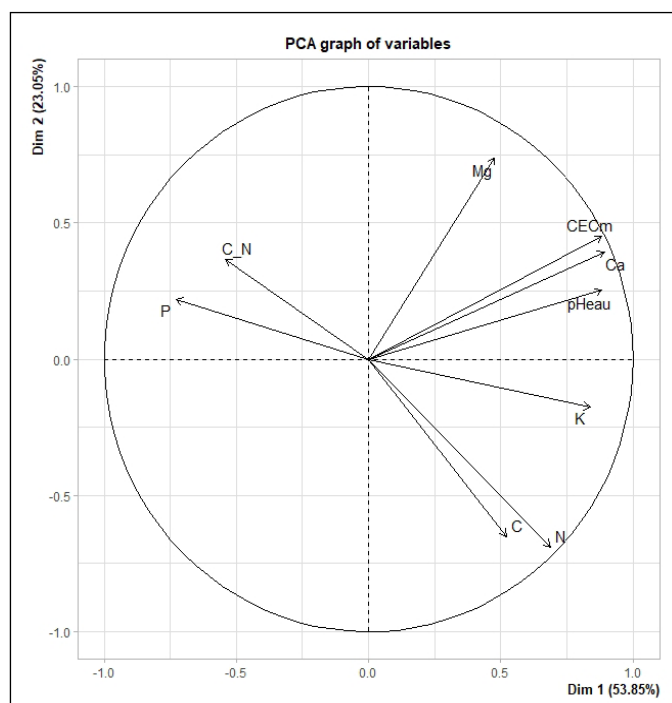
Appendix 5: Distribution of the different parameters measured by plot - Point 0 – 15-30 cm



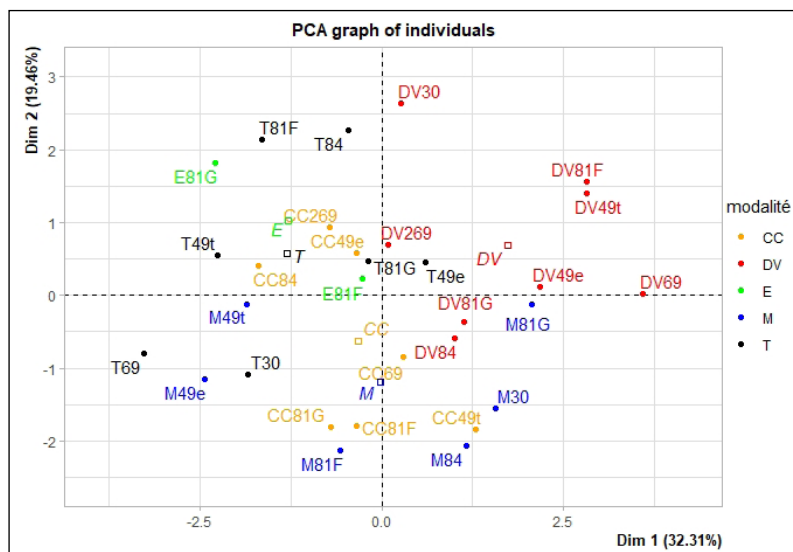
Annexe 5 : Répartition des différents paramètres mesurés par parcelle – Point 0 – 15-30 cm*Appendix 5: Distribution of the different parameters measured by plot - Point 0 – 15-30 cm***E- Teneur en C organique (g/kg)****G- Teneur en P2O5 (g/kg)****F- Teneur en azote total (g/kg)****H- Teneur en MgO (g/kg)**

Annexe 6 : Résultats de l'ACP sur les moyennes des données sol 0-15 cm à t+8 (modalités) : projection des variables (à gauche) et projection des individus (à droite) sur les deux premières dimensions de l'ACP

Appendix 6: Results of PCA on averages of 0-15 cm soil data at t+8 (modalities): projection of variables (left) and projection of individuals (right) on the first two dimensions of PCA



Appendix 7: Results of PCAcr on average soil data 15-30 cm at t+8 years (modalities): projection of variables (left) and projection of individuals (right) on the first two dimensions of PCA



**Annexe 8 : Résultats statistiques des analyses biologiques de terre.
0-20 cm (écarts-types entre parenthèses en italique ; les tests statistiques
sont indiqués entre traitements au sein d'un même essai)**

Sur la parcelle 81G, des prélèvements supplémentaires ont été réalisés sur l'inter-rang enherbé des modalités T (Te) et DV (DVe), en plus des prélèvements réalisés sur la partie désherbée mécaniquement.

Parcelle	Modalité	Carbone g/kg	Azote total g/kg	C/N	Cm mg C/kg	Cm % Ct
30	Test stat	S	S	ns	ns	S
	T	11,9 (0,4) c	1,00 (0,00) b	11,8 (0,2)	138 (26)	1,7 (0,3) a
	DV	20,7 (1,5) a	1,83 (0,25) a	11,6 (0,9)	157 (63)	1,0 (0,2) b
	M	16,5 (2,1) b	1,53 (0,24) ab	10,8 (0,7)	140 (34)	1,3 (0,2) ab
69	Test stat	S	S	ns	S	ns
	T	5,6 (0,7) b	0,56 (0,03) b	10,1 (0,9)	51 (32) b	1,0 (0,5)
	CC2	6,8 (0,4) ab	0,69 (0,03) b	9,9 (0,6)	77 (32) ab	1,4 (0,4)
	CC	5,7 (1,7) b	0,62 (0,13) b	8,9 (1,0)	78 (11) ab	2,0 (0,5)
	DV2	9,2 (1,2) a	0,92 (0,09) a	10,0 (0,6)	95 (48) a b	1,3 (0,4)
	DV	6,6 (1,6) ab	0,72 (0,16) ab	9,1 (0,5)	105 (21) a	2,0 (0,5)
81F	Test stat	S	S	ns	S	S
	T	7,6 (0,9) b	0,80 (0,00) b	9,5 (1,1)	125 (10) c	1,7 (0,1) cd
	CC	10,2 (2,2) ab	0,87 (0,05) ab	11,6 (2,0)	159 (26) c	1,6 (0,1) d
	DV	10,5 (1,1) ab	0,90 (0,08) ab	11,8 (1,8)	200 (10) b	1,9 (0,2) bc
	M	10,6 (0,8) a	0,87 (0,05) ab	12,2 (1,2)	215 (17) ab	2,1 (0,2) ab
	E	9,8 (1,0) ab	1,00 (0,08) a	9,8 (0,6)	255 (33) a	2,6 (0,1) a
81 G	Test stat	S	S	S	S	S
	T	9,6 (0,6) d	1,03 (0,05) d	9,3 (0,9) bc	266 (43) b	2,8 (0,4) ab
	CC	9,8 (0,5) cd	1,10 (0,00) cd	8,9 (0,5) c	308 (27) b	3,1 (0,3) a
	DV	13,1 (0,4) ab	1,13 (0,05) bcd	11,6 (0,2) a	266 (7) b	2,0 (0,0) b
	M	12,3 (0,8) bc	1,17 (0,05) bcd	10,5 (0,7) abc	257 (23) b	2,1 (0,3) b
	E	14,1 (0,6) a	1,23 (0,021) abc	11,7 (1,8) a	487 (111) a	3,4 (0,7) a
	Te	14,3 (0,1) a	1,27 (0,05) ab	11,3 (0,4) a	535 (77) a	3,7 (0,5) a
	DVe	15,6 (3,1) a	1,40 (0,08) a	11,1 (0,6) ab	533 (101) a	3,4 (0,2) a
49t	Test stat	S	S	ns	S	ns
	T	9,9 (0,4) b	1,03 (0,05) b	9,7 (0,7)	210 (23) b	2,3 (0,3)
	CC	14,8 (0,5) a	1,27 (0,05) ab	11,5 (0,2)	327 (71) a	2,5 (0,4)
	DV	12,8 (0,7) ab	1,30 (0,08) a	10,1 (0,2)	311 (56) a	2,8 (0,6)
49e	M	14,4 (1,5) a	1,30 (0,08) a	11,1 (0,9)	273 (17) ab	2,2 (0,3)
	Test stat	ns	ns	ns	ns	ns
	T	14,4 (0,7)	1,33 (0,05)	10,9 (0,2)	539 (76)	4,3 (0,6)
	CC	17,6 (2,5)	1,63 (0,31)	11,0 (0,6)	657 (157)	4,2 (0,4)
84	DV	20,6 (5,1)	1,87 (0,25)	10,8 (1,2)	635 (133)	3,6 (0,3)
	M	20,3 (5,2)	1,70 (0,29)	12,0 (1,3)	657 (143)	3,6 (0,6)
	Test stat	ns	ns	S	ns	ns
	T	15,9 (0,9)	1,82 (0,09)	8,8 (0,2) b	409 (37)	2,7 (0,1)
84	CC	17,9 (1,2)	1,80 (0,09)	10,0 (0,8) a	558 (105)	3,4 (0,6)
	DV	18,1 (2,3)	1,84 (0,11)	9,8 (0,7) a	455 (72)	2,6 (0,1)
	M	17,0 (1,4)	1,96 (0,10)	8,7 (0,4) b	388 (75)	2,4 (0,4)

Appendix 8: Statistical results of soil biological analysis. 0-20 cm (standard deviations in italics in brackets; statistical tests are indicated between treatments within the same trial)

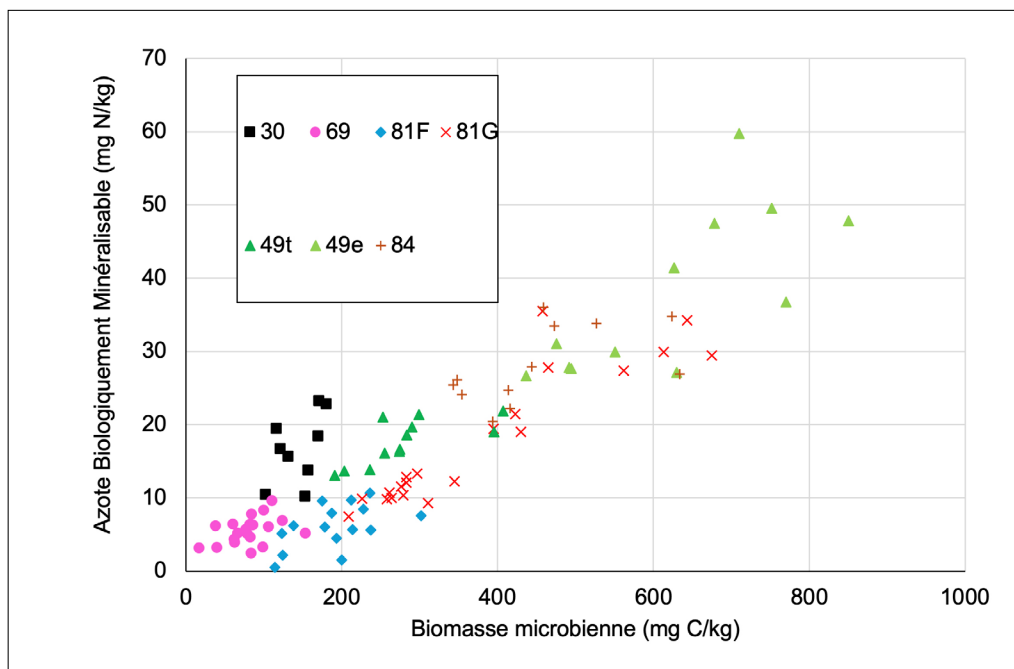
On plot 81G, additional samples were taken from the grassed inter-row areas of treatments T (Te) and DV (DVe), in addition to the samples taken from the mechanically weeded area.

Suite du tableau de la page 58

Parcelle	Modalité	C actif mg C/kg	C actif % Ct	ABM mg N/kg	ABM % Nt	AWCD	IBF
30	Test stat	S	ns	S	ns	ns	ns
	T	909 (51) b	7,6 (0,6)	11 (3) b	1,6 (0,3)	1,2 (0,1)	2,6 (0,4)
	DV	1321 (151) a	6,4 (0,5)	19 (5) a	1,4 (0,1)	1,2 (0,1)	2,3 (0,4)
	M	1208 (107) ab	7,4 (0,6)	19 (4) a	1,8 (0,1)	1,1 (0,0)	2,3 (0,3)
69	Test stat	S	S	S	S	S	S
	T	325 (47) b	5,8 (0,3) b	4 (1) b	0,9 (0,1) bc	0,7 (0,1) c	1,0 (0,1) c
	CC2	537 (53) a	7,9 (0,3) a	7 (1) a	1,3 (0,1) ab	1,1 (0,1) a	2,1 (0,2) a
	CC	532 (51) a	10,2 (2,7) a	6 (1) a	1,3 (0,2) a	0,8 (0,1) bc	1,3 (0,2) b
	DV2	539 (51) a	5,9 (0,6) b	4 (2) b	0,5 (0,3) c	0,9 (0,1) ab	2,0 (0,5) a
	DV	473 (60) ab	7,5 (1,7) ab	6 (3) a	1,2 (0,4) ab	0,8 (0,1) bc	1,2 (0,2) bc
81F	Test stat	S	ns	S	ns	ns	ns
	T	553 (49) b	7,3 (0,2)	3 (2) b	0,4 (0,3)	1,3 (0,1)	2,1 (0,5)
	CC	667 (89) ab	6,7 (0,9)	7 (2) ab	0,8 (0,2)	1,4 (0,2)	2,6 (0,8)
	DV	788 (100) a	7,5 (0,7)	6 (3) ab	0,7 (0,4)	1,3 (0,2)	2,4 (0,7)
	M	673 (53) ab	6,4 (0,1)	5 (1) ab	0,6 (0,0)	1,1 (0,1)	2,0 (0,2)
	E	704 (16) a	7,2 (0,6)	9 (1) a	0,9 (0,2)	1,1 (0,1)	1,8 (0,1)
81 G	Test stat	S	S	S	S	S	ns
	T	634 (44) b	6,7 (0,9) a	9 (1) b	0,9 (0,2) c	0,5 (0,1) b	1,3 (0,3)
	CC	634 (38) b	6,5 (0,2) a	13 (0) b	1,2 (0,0) b	0,8 (0,1) a	1,8 (0,2)
	DV	644 (42) b	4,9 (0,4) b	10 (1) b	0,9 (0,0) c	0,6 (0,1) b	1,4 (0,5)
	M	625 (18) b	5,1 (0,3) b	11 (1) b	0,9 (0,1) c	0,5 (0,1) b	1,2 (0,1)
	E	753 (73) a	5,3 (0,4) ab	25 (7) a	2,0 (0,2) a	0,8 (0,1) a	2,0 (0,2)
	Te	765 (14) a	5,4 (0,2) ab	25 (5) a	2,0 (0,4) a	0,8 (0,1) a	2,1 (0,6)
	DVe	872 (28) a	5,8 (1,0) ab	31 (3) a	2,2 (0,2) a	0,8 (0,1) a	1,5 (0,3)
49t	Test stat	S	S	S	ns	ns	ns
	T	698 (17) b	7,0 (0,4) a	14 (1) b	1,5 (0,1)	1,0 (0,2)	1,7 (0,5)
	CC	922 (104) a	6,2 (0,5) ab	20 (3) a	1,8 (0,2)	1,0 (0,1)	2,0 (0,5)
	DV	878 (56) a	6,9 (0,8) a	18 (1) ab	1,6 (0,2)	0,9 (0,1)	1,9 (0,2)
	M	765 (41) b	5,4 (0,4) b	19 (2) a	1,7 (0,1)	1,0 (0,0)	2,0 (0,2)
49e	Test stat	ns	ns	S	ns	ns	ns
	T	748 (44)	5,2 (0,5)	31 (1) b	2,3 (0,0)	1,3 (0,1)	2,6 (0,7)
	CC	974 (223)	5,5 (0,6)	42 (9) ab	2,6 (0,1)	1,3 (0,1)	2,8 (0,5)
	DV	926 (135)	4,6 (0,5)	48 (9) a	2,5 (0,2)	1,3 (0,1)	2,8 (0,5)
	M	911 (194)	4,6 (0,6)	46 (16) ab	2,6 (0,4)	1,4 (0,0)	2,7 (0,6)
84	Test stat	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	T	1134 (60)	7,1 (0,2)	28 (5)	1,6 (0,2)	0,9 (0,2)	2,7 (nd)
	CC	1186 (55)	6,7 (0,4)	28 (5)	1,7 (0,3)	0,9 (0,1)	2,8 (nd)
	DV	1223 (123)	6,8 (0,2)	27 (7)	1,6 (0,3)	1,0 (0,0)	3,6 (nd)
	M	1160 (146)	6,8 (0,7)	28 (5)	1,6 (0,2)	0,8 (0,1)	2,9 (nd)

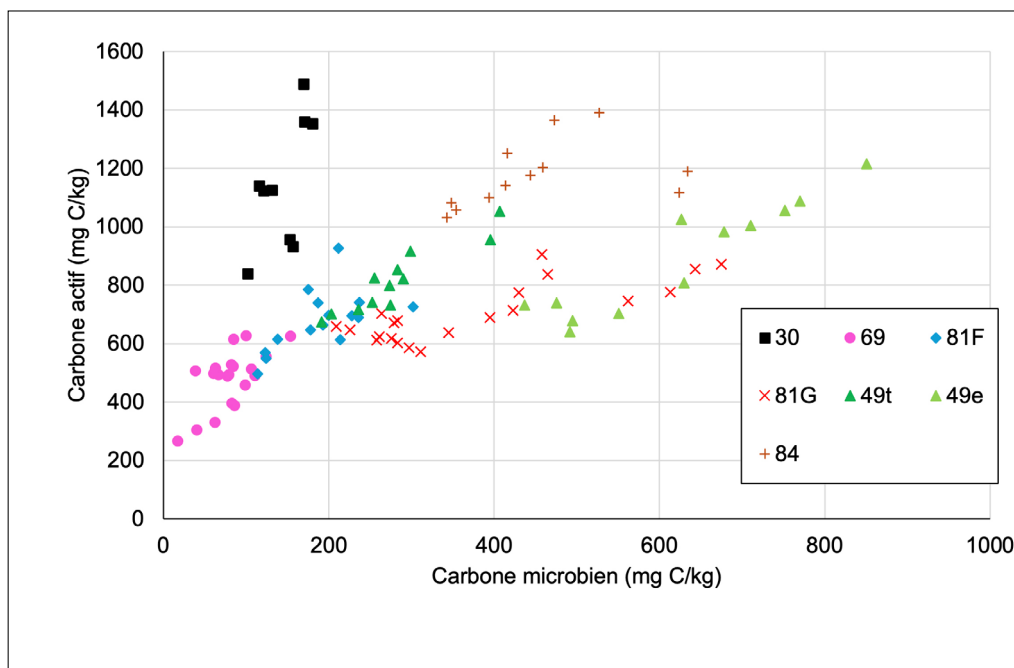
Annexe 9 : Relation entre le carbone microbien du sol (mg C/kg) et ABM (mg N/kg)

Appendix 9: Relationship between soil microbial carbon (mg C/kg) and Biologically Mineralizable Nitrogen (mg N/kg)



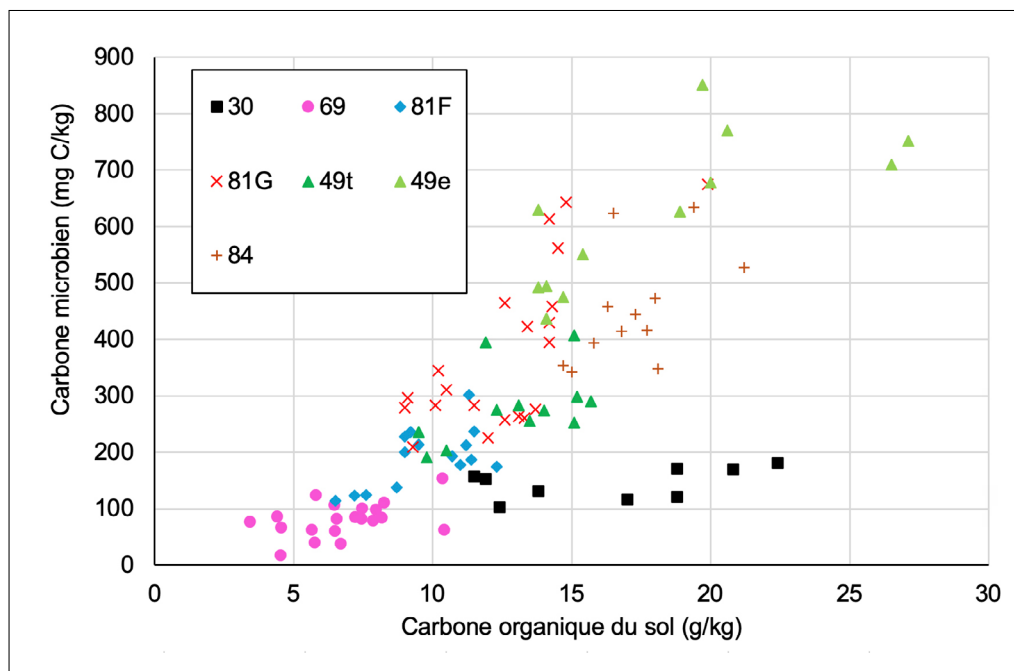
Annexe 10 : Relation entre le carbone microbien du sol (mg C/kg) et le carbone actif (mg C/kg)

Appendix 10: Relationship between soil microbial carbon (mg C/kg) and active carbon (mg C/kg)



Annexe 11 : Relation entre la teneur en carbone organique du sol (g/kg) et le carbone microbien (mg C/kg)

Appendix 11: Relationship between soil organic carbon (g/kg) and microbial carbon (mg C/kg)



Annexe 12 : Résultats de l'ACP sur les moyennes des données biologiques de terre (modalités) : projection des variables (à gauche) et projection des individus (à droite) sur les deux premières dimensions de l'ACP

Cmc, MOLc et ABMc sont les valeurs relatives par rapport au C ou au N respectivement pour Cm, MOL et ABM

Appendix 12: Results of PCA on averages of biological soil data (modalities): projection of variables (left) and projection of individuals (right) on the first two dimensions of PCA

Cmc, MOLc and ABMc are the relative values with respect to C or N respectively for Cm, MOL and ABM

