

---

Caractérisation multi-variables  
et multi-échelles d'un sol sous différents  
systèmes de culture

---

## RÉSUMÉ

La prédiction des stocks de C des sols représente un enjeu majeur dans le double contexte des changements climatiques et d'évolution rapide des systèmes de culture. L'amélioration des modèles prédictifs de l'évolution de ces stocks passe par une meilleure connaissance et compréhension des processus qui régulent la décomposition des MOS. Les essais au champ de longue durée où différents systèmes de culture mis en place afin de réaliser une évaluation de leurs potentialités agronomiques, constituent d'excellents outils pour l'étude de la dynamique des MOS.

Deux démarches d'étude visant à exploiter la variabilité des caractéristiques d'un sol sous des systèmes de culture contrastés pour expliquer les dynamiques des MOS ont été poursuivies. La première démarche fut de caractériser le sol sous les différents systèmes (via des analyses élémentaires en C et N, des mesures de densité apparente, de biomasse microbienne, de structure des communautés microbiennes, et de minéralisation basale (sur 70 jours), afin de déterminer quels sont les paramètres influençant le plus la décomposition du C des sols. La seconde démarche a été d'analyser à fine échelle des agrégats provenant des différents systèmes de culture, dans le but de voir si une relation existait entre architecture du réseau poral et MO (quantité et qualité).

Les résultats de la première partie montrent une différenciation nette des caractéristiques du sol sous système SCV par rapport à celles du sol sous systèmes conventionnel et biologique : concentration des matières organiques dans les premiers centimètres, biomasse microbienne et densité apparente plus élevées, structure des communautés avec une composante fongique plus importante, et minéralisation du C plus lente. Dans la seconde partie, le sol sous système SCV s'avère être celui avec la plus grande variabilité en terme de quantité et composition de la MO et également en terme d'architecture du réseau poral.

### Mots-clés:

*Système de culture ; Conventionnel ; Biologique ; Sous Couvert Végétal permanent; Microtomographie à rayons X ; Porosité; Distribution de la matière organique.*

# 1. Introduction

Pour répondre aux différents objectifs de production agricole que sont l'augmentation de la demande en produits agricoles, le maintien de la rentabilité et de l'emploi agricole, et cela en tenant compte des exigences environnementales telles que la lutte contre la pollution, la préservation de la biodiversité, la recherche agronomique doit mettre au point de nouveaux modes de production. La mise au point d'essais au champ de longue durée, où sur un même sol sont appliqués différents systèmes de culture, permet une évaluation de ces systèmes.

Dans la compréhension des processus régulant les dynamiques des MOS, l'analyse des impacts sur le sol de ces systèmes de culture apparaît comme un formidable outil. Ce type de suivi a d'ores et déjà montré les effets contrastés des pratiques et systèmes de culture sur différents facteurs de la décomposition des MOS tels que la nature des apports organiques, l'abondance et la nature des décomposeurs (ex. Kong et al., 2011) et la structure du sol (ex. Balesdent et al., 2000), et sur le stockage de C dans les sols. Ainsi il semblerait que les systèmes de culture en agriculture biologique aient des impacts variables sur le stockage de C (Robertson and Campbell, 1997; Robertson et al., 2000; Leifeld and Fuhrer, 2010) ; que les systèmes sans labour et avec une couverture végétale puissent stocker du C sur les premiers centimètres de profondeur (West and Post, 2002; Lal, 2004; Franzluebbers, 2005; Corbeels et al., 2006; Virto et al., 2012). Pour un même sol sous différents systèmes de culture, on peut disposer de structures et de statuts microbiens différenciés, et analyser leurs effets respectifs sur la décomposition des MOS.

Dans la première partie de ce chapitre nous proposons de caractériser un sol sous trois systèmes de culture contrastés, afin de déterminer quels sont les paramètres physiques et/ou biologiques pour lesquels la différenciation a été la plus importante et d'en analyser les conséquences possibles sur la dynamique des MO associées.

Des études géostatistiques ont montré que la grande majorité de la variabilité spatiale de la décomposition du carbone des sols est due à des processus ayant lieu à l'échelle micrométrique (Robertson et al., 1997; Herbst et al., 2009; Lamparter et al., 2009). Les communautés microbiennes vivent dans le réseau poral et donc leur accès aux substrats

organiques, à l'oxygène et à l'eau dépend de leur localisation au sein du réseau poral, ainsi que de la distribution du carbone organique (Sexstone et al., 1985; Prove et al., 1990; Linnquist et al., 1997; Wang et al., 2001). Ainsi une étude récente a montré l'existence d'une biogéographie microbienne à l'échelle porale (Ruamps et al., 2011). La question est à présent de savoir si il en va de même pour la distribution de la MO au sein du réseau poral. A notre connaissance, la relation entre réseau poral et matière organique n'a pas été étudiée ceci probablement à cause des difficultés méthodologiques liées à de telles analyses.

Dans la seconde partie nous nous intéresserons donc à cette relation entre réseau poral et matière organique. Le but sera d'identifier les corrélations pouvant exister entre la structure du sol et la distribution du carbone organique, à l'échelle des agrégats de sol. Dans cette optique nous analyserons la porosité, l'abondance et la qualité des matières organiques dans des agrégats d'un sol sous différents systèmes de culture. Cette relation est d'une grande importance dans la compréhension des phénomènes de minéralisation des MOS, car elle se situe à l'échelle de l'habitat microbien.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Présentation du site expérimental

Le site expérimental de La Cage situé à l'INRA de Versailles (France), est un essai de longue durée, où l'application de quatre systèmes de culture (conventionnel ou intensif, intégré, biologique et semis direct Sous Couvert Végétal permanent (SCV)) a conduit à la différenciation du sol. Mis en place en 1997, cet essai a pour but d'évaluer les performances environnementales et techniques de ces quatre systèmes de culture dans le contexte de l'agriculture du grand bassin parisien, c'est-à-dire avec une forte proportion de blé (rotation un an sur deux) et l'absence d'élevage donc de fertilisant organiques. Les caractéristiques générales du sol sont présentées dans le tableau II.1. Le dispositif de l'essai comprend deux blocs (I et II) subdivisés en quatre sous blocs correspondant aux quatre systèmes de culture. Ces sous blocs sont eux même découpés en deux parcelles de façon à ce que le blé soit présent tous les ans sur tous les systèmes de culture (Figure II.1).

Tableau II.1: Caractéristiques principales du sol sur 0-25 cm avant implantation des différents systèmes (d'après le rapport du projet Dmostra, 2005).

<b>Texture</b>	<i>mg.g<sup>-1</sup> sol</i>	Argiles (<2 µm)	167
	<i>mg.g<sup>-1</sup> sol</i>	Limons fins (2-20 µm)	182
	<i>mg.g<sup>-1</sup> sol</i>	Limons grossiers (20-50 µm)	380
	<i>mg.g<sup>-1</sup> sol</i>	Sables fins (50-200 µm)	236
	<i>mg.g<sup>-1</sup> sol</i>	Sables grossiers (200-2000 µm)	35
<b>Matières organiques</b>	<i>mg.g<sup>-1</sup> sol</i>	C	10,0
	<i>mg.g<sup>-1</sup> sol</i>	N	1,01
<b>pH (eau)</b>			7,4

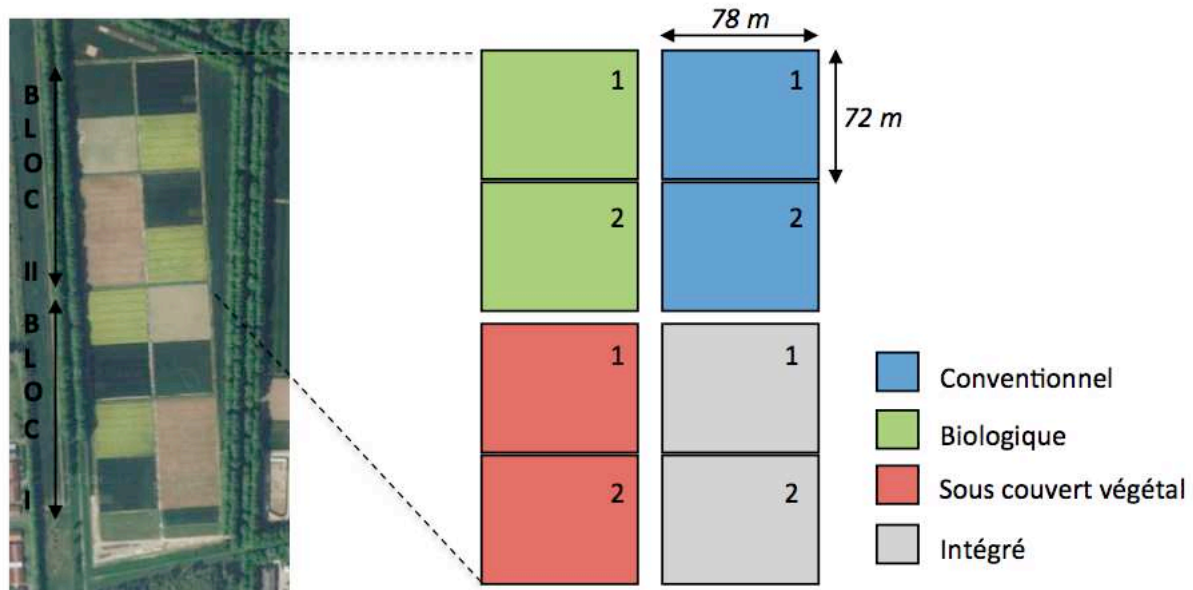


Figure II.1: Le dispositif de l'essai de La Cage situé à l'INRA de Versailles (France).

Les quatre systèmes de culture se distinguent par leurs objectifs (rendements, biomasse, ...), leurs contraintes associées et donc par les voies qui seront mises en œuvre pour atteindre ces objectifs tout en s'adaptant à ces contraintes. Tout d'abord, le système conventionnel est fondé sur la recherche de forts rendements d'où l'utilisation de variétés très productives et de bonnes qualités boulangères pour le blé, d'amendements azotés en grande quantité et de pesticides, engendrant de forts risques environnementaux. Afin de favoriser le fonctionnement racinaire le labour est pratiqué tous les ans sauf après la culture de pois. Avec ces hauts niveaux de productions ce système garantit la rentabilité économique. Ce système correspond à celui dominant actuellement la région. Ensuite, le système intégré a pour objectif de maintenir la marge économique en diminuant les quantités d'intrants apportés et en acceptant une baisse des rendements. Ainsi les risques d'impact environnementaux sont limités. Le labour est pratiqué un an sur deux pour favoriser le bon fonctionnement racinaire et pour limiter les risques parasitaires et de maladies. Puis le système Sous Couvert Végétal permanent est basé sur la suppression du travail du sol et le maintien d'une plante de couverture (fétuque puis luzerne) y compris pendant le cycle de la culture principale. La culture commerciale est implantée dans la culture de couverture contrôlée par fauchage ou l'utilisation d'herbicide. Enfin, le système biologique satisfait le cahier des charges de l'agriculture biologique interdisant l'emploi d'intrant de synthèse tels que les pesticides chimiques et les engrais minéraux. De manière à lutter contre les maladies et les mauvaises herbes, des variétés résistantes et le travail du sol sont utilisés. Dans le cas de la région du

bassin parisien, l'absence d'élevage oblige à introduire des légumineuses en rotation pour assurer la nutrition azotée des cultures, et ponctuellement des engrais organiques sont ajoutés.

Dans ce chapitre nous nous intéresserons uniquement aux systèmes conventionnel, biologique et sous couvert végétal permanent (SCV). En effet, ces systèmes nous semblaient, au vu de la littérature et des résultats antérieurement obtenus sur le site (Balabane et al., 2005), les plus pertinents en terme de variations des caractéristiques structurales et microbiennes qui sont susceptibles d'affecter la biodégradation des matières organiques des sols. Le tableau II.2 présente les caractéristiques des systèmes de culture choisis.

**Tableau II.2: Principales différences entre systèmes de culture.**

	Conventionnel	Biologique	SCV
<b>Travail du sol</b>	Labour 3ans/4	Labour	Non labour
<b>Objectif de production de biomasse</b>	+++	+	++
<b>Utilisation de pesticides</b>	+++	0	++(+)
<b>Utilisation de fertilisants</b>	+++	0	++
<b>Couverture permanente</b>	Non	Non	Oui
<b>Rendement de blé (moyenne depuis 1998)</b>	9,8 t.ha <sup>-1</sup>	5,0 t.ha <sup>-1</sup>	7,7 t.ha <sup>-1</sup>
<b>Entrées de C au sol</b>	+++	+	++

## 2.2. Caractérisation du sol sous les trois systèmes de culture

### *2.2.1. Profils des teneurs en carbone et azote organiques, rapport C/N et biomasse microbienne*

En décembre 2009, trois prélèvements de sol sur 40 cm de profondeur ont été réalisés dans chacun des trois systèmes de culture étudiés. De retour au laboratoire, les prélèvements de 40 cm de long ont été découpés tous les 2 cm afin d'obtenir des sous échantillons qui ont ensuite été séchés à l'air et broyés. Une fois séchés et broyés les échantillons sont analysés via un analyseur élémentaire de type CHN (CHN NA 1500, Carlo Elba) afin d'obtenir les teneurs

en Cet N organique ainsi que le rapport C/N. La biomasse microbienne a été déterminée par la méthode de fumigation-extraction (Vance et al., 1985).

Les effets respectifs de la profondeur et du système de culture sur les teneurs en C et N, le rapport C/N et la biomasse microbienne ont été analysés par des analyses de variance (ANOVA) à deux facteurs (la profondeur et le système de culture), en utilisant la version 2.14.0 du logiciel R (R Development Core Team, 2009. R: a language and environment for statistical computing. Available: <http://www.Rproject.org>).

### *2.2.2. Densité apparente*

Afin de réaliser des mesures de densité apparente sur 0-10 cm de profondeur, trois prélèvements dans chaque système de culture ont été effectués. Un cylindre métallique de 10 cm de hauteur et de volume connu a été enfoncé à l'aide d'une masse dans le sol, puis a été extrait de façon à prélever la totalité de son contenu. De retour au laboratoire les prélèvements correspondant aux contenus des cylindres ont été séchés à 105°C puis pesés et rapportés au volume du cylindre d'extraction, et ce pour obtenir la densité apparente en g. cm<sup>-3</sup>. Une ANOVA à un facteur (le système de culture) a été réalisée pour tester l'effet du système de culture sur la densité apparente avec le logiciel R (version 2.14.0).

### *2.2.3. Analyses des acides gras phospholipidiques (PLFA)*

Trois prélèvements sur 0-10 cm dans chaque système de culture ont été réalisés en vue des analyses « biologiques ». Pour l'analyse des acides gras phospholipidiques le sol a été préalablement tamisé à 5 mm et lyophilisé.

L'analyse des acides gras phospholipidiques a été établie après extraction de 10 g de sol en utilisant la méthode décrite par Frostegård et al. (1993). L'ensemble des lipides contenus dans les membranes cellulaires des microorganismes est extrait par solubilisation et agitation dans un extractant composé de méthanol, chloroforme et tampon citrate. Les phospholipides sont ensuite séparés des neutrolipides et des glycolipides par chromatographie liquide sur colonne de silice (Extract Clean®Silica, Grace). Les phospholipides ainsi récupérés sont dépolymérisés et transméthylés par méthanolyse alcaline. Après la méthylation les acides



gras obtenus sont séparés en utilisant un chromatographe en phase gazeuse de type Hewlett Packard 6890 muni d'un détecteur à ionisation de flamme (GC-FID). Un standard qualitatif composé d'un mélange d'acides gras méthylés allant du C11:0 au C20:0 (BAME, Sigma-Aldrich) est utilisé pour l'identification des acides gras contenus dans nos échantillons en se basant sur leurs temps de rétention. L'abondance relative de chaque acide gras est utilisée pour comparer la structure des communautés entre échantillons. Les acides gras contribuant à moins de 1% de la totalité du pool d'acides gras ont été enlevés avant l'analyse. La nomenclature standard des acides gras a été utilisée, comme décrite dans Frostegård et al. (1993). Les acides gras mono-insaturés et les cyclopropylés (C16:1w9, C18:1w9c, C18:1w9t, cycC17:0, cycC19:0) correspondent à des marqueurs bactériens Gram- (Zelles, 1999), les acides gras iso- et anteiso- (iC15:0, aC15:0, iC16:0, iC17:0, aC17:0) à des marqueurs bactériens Gram+ (Zelles, 1999) et le C18:2w(9,12) au marqueur fongique (Frostegård et al., 1993; Zelles, 1997). Les acides gras cyclopropylés peuvent aussi correspondre à des marqueurs d'anaérobies (Hill et al., 2000), et les C18:1w9c, C18:1w9t peuvent dans certains sols (par exemple les sols forestiers) correspondre à des marqueurs fongiques (Frostegård et al., 2011). La communauté bactérienne totale est représentée par la somme des marqueurs Gram- et Gram+ ainsi que les acides gras C15:0 et C17:0.

L'effet des différents systèmes de culture sur la structure des communautés microbiennes a été déterminé par des Analyses en Composantes Principales (ACP) en utilisant le package « Vegan : Community Ecology Package » dans la version 2.14.0 du logiciel R.

#### *2.2.4. Incubation, mesures du CO<sub>2</sub> et quantification de la minéralisation du carbone*

Pour chacun des trois systèmes de culture, trois carottes de sol ont été prélevées sur 0-10 cm de profondeur. Afin de s'affranchir des différences de teneurs en C observées entre les systèmes de culture de 0 à 6 cm de profondeur, les cylindres de sol utilisés pour l'incubation proviennent de l'épaisseur 6-10 cm. Ces cylindres de 4 cm de hauteur et 4,6 cm de diamètre sont incubés « intacts » c'est-à-dire sans modification de structure.

Les échantillons de sol « intacts » et équilibrés au même potentiel matriciel (-31,5 kPa) après passage en presse de Richards, sont placés dans des bocaux d'un litre, hermétiques

et fermés par des septa permettant les prélèvements de gaz. Dans le but de garder la teneur en eau des échantillons constante pendant l'incubation, 20 ml d'eau milli-Q sont placés au fond des bocaux. Les échantillons sont incubés à 20°C dans l'obscurité pendant 70 jours.

La minéralisation du C organique est évaluée en mesurant la production de CO<sub>2</sub> par les microorganismes du sol. La concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère des bocaux est déterminée aux jours 1, 3, 7, 14, 21, 28 et 70 de l'incubation, par chromatographie en phase gazeuse à l'aide d'un MICROGC (Agilent 3000A, Santa Clara, CA, USA). Après chaque mesure, les bocaux sont ouverts et l'atmosphère y est renouvelée avec de l'air reconstitué, humide et dépourvu de CO<sub>2</sub> (Fig. II.2). A noter qu'au début de l'incubation, l'atmosphère des bocaux était également dépourvue de CO<sub>2</sub>. Les différences de minéralisation basale totale entre systèmes de culture en fin d'incubation ont été analysées par une ANOVA à un facteur (le système de culture).



Figure II.2: Bocal d'incubation, dispositif de mesure de la concentration en CO<sub>2</sub> et système de renouvellement d'air.

### 2.3. Distribution de la matière organique dans des agrégats des différents systèmes de culture

#### 2.3.1. Micro-tomographie à rayons X

En septembre 2011, quatre cylindres de sol ont été prélevés sur l'épaisseur 6-10 cm dans les systèmes conventionnel, biologique et SCV, et en plus de cela quatre cylindres de sol sur l'épaisseur 2-6 cm dans le système SCV. De cette façon, en comparant (i) les deux épaisseurs du système SCV (2-6 et 6-10 cm), (ii) les trois systèmes de culture sur la même

épaisseur et (iii) le système sans labour face aux systèmes labourés, on pourra tester (i) l'effet de la quantité de matière organique, (ii) l'effet de la qualité de la matière organique et (iii) l'effet de la structure du sol sur la géométrie du réseau poral à l'échelle micrométrique. Une fois prélevés les échantillons sont emballés et envoyés à l'Agroecosystems Research Group de l'Université de Sydney.

Trois agrégats d'environ 4 mm de diamètre par cylindre de sol sont prélevés et séchés à l'air avant d'être scannés en micro-tomographie à rayons X (MicroXCT-400, Xradia) à une résolution de 5  $\mu\text{m}$ . Pour l'analyse, l'agrégat de sol est placé sur une platine de rotation entre une source de rayons X et un détecteur fixe. L'échantillon en rotation est alors bombardé par le faisceau de rayons X permettant ainsi d'obtenir des radiographies d'absorption à différents angles de projection. L'utilisation du logiciel Soil Laboratory développé à l'Université de Sydney permet ensuite la reconstruction et le seuillage des données d'absorption binaires (2D) en images tridimensionnelles (3D). L'analyse de ces images tridimensionnelles permet enfin d'obtenir les propriétés géométriques basiques du réseau poral (volume total, porosité total, porosité connectée, surface totale, ...) (Fig. II.3). Une fois scannés, les agrégats ont été renvoyés en France afin d'y être broyés et analysés leur teneur en C organique et la composition de leur matière organique.



Figure II.3: Analyse en micro-tomographie à rayons X et reconstruction tridimensionnelle d'un agrégat de sol.

### 2.3.2. Mesures du carbone organique total

De la même façon que pour les profils réalisés pour la caractérisation des systèmes de culture, le C organique contenu dans les agrégats scannés a été mesuré en utilisant un analyseur élémentaire de type CHN (CHN NA 1500, Carlo Elba).

### *2.3.3. Spectroscopie moyen infra-rouge par réflexion diffuse à transformée de Fourier*

Afin de caractériser la composition de la MO contenue dans les agrégats de sol provenant des différents systèmes de culture, la technique de spectroscopie moyen infra-rouge (SMIR) a été employée (Nicolet iS10, Smart Diffusive Reflectance, Thermo Scientific). Le rayonnement moyen infra-rouge (c'est-à-dire avec des longueurs d'onde de 400 à 4000  $\text{cm}^{-1}$ ) est projeté sur l'échantillon, préalablement broyé finement ( $< 200 \mu\text{m}$ ) et réfléchi dans toutes les directions. Une partie du rayonnement est absorbée par l'échantillon et l'autre partie est redirigée vers le détecteur. Du fait du peu de matériel à notre disposition, chaque agrégat a été broyé et mélangé à une poudre de bromure de potassium (KBr) qui est dit « transparent » à la lumière infra rouge, et donc n'affectant pas le signal résultant. L'analyse des données obtenues par spectroscopie moyen infra-rouge a été effectuée par une Analyse en Composantes Principales (ACP) en utilisant la version 2.14.0 du logiciel R.

## 3. Résultats et Discussion

### 3.1. Caractérisation du sol sous les trois systèmes de culture

La Figure II.4 montre les profils des teneurs en C et N organiques ainsi que le profil du rapport C/N dans les 3 systèmes de culture étudiés sur 0-40 cm de profondeur. Les teneurs en C et N, le rapport C/N ainsi que la biomasse microbienne diminuent significativement avec la profondeur et varient significativement selon les systèmes de culture (ANOVA,  $P < 0,001$ ). Le système SCV est significativement différent des systèmes labourés (conventionnel et biologique), qui ne sont pas significativement différents entre eux.

Dans les premiers centimètres de profondeur du système SCV les teneurs en C et N organiques sont plus de deux fois supérieures à celles des systèmes conventionnel et biologique. Les systèmes conventionnel et biologique présentent quant à eux des profils de teneurs en C et N similaires. De nombreuses études ont déjà montré cette différence de teneurs en C et N entre systèmes labourés et non labourés sur les premiers centimètres de profondeur qui s'explique par une accumulation en surface de la matière organique (Kandeler et al., 1999; Grandy and Robertson, 2007; Fernández et al., 2010). Cependant dans ces études il est difficile de voir à partir de quelle profondeur les différences disparaissent. Grâce à notre mode d'échantillonnage, il nous a été possible de déterminer que c'est à partir de 6 cm de profondeur que les teneurs en C et N entre les trois systèmes de culture deviennent similaires. Dans leur article comparant la distribution du C organique entre des systèmes labourés et non labourés, Salvo et al. (2010) montrent eux aussi que la profondeur où la différenciation entre les systèmes disparaissait était de 6 cm. Entre 28 et 34 cm de profondeur il est intéressant de noter une légère diminution des teneurs en C et N dans les trois systèmes probablement due à la semelle de labour. Initialement c'est-à-dire avant 1997, l'ensemble du site de La Cage était cultivé selon le système conventionnel, le fait que ce décrochement soit aussi observé dans le système SCV résulterait donc du passif des pratiques antérieures.

La biomasse microbienne dans le sol du système SCV est près de quatre fois supérieure à celles des systèmes travaillés sur les six premiers centimètres de profondeur.

Cookson et al., (2008) a également observé cette différenciation entre système conventionnel et système non labouré pour la biomasse microbienne et ce sur les 10 premiers centimètres de profondeur. Ce résultat est à mettre en relation avec les teneurs en matière organique plus importante en surface. D'autres travaux comparant le système conventionnel au système biologique ont montré une biomasse microbienne significativement supérieure dans le système biologique (Marinari et al., 2006; Tu et al., 2006). Dans notre étude nous n'avons pas obtenu de telles différences entre ces deux systèmes, cependant il ne faut pas perdre de vue qu'il existe une multitude de systèmes de culture biologiques et que comparer leurs effets peut être un exercice périlleux.

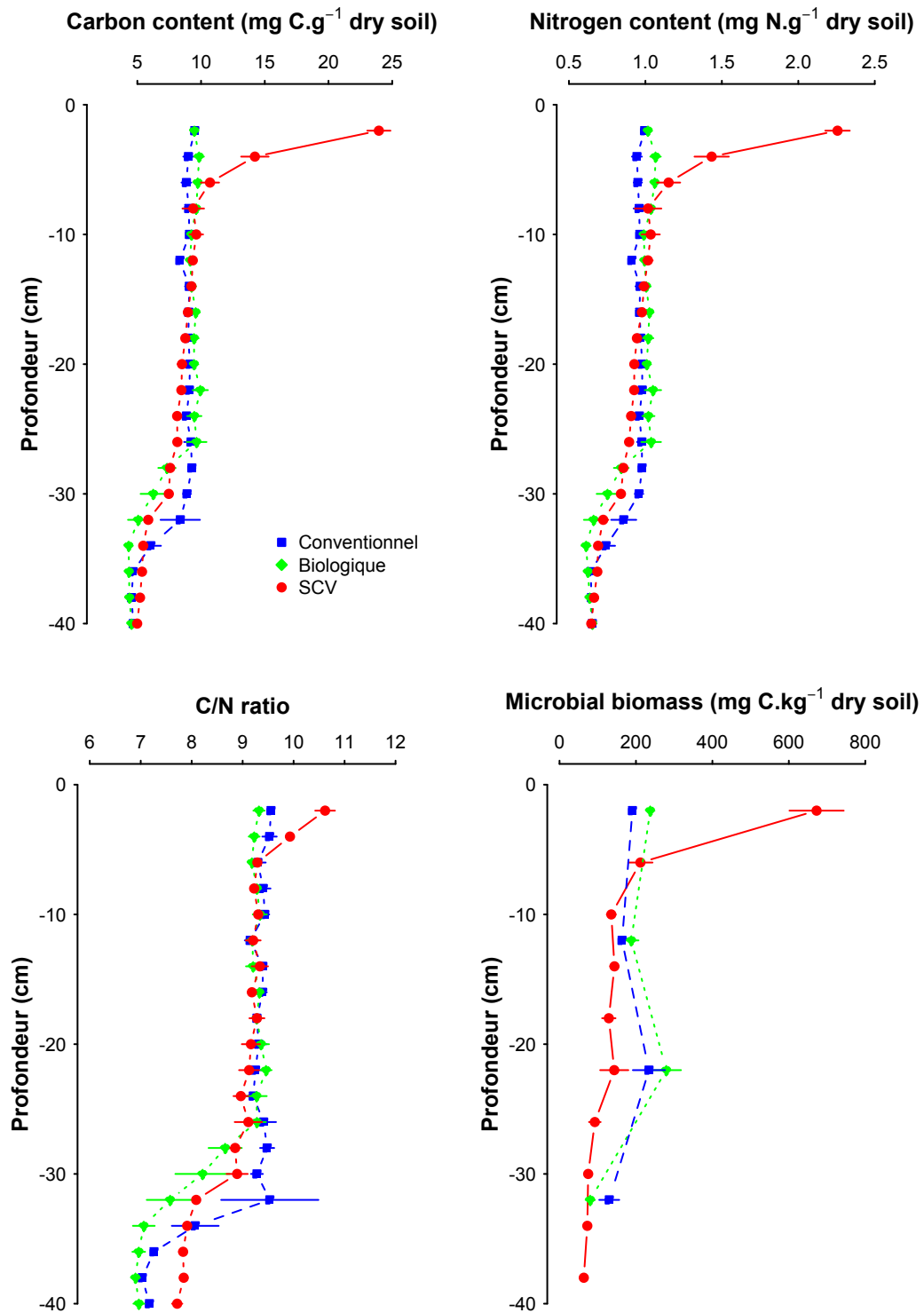


Figure II.4: Profils des teneurs en carbone et azote organiques, du rapport C/N et de la biomasse microbienne des sols sous les différents systèmes de culture. En bleu le système conventionnel, en vert le système biologique et en rouge le système SCV. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards (n=3).

La densité apparente dans le système SCV est significativement plus élevée que celles des systèmes de culture conventionnel et biologique (ANOVA,  $P < 0,05$ ) (Fig. II.5). Elle n'est toutefois pas significativement différente entre les systèmes de culture conventionnel et biologique. La différence significative entre système SCV et les systèmes labourés peut s'expliquer par le fait de l'absence de travail du sol dans le système SCV et donc un plus grand tassement du sol (Rahman et al., 2008). D'autres travaux n'ont quant à eux pas montré une telle différence que ce soit sur 5 ou 18 cm de profondeur (Puget and Lal, 2005; Grandy and Robertson, 2007; Fernández et al., 2010). Ces différences entre études peuvent s'expliquer par le fait que les plantes de couverture, les précédents culturaux, les propriétés du sol, les conditions climatiques mais également les périodes de prélèvement soient différentes. Il est évident qu'après un épisode de labour, les différences entre les systèmes labourés et le SCV seront nettement plus importantes qu'après une récolte.

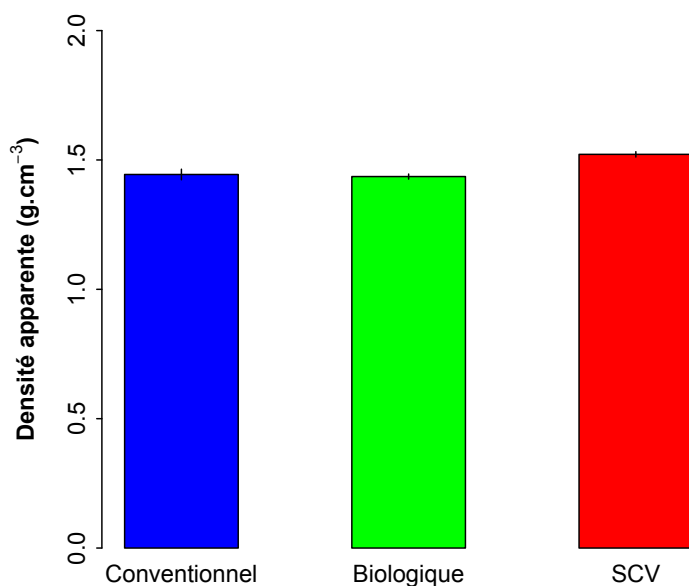


Figure II.5: Densité apparente sur 0-10 cm de profondeur des différents systèmes de culture. En bleu le système conventionnel, en vert le système biologique et en rouge le système SCV. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards (n=3).

La structure des communautés microbiennes du système SCV est significativement différente de celles des systèmes conventionnel et biologique, et ce selon l'axe 1 de l'ACP (ANOVA,  $P < 0,01$ ) (Fig. II.6). Aucune différence significative n'a été observée selon l'axe 2 de l'ACP, c'est-à-dire entre les systèmes de culture conventionnel et biologique. Les acides gras responsables de la différence significative selon l'axe 1 de l'ACP sont le marqueur fongique C18 :2w(9,12) et les C18 :1w9 cis- et trans- pouvant également correspondre à des marqueurs fongiques. Bien que nos résultats ne soient pas quantitatifs, une étude réalisée sur les sols des mêmes systèmes de culture a observé une biomasse fongique significativement



plus abondante pour le sol du système SCV (Henneron et al., Submitted). Dans leurs études respectives, Acosta-Martínez et al. (2007) et Rahman et al. (2008) ont également observé une abondance relative des biomarqueurs fongiques supérieure dans les systèmes sans labour. L'absence de labour semble donc favoriser le développement fongique. Ces résultats sont en accord avec ceux de la littérature, et en particulier ceux de Frey et al. (1999) où l'abondance d'hyphes sur 0-5 cm est nettement supérieure dans le système non labouré comparé au conventionnel.

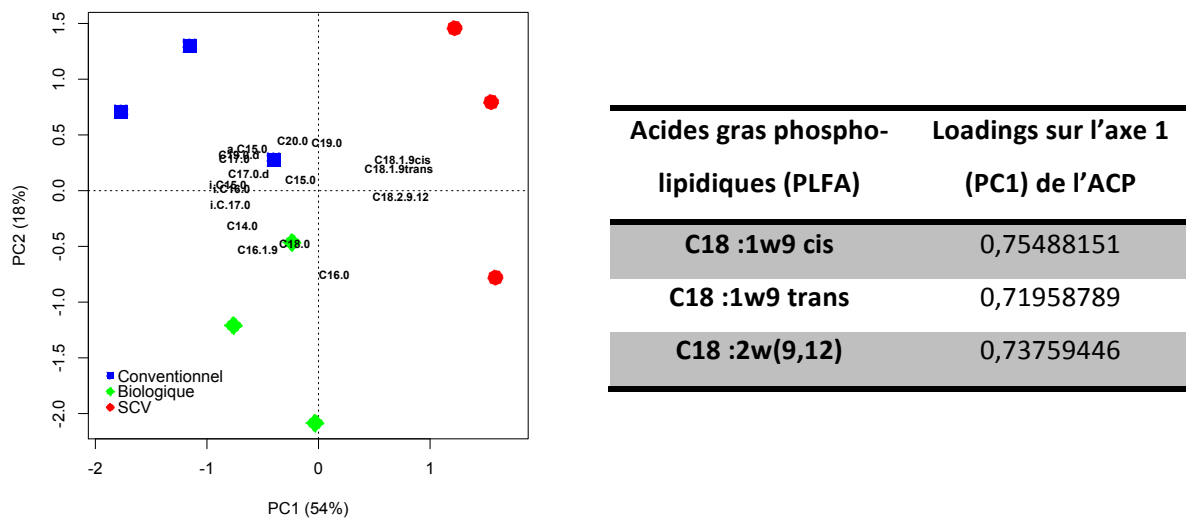


Figure II.6: Analyse en Composantes Principales (ACP) des profils des acides gras phospholipidiques (PLFA) extraits du sol sous les différents systèmes de culture, et loadings des acides gras responsables de la différenciation. En bleu le système conventionnel, en vert le système biologique et en rouge le système SCV.

Après 70 jours d'incubation, la minéralisation cumulée du C est significativement différente entre les différents systèmes de culture (ANOVA,  $P < 0,01$ ) (Fig. II.7). La minéralisation cumulée en fin d'incubation varie entre les systèmes selon l'ordre : SCV < Conventionnel < Biologique. Pour rappel, la quantité de C organique sur l'épaisseur considérée (6-10 cm) est de 10 mg C. g<sup>-1</sup> sol sec, et cela dans chacun des sols des trois systèmes. Même si la différence de minéralisation observée ici entre les systèmes de culture conventionnel et biologique n'est pas significative, on est amené à se demander si une plus grande diversité microbienne dans le sol du système biologique aurait un rôle dans la minéralisation du C. En effet, il a été démontré que l'absence de pesticides et de fertilisants de synthèse caractérisant les systèmes biologiques pouvait améliorer la diversité du sol (Edwards, 2002; Mäder et al., 2002). Dans le système SCV, la minéralisation cumulée est significativement plus faible que celles des systèmes de culture conventionnel et biologique

( $P < 0,01$ ). Dans l'étude de Fernández et al. (2010), la minéralisation du C dans le sol du système non labouré est quant à elle supérieure à celle du C du sol du système conventionnel. Cependant ce résultat est à prendre avec précaution puisque les valeurs de minéralisation ne sont pas rapportées aux teneurs en C respectives des sols sous les deux systèmes, et donc exprimées en  $\text{mg C.kg}^{-1}$  de sol. En exprimant les données en  $\text{mg C.g}^{-1}$  de C du sol, on obtient une minéralisation du C plus faible dans le système SCV que dans le système conventionnel et donc en accord avec nos résultats. Une étude de De Neve et Hofman (2000) mettant en lien la minéralisation des MOS dans des échantillons où le degré de compaction varie est en accord avec nos résultats. En effet, cette étude montre l'influence négative de la compaction sur la minéralisation des MOS, en particulier du carbone organique. Dans notre étude, le sol du système SCV sur 0-10 cm est le plus compact et celui où la minéralisation du C est moindre. Nous faisons l'hypothèse que la minéralisation est ralentie du fait d'une aération moindre dans les cylindres du sol sous SCV ou du fait d'une accessibilité moindre des MO aux microorganismes. L'incorporation des résidus de culture via le labour pourrait favoriser la décomposition de la MO en fournissant des conditions favorables de température et d'humidité aux décomposeurs microbiens (Rahman et al., 2008). De plus cette incorporation pourrait, en augmentant le contact entre sol et résidus, favoriser la colonisation microbienne des résidus et permettre une meilleure fourniture d'azote.

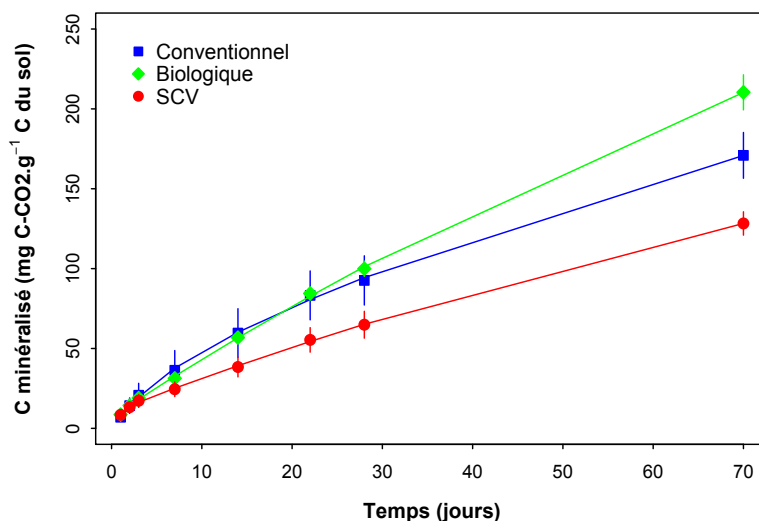


Figure II.7: Minéralisation basale du carbone dans les différents systèmes de culture. En bleu le système conventionnel, en vert le système biologique et en rouge le système SCV. Les barres d'erreur correspondent aux erreurs standards (n=3).

### 3.2. Distribution de la matière organique à l'échelle de l'agrégat

Des sections en deux dimensions obtenues après analyse en micro-tomographie à rayons X de certains agrégats provenant des différents systèmes de culture sont représentées en figure II.8. Une appréciation visuelle semble indiquer que les agrégats des systèmes SCV (aux deux profondeurs) ont une plus grande porosité que ceux des systèmes labourés. Les résultats de densité apparente présentés dans la partie 3.1 de ce chapitre, montrent que le labour est associé à une plus grande porosité à l'échelle décimétrique, alors que ces observations suggèrent une réduction de la porosité intra agrégat.

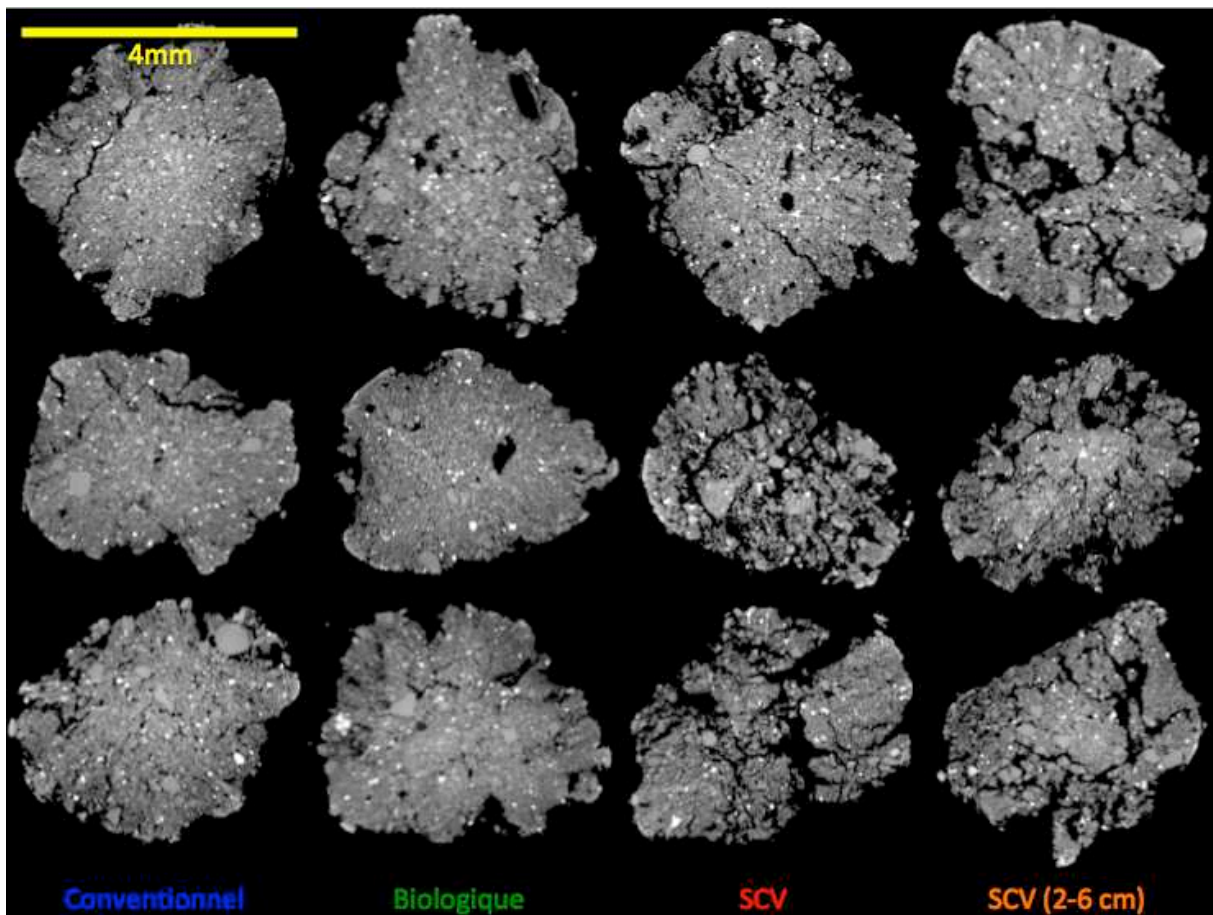


Figure II.8: Images obtenues après analyse en micro- tomographie à rayons X d'agrégats provenant des différents systèmes de culture à une résolution de 5 µm.

Pour tester si une relation existait entre réseau poral et MO, nous avons décidé de mettre en relation une variable descriptive du réseau poral : la porosité totale, et la teneur en C

organique (Fig. II.9). La figure II.9 montre l'existence d'une relation entre porosité totale et teneur en C organique pour les agrégats du systèmes biologique ( $r^2 = 0,51$ ). Pour les agrégats du système conventionnel, même si aucune relation n'a été observée, la tendance est la même que pour les agrégats du système biologique. En effet, dans ces deux systèmes il semblerait que plus la porosité augmente plus la teneur en C augmente. En ce qui concerne le système SCV, aucune relation entre porosité et teneur en C n'a pu être observée et ce quelque soit la profondeur d'échantillonnage. Dans les agrégats du système SCV la porosité et la teneur en C sont très variables à la différence des agrégats des systèmes labourés.

En l'absence de labour, la ségrégation spatiale de la MO pourrait être plus importante ce qui entraînerait une accumulation de C organique à des endroits inaccessibles aux décomposeurs microbiens. Cette hypothèse est renforcée par le fait qu'il a été observé une telle variabilité dans la fonction de minéralisation du C dans des agrégats du sol de ce même système non labouré (Sauvadet, 2012).

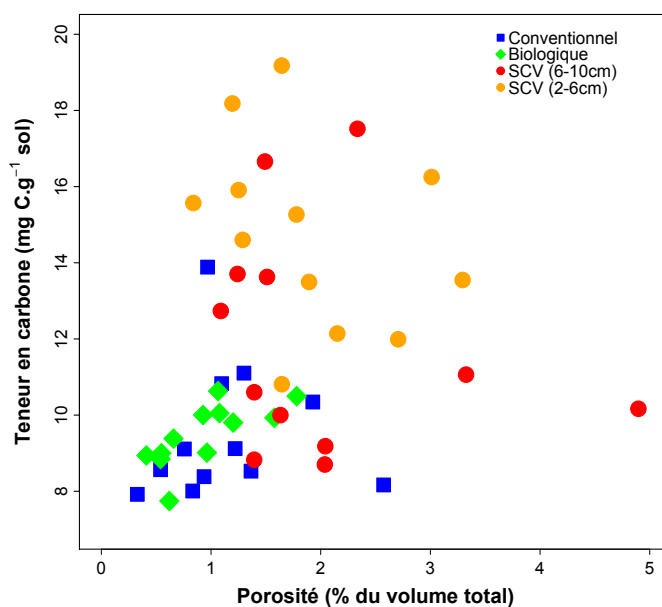


Figure II.9: Relation entre teneur en carbone organique et porosité totale pour les agrégats provenant des différents systèmes. En bleu le système conventionnel sur 6-10 cm, en vert le système biologique sur 6-10 cm, en rouge le système SCV sur 6-10 cm et en orange le système SCV sur 2-6 cm.

La composition de la MO contenue dans les agrégats des différents systèmes et obtenue par analyse en spectroscopie moyen infra rouge est représentée en figure II.10. Les systèmes de culture n'ont pas d'effet significatif sur la composition des MO des agrégats. Cependant, de même que pour la relation entre porosité et teneur en C, la composition des MO contenues dans les agrégats du système non labouré (SCV) est beaucoup plus variable que celle des MO contenues dans les agrégats des systèmes labourés (conventionnel et biologique). Du fait de l'absence de labour l'incorporation de la MO dans les agrégats du

système SCV, provenant d'une part de la plante cultivée et d'autre part de la plante de couverture, est vraisemblablement très hétérogène.

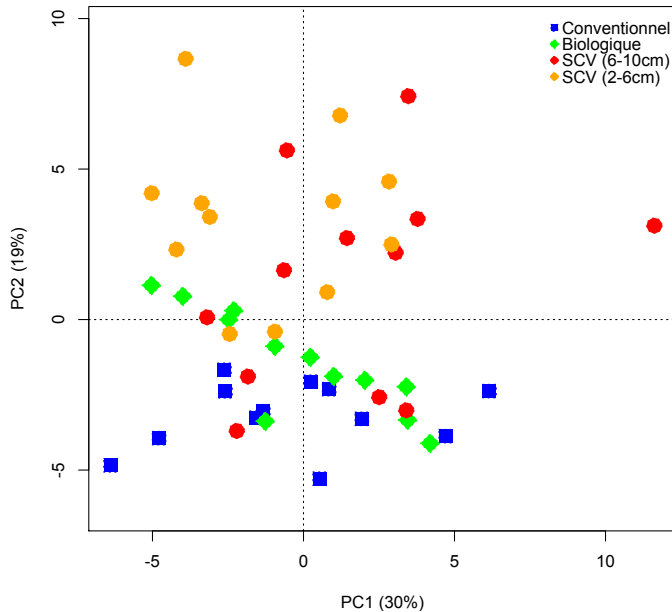


Figure II.10: Analyse en Composante Principale (ACP) de la composition des matières organiques obtenue par spectroscopie moyen infra-rouge (MIRS) dans les agrégats provenant des différents systèmes. En bleu le système conventionnel sur 6-10 cm, en vert le système biologique sur 6-10 cm, en rouge le système SCV sur 6-10 cm et en orange le système SCV sur 2-6 cm.

Dans les sols labourés avec absence de plante de couverture, il existe donc une relation à l'échelle de l'agrégat entre porosité, teneur en C et composition des MO. Il serait donc à présent intéressant de compléter ces données par une analyse des communautés microbiennes à l'échelle de l'agrégat comme l'a déjà fait Davinic et al. (2012). En effet ce dernier a étudié les communautés microbiennes à l'échelle de l'agrégat par pyroséquençage en les associant aux résultats de composition chimique de la MO obtenue par spectroscopie moyen infra rouge.

Cette étude est à notre connaissance une des premières cherchant à mettre en relation des résultats obtenus par des analyses en micro-tomographie à rayons X et des mesures standards (telles que la détermination de la teneur en C ou l'analyse par spectroscopie proche IR), et ce pour un grand nombre d'échantillons. Les informations qui en découlent pourraient être utilisées pour implémenter les modèles déterminant comment la distribution à micro-échelle du C pourrait réguler les dynamiques du C dans les sols.

## 4. Conclusion

Cette caractérisation nous montre que quelque soit l'échelle d'étude, le système SCV, c'est-à-dire non labouré, se distingue largement des systèmes conventionnel et biologique labourés. En effet, à l'échelle macroscopique, le sol du système non labouré avec une couverture végétale permanente (SCV) a une concentration en MO dans les premiers centimètres, une biomasse microbienne et une densité apparente plus élevées, une structure des communautés microbiennes avec une composante fongique plus importante, et une minéralisation du C plus lente. A l'échelle de l'agrégat, la porosité ainsi que la quantité et la qualité de la MO ont une plus grande variabilité pour le sol du système SCV.

Les pratiques culturales, et plus particulièrement du labour et le semis direct sous couvert végétal permanent, ont des impacts physiques et biologiques sur les sols allant de l'échelle de la parcelle à celle de l'agrégat.