



**HAL**  
open science

## Evaluation de la capacité de minéralisation du sol de systèmes de production alternatifs

Hélène Guillier

► **To cite this version:**

Hélène Guillier. Evaluation de la capacité de minéralisation du sol de systèmes de production alternatifs. 2016, 29 p. hal-01603570

**HAL Id: hal-01603570**

**<https://hal.science/hal-01603570>**

Submitted on 5 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

**AGROCAMPUS  
OUEST**

CFR Angers

CFR Rennes



UNIVERSITÉ DE  
**RENNES 1**

**university  
angers**



Année universitaire : 2015 - 2016

Spécialité : Production et Technologie du  
Végétal (ProTeV)

Parcours : Sélection, Production et  
Valorisation des Végétaux (SPVV) /

Option : Productions Végétales Intégrées  
(PVI)

### **Mémoire de Fin d'Études**

- d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

# **Evaluation de la capacité de minéralisation du sol de systèmes de production alternatifs**

**Par : Hélène GUILLIER**

***Soutenu à Rennes le 15/09/2016***

***Devant le jury composé de :***

Président : GODINOT Olivier

Autres membres du jury (Nom, Qualité) :

Maître de stage : AUTRET Bénédicte et CHENU Claire

Enseignant référent : MENASSERI Safya

Rapporteur : MORVAN Thierry

*Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST*



# Sommaire

Remerciements

Liste des abréviations

Tables des figures et des tableaux

I./ Introduction bibliographique.....	1
1.) Le sol : définition, fonctions et enjeux environnementaux .....	1
2.) La matière organique des sols.....	2
3.) Systèmes agricoles alternatifs et matières organiques du sol .....	5
4) Problématique, objectifs et démarche du mémoire.....	8
II./ Matériels et méthodes .....	9
1) Site expérimental et caractéristiques générales du sol .....	9
2) Systèmes de culture et dispositif expérimental .....	10
3) Echantillonnage du sol .....	11
4) Conditions d'incubation .....	11
5.) Mesure du carbone et de l'azote minéralisés .....	12
6.) Mesures complémentaires.....	13
7.) Simulation des cinétiques de minéralisation du C et N du sol .....	13
8.) Analyses statistiques .....	14
III./ Résultats et discussions .....	15
1.) Teneur en carbone et en azote dans les différents systèmes.....	15
2.) Biomasse microbienne dans les différents systèmes.....	17
3.) Cinétique de minéralisation du C et de N dans les différents systèmes .....	18
4.) Cinétique de minéralisation du C échantillons remaniés vs non remaniés. ....	22
IV./Conclusion et perspectives.....	24
V./ Références Bibliographiques .....	26

Annexes



# Remerciements

---

En premier lieu, je tiens à remercier très chaleureusement mes encadrantes de stage : **Bénédicte Autret** et **Claire Chenu** pour leurs disponibilités, la confiance qu'elles m'ont accordée durant ces six mois de stage et leurs qualités humaines. Le travail dans la bonne humeur a été agréable à vivre !

Je tiens également à remercier **Valérie Pouteaux** qui m'a chaperonnée dans la mise en place de mes diverses manipulations, un grand merci pour son soutien et pour son aide au lancement des incubations ainsi qu'à **Yolaine Goubard** qui m'a accompagnée dans l'utilisation du skalar, sans qui je n'aurais pu acquérir mes données de minéralisation d'azote.

Je remercie également tous les scientifiques avec lesquels j'ai pu de près ou de loin interagir : **Cyril Girardin** (pour la formation à l'utilisation du microchromatographe), **Naoise Nunan** (pour son aide statistique) et **Bruno Mary** (pour son suivi et ses divers compléments scientifiques apportés).

Je souhaite remercier toutes les personnes de l'étage de l'aile B de l'INRA Grignon qui ont apporté bonne humeur et bonne ambiance (rires et taquineries) durant nos repas du midi, (Justine, Alexandra, Adeline, Sophie, Cyrine, Paola, Patricia, Valérie, Baptiste, Alexandre, ...)

Je remercie également toute l'équipe des stagiaires de l'INRA Grignon et particulièrement Alexandre, mon co-équipier d'incubation, de minéralisation, de filtration et mon co-voitureur (merci pour ton aide quand mes manipulations finissaient tard ou quand je bloquais sur un calcul ainsi que tes blagues qui nous ont fait bien rire !) Je remercie également Marco pour son accueil chaleureux au sein du bureau des stagiaires/post-doc.

Enfin, je finirai en remerciant tout le personnel de l'INRA de Grignon et de Laon avec qui j'ai pu interagir de près ou de loin, merci à vous.



# Liste des Abréviations

---

C : Carbone

CIT : Carbone Inorganique Total

Co : Carbone organique

MO : Matière Organique / MOs : Matières Organiques

MOS : Matière Organique du Sol

TRM : Temps de Résidence Moyen

N : Azote





# Tables des figures et tableaux

---

**Figure 1** : Proportions en masse des constituants organiques dans des sols cultivés (Van-Camp et al., 2004 cité par Calvet et al., 2011)

**Figure 2** : Le cycle de l'azote dans les sols (Nicolardot et al., 1997 cité par Valé., 2006)

**Figure 3** : Facteurs influençant le taux de matières organiques des sols agricoles

**Figure 4** : Le cycle du C dans les agrosystèmes cultivés : 1- restitution des résidus de culture ; 2- importation de matière organique externe ; 3-minéralisation de la MOS (modifié de Chenu et al., 2014)

**Figure 5** : Plan du dispositif expérimental de La Cage et des cultures présentes en 2016

**Figure 6** : Méthode d'échantillonnage et de mesure de la minéralisation du C et N entre les deux sites

**Figure 7** : Conditionnement des échantillons pour les mesures de minéralisation du C et de N sur les deux sites de l'INRA

**Figure 8** : Système de flushage des bouches destinés à la mesure du CO<sub>2</sub> émis par la méthode du micro-chromatographe

**Figure 9** : Teneurs de carbone au lancement des incubations dans les différents systèmes de cultures. Les mesures sont effectuées sur les échantillons remaniés (profondeur de 0-30cm). La teneur en C de chaque système est notée au-dessus des barres d'histogramme. (NS=Non Significatif)

**Figure 10** : Teneurs d'azote au lancement des incubations dans les différents systèmes de cultures. Les mesures sont effectuées sur les échantillons remaniés (profondeur de 0-30cm). La teneur en N de chaque système est notée au-dessus des barres d'histogramme. (NS=Non Significatif)

**Figure 11** : Biomasse microbienne dans les différents systèmes de cultures. Les mesures sont effectuées sur les échantillons remaniés (profondeur de 0-30cm). La quantité de biomasse microbienne rapportée à la teneur en C du sol de chaque système est notée au-dessus des barres d'histogramme. (NS=Non Significatif)

**Figure 12** : Minéralisation absolue du C **(a)** et de N **(b)** dans les différents systèmes de culture, mesurée sur les échantillons de sol remaniés en incubation pendant 118 jours à l'INRA de Grignon

**Figure 13** : Minéralisation spécifique du C **(a)** et de N **(b)** dans les différents systèmes de culture, mesurée sur les échantillons de sol remaniés en incubation pendant 118 jours à l'INRA de Grignon

**Figure 14** : Minéralisation absolue du C exprimée en fonction du C microbien dans les différents systèmes de culture, mesurée sur les échantillons de sol remaniés en incubation pendant 118 jours à l'INRA de Grignon

**Figure 15** : Bilan des effets du système de production sur la minéralisation du C et N

**Figure 16 :** Minéralisation spécifique du C mesurée sur les échantillons de sol remaniés en incubation pendant 118 jours à l'INRA de Grignon et sur des échantillons de sol non remanié en incubation pendant 120 jours à l'INRA de Laon

**Tableau I :** Principaux facteurs influençant la minéralisation des matières organiques et leurs effets (Calvet et al., 2001).

**Tableau II :** Caractéristiques cultural du dispositif expérimental de La Cage de 1998 à 2016 (D'après Autret et al., 2016).

**Tableau III :** Analyse de la minéralisation du C à travers la valeur cumulative au dernier jour de mesure (j118)

**Tableau IV :** Analyse de la minéralisation de N à travers la valeur cumulative au dernier jour de mesure (j118)

**Tableau V :** Analyse de la minéralisation du C à travers l'optimisation des paramètres de modélisation de la cinétique de minéralisation

**Tableau VI :** Analyse de la minéralisation de N à travers l'optimisation des paramètres de modélisation de la cinétique de minéralisation

# I./ Introduction bibliographique

---

## 1.) Le sol : définition, fonctions et enjeux environnementaux

Le sol est un composant essentiel de la biosphère en raison de sa place au centre de la dynamique de divers éléments que sont les matières organiques mortes et vivantes, les minéraux l'eau et l'air (Calvet et al., 2011). Le sol est défini de différentes façons en fonction du domaine auquel il fait référence. D'un point de vue pédologique, c'est la « partie superficielle de la croûte terrestre résultant de l'altération des roches sous l'action des facteurs atmosphériques et des organismes vivants » alors que d'un point de vue agronomique, le sol constitue « la couche de terre travaillée par les instruments aratoires d'usage courant » (Parcevaux et al., 1990). En 1990, le conseil de l'Europe décline la définition du sol de la manière suivante : «Le sol fait partie intégrante des écosystèmes terrestres et constitue l'interface entre la surface de la terre et le socle rocheux ».

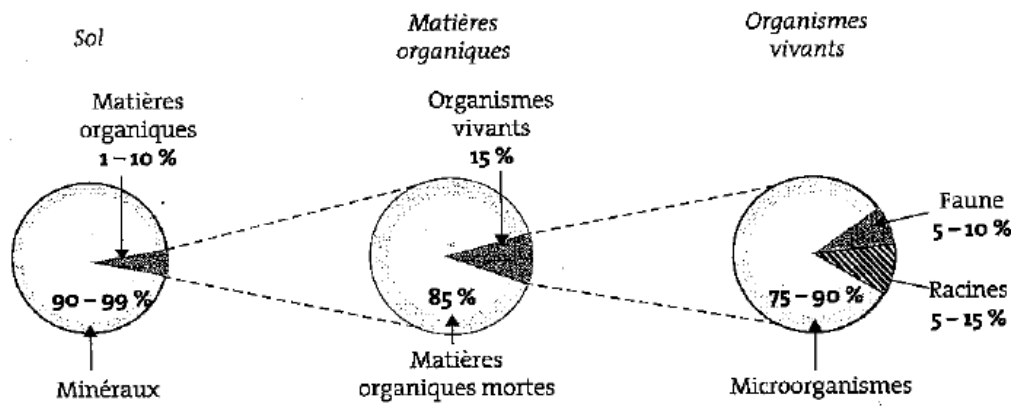
Le sol est constitué de 3 phases :

- **la phase solide**, composée d'un assemblage de particules minérales (sable, limon, argile) et de matières organiques;
- **la phase liquide**, appelée également solution du sol, elle contient les éléments sous forme dissoute, ionisés ou non, qui entrent en interaction avec la phase solide;
- **la phase gazeuse** dont la composition est proche de celle de l'air à la surface du sol et qui remplit la porosité du sol lorsque celui-ci n'est pas saturé en eau (Calvet et al., 2001).

De par sa composition (texture) et son agencement (structure), le sol assure de nombreuses fonctions (Citeau et al., 2008 ; Parcevaux et al., 1990 ; Lahmar et Ribaut, 2001) :

- c'est le milieu de croissance et de développement de la biomasse végétale qui constitue un ancrage pour les racines assurant le maintien des végétaux à la surface du sol. En effet, les végétaux puisent dans la solution du sol les éléments nutritifs et l'eau dont ils ont besoin pour leur métabolisme ;
- c'est un habitat abritant les organismes du sol (de la macrofaune aux micro-organismes). Ces organismes vivants sont impliqués dans de nombreux processus tels que la structuration du sol, la dégradation des substrats et des polluants mais également la mise à disposition des éléments nutritifs pour les végétaux ;
- c'est un milieu assurant la qualité de notre environnement de part sa double action : régulation de la ressource en eau et régulation de la qualité de l'air, le sol étant à la fois une source de gaz à effet de serre et un puits de CO<sub>2</sub> à travers les végétaux.

A l'échelle des décennies, le sol est un milieu non renouvelable qui subit des dégradations plus ou moins réversibles (Citeau et al., 2008). En effet, 38% des terres agricoles ont subi des dégradations d'origine anthropique depuis 1945 (Liu et al., 2006; Reeves, 1997). La dégradation des sols est définie en 1992 par Oldeman comme « le processus qui réduit la capacité actuelle et/ou future des sols à produire des biens et des services ». Elle est la conséquence de différents facteurs tels que l'érosion, causée par l'action de l'eau ou du vent, et accentuée par les activités humaines comme le surpâturage ou le défrichement (Doran et Zeiss, 2000; Oldeman, 1992). Cette dégradation s'accompagne souvent d'une perte de la matière organique du sol (MOS), résultant de l'impact de nombreux facteurs liés à l'activité humaine tels que (Citeau et al., 2008) :



**Figure 1** : Proportions en masse des constituants organiques dans des sols cultivés

(Van-Camp et al., 2004 cité par Calvet et al., 2011)

- le changement d'usage des sols, comme par exemple la conversion de prairies en cultures intensives provoquant un déstockage;
- le travail du sol profond provoquant la dilution de la MO ;
- les moindres restitutions de matières organiques fraîches causées par l'exportation des résidus végétaux et par de plus faibles apports d'amendements organiques.

Ainsi, la MOS se révèle être un bon indicateur de la qualité des sols (Doran et Zeiss, 2000) permettant de décrire leur fertilité et leur stabilité (Baldwin, 2006; Calvet et al., 2011).

## 2.) La matière organique des sols

### A. Définition et rôles de la MOS

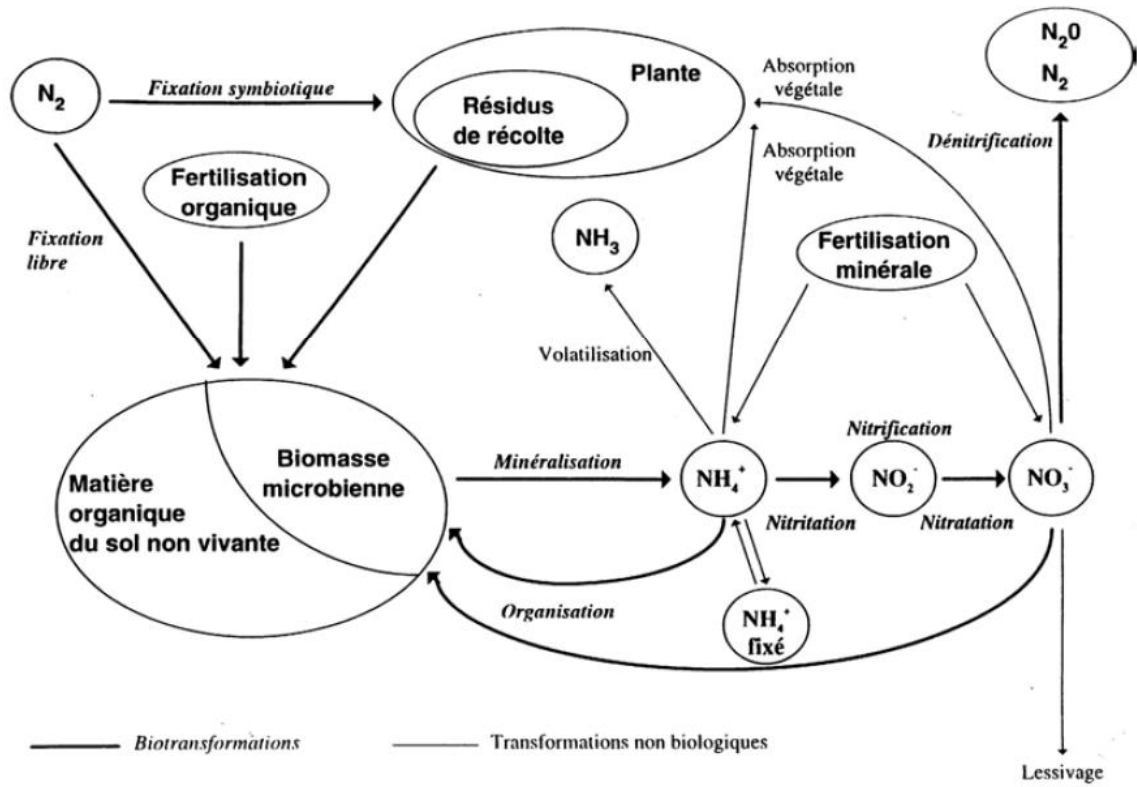
La MOS peut être définie comme l'ensemble des composés organiques du sol comprenant à la fois la biomasse vivante et la matière organique morte, c'est-à-dire tout résidu d'origine animale ou végétale à divers stade de décomposition (Stevenson, 1994 ; Calvet et al., 2011). Elle inclue également les composés organiques solubles dans l'eau tels que les substances excrétées par les racines (Laboubee, 2007). Ces MOS proviennent des parties aériennes (feuilles, tiges, écorces, fruits) mais également des parties souterraines (racines mortes et rhizodépôts) (Calvet et al., 2011). La figure 1 synthétise les proportions en masse des constituants organiques dans les sols cultivés. La MOS ne représente que 1 à 10% de la masse du sol, selon le type de sol (Calvet et al., 2011).

Malgré leur faible proportion dans le sol, les MOS ont des fonctions agronomiques nombreuses ayant des rôles clés dans l'écosystème :

- elles fournissent les éléments nutritifs nécessaires au développement et à la croissance des végétaux. Effectivement, elles forment avec l'argile un « complexe argilo-humique » qui a la capacité d'adsorber les cations et par conséquent contribuent à la capacité d'échange cationique du sol (capacité du sol à stocker et à relarguer les éléments minéraux de la solution du sol). Ainsi, à travers la minéralisation des MOS, il y a libération d'éléments minéraux. Par conséquent, les MOS maintiennent la productivité des écosystèmes (Chenu et Balabane, 2001; Citeau et al., 2008 ; Chenu et al., 2014, Lefèvre, 2015).
- elles constituent une source d'énergie et d'éléments nutritifs pour les organismes du sol, et stimulent ainsi leur activité (Chenu et Balabane, 2001 ; Chenu et al., 2014 ; Lefèvre, 2015)
- elles contribuent à la structuration du sol grâce à la formation d'agrégats qui favorisent la rétention en eau, l'aération et la stabilité structurale du sol. Par conséquent, elles protègent le sol des agressions extérieures telles que la pluie et le tassement (Chenu et Balabane, 2001; Citeau et al., 2008 ; Chenu et al., 2014 ; Lefèvre, 2015).
- elles contribuent à la qualité de l'eau en jouant un rôle de filtre vis-à-vis des polluants et éléments métalliques, mais aussi à la qualité de l'air en raison des émissions de dioxyde de carbone, de méthane, de gaz azotés (Chenu et Balabane, 2001 ; Chenu et al., 2014).

### B. La dynamique de la MOS

Une fois en contact avec le sol, les MOS subissent des biotransformations. Ces biodégradations consistent en des réactions chimiques (hydrolyse, dépolymérisation, oxydation) catalysées par des enzymes, aboutissant à des molécules de plus en plus petites (acides-aminés, monosaccharide) (Calvet et al., 2011).



**Figure 2 :** Le cycle de l'azote dans les sols  
(Nicolardot et al., 1997 cité par Valé., 2006)

Afin de comprendre et de modéliser la dynamique de la MOS, des compartiments de MOS ont été définis (les « pools »), se caractérisant par un taux de décomposition et des facteurs contrôlant ce taux qui leur sont propres (Six et al., 2002). Ainsi, la MOS est souvent classée en deux principaux pools : le pool de MOS labile, ou actif, qui sera dégradé facilement et le pool stable, qui est protégé de la dégradation (Balesdent et al., 2000).

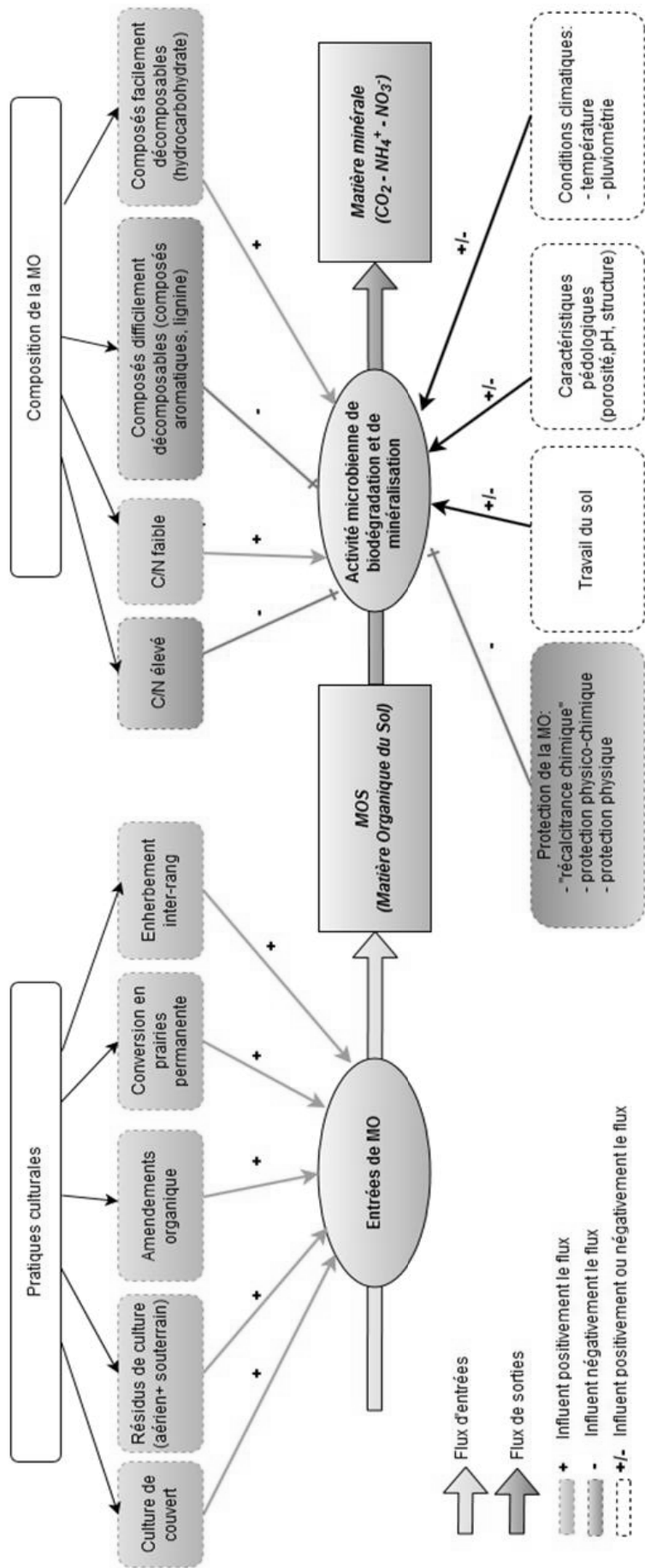
Dans un premier temps les composés facilement décomposables tels que les sucres sont consommés rapidement provoquant un pic d'activité microbienne (Jones et Murphy, 2007 ; Grosbellet, 2008). Cette biomasse microbienne se caractérise par des populations de « stratégie r » qui se développent sur tous types de substrats (Grosbellet, 2008), le « r » faisant référence aux taux de croissance de la population (Lévêque et Paugy, 2006). On parle alors de la minéralisation brute de la MOS, qui se traduit par le passage de composés organiques à des composés sous forme minérale (Valé, 2006). Dans le cas des composés azotés, la minéralisation brute se réalise en plusieurs étapes (figure 2): une première étape, l'ammonification (passage d'azote organique en ammonium  $\text{NH}_4^+$ ), sous l'action de micro-organismes hétérotrophes qui utilisent des substrats carbonés comme source d'énergie, puis la nitrification (passage de  $\text{NH}_4^+$  en nitrite  $\text{NO}_2^-$ ) par l'intermédiaire de bactéries autotrophes appelées *Nitrosomonas* et enfin une dernière étape, la nitrification (passage du nitrite  $\text{NO}_2^-$  en nitrates  $\text{NO}_3^-$ ) grâce à des bactéries appelées *Nitrobacter* (Benoit, 2015). Dans le cas des composés carbonés, la minéralisation est décrite comme le passage du carbone organique à du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) dans des conditions aérobies et à du méthane ( $\text{CH}_4$ ) dans des conditions anoxiques, grâce aux micro-organismes du sol qui utilisent le carbone organique comme source d'énergie. Ces micro-organismes sont caractérisés par un rapport carbone sur azote (C/N) variant de 8. Une source d'azote minéral leur est nécessaire pour minéraliser le substrat carboné dont le C/N est supérieure à 25. Ce phénomène est appelé immobilisation ou organisation de l'azote minéral (Gallardo et Merino, 1992 ; Grosbellet, 2010). Ainsi, pour déterminer la minéralisation nette de l'azote, il faut déduire l'immobilisation de la minéralisation brute (Valé, 2006).

Dans un second temps, les composés difficilement décomposables tels que les tanins, la lignine, les cutines et les subérines vont être minéralisés. Cette minéralisation est réalisée par une biomasse microbienne de « stratégie K », c'est-à-dire spécifique de la dégradation de substrats plus complexes (Grosbellet, 2008). Le « K » fait référence aux paramètres de la courbe de croissance d'une population représentant l'asymptote supérieure c'est-à-dire la capacité de charge de l'environnement pour la population (Lévêque et Paugy, 2006).

### *C. facteurs qui influencent le taux de MOS*

La teneur en matière organique du sol est gouvernée par les flux d'entrées, c'est-à-dire la MO arrivant au niveau du sol et les flux de sorties par minéralisation (Chenu et al., 2014 ; X.Liu et al., 2006). En raison de la difficulté de dosage de la MOS de par sa complexité, la teneur en carbone organique (Co) est employée comme indicateur de la teneur en MOS (Calvet et al., 2011). Tout comme la teneur en MOS, l'évolution du Co résulte de l'adéquation entre les flux d'entrées et de sorties (Chenu et al., 2014; ). Ainsi, nous évoquerons les facteurs influençant le taux de MOS à travers les processus impactant les flux d'entrées et de sorties du Co du sol. Ces processus sont repris dans la figure 3 ci-contre et seront présentés dans les paragraphes ci-dessous.





**Figure 3 :** Facteurs influençant le taux de matières organiques des sols agricoles

➤ *Facteurs influençant les flux d'entrées de la MOS : les apports de MO*

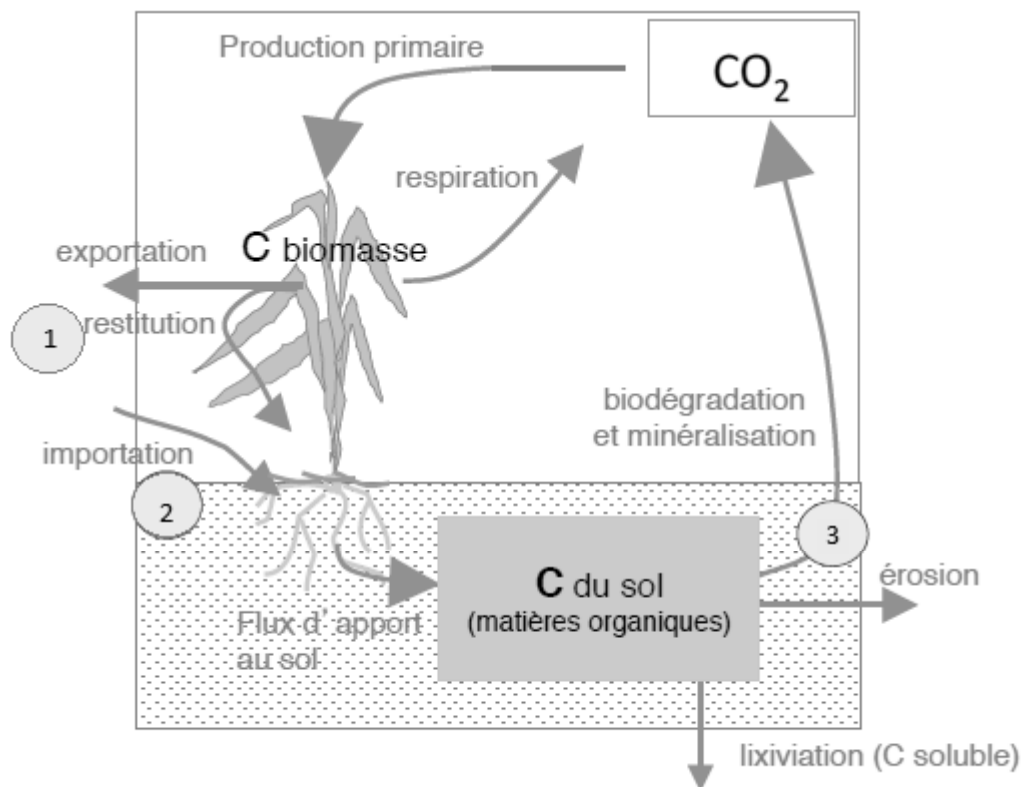
La figure 4 illustre les flux de Co dans les agrosystèmes cultivés. On distingue deux catégories de flux entrants de Co au niveau des sols :

- **les matières organiques directement issues de la biomasse se développant sur le sol étudié** (point 1, figure 4). Cette catégorie englobe les cultures intermédiaires et associées ainsi que les résidus de cultures. Ces résidus de culture se distinguent entre, les parties aériennes non récoltées telles que les feuilles et les tiges et, les parties souterraines constituées des racines mortes et des rhizodépôts (Calvet et al., 2011). L'apport de Co par les parties souterraines des végétaux cultivés représente un tiers du Co total apporté au sol, ce qui contribue de façon non négligeable à la MOS (Calvet et al., 2001). Durant le cycle de développement des plantes, les racines libèrent dans leur environnement proche (rhizosphère) des composés organiques appelés rhizodépôts. Ce processus, nommé rhizodéposition, est une perte d'énergie pour la plante puisque le Co excrété dans le sol ne contribuera pas à la production de matière sèche. Cependant, il a été admis que ces substances stimulent l'activité biologique avoisinant les racines ce qui améliore la disponibilité des nutriments pour la plante (Nhuyen, 2003). Les microorganismes assimilant rapidement ces rhizodépôts, les quantités et la qualité de ces composés organiques restent incertaines, étant de plus impactées par les caractéristiques du sol (Nhuyen, 2003).
- **les matières organiques d'origine extérieure directement importées au sol** (point 2, figure 4). Dans cette catégorie, on classe les MOS selon leur origine : l'élevage (fumier et lisier) ; les activités urbaines (boues de station d'épuration, compost de d'ordures ménagères, déchets verts) ; les activités industrielles (déchet issus des industries agroalimentaires) et divers produits tels que les algues, les tourbes etc.

➤ *Facteurs influençant les flux de sorties de la MOS : la vitesse de dégradation de la MOS*

Au cours du temps, toutes les MOS se décomposent et constituent le principal flux de sortie de la MOS (point 3, figure 4). Néanmoins, leurs vitesses de dégradation dépendent d'un certain nombre de facteurs relatifs aux substrats, au milieu mais également aux pratiques culturales (Calvet et al., 2011). Le temps de résidence de la MO dans le sol varie, selon la stabilisation de la MO, de quelques heures jusqu'à quelques millénaire, avec une moyenne de quelques décennies pour les agroécosystèmes tempérés. (Grandy et Robertson, 2007). En effet, les composés organiques du sol sont protégés de la dégradation par de nombreux mécanismes qui ont pour effet de ralentir la vitesse de dégradation que l'on peut classer en deux catégories (cf. figure 4):

- **la « récalcitrance chimique »**: cela caractérise les composés chimiques difficilement dégradables tels que les tanins, la lignine, les cutines et les subérines (Juarez, 2014; Calvet et al., 2011) nécessitant des enzymes complexe pour leur dégradations (Lefèvre, 2015). En effet, les microorganismes vont dégrader préférentiellement les substrats facilement utilisables (dit labiles), riches en éléments nutritifs et en énergie, avant de dégrader les substances plus complexes (Lefèvre, 2015). Cependant, ce phénomène est remis en question par Dungait qui démontre en 2012 la capacité des microorganismes à dégrader, en quelques années, tous types de substrats tant que celui-ci lui est accessible (Dungait et al., 2012 cité par Lefèvre, 2015).



**Figure 4 :** Le cycle du C dans les agrosystèmes cultivés : 1- restitution des résidus de culture ; 2-importation de matière organique externe ; 3-minéralisation de la MOS (modifié de Chenu et al., 2014)

**Tableau I :** Principaux facteurs influençant la minéralisation des matières organiques et leurs effets (Calvet et al., 2001).

		Effets	
Facteurs relatifs au milieu	Facteurs physiques	Température du sol	Augmentation avec la température jusqu'à un maximum de $\approx 30-35^{\circ}\text{C}$
		Teneur en eau du sol	Augmentation avec la teneur en eau jusqu'à un maximum d'hydratation de 0,6 à 0,9 fois la capacité de rétention en eau
		Structure du sol	Favorable si l'espace poral permet la circulation de l'eau et de l'air, défavorable si le sol est compacté
	Facteurs physico-chimiques	pH	Milieus acides peu favorables
		Potentiel d'oxydoréduction	Augmentation avec l'aération ; les milieux oxydiques sont favorables
		Association avec les minéraux du sol	Diminution due à une protection physicochimique
	Facteurs chimiques	Azote inorganique (engrais azotés minéraux)	Effet positif, négatif ou nul selon le C/N et la biodégradabilité des matières organiques

- **la protection physico-chimique** : cela correspond aux associations MOS avec la phase minérale (oxyhydroxydes) ou avec des ions métalliques (colloïdes de fer ou d'aluminium) rendant la MOS difficilement biodégradable (Juarez, 2014). Ces interactions telles que l'adsorption, la co-précipitation et la complexation sont de natures différentes : liaisons hydrophobes, transfert de charges, etc. C'est l'énergie supplémentaire nécessaire pour casser ces liaisons qui rend la déprotection de la MO plus difficile (Lefèvre, 2015).
- **la protection physique** : cela correspond à la rétention de la MO au sein des agrégats ou de la microporosité. Effectivement, les substrats deviennent inaccessibles aux microorganismes et à la diffusion de leurs enzymes. De plus, les conditions environnementales avoisinant ces MOS peuvent ne pas être propices à l'activité microbienne en raison du déficit en oxygène. Ainsi, la présence de zones anaérobiques conduit à un ralentissement du taux de décomposition de la MO. (Juarez, 2014 ; Balesdent et al., 2000)

Les facteurs relatifs au milieu ayant une influence sur la dégradation de la MOS sont présentés dans le tableau I, ils peuvent être classés en trois catégories :

- **les facteurs physiques**, regroupant la température, la teneur en eau et la structure du sol qui influencent l'activité microbienne. En effet, la température a une influence directe sur l'activité et sur les quantités des enzymes excrétées ainsi que sur la physiologie des microorganismes. Ces microorganismes sont caractérisés par une gamme de température dans laquelle leur activité est maximale. A l'instar de la température, la teneur en eau et en oxygène du sol a une influence sur l'activité microbienne (cf. figure 4). Les microorganismes aérobies étant les minéralisateurs des éléments essentiels (C, N, P et S), l'espace poral du sol ne doit pas être totalement saturé en eau ou à l'inverse complètement désaturé pour assurer une dégradation optimale des MOS. C'est à ce niveau que la structure du sol a son importance en raison de son rôle dans les transferts d'oxygène, d'eau et de substances dissoutes (Calvet et al., 2001).

- **les facteurs physico-chimiques**, comprenant le pH du sol, le potentiel d'oxydoréduction et l'association avec les minéraux du sol. De manière générale l'activité microbienne est réduite dans des milieux acides et anoxiques (Calvet et al., 2001). Le dernier paramètre de ce facteur (l'association avec les minéraux du sol) a été décrit précédemment dans le paragraphe évoquant la protection de la MOS.

- **les facteurs chimiques**, à travers l'azote inorganique (engrais azotés minéraux). L'azote est un élément chimique important dans l'activité microbienne en raison du rapport carbone sur azote (C/N) qui est plus faible que celui des résidus végétaux, une source d'azote est donc nécessaire pour minéraliser ces résidus (Calvet et al., 2001).

Enfin, l'ensemble de ces flux d'entrées et de sorties de MO dans les sols sont influencés par l'activité anthropique, et en particulier dans les systèmes agricoles où les pratiques culturales peuvent être responsables de modifications significatives des flux de MO.

### 3.) Systèmes agricoles alternatifs et matières organiques du sol

Depuis une vingtaine d'années les systèmes de culture dit « alternatifs » ont fait l'objet de nombreuses études. L'agriculture alternative est définie par Altieri et al. (1987) comme « toute approche de l'agriculture qui vise à fournir des rendements soutenus par l'utilisation de technologies de gestion écologiquement rationnelles ». Cela se traduit par des concepts écologiques, tels que le recyclage des nutriments et de la



matière organique (Altieri et al., 1987). Ainsi, parmi les principaux systèmes de production alternatifs existent :

- ***L'Agriculture Biologique (BIO)*** : L'Agriculture biologique est définie par le cahier des charges européen (Règlement CE N° 889/2008) comme « un mode de production agricole systémique reposant sur l'activité microbienne des sols, le recyclage des déchets organiques et les cycles biologique et biogéochimique, en interdisant les produits de synthèse (engrais, pesticides, médicaments) et organismes génétiquement modifiés (OGM) » ( Règlement CE N° 889/2008 cité par Benoit, 2015). Par conséquent, les outils tels que l'introduction de variété adaptées, la diversification des rotations, le désherbage mécanique l'utilisation de couvert végétaux et de produits allopathiques permettent de lutter de manière biologique contre les facteurs pouvant limiter la production (ravageurs, maladies, compétition avec les adventices (Bàrberi, 2002).
- ***les systèmes de production intégrée (INT)*** : Le concept de production intégrée est apparu en 1977 lorsqu'un groupe d'entomologiste décide d'échafauder une nouvelle conception de la production agricole basée sur la lutte intégrée contre les ravageurs (Boller et al., 1998). Par la suite la production intégrée sera définie comme « une production économique de produits de haute qualité, donnant la priorité à des méthodes écologiquement plus sûres, minimisant l'utilisation et les effets indésirables des produits agrochimiques et visant à l'amélioration de la sécurité environnementale et de la santé humaine » (Boller et al., cité par Lucas, 2007).
- ***l'agriculture de conservation ou systèmes sous couvert végétaux (SCV)*** : Ce système, prend exemple sur le fonctionnement des écosystèmes naturels stables (Corsi et al., 2012). Ainsi, il repose sur trois principes majeurs (Corsi et al., 2012):
  - Une perturbation minimale du sol se traduisant par un système en non labour avec semi-direct et possibilité de fertilisation. La perturbation mécanique lors du semis et de la fertilisation doit être inférieure à 15 cm de largeur ou ne doit pas dépasser 25% de la surface cultivée ;
  - Une couverture permanente du sol sous forme de résidus de culture restitués au sol, de culture intermédiaire telle que les engrais verts et /ou de couverture végétale semée sous la culture principale. La surface minimum de couverture du sol doit être de 30% pour qu'un système soit considéré comme agriculture de conservation ;
  - Une diversité des espèces cultivées en monoculture ou en association impliquant au moins 3 cultures.

Les bienfaits résultant de la combinaison de ces trois facteurs sont la protection physique du sol contre le soleil, la pluie et le vent, ainsi que la stimulation de l'activité biologique des sols. En effet, la perturbation minimale réduit les pertes de MOS et maintien ou augmente le stock de C et N en surface. La couverture permanente du sol quant à elle, améliore l'infiltration de l'eau dans le sol, réduit les pertes d'eau par évaporation, modère la température du sol, favorise l'activité biologique, améliore la minéralisation de l'azote dans les couches supérieures et protège les agrégats de leur destruction par la pluie. Enfin, la diversité d'espèces cultivées contrôle les maladies en cassant le cycle des pathogène (Hobbs et al., 2008).

Les différentes pratiques agronomiques caractérisant ces systèmes alternatifs peuvent influencer la MOS. Ainsi, l'introduction de couvert végétal permanent dans les systèmes de culture à travers la mise en place de cultures intermédiaires (ex. engrais vert) permet un stockage de carbone évalué à  $0.16 \text{ tha}^{-1}\text{an}^{-1}$  (Arrouays et al., 2002) La conversion en prairies permanentes assure des entrées de C par voie racinaire



(racines mortes, rhizodépôts) et par voie aérienne si il y a une restitution des cultures (Chenu et al., 2014). Ce stockage peut s'élever à  $0.49 \text{ tC}^{-1}\text{ha}^{-1}\text{an}^{-1}$  (Arrouays et al., 2002). Enfin, l'enherbement inter-rang des cultures pérennes telles que les vignes et les vergers permet un stockage de carbone additionnel d'environ  $0.4 \text{ tC}^{-1}\text{ha}^{-1}\text{an}^{-1}$  (Arrouays et al., 2002) ainsi que l'introduction d'arbre dans le cadre de l'agroforesterie avec un stockage de  $0.25 \text{ tC}^{-1}\text{ha}^{-1}\text{an}^{-1}$  sur les 30 premiers centimètres de sol (Cardinael et al., 2015). L'article de Arrouays et al. (2002) ne précise la profondeur de sol dans lequel se déroule ce stockage additionnel de C, par conséquent ces valeurs sont à prendre avec beaucoup de précaution.

La restitution et l'épandage d'effluents d'élevage constituent un stock de C non négligeable dans les sols. En effet, pour une restitution de 7 t de paille, le stockage du C est estimé à  $0.15 \text{ tC}^{-1}\text{ha}^{-1}\text{an}^{-1}$  et la quantité de C apportée par les effluents d'élevages en France s'élève à  $25 \text{ Mt C}^{-1}\text{an}^{-1}$  (Arrouays et al., 2002). Cependant, l'incorporation de ces matières organiques fraîches peut provoquer une sur-minéralisation de la MOS, ce phénomène est appelé « priming effect » (Fontaine et al., 2003). Ainsi, l'ensemble de ces pratiques contribue à augmenter les entrées de Co dans les parcelles agricoles, avec une intensité variable selon notamment l'intensité du priming effect (Fontaine et al., 2003).

Par ailleurs, de nombreux auteurs se sont intéressés aux conséquences du non travail du sol sur la dégradation de la MO. Ces derniers ont démontré que le travail du sol engendre une destruction rapide des macroagrégats conduisant à une augmentation de la vitesse de décomposition de la MOS en raison de l'exposition de la MO auparavant protégée dans les agrégats (Bossuyt et al., 2002; Grandy et Robertson, 2007; Balesdent et al., 2000; Barreto et al., 2009). De ce fait, le non travail du sol permettrait une séquestration plus importante du C et une accumulation de MOS (Bossuyt et al., 2002; Grandy et Robertson, 2007; Barreto et al., 2009). Cependant ces propos sont contestés par d'autres scientifiques qui ont mis en avant une minéralisation plus importante du C et de N dans des conditions de non travail du sol (Curtin et al., 2014; Oorts et al., 2006). Ces auteurs concluent que l'augmentation de la MOS en réduction du travail du sol dépend de certains facteurs du milieu incluant la texture du sol, la rotation culturale, les conditions climatiques et la nature de la protection physique de la MO (Curtin et al., 2014; Oorts et al., 2006). Ainsi, de part ces données, il semblerait que les systèmes de type SCV aurait tendance à accumuler davantage de MOS que le système conventionnel en raison de l'effet synergique du non travail du sol et de la culture de couvert.

Concernant le système de production biologique, une augmentation de la concentration en Co, ainsi que des stocks et du taux de séquestration du C y est souvent constatée, au regard du système conventionnel (Clark et al., 1998; Mondelaers et al., 2009; Gattinger et al., 2012). En effet, en 2012 Gattinger et al. évaluent l'ensemble des données de 74 études différentes et concluent que les sols en système biologique ont des stocks, des concentrations et des taux de séquestration du Co significativement supérieurs que dans les sols en système conventionnel. Cependant, cette étude a été critiquée par Leifeld et al. (2013) qui lui reprochent de ne pas être représentative des systèmes conventionnels. Effectivement, dans l'étude de Gattinger, 92% des systèmes biologiques reçoivent des entrées de C externe, à contrario seul 27% des systèmes conventionnels en perçoivent. Ainsi, l'augmentation des stocks dans le système biologique s'explique par les apports, nettement supérieurs, de MO extérieure à l'exploitation en comparaison au système conventionnel (Leifeld et al., 2013).

A l'instar du système biologique, Clark et al., (1998) mettent en évidence un accroissement de la teneur en MOS et en C dans le système intégré en comparaison à celui du système conventionnel. Il a également été admis que cette augmentation résulte de l'application d'amendements organiques et de la cultures de couvert (Clark et al., 1998). Cependant, Clark et al. constatent ces effets quelques années après la mise en





place du dispositif. De plus, ils observent une stabilisation puis un déclin de ces teneurs en raison de l'arrêt de l'application de l'apport organique (Clark et al., 1998). Par ailleurs, il est important de relever que la plupart de ces études sont réalisées sur de courtes durées (période de 8 ans dans le cas de l'étude de Clark et al., 1998) et dans des systèmes alternatifs avec des apports organiques (Gattinger et al., 2012 ; Mondelaers et al., 2009; Clark et al., 1998). Malgré la part croissante d'exploitations adoptant ces systèmes, le manque de référence d'études à long terme de la dynamique du carbone et de l'azote reste important, particulièrement dans des systèmes sans apports d'effluents d'élevage (Mondelaers et al., 2009).

De tels systèmes de culture ont été mis en place dans le dispositif expérimental de La Cage (INRA, Versailles). Quatre systèmes de cultures y sont comparés depuis 1988 : un système conventionnel (CONV), un système en production intégrée (INT), un système en agriculture biologique (BIO) et un système sous couvert végétal permanent non labouré (SCV). Le suivi de la teneur en Co et de la densité apparente du sol y a été réalisé depuis le début de l'essai en 1998. Au début de l'expérimentation, les parcelles étaient homogènes, par conséquent aucune différence significative de stocks de Co n'a été détectée entre les systèmes de culture. En 2014, on observe en revanche des stocks de Co significativement supérieurs dans le système SCV comparé à ceux mesurés dans les trois autres systèmes CONV, INT et BIO. Le stock moyen de Co du système SCV s'élève à  $51.9 \text{ t Co}^{-1} \text{ ha}^{-1}$  sur une profondeur de 0-30cm, alors qu'il est en moyenne de  $42.4 \text{ t Co}^{-1} \text{ ha}^{-1}$  dans les autres systèmes (Autret et al., 2016) Ces auteurs insistent sur le lien fort existant entre le stockage du C dans le sol et les entrées de C supplémentaire du système SCV, en particulier via les restitutions racinaires issues du couvert végétal. De plus, les auteurs ont par la suite simulé l'évolution des stocks de C entre 1998 et 2014 grâce au modèle du cycle du carbone AMG (Saffih-Hdadi et Mary, 2008), en optimisant notamment la valeur du coefficient de minéralisation du Co du sol. Le modèle AMG est un modèle simple de simulation du devenir du C dans le sol, et considérant trois compartiments de MO : la matière organique fraîche issue des résidus, le pool de C actif et le pool de C stable. Les auteurs parviennent à simuler correctement l'évolution des stocks de C sur la période considérée, avec une valeur de minéralisation commune à l'ensemble des systèmes de cultures, résultat en contradiction avec les travaux menés par ailleurs. En 2000, Paustian et al. présentent la compilation des résultats de 3 études mis en place au Etats-Unis, au Canada et en France et mettent en avant un temps de résidence moyen (TRM) de la MOS (équivalent à l'inverse du taux de minéralisation) approximativement deux fois supérieur dans les systèmes en non travail du sol comparés à ceux avec travail du sol. Cependant, lorsque le facteur de 1,9 (moyenne du rapport des TRM en non travail du sol sur celui avec travail du sol des trois études) est utilisé dans le modèle AMG pour estimer l'évolution des stocks de Co dans le système SCV dans l'essai de La Cage, il en résulte une surestimation des stocks (Autret et al., 2016). Ainsi, l'hypothèse d'une minéralisation plus faible de la MOS dans le système SCV par rapport aux systèmes labourés CONV, INT et BIO est rejetée, remettant en question la dynamique de la MO dans les systèmes non labourés tels que le système SCV.

#### **4) Problématique, objectifs et démarche du mémoire**

La présentation du contexte de l'étude permet de dresser l'état des connaissances actuelles sur le sol (sa composition, ses fonctions et ses enjeux environnementaux) mais également sur la MOS (ses fonctions, sa dynamique et les facteurs impactant sa teneur). Dans le cas des sols agricoles, on a pu voir que certaines pratiques pouvaient impacter les flux de la MOS et induire une diminution de la fertilité, des problèmes d'érosion etc. Des pratiques agricoles dites « alternatives » sont susceptibles de préserver les MOS, voir même d'en augmenter la teneur. Cependant, l'état de l'art souligne un certain manque de connaissances concernant l'impact de ces systèmes de cultures vis-à-vis des processus biogéochimiques, tels que la dynamique des MO dans les sols, en particulier dans des dispositifs de longue durée. Sur la base de ce



constat, ainsi que sur la base des travaux de Autret et al., 2016 sur la minéralisation de l'évolution de la MOS, la problématique de recherche formulée est la suivante :

### **Les systèmes de production alternatifs affectent-ils différemment les vitesses de minéralisation de la matière organique du sol ?**

Afin de répondre à cette problématique, l'étude s'est penchée sur le dispositif expérimental de l'essai longue durée de La Cage, mis en place en 1998 à l'INRA à Versailles et, comparant 4 systèmes de culture en rotation céréalière sans apport d'effluents d'élevage : conventionnel (CONV), production intégrée (INT), agriculture biologique (BIO) et production sous couvert permanent (SCV).

Notre objectif est de mesurer et de comparer la capacité de minéralisation du C et N issus de la MO du sol dans ces différents systèmes de production et de les confronter aux résultats obtenus par modélisation (Autret et al., 2016). L'hypothèse de recherche formulée est la suivante: les systèmes de production alternatifs n'affectent pas les vitesses de minéralisation de la MO du sol, y compris le système en non labour (SCV). Pour ce faire, nous avons incubé durant 4 mois des échantillons de sol issus du dispositif expérimental de La Cage et avons mesuré la minéralisation de la MOS, c'est-à-dire l'évolution des stocks d'azote minéral du sol ainsi que les émissions de CO<sub>2</sub> émis sur une durée de 118 jours. Des mesures complémentaires de C et N total du sol ainsi que la biomasse microbienne ont été réalisées afin de caractériser les systèmes étudiés. Parallèlement, nous avons étudié l'impact de la structure du sol sur la minéralisation des systèmes CONV et SCV par incubation de sol remanié vs sol non remanié.

Dans la première partie de ce mémoire, nous décrivons le dispositif expérimental de La Cage, ainsi que les méthodes mises en œuvre afin de mesurer la minéralisation du C et N des sols au laboratoire. Dans la seconde partie, nous exposerons les résultats obtenus. Dans une dernière partie, une discussion portant sur les résultats et leurs confrontations avec des travaux sur la minéralisation des MOS sera réalisée.

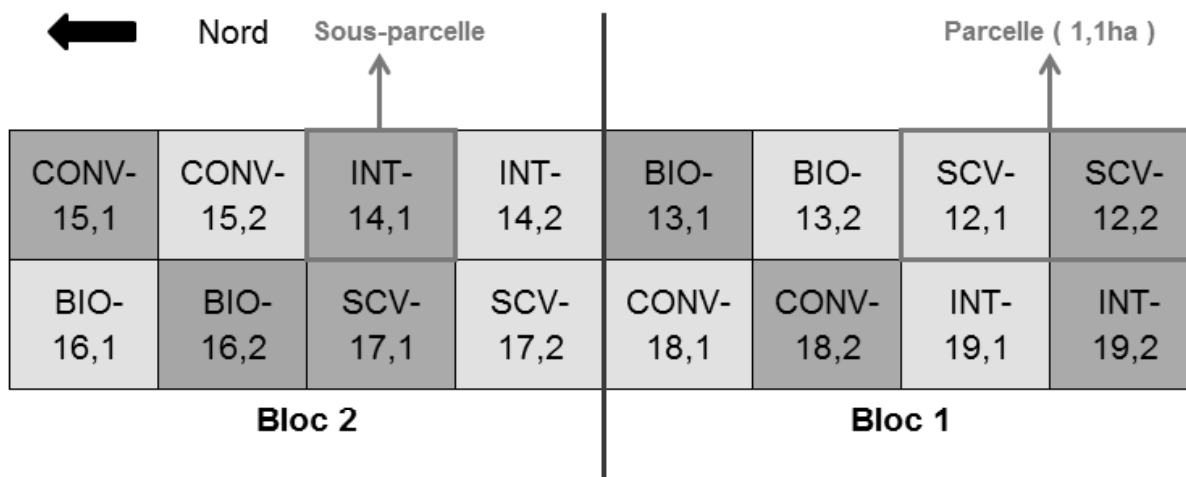
## **II./ Matériels et méthodes**

---

### **1) Site expérimental et caractéristiques générales du sol**

L'étude a été conduite sur la station expérimentale de La Cage à Versailles (48°48' N, 2°08' E), établie par l'INRA en 1998 (18 ans). Ce site expérimental a pour objectif d'évaluer les performances agronomiques, économiques et environnementales de trois systèmes de culture alternatifs au regard du système conventionnel. Ces systèmes sont représentatifs du bassin de production parisien, caractérisé par des successions courtes de grande culture, l'absence d'apport d'effluents d'élevage et une importante production de blé d'hiver. Avant la mise en place du dispositif expérimental, le site était conduit en système de production conventionnel.

Le site se caractérise par un climat océanique tempéré avec une moyenne annuelle de température, de pluviométrie et de potentiel d'évapotranspiration de 11,3°C, 627mm et 673mm respectivement pour la période 1998-2014. Le sol est un limon profond assaini par un drainage ancien, c'est un Luvisol (classification des sols selon la FAO) de texture moyenne en surface (17% d'argile, 56% de limon et 27% de sable). Au début de l'essai (en 1998) la teneur moyenne en Co était de 9,49g.kg<sup>-1</sup>, le rapport C/N de 9,6 et le pH de 7,38 pour la couche de sol labouré (0-25cm).



Blé	CONV- : conventionnelle
Colza	INT- : production intégré
Luzerne	BIO- : agriculture biologique
	SCV- : système sous couvert permanent (sans labour)

Figure 5 : Plan du dispositif expérimental de La Cage et des cultures présentes en 2016

Tableau II : Caractéristiques cultural du dispositif expérimental de La Cage de 1998 à 2016 (D'après Autret et al., 2016).

	Période	Critère	Système de culture			
			PRO	INT	SCV	BIO
Succession culturale	1998-2009	Succession culturale	Pois-Blé-Colza-Blé	Pois-Blé-Colza-Blé	Pois-Blé-Maïs-Blé	Colza-Blé-Pois-Luzerne-Luzerne-Blé
		Culture de couvert	X	X	Féтуque	X
	2010-2016	Succession culturale	Pois-Blé-Colza-Blé	Pois-Blé-Colza-Blé	Blé/Luzerne-Luzerne-Luzerne-Blé/Luzerne	Colza-Blé-Pois-Luzerne-Luzerne-Blé
		Culture de couvert	X	X	Luzerne	X
Gestion/management	1998-2016	Culture dérobées	X	X	Avoine et vesce avec moutarde ou radis fourager	X
		Labour	Tous les ans	Tous les 2 ans	Sans labour	Tous les ans
		Fertilisation azotée (kg/ha/an)	143	114	104	10

## 2) Systèmes de culture et dispositif expérimental

L'essai de La Cage compare 4 systèmes de culture sur une surface de 8ha : conventionnel (CONV), bas intrants appelé système intégré (INT), agriculture biologique (BIO) et semis direct sous couvert végétal permanent également appelé agriculture de conservation (SCV). Le dispositif expérimental est composé de deux blocs dans lesquelles les 4 systèmes de cultures ont été randomisés dans des parcelles de 1,1ha. Chacune des 8 parcelles est divisée en deux sous-parcelles qui se distinguent par la culture semée, de telle sorte que le blé soit présent chaque année dans une des deux sous-parcelles (cf. figure 5).

Le mode de conduite des 4 systèmes de production est détaillé dans le tableau II. Ainsi, chaque système a un mode de gestion qui lui est spécifique concernant :

- **le travail du sol** : un labour est réalisé tous les ans pour le système CONV et BIO, excepté après une culture de pois et, un an sur deux dans le système INT. En revanche, aucun labour n'est effectué dans le système SCV.
- **la fertilisation** : La fertilisation azotée fluctue chaque année en fonction de la culture semée. Cependant la moyenne des apports azotés sur la période de 1998 à 2014 s'élève à 143, 114, 104 et 0 kg N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> pour le système CONV, INT, SCV et BIO respectivement. Afin d'être représentatif de la région de production, aucun épandage de fumier ou de fertilisation organique n'est réalisé à l'exception du système BIO pour lequel un épandage de guano (excrément des oiseaux marins et des chauves-souris) et de farine de plume a été réalisé sur la période de 1998-2009 avec des quantités moyennes de 10kg N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>. Une fertilisation minérale potassique et phosphorique a été fournie pour tous les systèmes hors système BIO.
- **la protection des cultures** : Une application systématique de pesticides est effectuée pour éviter tout facteur limitant en système CONV et dans les systèmes INT et SCV uniquement lorsque le seuil de dommage a été dépassé.
- **la succession culturale** : La rotation initiale mise en place au début de l'essai pour l'ensemble des 4 systèmes de production était colza (*Brassica napus* L.) - blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.) - pois de printemps (*Pisum sativum* L.) - blé d'hiver. En raison d'une stratégie d'amélioration des systèmes alternatifs plus adaptés aux contraintes inhérentes aux systèmes de production, la rotation a été modifiée pour les systèmes BIO et SCV. Ces modifications ont consisté à incorporer du maïs (*Zea mays* L.) sur 2ans plutôt que du colza et de la luzerne (*Medicago sativa*) en culture principale pour ces deux systèmes alternatifs. Cependant, on peut noter la présence de blé chaque année pour tous les systèmes de culture mis en expérimentation depuis le début de l'essai pour rester représentatif du bassin de production.
- **la gestion des résidus de culture** : Pour ce qui est de la culture principale, les résidus de cultures sont laissés à la surface du sol pour tous les traitements. Dans les systèmes BIO et SCV, la luzerne est coupée trois à quatre fois par an et laissée sur le sol en tant qu'engrais vert hormis la première coupe qui est réincorporée au sol pour le système BIO. Des cultures intermédiaires sont semées durant l'automne et l'hiver pour limiter les pertes d'azote par lixiviation (cf. Tableau II). Enfin, une des caractéristiques majeures du système SCV est sa culture de couvert représenté tantôt par de la luzerne, tantôt par de la fétuque (*Festuca rubra*). Ces cultures sont soit détruites chimiquement, soit mécaniquement lors du semis de la culture principale.

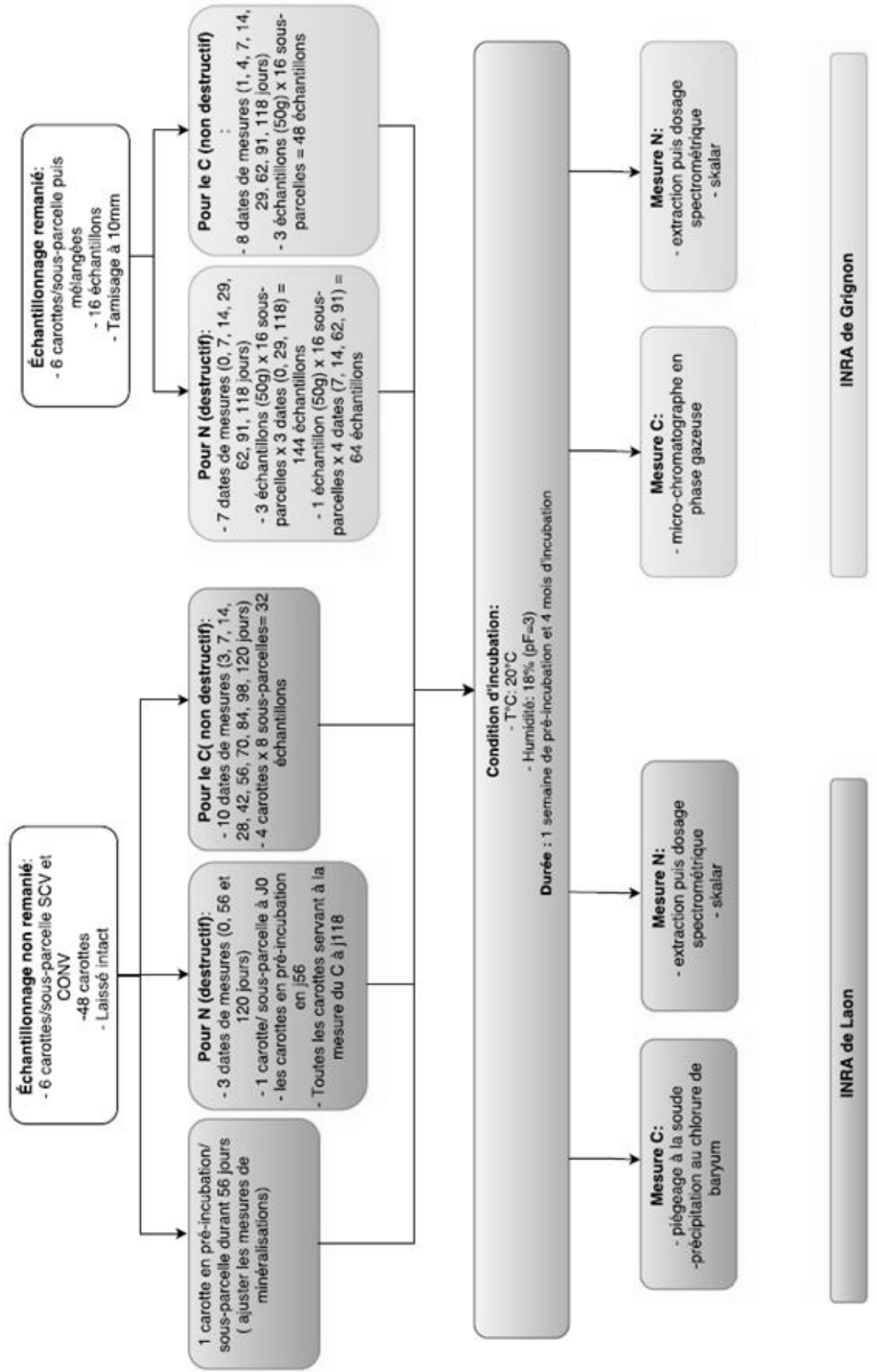


Figure 6 : Méthode d'échantillonnage et de mesure de la minéralisation du C et N entre les deux sites

### 3) Echantillonnage du sol

Les échantillons de sols ont été prélevés la première semaine de février 2016 afin de ne pas affecter le développement des cultures en place. Deux types de prélèvements ont été effectués (cf. Annexe 1) :

- **un échantillonnage de sol remanié** : Pour cela, 6 carottes de sol ont été prélevées de façon aléatoire dans toutes les sous-parcelles du dispositif afin d'être représentatif de la variabilité sous-parcellaire. Les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'une sonde cylindrique d'un diamètre de 5-6 cm de largeur sur 0-30cm de profondeur, correspondant à l'horizon labouré. Les 6 carottes ont ensuite été mélangées pour chacune des sous-parcelles. Ainsi, 16 échantillons de sol d'environ 6 kg chacun ont été prélevés. L'incubation de ces échantillons a été effectuée à l'INRA de Grignon.
- **un échantillonnage de sol non remanié** : Ce type d'échantillonnage permettra d'évaluer l'effet de la structure du sol sur la minéralisation d'un système non labouré au regard d'un système labouré. Ainsi, 6 carottes ont été prélevées de façon aléatoire dans chaque sous-parcelle des systèmes CONV et SCV à l'aide de la sonde cylindrique. Elles ont été gardées intactes et incubées sans remaniement à l'INRA de Laon.

L'ensemble des prélèvements ont été conservés en chambre froide jusqu'au début des manipulations afin de freiner le processus de minéralisation.

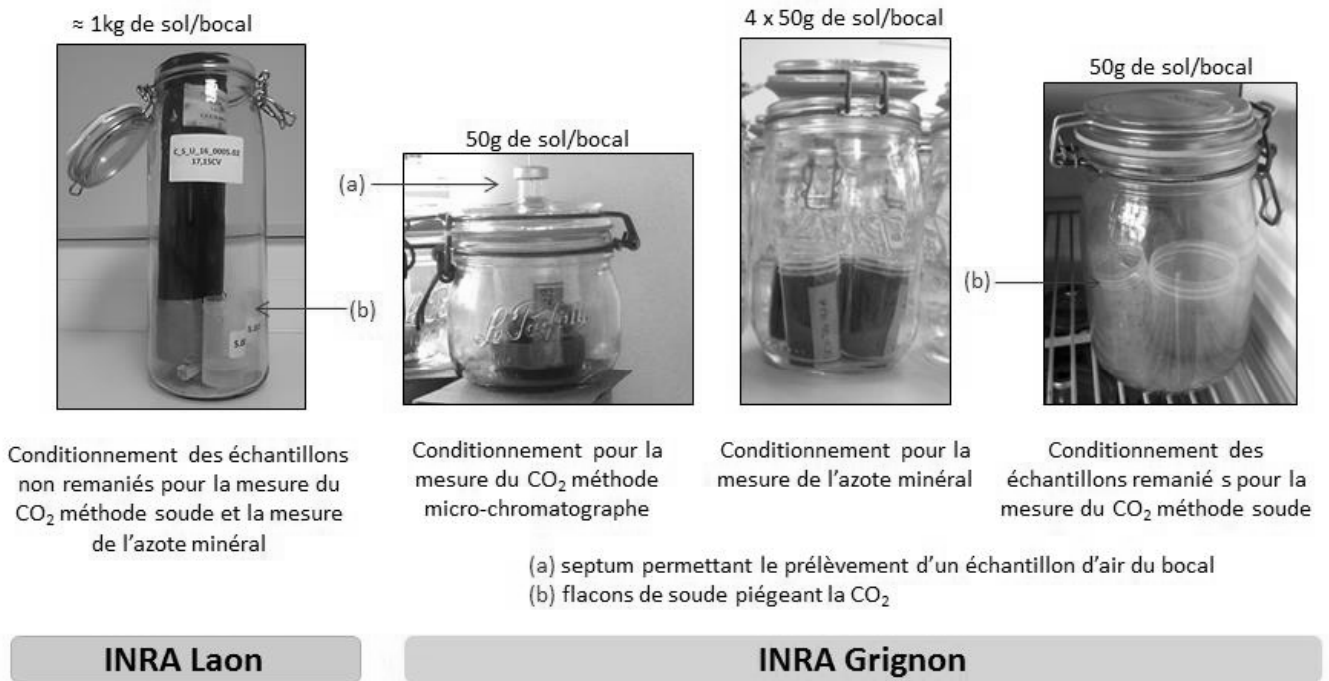
### 4) Conditions d'incubation

Le détail des conditions d'incubation et de la préparation des échantillons de sol est donné en figure 6. Afin de permettre une minéralisation optimale, les échantillons de sol ont été placés à une température de 20°C et l'humidité du sol ajusté à 18% (équivalent à un pF de 3). Une pré-incubation d'environ une semaine a été nécessaire pour réactiver la flore microbienne et s'affranchir du pic de minéralisation suivant l'installation des échantillons dans l'incubateur. La durée totale de l'incubation est de 4 mois.

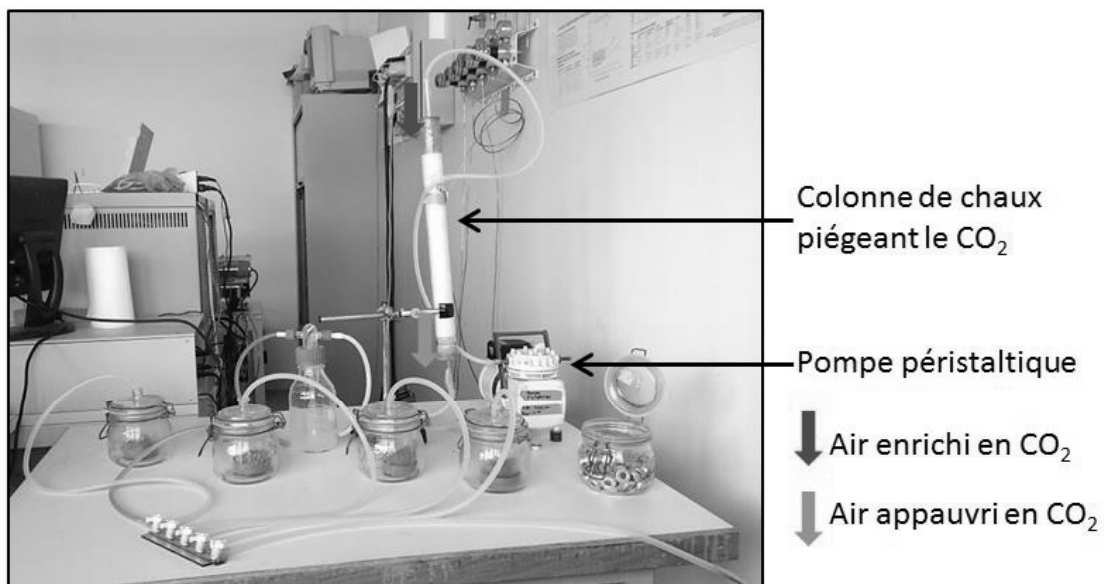
Le nombre de sous-échantillons et de dates de mesure a été fonction de la place disponible dans les incubateurs des deux sites (INRA de Laon et Grignon) et de la mesure effectuée (destructive pour l'azote, non destructive pour le C). Les incubations ont été réparties de la manière suivante :

- **sur le site de Grignon** : Les 16 échantillons de sol ont subi une première étape de tamisage à 10mm pour retirer tous résidus de culture (pailles, racines). Par la suite, l'humidité du sol a été mesurée sur 3 échantillons de 5 g de sol par sous-parcelle afin d'estimer l'ajustement nécessaire pour atteindre les conditions d'incubation.  
Pour la minéralisation du C, 3 échantillons de 50 g ont été pesés par sous-parcelle (soit 48 échantillons au total). Le suivi des émissions de CO<sub>2</sub> a été réalisé sur 8 dates (au bout de 1, 4, 7, 14, 29, 62, 91 et 118 jours d'incubation). Une fois le sous-échantillonnage et l'humidité du sol ajustée, les sous-échantillons ont été placés dans des bocaux de 0,5 L dans lesquels de l'eau a été disposée dans le fond du bocal évitant l'assèchement du sol puis, ils ont été fermés hermétiquement (cf. figure 7).  
Pour la minéralisation de l'azote, étant donné le caractère destructif de la mesure et du manque de place, 3 échantillons de 50g de sol par sous-parcelle ont été effectués sur 3 (0, 29 et 118 jours) des 7 dates de mesures (0, 7, 14, 29, 62, 91 et 118 jours). Pour les 4 autres dates (7, 14, 62, 91), la mesure de l'azote a été réalisée sur un seul échantillon de 50g de sol par sous-parcelle (soit 208 échantillons au total pour la minéralisation de l'azote). Une fois l'humidité ajustée, les sous-échantillons ont été





**Figure 7 :** Conditionnement des échantillons pour les mesures de minéralisation du C et de N sur les deux sites de l'INRA



**Figure 8 :** Système de flushage des bocaux destinés à la mesure du CO<sub>2</sub> émis par la méthode du micro-chromatographe

regroupés par jour de mesure et disposés dans des bocaux de 1L (avec de l'eau au fond) avant d'être placés dans les incubateurs pour une semaine de pré-incubation (cf. figure 7).

- **sur le site de Laon** : Sur les 6 carottes prélevées par sous-parcelle : une carotte a été utilisée pour réaliser la mesure de N minéral initial, la seconde a été pré-incubées durant 56 jours afin d'ajuster les conditions d'incubation pour les quatre carottes restantes, qui sont-elles incubées durant 120 jours. La quantité de sol par carotte est d'environ 1kg. Les échantillons ont été placés dans des bocaux de 2L avec de l'eau au fond pour limiter l'assèchement du sol et ont été fermés hermétiquement avant d'être placés dans l'incubateur pour une semaine de pré-incubation (cf. figure 7). La mesure des émissions de CO<sub>2</sub> a été réalisée à 10 dates (3, 7, 14, 28, 42, 56, 70, 84, 98 et 120 jours d'incubation) et celle de l'azote minéral au 56<sup>ème</sup> pour les carottes pré-incubées et 120<sup>ème</sup> jour pour le reste des carottes.

## 5.) Mesure du carbone et de l'azote minéralisés

La technique de mesure de la quantité d'azote minéralisée est la même à Laon et Grignon. A chaque date de mesure, les échantillons ont été sortis de l'incubateur et mis au congélateur afin de réaliser le dosage. Celui-ci se déroule en deux étapes :

- **une première étape d'extraction**: Elle a pour objectif de faire passer en solution l'azote minéral, c'est-à-dire l'azote sous forme ammoniacale (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) et nitrique (NO<sub>3</sub><sup>-</sup> principalement et NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) grâce à une solution de chlorure de potassium à 1M. Après agitation, le surnageant est prélevé pour être congelé avant le dosage.
- **une seconde étape de dosage** : C'est un dosage spectrométrique réalisé à l'aide d'un skalar (San ++système) qui dosera séparément l'azote sous forme ammoniacal (à 660 nm) et l'azote sous forme nitrique à 540 nm.

La technique de mesure du C minéralisé employée à Laon est différente de celle de Grignon. Pour les échantillons de sol non remanié (à Laon), le protocole consiste à capter le CO<sub>2</sub> par de la soude (NaOH à 1 mol.L<sup>-1</sup>), formant ainsi du carbonate de sodium (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). La quantité de CO<sub>2</sub> émise par le sol est estimée en pesant la quantité de carbonate de baryum (BaCO<sub>3</sub>) formée lors de la réaction de précipitation du carbonate de sodium Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> avec le dichlorure de baryum (BaCl<sub>2</sub>). Par conséquent, un flacon avec un volume définit de soude a été placé dans chaque bocal contenant une carotte de sol non remanié. Des bocaux « blancs » sans sol ont été réalisés afin de connaître la quantité de CO<sub>2</sub> naturellement présente dans le bocal et de la déduire à la valeur obtenue dans les bocaux de minéralisation. A chaque jour de mesure, le flacon de soude est remplacé par un autre qui piègera le CO<sub>2</sub> dans l'ensemble des bocaux jusqu'à la prochaine date de mesure.

Pour les échantillons de sol remaniés (à Grignon), la mesure est réalisée par un micro-chromatographe en phase gazeuse couplé à un catharomètre. Un échantillon d'air du bocal est prélevé et injecté dans une colonne de chromatographie qui sépare les gaz selon leur poids moléculaire et leur affinité avec la colonne. Un détecteur de conductivité thermique (ou catharomètre) mesure une variation d'intensité au passage du gaz. Le logiciel converti par la suite les différences de potentiel en partie par million (ppm). Ainsi, au début des incubations l'ensemble des bocaux ont été « flushés », ce qui signifie que le CO<sub>2</sub> présent dans l'atmosphère du bocal a été éliminé en injectant de l'air préalablement passée dans une colonne de chaux qui capte de CO<sub>2</sub> (cf. figure8). A chaque jour de mesure les échantillons sont flushés, limitant ainsi la saturation en CO<sub>2</sub> du bocal. Pour s'assurer de l'efficacité du flush la mesure du CO<sub>2</sub> a été réalisée sur des bocaux sans sol flushés à chaque jour de mesure.



La concordance entre les valeurs de minéralisation obtenues par la méthode soude et celles obtenus par la méthode du micro-chromatographe a été vérifiée sur le site de Grignon. Cela a été réalisée en mesurant le CO<sub>2</sub> piégé par la soude sur 3 échantillons de 50g de sol d'une sous parcelle du système conventionnel (cf. figure 7). Les valeurs acquises par ces échantillons seront comparées à celles acquises pour la même sous-parcelle par la méthode du micro-chromatographe.

## 6.) Mesures complémentaires

Parallèlement au suivi de la minéralisation du C et de N, des mesures complémentaires permettant d'enrichir les résultats de minéralisation ont été mises en place. Tout d'abord, la teneur initiale en C et en N organique du sol et celle à la fin de la minéralisation a été déterminée par un analyseur élémentaire (EURO EA, Eurovector, Italie). A partir de prélèvement analytique de l'ordre du milligramme (50mg) encapsulé dans des capsules d'étain, les échantillons sont minéralisés par combustion à très haute température (1050°C), sous courant d'hélium/oxygène et sous pression. Les gaz qui y sont dégagés, notamment le CO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub>, sont quantifiés par un détecteur à conductivité.

Ainsi, dans le cas des échantillons de sol remaniés, la mesure initiale a été effectuée sur 3 échantillons de 50mg de sol par sous-parcelle préalablement séchés une semaine à 45°C et broyés finement à l'aide du broyeur planétaire à bille Restch PM100. La mesure finale, est réalisée sur l'ensemble des répliquas des échantillons consacrés au suivi de la minéralisation du C (un échantillon de 50 mg par répliqua). Dans le cas des échantillons de sol non remanié, la mesure initiale a été effectuée sur une partie des carottes mise de côté avant le lancement des incubations (carottes utilisées pour la mesure de l'N minéral initial). La mesure finale, est faite sur les carottes à la fin de l'incubation. Cette mesure permettra dans un premier temps d'évaluer la teneur en C et en N dans les différents systèmes et dans un second temps d'exprimer les valeurs de minéralisation spécifique, c'est-à-dire rapportée à la teneur initiale en C ou en N du sol.

De plus, la mesure de la biomasse microbienne des sols sur l'ensemble des sous-parcelles du dispositif a été mesurée sur les échantillons remaniés selon la méthode de fumigation - extraction du carbone organique de Vance et al. (1987). Par fumigation au chloroforme, les cellules microbiennes intactes sont lysées et la matière organique microbienne est libérée. La matière organique non vivante n'est quant à elle pas affectée par cette fumigation. Par la suite, le Co est dosé selon la méthode de Dumas. Cette méthode nécessite d'une part le dosage du Carbone Total (CT) par combustion sèche et d'autre part la détermination du Carbone Inorganique Total (CIT) par calcimétrie. Le Co est alors obtenu par le calcul de la différence entre le carbone total et le carbone minéral (Co= CT-CIT). Ainsi en déduisant le Co extrait dans les échantillons de sol fumigés de celui extrait dans les échantillons de sol non fumigés, le Co issue de la biomasse microbienne est évaluée. Par un souci de place, la mesure a été réalisée sur deux échantillons de 10g de sol par sous-parcelle. Ces échantillons seront ensuite séparés en deux fois 5 g pour la mesure du Co sur des échantillons fumigés et non fumigés. Cette mesure permettra dans un premier temps d'évaluer la quantité de biomasse microbienne entre les différents systèmes et dans un second temps d'exprimer la minéralisation du C en fonction de la biomasse microbienne. L'efficacité de minéralisation des microorganismes dans les différents systèmes de culture peut être déduite de cette mesure.

## 7.) Simulation des cinétiques de minéralisation du C et N du sol

Après acquisitions de l'ensemble des données expérimentales, une simulation des cinétiques de minéralisation du C et de N a été effectuée. L'évolution des quantités cumulées de C minéralisé a été décrite par un modèle exponentiel asymptotique, dont l'équation est la suivante :

$$Yc(t) = Ymax(1 - e^{(-kt)})$$



Où  $t$  correspond au jour de mesure après le début des incubations,  $Y_{max}$  est l'asymptote, c'est-à-dire la valeur maximale de minéralisation qui pourrait être obtenue et  $k$  est une constante de vitesse ( $\text{jour}^{-1}$ ). Les paramètres  $Y_{max}$  et  $k$  ont été optimisés en utilisant l'outil solveur d'Excel. Ce modèle a été utilisé pour la minéralisation du C absolue, spécifique et rapporté au C microbien.

La dynamique de minéralisation de l'azote, absolue et spécifique, a été décrite par un modèle linéaire simple :

$$Y_n(t) = at$$

Où  $t$  correspond au jour de mesure après le début de l'incubation et  $a$ , la vitesse de minéralisation de l'azote. Les premiers jours de mesures (j7 et j14) n'ont pas été pris en compte dans la modélisation en raison du phénomène d'organisation liée à la mise en place des conditions d'incubation. Ce phénomène entraîne une fluctuation importante de la cinétique de minéralisation au début des incubations.

## 8.) Analyses statistiques

L'ensemble des données ont été analysées sous la version 3.1.2 de Rstudio (R Core Team, 2014). Dans la mesure où le nombre de vraies répétitions dans l'expérience est faible (deux blocs randomisés), chacune des sous-parcelles a été considérée comme une répétition à part entière, produisant ainsi quatre pseudo-répliqua par système de culture. Ce choix résulte de la faiblesse de la conception expérimentale et a également été adopté par d'autres auteurs utilisant le dispositif de La Cage comme support d'étude. En effet, Henneron et al., (2014) et Autret et al., (2016) justifient ce choix par plusieurs raisons : 1) la gestion du dispositif expérimental avant 1998 était la même sur l'ensemble de l'essai, 2) les gradients topographiques et pédologiques préexistantes ont été contrôlés par le blocage, 3) l'hétérogénéité spatiale entre les sous-parcelles est aussi importante que celle entre les parcelles notamment en ce qui concerne les concentrations en Co du sol et les stocks de Co en 1998.

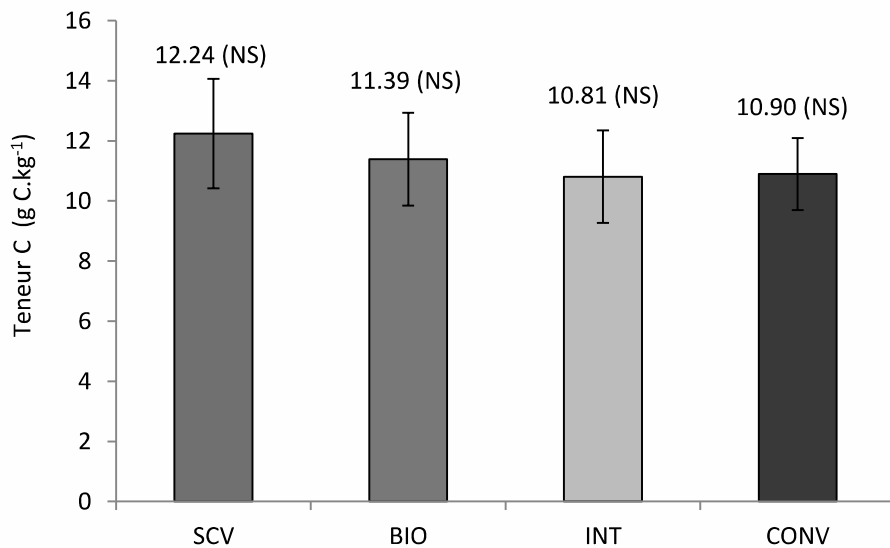
Pour éviter toutes confusions d'effets, en raison des successions culturales différentes d'un système à l'autre, l'effet système de production et couple « précédent cultural/culture en place » ont été analysés. L'effet de ces facteurs ont été testés sur la minéralisation du C et de N à travers différentes variables :

- les valeurs de minéralisation absolue ( $\text{mg C.kg}^{-1}$  ou  $\text{mg N.kg}^{-1}$ ), spécifique ( $\text{mg C.g}^{-1}\text{C}$  ou  $\text{mg N.g}^{-1}\text{N}$ ) et de C rapporté au C microbien ( $\text{mg C.mg}^{-1}\text{C mic}$ ) au dernier jour de mesure (j118)
- les valeurs des paramètres des courbes de modélisation de la cinétique de minéralisation ( $Y_{max}$  et  $k$  pour le carbone,  $a$  pour l'azote)

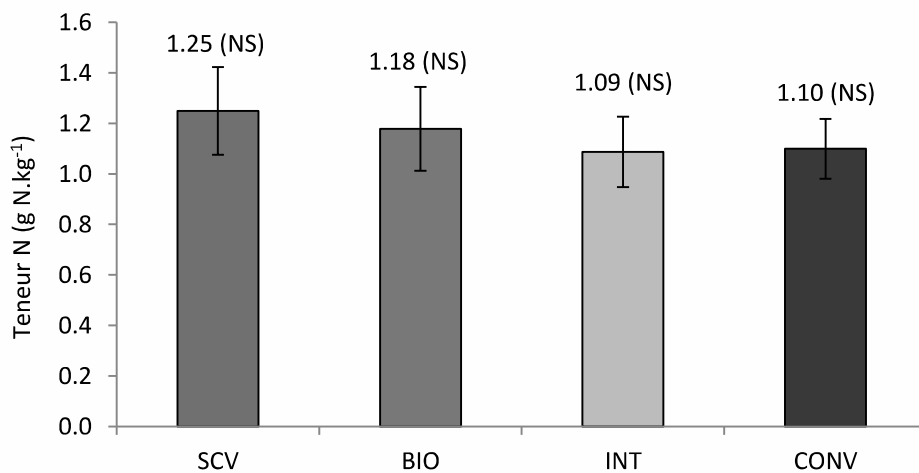
L'effet des systèmes de production a été également testé sur :

- les teneurs en C, N et le rapport C/N au lancement des incubations
- la quantité de biomasse microbienne du sol exprimé en kg de sol sec et en g de C du sol

Le prélèvement de sol effectué dans chaque sous-parcelle ayant fait l'objet de 3 sous-échantillons, ces derniers sont donc dépendants et considérés comme des répliquas analytiques. Par conséquent l'analyse statistique de l'effet du système de production sur les différentes variables a été testé sur la moyenne de ces répliquas. Cependant, au vu du nombre restreint de répétitions pour la culture de Luzerne (expliqué par des rotations différentes d'un système à l'autre), l'effet du couple « précédent cultural/ culture en place » sur les différentes variables a été testé en prenant en compte l'ensemble des répliquas. Ainsi, l'effet du système de culture, du couple « précédent cultural/ culture en place » et du bloc sur les variables étudiées



**Figure 9** : Teneurs de **carbone** au lancement des incubations dans les différents systèmes de cultures. Les mesures sont effectuées sur les échantillons remaniés (profondeur de 0-30cm). La teneur en C de chaque système est notée au-dessus des barres d'histogramme. (NS=Non Significatif)



**Figure 10** : Teneurs d'**azote** au lancement des incubations dans les différents systèmes de cultures. Les mesures sont effectuées sur les échantillons remaniés (profondeur de 0-30cm). La teneur en N de chaque système est notée au-dessus des barres d'histogramme. (NS=Non Significatif)

ont été évalués par une analyse de variance (ANOVA). En cas de significativité, le test LSD du package agricolae de comparaison des moyennes a été utilisé (De Mendiburu, 2014). En raison d'un effet significatif des blocs en modèle linéaire simple, il a été décidé d'utiliser un modèle linéaire mixte avec comme facteurs fixes le couple « précédent cultural/ culture en place » et/ou système de culture, et comme facteur aléatoire le bloc en utilisant le package nlme (Pinheiro et Bates). La normalité et l'homoscédasticité des résidus du modèle ont été vérifiées par le test de Shapiro-Wilk et Levene respectivement. En cas de discordance, les données ont été transformées par la transformation Box Cox. Le test non paramétrique de Kruskal-Wallis du package agricolae (De Mendiburu, 2014) est mis en place dans le cas où les hypothèses du test ne seraient pas validées après transformation. Le test.t de comparaison des moyennes a été réalisé pour évaluer l'effet du mode de prélèvement (remanié vs non remanié) sur la minéralisation du C au sein d'un système de culture (CONV ou SCV).

### III./ Résultats et discussions

---

#### 1.) Teneur en carbone et en azote dans les différents systèmes

Les teneurs en C et en N des différents systèmes de production au lancement des incubations sont présentées en figure 9 et 10. Ces teneurs étant mesurées à partir des échantillons de sol remaniés, elles sont donc représentatives de la couche labourée (0-30 cm). Celle des échantillons non remaniés n'est pas présentée ici. Les analyses étant toujours en cours.

Les teneurs en C du sol sont comprises entre 12.24 g C. kg<sup>-1</sup> pour le système SCV et 10.81 g C. kg<sup>-1</sup> pour le système INT. L'analyse statistique ne révèle aucune différence significative entre les différents systèmes (p-value>0.05). Ces résultats sont en contradiction avec ceux de Autret et al. (2016) qui décèlent en 2014 sur ce même dispositif, une différence significative de la teneur en Co du sol dans l'horizon labouré du système SCV au regard des autres systèmes (CONV, INT et BIO). Cette différence s'explique par une augmentation moyenne de 0.87 g C. kg<sup>-1</sup> dans tous les systèmes entre 2014 et 2016 avec des variations maximales de 1.67 g C. kg<sup>-1</sup> en BIO et 1.19 g C. kg<sup>-1</sup> en CONV. Cependant, lorsque les horizons sont étudiés séparément, Autret et al. (2016) observe une différence notable dans la première couche du sol (0-10cm) du système SCV comparés aux autres systèmes alors que les concentrations de Co du sol dans les couches comprises entre 10 et 60 cm de profondeur ne sont pas significativement différentes.

La concentration moyenne en N dans les systèmes est de 1.15 g N. kg<sup>-1</sup> avec un maximum de 1.25 g N. kg<sup>-1</sup> pour le système SCV et un minimum de 1.09 g. kg<sup>-1</sup> de sol sec pour le système INT. Contrairement au C, l'azote se trouve majoritairement sous forme minérale dans le sol et est par conséquent très vite assimilé par les plantes, organisé par les micro-organismes ou perdu par lixiviation ce qui explique ces plus faibles concentrations. La teneur en N n'est pas significativement différente d'un système à l'autre (p-value>0.05). A l'instar du C, ces résultats sont en contradiction avec les teneurs en N mesuré en 2014. Effectivement, l'analyse statistique détecte une différence significative de teneur en N pour le système SCV au regard des autres systèmes (p <0.05). Une différence moyenne de 0.09 g N. kg<sup>-1</sup> est observée entre 2014 et 2016 pour tous les systèmes avec des maximums de 0.17 g N. kg<sup>-1</sup> pour le système BIO et 0.12 g N. kg<sup>-1</sup> pour le système CONV.

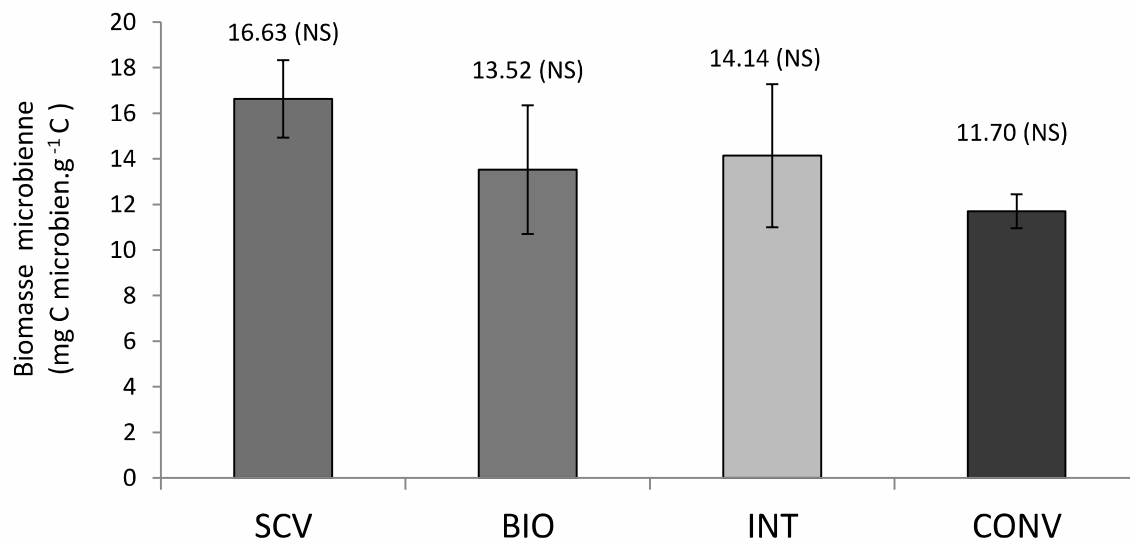




Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces résultats contradictoires de teneurs en C et N entre 2014 et 2016:

- les conditions de prélèvement : en 2016 l'échantillonnage des sols a été effectué dans des conditions humides avec des sols tassés. Ainsi, il est possible que la quantité de sol prélevée corresponde à des profondeurs plus importantes, ce qui engendrerait une dilution plus conséquente du C et de N organique diminuant ainsi les écarts entre les systèmes.
- les conditions climatiques entre les deux années de prélèvement ont pu avoir une influence sur les teneurs en C et N. La température et la teneur en eau du sol ont une influence sur plusieurs processus, particulièrement sur l'activité des microorganismes et par conséquent sur les teneurs en C et N total du sol (Calvet et al., 2001). Dimassi et al. (2014) ont étudié les variations de stock de Co sur une profondeur de 0-60cm de systèmes en non travail du sol vs travail superficiel vs travail du sol conventionnel sur une période de 40 ans. Ils se sont intéressés à l'influence de l'interaction climat et travail du sol sur les stocks de Co du sol et ont constaté que la baisse importante du stock en réduction du travail du sol était corrélée significativement aux bilans hydriques. Ainsi lors des années humides, l'augmentation de la teneur en eau du sol accroît la décomposition de la matière organique en travail du sol réduit (plus particulièrement en surface). A contrario, lors des années sèches le stockage du C en réduction du travail du sol est plus important qu'en travail du sol en raison d'une plus grande diminution de la minéralisation du Co par rapport au travail du sol conventionnel. Par ailleurs Wang et al., (2006) a examiné les effets de la température, de l'humidité du sol et de leurs interactions en incubant des carottes de sol prélevées dans 3 sites différents adjacent (un site pâturé, un site non pâturé depuis 4 ans et un site non pâturé depuis 25ans) sur les taux de minéralisation. Elle a pu mettre en évidence que la teneur en eau du sol ainsi que les températures impact profondément les taux de minéralisation sur les trois sites.
- L'interaction entre condition climatique et culture en place : Les variations maximales de teneurs en C et N ont été observées dans les systèmes BIO et CONV. En regardant séparément les teneurs en C et en N en fonction de la culture semées en 2016, on aperçoit une différence moyenne de teneur en C de 1.25 g C. kg<sup>-1</sup> et de teneur en N de 0.11 g N. kg<sup>-1</sup> entre les sous-parcelles en colza et celle en blé. Cette différence peut s'expliquer par la sénescence importante des feuilles de colza accentuée par les conditions climatiques douces lors du prélèvement. Dans le système BIO se sont les sous-parcelles en luzerne qui ont des teneurs en C et N plus élevées que dans les 3 autres systèmes, +0.95 g C. kg<sup>-1</sup> et +0.12 g N. kg<sup>-1</sup> respectivement.

Les teneurs en azote du sol sont en moyenne 10 fois plus faibles que celle du C. Effectivement la concentration moyenne dans les systèmes est de 1.14 g N. kg<sup>-1</sup> de sol sec avec un maximum de 1.25 g N. kg<sup>-1</sup> pour le système SCV et un minimum de 1.04 g N. kg<sup>-1</sup> pour le système CONV. Contrairement au C, l'azote se trouve majoritairement sous forme minérale dans le sol et, est par conséquent très vite assimilé par les plantes, organisé par les micro-organismes ou perdu par lixiviation ce qui explique ces plus faibles concentrations. La teneur en N n'est pas significativement différente d'un système à l'autre (p-value>0.05). A l'instar du C, ces résultats sont en contradiction avec les teneurs en N mesuré en 2014. Effectivement, l'analyse statistique détecte une différence significative de teneur en N pour le système SCV au regard des autres systèmes (p<0.05). Une différence moyenne de 0.08 g N. kg<sup>-1</sup> est observée pour tous les systèmes entre 2014 et 2016 avec un maximum de 0.17 g N. kg<sup>-1</sup> pour le système BIO. On peut avancer les mêmes hypothèses concernant les écarts de teneur entre 2014 et 2016.



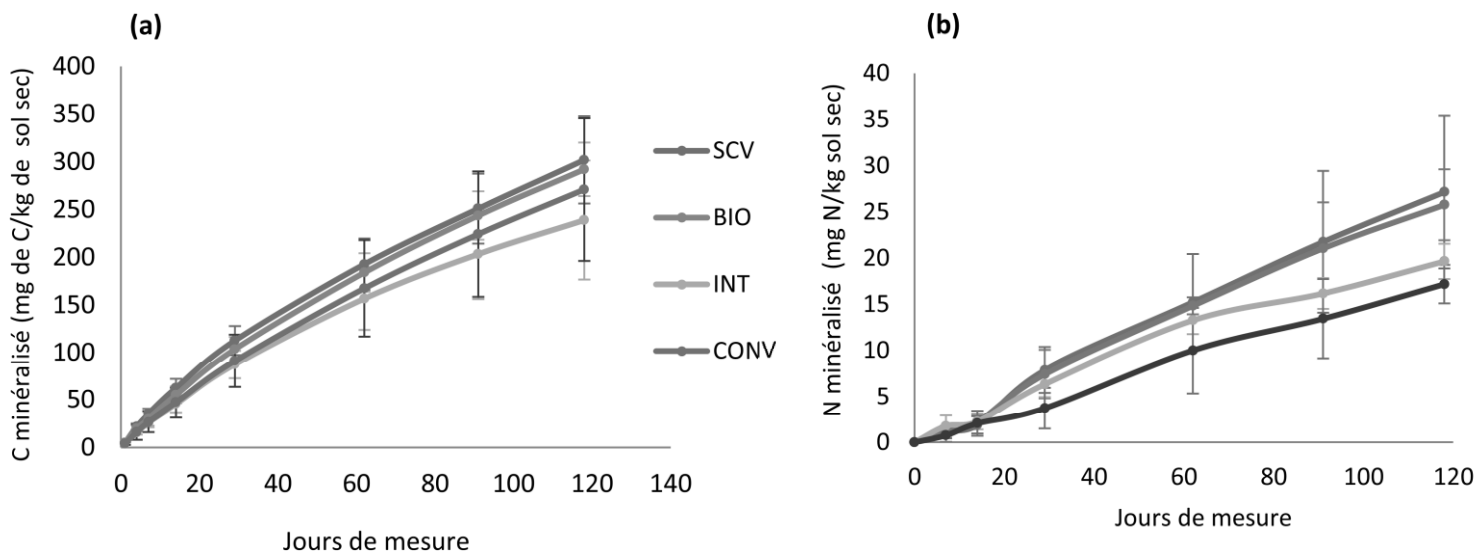
**Figure 11** : Biomasse microbienne dans les différents systèmes de cultures. Les mesures sont effectuées sur les échantillons remaniés (profondeur de 0-30cm). La quantité de biomasse microbienne rapportée à la teneur en C du sol de chaque système est notée au-dessus des barres d'histogramme. (NS=Non Significatif)

De manière générale ces résultats vont à l'encontre de ceux de nombreux auteurs (Clark et al., 1998; Mondelaers et al., 2009; Gattinger et al., 2012) qui mettent en évidence des teneurs en Co ou en N plus importantes dans des systèmes alternatifs tels que le non travail du sol, le système biologique ou intégré. Mazzoncini et al. (2015) comparent l'impact du non travail du sol sur les teneurs en Co et en N total du sol à partir du dispositif expérimental longue durée mis en place en 1986 par le Centre de recherche agro-environnementale de l'Université de Pise en Italie. Il met en évidence depuis 1996 des concentrations de Co significativement plus élevées dans le système en non labour sur une profondeur de 0-30cm comparé au système avec travail du sol. Ces différences variaient de 17% en 1996 à 31% en 2014. Les différences de teneur en N total du sol suivent la ligne de celle du Co. Cela remet donc en question les résultats trouvés en 2016 sur le dispositif de La Cage. Cependant, bien qu'il n'y ait pas de différence significative, la teneur en C et en N en SCV se classe en première position suivit du système BIO, INT et CONV.

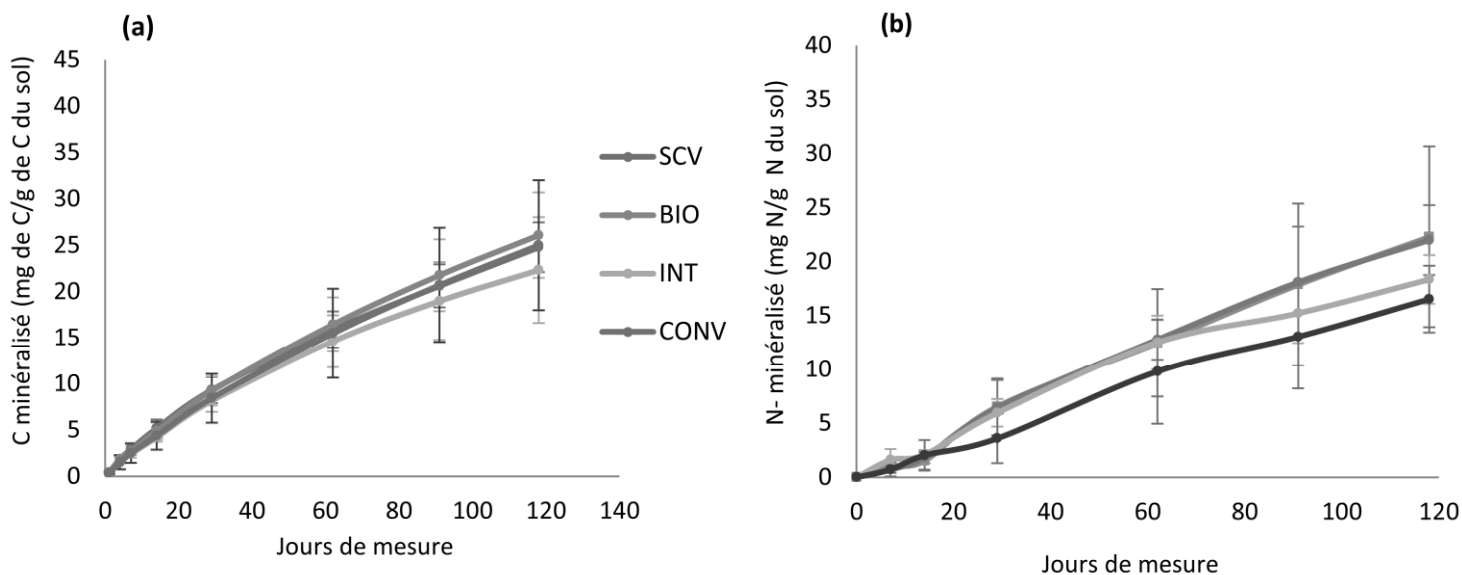
## 2.) Biomasse microbienne dans les différents systèmes

La biomasse microbienne mesurée, dans l'horizon 0-30 cm des différents systèmes de production au lancement des incubations, est présentée en figure 11. L'expression des résultats se fait en mg C microbien.g<sup>-1</sup> C du sol. Cette mesure reflète l'abondance de la biomasse microbienne qui minéralise les composés organiques dans chacun des systèmes pendant l'incubation. C'est dans le système SCV que l'abondance est la plus importante avec une moyenne de 16.63 mg C microbien. g<sup>-1</sup> C, suivit par le système INT (14.14 mg C microbien. g<sup>-1</sup> C), le système BIO (13.52 mg C microbien. g<sup>-1</sup> C) et en dernière position le système CONV avec une moyenne de 11.70 mg C microbien. g<sup>-1</sup> C. L'amplitude des valeurs de biomasse microbienne entre les systèmes s'élève à 4.93 mg C microbien. g<sup>-1</sup> C. Il est important de noter que la variabilité intra-système fluctue d'un système à l'autre. Effectivement, alors que l'écart-type est de 0.74 mg C microbien. g<sup>-1</sup> C dans le système CONV, il atteint 3.14 mg C microbien. g<sup>-1</sup> C dans le système INT. Dans ce système, les deux sous-parcelles du bloc 2 ont des valeurs 1.4 fois plus élevées que celle des deux autres sous-parcelles du bloc 1. Cette variabilité est difficile à expliquer, cependant la mesure n'a pas été effectuée avec une vraie répétition analytique. En effet, par manque de place dans l'enceinte de fumigation les mesures ont été faites sur deux échantillons de sol par sous-parcelle. L'analyse statistique ne révèle pas de différence significative entre les différents systèmes (p-value>0.05).

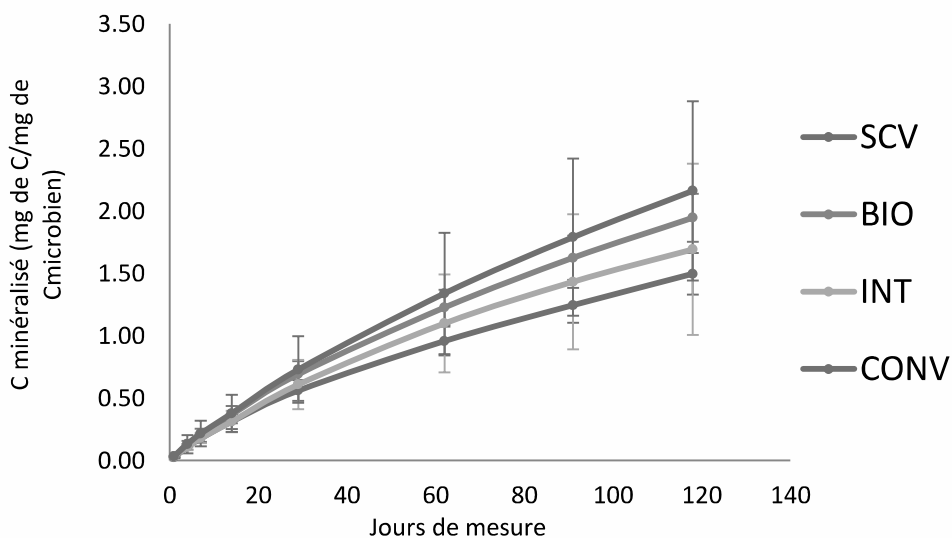
Ces conclusions statistiques sont en incohérence avec ceux de la littérature scientifique notamment ceux de Henneron et al.,(2014) qui, sur ce même dispositif expérimental de La Cage, démontre une augmentation du nombre d'organismes tels que les bactéries dans le système SCV. Cependant ces conclusions ont été établies sur une profondeur de 0-10 cm. Ainsi en travaillant sur une profondeur de labour de 0-30 cm l'effet quantité de biomasse microbienne en fonction du système de production est dilué. Cette augmentation de la biomasse microbienne avait déjà été observée précédemment dans d'autres systèmes de culture alternatifs. Effectivement, en 2010 Helgason et al. ont mis en évidence une biomasse bactérienne, fongique et totale environ 32% supérieure en non travail du sol comparé au système conventionnel avec labour. Ces conclusions se sont avérées identiques concernant le système biologique (Birkhofer et al., 2008), cependant ces augmentations ont été attribuées aux apports organiques étant donné que le système conventionnel avec apport de fumier a également vu sa biomasse microbienne et fongique plus importante que dans les systèmes sans apports. Même si l'analyse statistique ne révèle pas de différences significatives entre les systèmes de culture, la concentration mesurée en SCV reste supérieure aux autres systèmes.



**Figure 12** : Minéralisation absolue du C (a) et de N (b) dans les différents systèmes de culture, mesurée sur les échantillons de sol remaniés en incubation pendant 118 jours à l'INRA de Grignon



**Figure 13** : Minéralisation spécifique du C (a) et de N (b) dans les différents systèmes de culture, mesurée sur les échantillons de sol remaniés en incubation pendant 118 jours à l'INRA de Grignon



**Figure 14** : Minéralisation absolue du C exprimée en fonction du C microbien dans les différents systèmes de culture, mesurée sur les échantillons de sol remaniés en incubation pendant 118 jours à l'INRA de Grignon

### 3.) Cinétique de minéralisation du C et de N dans les différents systèmes

Les résultats de minéralisation sont issus des échantillons de sol remanié incubés 118 jours à 20°C et 18% d'humidité.

#### A. Minéralisation du C et de N

La dynamique de minéralisation absolue, spécifique du C et de N ainsi que la minéralisation du C rapporté au C microbien sont présentés par des courbes lissées en figures 12, 13 et 14. Les points représentent la moyenne des valeurs de minéralisation obtenue à une date de mesure donnée pour l'ensemble des sous-parcelles d'un même système de culture. Si on s'intéresse uniquement à l'allure générale des courbes, on remarque que la cinétique de minéralisation du C fluctue moins que celle de N. Pour le C, le classement des systèmes de production selon la quantité de C minéralisé varie peu d'un jour de mesure à l'autre. Au début des incubations, les courbes de minéralisation des différents systèmes de culture se chevauchent, l'écart-type au premier jour de mesure des valeurs de minéralisation des 4 systèmes est très faible : 0.37 mg C. kg<sup>-1</sup>, 0.03 mg C. g<sup>-1</sup> C, 0.004 mg C. mg<sup>-1</sup>C mic en absolue, spécifique et rapporté au C microbien respectivement. En fin d'incubation, les courbes sont plus écartées les unes des autres, l'écart-type au dernier jour de mesure des valeurs de minéralisation des 4 systèmes sont plus élevés : 27.89 mg C. kg<sup>-1</sup>, 1.59 mg C. g<sup>-1</sup>C et 0.29 mg C. mg<sup>-1</sup> C microbien en absolue, spécifique et rapporté au C microbien respectivement. Pour l'N, on observe une oscillation plus importante des courbes principalement en début d'incubation. Cela se justifie par le processus d'immobilisation de l'azote minéral. En effet, au début des incubations, l'activité microbienne se mettant en place, une partie de l'azote minéralisé par les microorganismes assure leur activité physiologique basale et n'est donc pas quantifié lors du dosage du N minéralisé. Cette fluctuation peut être accentuée en raison du caractère destructif du dosage de N minéral. Effectivement, le suivi n'est pas réalisé sur le même échantillon pour une sous-parcelle donnée, c'est donc une source de variabilité.

Les résultats et l'analyse statistique des valeurs cumulées de C et N minéralisé au dernier jour d'incubation sont présentés ci-dessous. On distingue l'effet du système de culture et l'effet du couple « précédent cultural/culture en place » sur les valeurs de minéralisation.

#### *L'effet du système de culture sur la minéralisation du C et de N*

Les valeurs de minéralisation absolue, spécifique et rapporté au C microbien pour la dynamique du C figurent dans le tableau III pour le C et en tableau IV pour l'N. Les résultats des analyses statistiques y sont de plus présentés.

Que ce soit pour le C ou l'N, la minéralisation absolue est plus importante pour les systèmes SCV (302.06 mg C. kg<sup>-1</sup> et 27.16 mg N. kg<sup>-1</sup>) et BIO (292.25 mg C. kg<sup>-1</sup> et 25.77 mg N. kg<sup>-1</sup>) que pour les systèmes CONV (271.13 mg C. kg<sup>-1</sup> et 17.19 mg N. kg<sup>-1</sup>) et INT (239.05 mg C. kg<sup>-1</sup> et 19.66 mg N. kg<sup>-1</sup>) avec toutefois des écart-types sont élevés se recoupant pour toutes les dates de mesures. Toutefois, les teneurs en C et en N du sol étant différentes d'un système à l'autre, il est préférable d'exprimer les résultats minéralisation spécifique, c'est-à-dire en fonction de la teneur en C du sol plutôt que pour une masse de sol donnée. Ce choix d'expression des résultats permet de comparer les systèmes entre eux et de ne pas attribuer une minéralisation supérieure dans un système au fait que la concentration en C<sub>0</sub> y est plus élevée. Lorsqu'on calcule la minéralisation en spécifique, les systèmes BIO et CONV se placent en premières positions avec 26.09 ± 4.60 et 25.01 ± 7.02 mg C. g<sup>-1</sup>C suivis des systèmes SCV et INT avec 24.78 ± 2.68 mg C. g<sup>-1</sup>C et 22.32 ± 5.72 mg C. g<sup>-1</sup>C. On remarque également que les écart-types sont élevés. Le passage en

**Tableau III** : Analyse de la minéralisation du C à travers la valeur cumulative au dernier jour de mesure (j118)

Significativité	Effet "système de culture"			Effet "couple précédent cultural/culture en place"											
	SCV	BIO	INT	CONV	Significativité	Colza / Blé	Blé / Colza	Luzerne / Luzerne							
NS	302.06	45.75 (a)	292.25	28.00 (a)	239.05	62.26 (a)	271.13	74.77 (a)	S (p < 0.001)	254.49	67.47 (b)	310.25	61.46 (a)	268.80	50.73 (b)
NS	24.78	2.68 (a)	26.09	4.60 (a)	22.32	5.72 (a)	25.01	7.02 (a)	S (p < 0.01)	23.69	6.24 (b)	26.44	5.25 (a)	23.23	6.39 (b)
NS	1.50	0.17 (a)	1.95	0.19 (a)	1.69	0.69 (a)	2.16	0.72 (a)	S (p < 0.001)	1.66	0.53 (b)	2.05	0.65 (a)	1.84	0.37 (b)

moyenne *écart-type* (comparaison des moyennes)

NS: Non significatif S: Significatif (valeur de la p-value)

**Tableau IV** : Analyse de la minéralisation de N à travers la valeur cumulative au dernier jour de mesure (j118)

Significativité	Effet "système de culture"			Effet "couple précédent cultural/culture en place"											
	SCV	BIO	INT	CONV	Significativité	Colza / Blé	Blé / Colza	Luzerne / Luzerne							
NS	27.16	8.25 (a)	25.77	3.83 (a)	19.66	1.90 (a)	17.19	2.09 (a)	S (p < 0.05)	20.86	4.10 (b)	22.40	7.72 (b)	28.90	2.80 (a)
NS	22.28	8.36 (a)	22.00	3.23 (a)	18.36	2.19 (a)	15.91	3.40 (a)	NS	19.03	3.73 (a)	18.98	6.77 (a)	23.80	3.81 (a)

moyenne *écart-type* (comparaison des moyennes)

NS: Non significatif S: Significatif (valeur de la p-value)

spécifique n'a pas engendré de changements dans la classification des systèmes de culture en fonction de la minéralisation de N. Les écart-types sont du même ordre de grandeur que pour la minéralisation absolue. L'analyse statistique ne détecte aucun effet significatif du système de culture sur la minéralisation absolue et spécifique du C et de N ( $p$ -value $>0.05$ ). La minéralisation est semblable d'un système à l'autre.

L'efficacité de la biomasse microbienne à dégrader des composés organiques dans chaque système de culture est illustrée à travers l'expression de la minéralisation du C rapporté au C microbien. La valeur moyenne de minéralisation du C au dernier jour d'incubation, tous systèmes confondus, s'élève à 1.82 mg C.  $\text{mg}^{-1}$  C microbien, avec une valeur maximale à 2.16 mg C.  $\text{mg}^{-1}$  C mic pour le système CONV et une minimal à 1.50 mg C.  $\text{mg}^{-1}$  C mic pour le système SCV, avec des écart-types élevés pour tous les systèmes. L'analyse statistique ne détecte aucun effet du système de culture sur la minéralisation du C exprimé en C microbien du sol ( $p$ -value $>0.05$ ). Ainsi l'efficacité de minéralisation par les microorganismes est équivalente dans tous les systèmes de production. Cependant, il est intéressant de noter la tendance de la biomasse microbienne du système CONV à avoir une efficacité de minéralisation plus élevée au regard des autres systèmes et ce avec une abondance microbienne la plus faible.

#### *L'effet du couple « précédent cultural/culture en place » sur la minéralisation du C et de N*

Les valeurs de minéralisation absolue, spécifique et rapporté au C microbien pour la dynamique du C figurent dans le tableau III pour le C et en tableau IV pour l'N. Les résultats des analyses statistiques y sont de plus présentés.

Dans tous les cas de figure, la minéralisation absolue du C est plus élevée pour le couple Blé/Colza. Effectivement, la minéralisation absolue du C dans cette rotation s'élève à 310.25 mg C.  $\text{kg}^{-1}$  contre 254 mg C.  $\text{kg}^{-1}$  et 268.80 mg C.  $\text{kg}^{-1}$  pour la rotation Colza/Blé et Luzerne/Luzerne respectivement. La minéralisation spécifique, est de 26.44 mg C.  $\text{g}^{-1}$ C contre 23.69 mg C.  $\text{g}^{-1}$ C et 23.23 mg C.  $\text{g}^{-1}$ C pour la rotation Colza/Blé et Luzerne/Luzerne respectivement. Enfin, celle rapporté au C microbien est de 2.05 mg C.  $\text{mg}^{-1}$  C microbien contre 1.66 mg C.  $\text{mg}^{-1}$ C micro et 1.84 mg C.  $\text{mg}^{-1}$ C mic pour la rotation Colza/Blé et Luzerne/Luzerne respectivement. L'analyse de variance détecte un effet significatif du couple « précédent cultural/culture en place » sur la minéralisation absolue ( $p$ -value $<0.001$ ), spécifique ( $p$ -value $<0.01$ ) et rapporté au C microbien ( $p$ -value $<0.001$ ). La comparaison des moyennes révèle une minéralisation significativement plus importante pour le couple « précédent cultural/culture en place » Blé/Colza par rapport au couple Colza/Blé et Luzerne/Luzerne. Ainsi la minéralisation du C et l'efficacité de la biomasse microbienne à minéraliser des composés carbonés sont plus élevées dans les sols où une culture de Colza a été semée début septembre et avec un précédent Blé.

Les valeurs de minéralisation absolue de N est statistiquement plus élevée dans le couple Luzerne/Luzerne ( $p$ -valeur $<0.05$ ) avec une moyenne de 28.90 mg N.  $\text{kg}^{-1}$ , contre 22.40 mg N.  $\text{kg}^{-1}$  et 20.86 mg N.  $\text{kg}^{-1}$  pour le couple Blé/Colza et Colza/Blé respectivement. En revanche, l'analyse statistique ne détecte effet significatif du couple « précédent cultural/culture en place » sur la minéralisation spécifique de N ( $p$ -value $>0.05$ ). Ainsi, la minéralisation spécifique est équivalente entre les différents couples : Luzerne/Luzerne (23.80  $\pm$  3.81 mg N.  $\text{g}^{-1}$  N), Colza/Blé (19.03  $\pm$  3.73 mg N.  $\text{g}^{-1}$  N) et Blé/Colza (18.98  $\pm$  6.77 mg N.  $\text{g}^{-1}$  N).



**Tableau V** : Analyse de la minéralisation du C à travers l'optimisation des paramètres de modélisation de la cinétique de minéralisation

Paramètres	Effet "système de culture"				Effet "couple précédent cultural / culture en place"				
	Significativité	SCV	BIO	INT	CONV	Significativité	Colza / Blé	Blé / Colza	Luzerne / Luzerne
Absolue (mg C / kg sols sec)	NS	425.08 94.31 (a)	456.88 84.54 (a)	359.17 125.92 (a)	473.04 112.89 (a)	S (p < 0.01)	401.39 127.29 (b)	487.92 123.98 (a)	413.87 97.03 (b)
	NS	0.01 0.002 (a)	0.01 0.002 (a)	0.01 0.005 (a)	0.01 0.002 (a)	NS	0.01 0.01 (a)	0.01 0.00 (a)	0.01 0.002 (a)
Spécifique (mg C / g C du sol)	NS	34.54 3.32 (a)	41.09 11.14 (a)	33.81 12.59 (a)	44.58 7.80 (a)	S (p < 0.01)	37.52 12.34 (ab)	41.47 10.47 (a)	36.01 12.28 (b)
	NS	0.01 0.002 (a)	0.01 0.002 (a)	0.01 0.005 (a)	0.01 0.002 (a)	NS	0.01 0.01 (a)	0.01 0.003 (a)	0.01 0.002 (a)
(mg C / mg de C microbien)	NS	2.09 0.27 (a)	3.03 0.47 (a)	2.61 1.30 (a)	3.74 0.91 (a)	NS	2.66 1.04 (a)	3.26 1.27 (a)	2.81 0.59 (a)
	NS	0.01 0.002 (a)	0.01 0.002 (a)	0.01 0.005 (a)	0.01 0.002 (a)	NS	0.01 0.01 (a)	0.01 0.00 (a)	0.01 0.002 (a)

moyenne écart-type (comparaison des moyennes)

NS: Non significatif S: Significatif (valeur de la p-value)

Ymax : asymptote (valeur maximal de minéralisation)

k : constante de vitesse (jour<sup>-1</sup>)

**Tableau VI** : Analyse de la minéralisation de N à travers l'optimisation des paramètres de modélisation de la cinétique de minéralisation

Paramètre	Effet "système de culture"				Effet "couple précédent cultural/culture en place"				
	Significativité	SCV	BIO	INT	CONV	Significativité	Colza / Blé	Blé / Colza	Luzerne / Luzerne
Absolue (mg N / kg sols sec)	NS	0.24 0.08 (a)	0.23 0.04 (a)	0.18 0.02 (a)	0.15 0.04 (a)	S (p < 0.05)	0.18 0.04 (b)	0.19 0.07 (b)	0.25 0.02 (a)
Spécifique (mg N / g N du sol)	NS	0.19 0.08 (a)	0.19 0.04 (a)	0.17 0.03 (a)	0.14 0.04 (a)	S (p < 0.05)	0.16 0.03 (ab)	0.16 0.06 (b)	0.21 0.03 (a)

moyenne écart-type (comparaison des moyennes)

NS: Non significatif S: Significatif (valeur de la p-value)

$\alpha$  : pente de la courbe de modélisation

## *B. Analyse des paramètres de simulation de la minéralisation C et N*

Les résultats de l'analyse de variances sur les paramètres ( $Y_{max}$  et  $k$  ou  $a$ ) des courbes de minéralisation du C et de N sont présentés en tableau V et VI. Les paramètres ont été analysés pour l'ensemble des expressions de la minéralisation. Les moyennes, les écart-types et la significativité des tests statistiques concernant l'effet du système de culture et du couple « précédent cultural/culture en place » y sont précisés.

### *L'effet du système de culture sur la minéralisation du C et de N*

Le paramètre  $Y_{max}$  de minéralisation du C, représentant la valeur maximale de minéralisation qui pourrait être obtenue, est en moyenne de 434.28 mg C. kg<sup>-1</sup> en absolue, de 38.75 mg C. g<sup>-1</sup> C en spécifique et de 2.90 mg C. mg<sup>-1</sup> C mic. Ce paramètre de modélisation atteint des valeurs de minéralisation supérieures à celles mesurées au dernier jour d'incubation, indiquant que la minéralisation pourrait être poursuivie avant d'atteindre un palier maximum de C minéralisé. Effectivement, quel que soit l'unité d'expression du résultat, c'est le système CONV qui se place en première position suivi par le système BIO, SCV et INT qui ont des valeurs en moyenne 1.15 fois, 1.29 et 1.49 fois inférieur aux autres CONV en absolue, spécifique et rapporté au C microbien respectivement. Le paramètre  $k$ , correspondant à la constance de vitesse (jour<sup>-1</sup>) montre des valeurs du même ordre de grandeur quel que soit l'expression de la minéralisation du C.

Le paramètre  $a$  correspond à la vitesse de la minéralisation de N en mg N. kg<sup>-1</sup>. jour<sup>-1</sup> en absolue et en mg N. g<sup>-1</sup> N. jour<sup>-1</sup> en spécifique. Les valeurs de  $a$  sont également du même ordre de grandeur tous systèmes confondus avec une moyenne de 0.2 mg N. kg<sup>-1</sup>. jour<sup>-1</sup> en minéralisation absolue et 0.17 mg N. g<sup>-1</sup> N. jour<sup>-1</sup> en minéralisation spécifique.

L'analyse statistique des paramètres  $Y_{max}$ ,  $k$ , et  $a$  ne détecte aucun effet significatif du système de culture sur la minéralisation du C et de N et ce quel que soit l'expression des résultats et du paramètre étudié (p-value > 0.05). La minéralisation est équivalente d'un système à l'autre.

### *L'effet du couple « précédent cultural/culture en place » sur la minéralisation du C et de N*

L'effet du couple « précédent cultural/culture en place » sur la valeur de  $Y_{max}$  est comparable à celui sur la minéralisation du C et de N au dernier jour d'incubation. L'analyse de variance sur le paramètre  $Y_{max}$  révèle un effet significatif de la rotation culturale, avec une minéralisation du C (en absolue et spécifique) significativement plus importante pour la succession Blé/Colza (487.92 mg C. kg<sup>-1</sup> avec une p-value<0.01 et 41.47 mg C. g<sup>-1</sup> C avec une p-value<0.01). Cependant, aucun effet du paramètre  $k$  n'est détecté sur les différentes expressions de la minéralisation (p-value>0.05), ce qui laisse à penser que la quantité minéralisée ( $Y_{max}$ ) peut être significativement différente d'une rotation à l'autre mais que la vitesse de dégradation ( $k$ ) varie peu. La différence significative observée pour le paramètre  $Y_{max}$  serait par conséquent liée aux entrées de MO plus ou moins dégradables. De plus aucune différence significative du paramètre  $Y_{max}$  des courbes de minéralisation du C rapporté à la biomasse microbienne (p-value>0.05) n'est détectée.

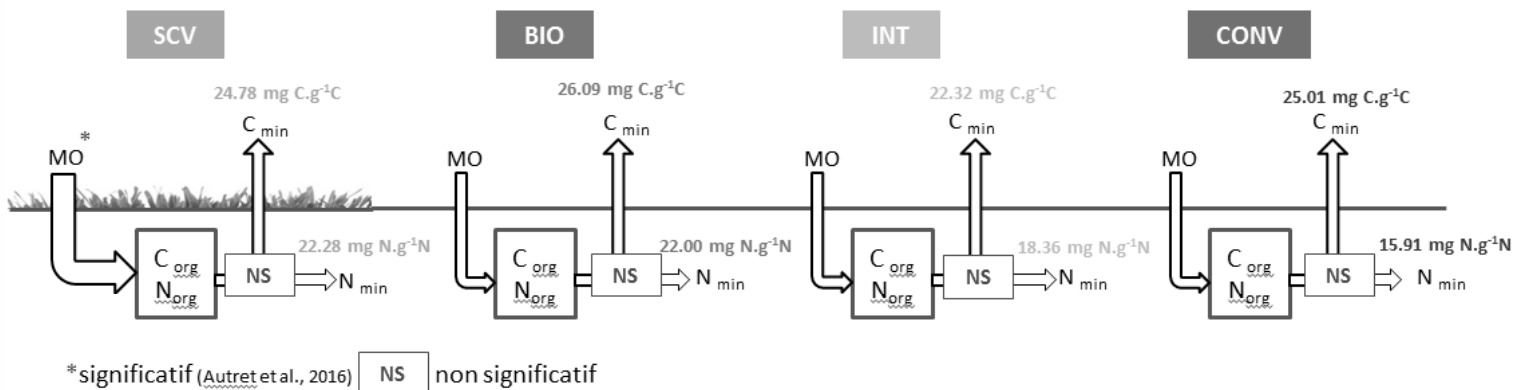
Concernant la minéralisation de l'N, l'analyse sur les paramètres révèle de nouveau une minéralisation significativement plus importante pour la rotation Luzerne/ Luzerne comparée aux deux autres rotations (p-value<0.05) en minéralisation absolue. Contrairement à l'analyse au dernier jour d'incubation de la minéralisation spécifique de l'azote, l'analyse statistique sur le paramètre  $a$  de modélisation de la



minéralisation spécifique met en évidence un effet significatif du couple Luzerne/Luzerne uniquement par rapport à Blé/Colza.

### C. Bilan de la minéralisation du C et N sur les effets testés

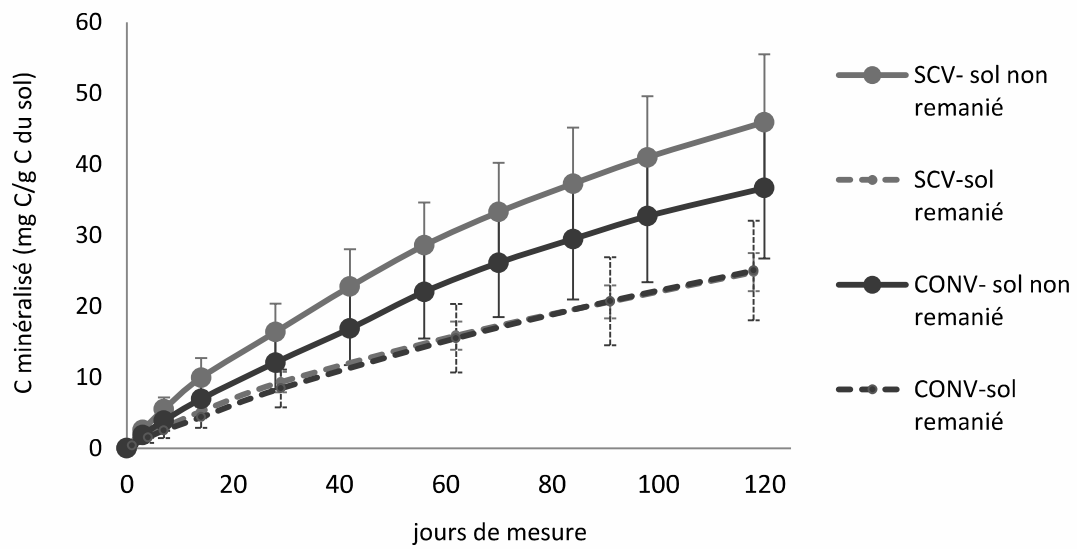
Le schéma ci-dessous synthétise les résultats obtenus sur l'effet des systèmes de culture sur la minéralisation du C et de N. Les valeurs de minéralisation spécifique du C et de N sont précisées ainsi que les résultats de l'analyse statistique.



**Figure 15** : Bilan des effets du système de production sur la minéralisation du C et N

Les résultats expérimentaux sur les échantillons de sol remanié incubé pendant 118 jours ne montrent pas d'effet significatif du système de culture sur la minéralisation du C et de N. L'hypothèse de départ est validée, à savoir que les systèmes de production alternatifs, sur la profondeur étudiée de 0-30 cm, n'affectent pas les vitesses de minéralisation de la MO du sol, y compris dans le système en non labour (SCV). Ces résultats contredisent ceux de nombreux auteurs qui ont démontré une augmentation de la vitesse de décomposition de la MOS dans des systèmes en non travail du sol (Bossuyt et al., 2002; Grandy et Robertson, 2007; Balesdent et al., 2000; Barreto et al., 2009). Cependant nous avons pu voir en introduction bibliographique que ces résultats ont été contestés par d'autres scientifiques qui ont mis en avant une minéralisation plus importante du C et de N dans des conditions de non travail du sol. Par ailleurs, ces résultats sont confortés par la simulation, à l'aide du modèle AMG, de l'évolution des stocks de Co entre 1998 et 2014 dans les 4 systèmes de cultures du dispositif expérimental de La Cage (Autret et al. 2016). Effectivement, ils ont démontré que le temps de résidence moyen de la MO était le même pour les 4 systèmes de culture et que l'utilisation du facteur de TRM de 1.9 suggéré par Paustian et al. (2000) pour le système en non labour conduisait à une surestimation des stocks de Co dans le système SCV.

Toutefois l'effet du travail du sol sur la protection de la matière organique n'est pas entièrement remis en question. Effectivement, le travail du sol engendre une destruction rapide des macroagrégats. La MO auparavant protégée dans les agrégats est davantage accessible à la dégradation (Six et al., 1999; Bossuyt et al., 2002). Ainsi dans le système SCV sans travail du sol, le Co serait davantage protégé au sein des agrégats que dans les systèmes en travail du sol tels que CONV, INT et BIO, ce qui aurait tendance à diminuer les vitesses de minéralisation. Or, nous n'observons pas de différence ce suggère que d'autres facteurs favorisant la vitesse de dégradation sont à prendre en compte dans le fonctionnement du système SCV. Le facteur pouvant également influencer les vitesses de minéralisation des composés organiques sont les entrées de MO. En effet, les résultats de nos expérimentation ont pu mettre en évidence un effet des couples « précédent cultural/ culture en place » sur la minéralisation du C. Selon le précédent cultural, les quantités et la qualité de la MO restitué par les résidus de culture est différente. Cela confirme que les



**Figure 16 :** Minéralisation spécifique du C mesurée sur les échantillons de sol remaniés en incubation pendant 118 jours à l'INRA de Grignon et sur des échantillons de sol non remanié en incubation pendant 120 jours à l'INRA de Laon

entrées de MO ont une influence sur les vitesses de dégradation de la MO. Les entrées de MO ont pu influencer les vitesses de minéralisation à travers la quantité de MO apportée, qui est plus importante dans le système SCV. Effectivement, Autret et al. (2016) a mis en évidence des entrées de C significativement plus importante dans le système SCV par rapport aux autres systèmes, notamment des résidus racinaires issus des couverts végétaux plus important. Par ailleurs, la qualité de la MO a elle aussi une influence sur la minéralisation des composés organiques. En effet, la décomposition de la MO, notamment des résidus de culture est contrôlée par de nombreux facteurs tels que la composition biochimique des plantes en cellulose, hémicellulose, lignine (Abiven et al., 2005). Ces derniers ont démontré que la minéralisation du C racinaire est plus lente que celles des feuilles et des tiges. Par ailleurs, McDaniel et al. (2014) ont mis en évidence que la diversité des cultures au fil du temps influe sur la transformation des résidus nouvellement apporté, sur la dynamique microbienne et sur le cycle des nutriments. Cette étude a été réalisée en incubant des sols prélevés sur une profondeur de 0-10 cm sur lesquels des longues rotations ont été mise en place depuis 5 ans. Le système SCV ayant une succession culturale plus diversifiée que les autres systèmes en raison des cultures intermédiaires et des cultures de couvert mises en place, nous supposons que cela à impacter les vitesses de minéralisation tels que le suggère McDaniel et al. (2014).

#### **4.) Cinétique de minéralisation du C échantillons remaniés vs non remaniés**

Les cinétiques de minéralisation du C des échantillons de sol remaniés vs non remaniés peuvent être comparées en raison de la similitude des résultats entre des deux méthodes de mesure du CO<sub>2</sub> observée dans le cadre de la vérification de la conformité des résultats entre les méthodes (méthode soude et méthode microchromatographe). Cependant, aucune analyse statistique n'a pu être effectuée en raison de la suppression d'un des répliquats de la méthode microchromatographe pour lequel les mesures de CO<sub>2</sub> émis sont incohérentes par rapport aux deux autres répliquats. En effet, il semblerait que cet échantillon n'ait pas minéralisé à hauteur des autres ; cela peut être dû à un problème d'étanchéité du bocal. Il a donc été décidé de supprimé ce répliquat et de pas le prendre en compte dans l'ensemble des analyse effectué. Par conséquent il faut se contenter de l'appréciation du graphique de comparaison des méthodes (figure 16) avec des courbes et des écart-types qui se recoupent à toutes les dates de mesures, ce qui laisse présager qu'il n'y aurait pas de différences significatives entre ces deux méthodes de mesure du C minéralisé à partir d'un sol (Annexe 2).

La dynamique de minéralisation spécifique du C des échantillons de sol remaniés et non remaniés des systèmes CONV et SCV sont représentés par des courbes lissées en figures 16. Les points représentent la moyenne des valeurs de minéralisation obtenue à une date de mesure donnée pour l'ensemble des sous-parcelles d'un même système de culture.

Si on s'intéresse uniquement à l'allure générale des courbes, on remarque que la cinétique de minéralisation du C dans les sols non remaniés est supérieure à celle des sols remaniés et ce pour les deux systèmes de production. Les écart-types des échantillons de sol remaniés se recoupent avec ceux des échantillons non remaniés du système CONV. L'analyse statistique a été réalisée uniquement sur les paramètres du modèle Y<sub>max</sub> et k. Effectivement, comme la durée d'incubation est différente entre les deux types d'échantillonnage (118 jours pour les échantillons de sol remaniés et 120 jours pour les échantillons non remaniés) il est préférable de comparer ces cinétiques uniquement sur les valeurs des paramètres afin de ne pas faire de confusion d'effet et d'attribuer une différence qui serait expliqué par un jour de mesure différents au dernier jour d'incubation. Les valeurs des paramètres ne sont pas présentées ici. L'analyse statistique de comparaison des moyennes au sein d'un même système pour le paramètre Y<sub>max</sub> a mis en



évidence un effet du type de prélèvement sur la minéralisation du C absolue et spécifique en système SCV (p-value > 0.05 en absolue, p-value > 0.001 en spécifique) mais pas en système CONV (p-value>0.05 en absolue et spécifique). Cependant la quantité de C minéralisable ( $Y_{max}$ ) est dépendant des quantités de C de départ. Etant donné que, pour les échantillons non remaniés les résidus de cultures et la macrofaune piégés lors du prélèvement n'ont pas été enlevés cela engendre une quantité plus importante de composés facilement minéralisable comparé aux échantillons issus des prélèvements remaniés. Ces matières organiques étant plus importante en système SCV cela explique que l'on n'observe pas de différence pour le paramètre  $Y_{max}$  en système CONV. Cependant, l'analyse du paramètre k, de constance de vitesse ( $\text{jour}^{-1}$ ) ne révèlent aucun effet significatif du type de prélèvement sur la minéralisation du C en absolue et spécifique quel que soit le système de production SCV et CONV (p-value>0.05). Ainsi d'après ce paramètre il n'y a pas d'effet du type de prélèvement et par conséquent de la structure du sol sur la minéralisation du C dans les systèmes étudiés SCV et CONV.





## IV./Conclusion et perspectives

---

Nous avons étudié la dynamique de minéralisation du C et de N par incubation en laboratoire à partir de prélèvement de sol issu du dispositif expérimental de longue durée de La Cage comparant un système de production conventionnel à des systèmes de production alternatifs (Système Intégré, Agriculture Biologique et Système sous couvert végétal permanent sans labour). Les objectifs, les résultats ainsi que les conclusions de notre étude sont résumés ci- dessous:

- **Objectif n°1** : Evaluer la capacité de minéralisation de systèmes de culture alternatifs au regard d'un système conventionnel. Pour cela, une expérimentation d'incubation d'échantillons de sol remaniés issus des différents systèmes de production a été mise en place. Les résultats expérimentaux nous permettent d'établir la conclusion suivante : **les systèmes de production alternatifs, sur la profondeur étudiée de 0-30 cm, n'affectent pas les vitesses de minéralisation de la MO du sol, y compris dans le système en non labour (SCV)**. Ce résultat ainsi que la bibliographie réalisée nous conduisent à formuler deux nouvelles hypothèses. Dans le système SCV, la quantité et la qualité des MO restituées en surface stimuleraient davantage la dégradation de composés organiques que les autres systèmes, alors que dans les systèmes CONV, BIO et INT le facteur travail du sol stimulerait lui la minéralisation des composés organiques au regard du système non labour (SCV). Ces hypothèses pourraient être testées par des expérimentations supplémentaires:
  - Analyser la qualité biochimique des résidus de cultures issus des différents systèmes (quantification des composés pariétaux). Les résidus de culture supplémentaires observés en SCV, notamment ceux issus de la Luzerne, seraient plus facilement décomposables que les résidus présents dans les 3 autres systèmes de culture. Cette manipulation permettrait de répondre à la deuxième hypothèse.
  - Déterminer la quantité de C et N protégée dans le sol du système SVC comparé au système CONV, par mesure de minéralisation du C et de N dans des échantillons de sol broyé et non broyé issus de ces systèmes de culture. (Cette manipulation a été envisagée dans le cadre de mon stage, mais par manque de temps et de moyen cela n'a pas pu être réalisé, cependant le protocole de manipulation a pu être rédigé Annexe 3). Cette manipulation permettrait de répondre à la seconde hypothèse
- **Objectif n°2** : Evaluer l'effet potentiel de la structuration du sol sur la capacité de minéralisation du C et de N en système de production avec et sans travail du sol (CONV vs SCV). Pour cela, une expérimentation d'incubation d'échantillons de sol remaniés et non remanié issus des systèmes de production CONV et SVC a été mise en place. Les résultats expérimentaux nous permettent d'établir la conclusion suivante : la structuration du sol n'affecte pas les vitesses de minéralisation de la MO dans les systèmes avec et sans travail du sol. Cependant, nous avons pu établir des différences de quantité maximale pouvant être minéralisée dans le système SCV selon le mode de prélèvement (remaniés vs non remanié) expliqué par des quantités de MO plus importante dans les échantillons de sols non remaniés. Or cette manipulation est complexe car elle suggère de parvenir à retirer l'ensemble de la MO fraîches présentes dans l'échantillon, au risque de dénaturer la structure du sol de l'échantillon. Une solution serait de reconstituer des carottes de sol après un retrait des MO fraîches, en respectant les gradients de teneur en Co et de densités apparentes qui existent sur la profondeur considéré.

Ces résultats s'insèrent dans le travail de recherche de Bénédicte Autret qui vise à estimer l'impact des systèmes de culture alternatifs sur le cycle du carbone et de l'azote, tant en termes de stockage de ces éléments dans le sol, que des pertes par lessivage ou émissions gazeuses. Mieux comprendre les processus



biogéochimiques qui affectent ces flux de carbone et d'azote, en particulier leurs minéralisations dans le sol, peut favoriser par la suite la diffusion de méthodes de productions alternatives plus respectueuses de l'environnement.



## V./ Références Bibliographiques

---

- Abiven, S., Recous, S., Reyes, V., & Oliver, R. (2005). Mineralisation of C and N from root, stem and leaf residues in soil and role of their biochemical quality. *Biology and Fertility of Soils*, 42(2), 119–128. <http://doi.org/10.1007/s00374-005-0006-0>
- A.Altieri Miguel, G.Farrell John, B.Norgaard Susanna, Liebman Matt, Magdoff Fred, Murphy Bill, B.Norgaard et O.Sikor Thomas. (1987). *Agroecology : the scientific basis of alternative agriculture*. Westview Press A Member of the Perseus Books Group, 246pp
- Arrouays, D., Balesdent, J., Jayet, P. a., Soussana, J.-F., & Stengel, P. (2002). Stocker du carbone dans les sols agricole, 332.
- Baldwin, K. R. (2016). Soil Quality Considerations for Organic Farmers.North carolina cooperative extension service, EO6-45788
- Balesdent, J., Chenu, C., & Balabane, M. (2000). Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil & Tillage Research*, 53(3-4), 215–230. [http://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00107-5](http://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00107-5)
- Bàrberi, P. (2002). Weed management in organic agriculture: are we adressing the right issues? *Weed Res*, 42, 177–193.
- Barreto, R. C., Madari, B. E., Maddock, J. E. L., Machado, P. L. O. A., Torres, E., Franchini, J., & Costa, A. R. (2009). The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO<sub>2</sub> in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 132(3-4), 243–251. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.008>
- Bénédicte Autret, Bruno Mary, Claire Chenu, May Balabane, Cyril Girardin, Michael Bertrand, Gilles Grandeau, N. B. (2016). Alternative arable cropping systems: a key to increase soil organic carbon storage? Results from a 16 year field experiment. *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015*, 1, 150–164. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Benoit, M. (2015). Les fuites d 'azote en grandes cultures céréalières : Lixiviation et émissions atmosphériques dans des systèmes biologiques et conventionnels du bassin de la Seine ( France).Thèse de Doctorat, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- Birkhofer, K., Bezemer, T. M., Bloem, J., Bonkowski, M., Christensen, S., Dubois, D., Scheu, S. (2008). Long-term organic farming fosters below and aboveground biota: Implications for soil quality, biological control and productivity. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(9), 2297–2308. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.05.007>
- Boller, E. F., Avilla, J., Gendrier, J. P., Jörg, E., & Malavolta, C. (1998). *Integrated Production in Europe: 20 years after the declaration of Ovrornaz*. IOBC wprs Bulletin Bulletin OILB srop (Vol. 21).
- Bossuyt, H., Six, J., & Hendrix, P. F. (2002). Aggregate-Protected Carbon in No-tillage and Conventional Tillage Agroecosystems Using Carbon-14 Labeled Plant Residue. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 1965. <http://doi.org/10.2136/sssaj2002.1965>
- Cardinael, R., Chevallier, T., Barthès, B. G., Saby, N. P. A., Parent, T., Dupraz, C., ... Chenu, C. (2015). Impact of alley cropping agroforestry on stocks, forms and spatial distribution of soil organic carbon - A case study in a Mediterranean context. *Geoderma*, 259-260, 288–299. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.06.015>



- Chenu, C., Klumpp, K., Bispo, A., Angers, D., Colnenne, C., & Metay, A. (2014). Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France. *Innovations Agronomiques*, 37, 23–37.
- Christian Lévêque, D. P. (2006). Les poissons des eaux continentales africaines-Diversité, écologie utilisation par l'homme, 190.
- Christophe Nhuyen. (2003). Rhizodeposition of organic C by plants: mechanisms and controls. *Agronomic Sustainable Development*, 25(2004), 375–396. <http://doi.org/10.1051/agro>
- Citeau Laëticia, Bispo Antonio, Bardy Marion et King Dominique. (2008). Gestion durable des sols. Quae édition, 323pp
- Clark, M. S., Horwarth, W. R., Shennan, C., & Scow, K. M. (1998). Changes in soil chemical properties resulting from organic and low-input farming practices. *Agronomy Journal*, 90.(October), 662–671. <http://doi.org/10.2134/agronj1998.00021962009000050016x>
- Corsi, S., Friedrich, T., Kassam, A., Pisante, M., & de Moraes Sa, J. (2012). *Soil organic carbon accumulation and greenhouse gas emission reductions from conservation agriculture: A literature review* (Vol. 16).
- Curtin, D., Beare, M. H., Scott, C. L., Hernandez-Ramirez, G., & Meenken, E. D. (2014). Mineralization of Soil Carbon and Nitrogen Following Physical Disturbance: A Laboratory Assessment. *Soil Science Society of America Journal*, 78(3), 925. <http://doi.org/10.2136/sssaj2013.12.0510>
- Dimassi, B., Mary, B., Wylleman, R., Labreuche, J., Couture, D., Piraux, F., & Cohan, J. P. (2014). Long-term effect of contrasted tillage and crop management on soil carbon dynamics during 41 years. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 188, 134–146. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2014.02.014>
- Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15, 3–11.
- Fontaine, S., Mariotti, A., & Abbadie, L. (2003). The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? *Soil Biology and Biochemistry*, 35(6), 837–843. [http://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00123-8](http://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00123-8)
- Gallardo, A., & Merino, J. (1992). Nitrogen mineralization in leaf litter at two Mediterranean ecosystems of SW Spain. *Biogeochemistry*, 15(1980), 213–228.
- Gattinger, A., Muller, A., Haeni, M., Skinner, C., Fliessbach, A., Buchmann, N., ... Niggli, U. (2012). Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(44), 18226–31. <http://doi.org/10.1073/pnas.1209429109>
- Grandy, A. S., & Robertson, G. P. (2007). Land-use intensity effects on soil organic carbon accumulation rates and mechanisms. *Ecosystems*, 10(1), 58–73. <http://doi.org/10.1007/s10021-006-9010-y>
- Grosbellet, C. (2008). Évolution Et Effets Sur La Structuration Du Sol De La Matière Organique Apportée En Grande Quantité. Thèse de Doctorat, Université d'Angers.
- Helgason, B. L., Walley, F. L., & Germida, J. J. (2010). No-till soil management increases microbial biomass and alters community profiles in soil aggregates. *Applied Soil Ecology*, 46(3), 390–397. <http://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.10.002>
- Henneron, L., Bernard, L., Hedde, M., Pelosi, C., Villenave, C., Chenu, C., Blanchart, E. (2014). Fourteen years of evidence for positive effects of conservation agriculture and organic farming on soil life. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1), 169–181. <http://doi.org/10.1007/s13593-014-0215-8>





- Hobbs, P., Sayre, K., & Gupta, R. (2008). The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 543–555. <http://doi.org/10.1098/rstb.2007.2169>
- Jones, D. L., & Murphy, D. V. (2007). Microbial response time to sugar and amino acid additions to soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(8), 2178–2182. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.03.017>
- Laboubee, C. (2007). Retour au sol des matières organiques nécessaire à leur maintien en état en sols agricoles, Rapport d'Arvalis, 45.
- Lahmar Rabah et Ribaut Jean-Pierre. Sol et société, regards pluriculturels. (2001). Charles Leopold Mayer, 218pp
- Lefèvre, R. (2015). Matière organique stable du sol: dynamique et mécanismes de (dé)stabilisation. Thèse de Doctorat, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris IV.
- Leifeld, J., Angers, D. a, Chenu, C., Fuhrer, J., Kätterer, T., & Powlson, D. S. (2013). Organic farming gives no climate change benefit through soil carbon sequestration. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(11), E984. <http://doi.org/10.1073/pnas.1220724110>
- Levêque Christian et Paugy Didier. (2006). Les poissons des eaux continentales africaines : Diversité, écologie, utilisation par les hommes. IRD Edition, 190pp
- Lucas, P. (2007). Le concept de la protection intégrée des cultures. *Innovations Agronomiques*, 1, 15-21
- Mazzoncini, M., Antichi, D., Di Bene, C., Risaliti, R., Petri, M., & Bonari, E. (2015). Soil carbon and nitrogen changes after 28 years of no-tillage management under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 77, 156–165. <http://doi.org/10.1016/j.eja.2016.02.011>
- McDaniel, M. D., Grandy, A. S., Tiemann, L. K., & Weintraub, M. N. (2014). Crop rotation complexity regulates the decomposition of high and low quality residues. *Soil Biology and Biochemistry*, 78, 243–254. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.07.027>
- Mondelaers, K., Aertsens, J., & Van Huylenbroeck, G. (2009). A meta-analysis of the differences in environmental impacts between organic and conventional farming. *British Food Journal*, 111(10), 1098–1119. <http://doi.org/10.1108/00070700910992925>
- Oldeman, L. (1994). The global extent of soil degradation. *Soil Resilience and Sustainable Land Use*. Retrieved from [http://library.wur.nl/isric/fulltext/isricu\\_i26803\\_001.pdf](http://library.wur.nl/isric/fulltext/isricu_i26803_001.pdf)
- Oorts, K., Nicolardot, B., Merckx, R., Richard, G., & Boizard, H. (2006). C and N mineralization of undisturbed and disrupted soil from different structural zones of conventional tillage and no-tillage systems in northern France. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(9), 2576–2586. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.03.013>
- Paustian, K., Six, J., Elliott, E. T., & Hunt, H. W. (2000). Management options for reducing CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry*, 48, 147–163.
- Raoul Calvet, Chenu Claire, Houot Sabine. (2011). Les matières organiques des sols. Edition France agricole, 347pp
- Reeves, D. W. (1997). The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil & Tillage Research*, 43, 131–167. [http://doi.org/10.1016/s0167-1987\(97\)00038-x](http://doi.org/10.1016/s0167-1987(97)00038-x)
- Sabrina Juarez. (2014). Régulations biotiques et abiotiques de la décomposition des matières organiques des sols. Thèse de Doctorat, AgroParisTech.



- Saffih-Hdadi, K., & Mary, B. (2008). Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(3), 594–607. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.08.022>
- S.De Parcevaux, D.Payen, P.Brochet, Ch.Samie, M.Hallaire, S.Mériaux. (1990). Dictionnaire encyclopédique d'agrométéorologie. CILF, INRA, Météofrance, 323pp
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. a, & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturatin of soils. *Plant and Soil*, 241, 155–176. <http://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
- Six, J., Elliott, E. T., & Paustian, K. (1999). Aggregate and Soil Organic Matter Dynamics under Conventional and No-Tillage Systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63(5), 1350–1358. <http://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351350x>
- Stevenson F.J. (1994). Humus chemistry, Genesis, Composition, Reaction. John wiley et sons.inc, 497pp
- Valé, M. (2006). Quantification et prédiction de la minéralisation nette de l'azote du sol in situ, sous divers pédoclimats et systèmes de culture français, Thèse de Doctorat, Sciences Ecologiques, Vétérinaires, Agronomiques et Bioingénieries.
- Wang, C., Wan, S., Xing, X., Zhang, L., & Han, X. (2006). Temperature and soil moisture interactively affected soil net N mineralization in temperate grassland in Northern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(5), 1101–1110. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.09.009>
- X.Liu, S.J. Herbert, A.M. Hashemi, X. Zhang, G. D. (2006). Effects of agricultural management on soil organic matter and carbon transformation - a review. *Plant Soil and Environment*, 52(12), 531–543. Retrieved from <Go to ISI>://WOS:000207726700001

	Diplôme / Mention : Master 2 Sciences Technologie Santé Mention Biologie Agronomie Santé Spécialité : Production et Technologie du Végétal (ProTeV) Parcours II. Sélection, Production et Valorisation des Végétaux (SPVV) Option : Productions végétales intégrées (PVI) Responsable d'option : Christophe LE MAY
Auteur(s) : Hélène GUILLIER Date de naissance : 18/09/1993	<b>Organisme d'accueil</b> : INRA AgrolImpact Pôle du Griffon, 180 rue Pierre-Gilles de Gennes 02000 BARENTHON-BUGNY <b>Maîtres de stage</b> : Bénédicte AUTRET, Claire CHENU
Nb pages :                    Annexe(s) : 4	
Année de soutenance : 2016	
Titre français : <b>Evaluation de la capacité de minéralisation du sol de systèmes de production alternatifs</b>	
Titre anglais : <b>Potential soil mineralization of alternative arable cropping systems</b>	
<p>Les systèmes de culture alternatifs se sont développés depuis les années 90 afin notamment de préserver la fertilité des sols, qui se caractérise en partie par sa teneur en matières organiques. Malgré un engouement fort pour ces nouveaux systèmes, il n'existe pas de consensus au sein de la communauté scientifique sur la dynamique à long terme de la minéralisation des matières organiques du sol dans ces systèmes tels que l'agriculture de conservation ou l'agriculture biologique. L'objectif de cette étude est d'évaluer la capacité de minéralisation du carbone (C) et de l'azote (N) du sol de trois systèmes de production alternatifs (agriculture biologique, agriculture de conservation, agriculture intégré) de l'essai expérimental de longue durée (18 ans) de La Cage (INRA, Versailles), comparés à un système de production conventionnel. Les échantillons de sol prélevés par carottage (0-30 cm) dans chaque système de culture ont été incubés pendant 118 jours et des mesures régulières du CO<sub>2</sub> émis et de quantité d'azote minéral du sol ont été faites. Les teneurs en C et en N ont été mesurées pour chaque échantillons au lancement des incubations ainsi que le C microbien, afin d'exprimer la minéralisation en valeur absolue (par kg de sol sec), spécifique (par g de C du sol) et par unité de C microbien. Pour comparer la dynamique de minéralisation entre les systèmes, l'analyse statistique a été effectuée sur les valeurs cumulatives de minéralisation au dernier jour de mesure mais également sur les paramètres des courbes de minéralisation préalablement modélisées. Les résultats montrent des valeurs de minéralisation cumulée moyenne en fin d'incubation de 24.55 mg C. g<sup>-1</sup> C, 19.61 mg N. g<sup>-1</sup> N et 1.82 mg C. mg<sup>-1</sup> C microbien tous systèmes confondus. Aucun effet significatif des systèmes de culture sur la minéralisation absolue, spécifique et par unité de C microbien n'a été détecté. Cependant, l'analyse révèle un effet significatif du couple « précédent cultural/culture en place » sur la minéralisation absolue et spécifique du C et sur la minéralisation absolue de N. Nous affirmons donc que le non labour du sol n'influence pas le potentiel de minéralisation de la matière organique du sol, ce dernier étant comparable à celui du système labouré. Des mesures complémentaires, telles que l'analyse de la qualité biochimique des résidus décomposés ou l'étude de la minéralisation d'agrégats de matières organiques déprotégées, pourraient permettre de mieux comprendre les processus expliquant cette vraisemblance entre systèmes.</p>	
<p>Alternative cropping systems have known an important development since the 90s, as they aim at preserving soil fertility, which is characterized by its organic matter content. However, there is no consensus within the scientific community on the long-term impact of these alternative practices on the dynamics of soil organic matter mineralization. The objective of this study is to evaluate the carbon (C) and nitrogen (N) mineralization of three alternatives cropping systems (organic farming, conservation agriculture and low input system) of a the long-term (18 years) field experiment of "La Cage" (INRA, Versailles). Soil samples collected by core drilling (0-30 cm) in each cropping systems were incubated for 118 days and regular measurements of the CO<sub>2</sub> emitted and the amount of soil mineral nitrogen were made. The contents of C and N and the microbial C in each sample at the start of the incubations were measured, to express the mineralization in absolute and specific value, and by microbial C unit. To compare the dynamics of mineralization between systems, statistical analysis was performed on the cumulative values of mineralization on the last day of measurement but also on the parameters of the mineralization curves previously modeled. The results show an average cumulative mineralization value of 24.55 mg C. g<sup>-1</sup> C, 19.61 mg N. g<sup>-1</sup> N and 1.82 mg C. mg<sup>-1</sup> C microbial at the end of incubation. No significant effect of the cropping system on the mineralization, (absolute, specific and per unit of microbial C) is detected. However, the analysis revealed a significant effect of the couple "previous crop / cultivated crop" on both absolute and specific C mineralization and only on the absolute N mineralization. So we can say that no-tillage hasn't impact on potential of soil organic matter mineralization this one being comparable to potential mineralization in the conventional tillage. Additional measures, such as analysis of the biochemical quality of decomposed residues or the study of the mineralization unprotected aggregates of organic matter, could help for a better understanding of the processes involved in this likelihood between systems.</p>	
Mots-clés : Matières organique du sol, minéralisation, carbone, azote, non labour, agriculture biologique	
Key Words: Soil organic matter, mineralization, carbon, nitrogen, no tillage, organic farming	

# Annexes

---

**Annexe 1:** Protocole de recherche : Capacité de minéralisation des matières organiques d'un sol limoneux sous différents systèmes de culture

**Annexe 2 :** Comparaison de 2 méthodes de dosage du C minéralisé : « méthode soude » vs « méthode du micro-chromatographe »

**Annexe 3 :** Propositions de protocole des manipulations supplémentaires: effet de la perturbation du sol sur la minéralisation des MOS

**Annexe 4 :** Script R : ANOVA (en moyennant les répliquats analytique et par répliquats analytique)

## **Annexe 1:**

Protocole de recherche : Capacité de minéralisation  
des matières organiques d'un sol limoneux sous  
différents systèmes de culture

## **Annexe 2 :**

Comparaison de 2 méthodes de dosage du C minéralisé : « méthode soude » vs « méthode du micro-chromatographe »




### **Annexe 3 :**

Propositions de protocole des manipulations  
supplémentaires: effet de la perturbation du sol sur  
la minéralisation des MOS

## **Annexe 4 :**

Script R : ANOVA (en moyennant les répliquats analytique et par répliquats analytique)

 UMR 1402 EcoSys Versailles-Grignon INRA AgroParisTech SCIENCE & IMPACT	Protocole de recherche / expérimental	Nom du fichier: abreviation_MotClef_PX_aaaammjj
	<b>Capacité de minéralisation des matières organiques d'un sol limoneux sous différents systèmes de culture</b>	Version : 1-1 <sup>er</sup> mars Date de création : Date de mise à jour Page 1 sur 9

### Notes importantes :

- Avant d'utiliser ce document, **vérifiez qu'il s'agit bien de la dernière version.**
- Les dernières versions des trames sont dans la rubrique Qualité de l'espace informatique partagé :  
[https://ecosys.versailles-grignon.inra.fr/pagedo/EcoSys/Appui\\_a\\_la\\_recherche/Qualite/Documents\\_Outils\\_Internes](https://ecosys.versailles-grignon.inra.fr/pagedo/EcoSys/Appui_a_la_recherche/Qualite/Documents_Outils_Internes).
- **Définition** du Protocole de recherche / expérimental (PX) : document synthétisant les objectifs par rapport à une question de recherche et les activités, responsables, ressources, tâches à effectuer et leur déroulement pour la réalisation d'une expérimentation : c'est le fil conducteur ou la colonne vertébrale du déroulement des activités de recherche.
- Lorsque vous utilisez cette trame, **renommer le fichier**. Par exemple : SOL\_DégradRacine\_PX\_20150214

### Informations sur ce document

#### Titre du Projet, code Projet :

**Evaluation de la capacité de minéralisation d'un sol limoneux sous systèmes de culture alternatifs**

### Suivi des modifications de ce document :

=> Toute modification devra être notée afin d'améliorer le protocole et que son contenu aide à la rédaction des rapports, des articles...




Date	Nom du fichier	Modifications apportées / Justification	Intervenant

**Où trouver ce document :** Lieu physique (site, bâtiments, pièce ....) ou Chemin d'accès à l'espace informatique où se trouve la dernière version de ce protocole.

### Sommaire :

1	Contexte - Objectif général.....	2
2	Ressources financières - contrat de recherche .....	2
3	Pilotage du protocole /Acteurs / ressources humaines : .....	3
4	Liste des opérations et planification.....	3
5	Détails des opérations et plans d'expériences .....	4
5.1	Opération / Etape 1 Prélèvement des sols sur le terrain .....	4
5.2	Opération / Etape 2 – Préparation des échantillons .....	4
5.3	Opération / Etape 3 – Préparation et lancement de l'incubation .....	5
5.4	Opération / Etape 4 – Mesure du CO <sub>2</sub> dégagé .....	6
5.5	Opération / Etape 4 – Mesure du N minéralisé.....	6
5.6	Opération / Etape 4 – Mesure de la biomasse microbienne.....	8
6	Annexes : .....	8

	Rédacteur(s)	Vérificateur(s) éventuel(s)	Approbateur(s) éventuel(s)
<b>Nom :</b>			
<b>Fonction :</b>			Animateur Qualité
<b>Date du visa :</b>			

 Versailles-Grignon  	Protocole de recherche / expérimental	Nom du fichier: abreviation_MotClef_PX_aaaammjj
	<b>Capacité de minéralisation des matières organiques d'un sol limoneux sous différents systèmes de culture</b>	Version : 1-1 <sup>er</sup> mars Date de création : Date de mise à jour Page 2 sur 9

## Contenu de ce document :

### 1 Contexte - Objectif général

#### **Objectif scientifique :**

Malgré un engouement fort pour les systèmes de culture alternatifs depuis les années 90, le manque de références reste important, et en particulier celui d'études de longue durée et d'études sur les processus biogéochimiques, tels que la dynamique du C et N dans le sol.

L'essai de longue durée de La Cage, mis en place en 1998 à l'INRA de Versailles, compare 4 systèmes de culture en rotation céréalière sans apports d'effluents d'élevage (conventionnel, production intégrée, agriculture biologique et production sous couverture végétale permanente). Il est l'objet du travail de thèse de Bénédicte Autret, portant notamment sur la différenciation des stocks de C et N du sol au cours du temps depuis le début de l'essai.

L'objectif du stage est de mesurer et comparer la capacité de minéralisation du C et N du sol des différents traitements, et de les confronter aux valeurs données par le modèle AMG (Saffih et Mary, 2008). En particulier nous nous demandons si les vitesses de minéralisation sont plus faibles dans le sol non travaillé (SCV). Deux modalités seront comparées : sol non remanié (manipes faites à l'INRA Laon) et sol remanié (manipes à Ecosys, stage d'Hélène Guillier)

On considèrera les 4 systèmes de culture mis en place à La Cage : productif, intégré, biologique, SCV.

#### **Champs thématique :**

Sol, biogéochimie (CT4 EA-INRA)

#### **Hypothèse & Principe du protocole :**

On considèrera 4 systèmes de culture mis en place à La Cage : productif, intégré, biologique, SCV et on quantifiera la minéralisation du C et du N sur des incubations de 4 mois, en conditions contrôlées.

#### **Valorisation envisagée et livrable(s) demandé(s) par le projet :**

- Confrontation des taux de minéralisation mesurés in vitro aux taux in situ tels qu'estimés par le modèle AMG)
- Mémoire de stage de fin d'étude d'Hélène Guillier
- Article scientifique.

### 2 Ressources financières - contrat de recherche

#### **Identification du contrat de recherche :**

Contrat de l'Unité d'Agronomie INRA de Laon (prennent en charge la stagiaire et une partie des manipes).


#### **Responsable du contrat de recherche :**

Bruno Mary

Dépenses Grignon : Claire, prendre les coûts sur le contrat Picaso Reacctif (estimation coûts à faire : base incubation, mesures CO<sub>2</sub>, mesures Nmin).

#### **Coordonnées du gestionnaire :**

#### **Contraintes de confidentialité :**




 <p>UMR 1402 EcoSys Versailles-Grignon INRA AgroParisTech</p>	Protocole de recherche / expérimental	Nom du fichier: abreviation_MotClef_PX_aaaammjj
	<b>Capacité de minéralisation des matières organiques d'un sol limoneux sous différents systèmes de culture</b>	

### 3 Pilotage du protocole / Acteurs / ressources humaines :

	Nom Prénom et coordonnées	contribution, compétences	Temps passé
Responsable scientifique	Claire Chenu Bénédicte Autret		
Responsable Technique	Valérie Pouteau		
Liste Intervenants permanents			
Liste Intervenants Non-permanents	Hélène Guillier	Etudiante de M2	6 mois à partir de mars 2016

### 4 Liste des opérations et planification

Quoi ?	Qui ?	Quand ?		
		Dates de décision	Dates prévues d'exécution	Dates effectives d'exécution
Opérations/Etapes (Méthodes)	<b>Manipulateur</b> /Encadrant technique ou scientifique			
Prélèvement des échantillons de stage	Gilles Grandeau		Février 2016	
Préparation des échantillons	Hélène – à Laon		1ere semaine Mars 2016	
Lancement Incubation au laboratoire	Hélène, Valérie			
Mesure du CO <sub>2</sub> dégagé par microGC	Hélène- Grignon		Jours 3, 7, 14, 30, 60, 90 et 120	
Prélèvement destructif pour mesure du N minéralisé, analyse au scalar	Hélène- Grignon		Jours 0, 7, 14, 30, 60, 90 et 120	
Mesure de biomasse microbienne (pertinence et dates à définir)	Hélène- Grignon		Jours 0 et 1	

 Versailles-Grignon  	Protocole de recherche / expérimental	Nom du fichier: abreviation_MotClef_PX_aaaammjj
	<b>Capacité de minéralisation des matières organiques d'un sol limoneux sous différents systèmes de culture</b>	Version : 1-1 <sup>er</sup> mars Date de création : Date de mise à jour Page 4 sur 9

## 5 Détails des opérations et plans d'expériences

### 5.1 Opération / Etape 1 Prélèvement des sols sur le terrain

#### **But / objectif :**

*L'objectif de cette étape est de collecter les sols dans des conditions de prélèvements identiques quel qu'en soit le système de culture. Ainsi, les sols sont prélevés à une profondeur de 0-30 cm correspondant à la profondeur de labour et 6 prélèvements par parcelle sont réalisés afin d'être représentatif du sol de la parcelle.*

#### **Matériel :**

- Tarière
- Sonde cylindrique (diamètre 5-6 cm sur 0-27 cm)
- 16 sacs de prélèvement pour conserver les sols

#### **Méthode, plan d'expérience :**

- 1) 6 carottes prélevées par parcelle dans les 2 blocs avec une sonde cylindrique (diamètre 5-6 cm) sur 0-30 cm environ (soit 4 kg de sol/parcelle) ;
- 2) Les 6 carottes sont mélangées ensemble pour chaque parcelle = 16 échantillons de sol ;
- 3) Les échantillons sont conservés en chambre froide jusqu'aux incubations.

Document joint en annexe : plan de prélèvement

### 5.2 Opération / Etape 2 – Préparation des échantillons

#### **But / objectif :**

*L'objectif de cette étape est de placer les échantillons dans des conditions identiques de mesures. C'est-à-dire un sol sans résidus de culture et un potentiel hydrique analogue pour tous les échantillons. Le potentiel hydrique choisi doit être favorable à la minéralisation et défavorable à la dénitrification. Ainsi, l'humidité sera ajustée à un potentiel matriciel de 3 autour de la capacité au champ.*

#### **Matériel :**


- Tamis de 10mm
- 16 bacs pour conserver les sols
- Balance pour peser le poids frais et le poids sec
- 48 cristallisoirs pour réaliser la mesure d'humidité

#### **Méthode, plan d'expérience :**

*Le sol est conservé en chambre froide dans des sacs en plastique (sol remanié) jusqu'au début des manipulations au laboratoire.*

- 1) Retirer les résidus de culture (pailles, racines) ;
- 2) Tamiser à 10 mm les échantillons de sol ;
- 3) Mesurer l'humidité de l'échantillon à l'étuve (24h à 105°C) : si teneur en eau est >  $W_i$  (teneur en eau à  $pF = 3$ ), laisser le sol sécher quelques heures/jours ;
- 4) Conserver le sol en chambre froide si l'incubation est retardée ;
- 5) Ajouter de l'eau jusqu'au  $W_i$  en vaporisant de l'eau déminéralisée sur le sol, lui-même étalé en une fine couche sur un plateau.

#### **Détermination de $W_i$**

 UMR 1402 EcoSys Versailles-Grignon INRA AgroparisTech SCIENCE & IMPACT	Protocole de recherche / expérimental	Nom du fichier: abreviation_MotClef_PX_aaaammjj
	<b>Capacité de minéralisation des matières organiques d'un sol limoneux sous différents systèmes de culture</b>	Version : 1-1 <sup>er</sup> mars Date de création : Date de mise à jour Page 5 sur 9

Données Sabrina Juarez et Valérie Pouteau, mesure de la teneur en eau à pF3 d'échantillons émiétés et tamisés à 4 mm des parcelles conventionnel et SCV : conv 0,175 g eau/g sol sec, SCV : 0,190 g eau/g sol sec (Bloc B). On peut considérer que la rétention d'eau est la même pour le sol des parcelles en Conv, Intégré et Bio.


### 5.3 Opération / Etape 3 – Préparation et lancement de l'incubation

#### Récapitulatif :

	CO <sub>2</sub> (non destructif)	N minéral (mesure destructive)	Répét N minéral (mesure destructive)
Nombre de dates	8 dates (1, 4, 7, 14, 29, 62, 91 et 118 jours)	7 dates (0, 7, 14, 29, 62, 91 et 118 jours)	3 dates (0, 29 et 118 jours)
Nombre d'échantillons	16 parcelles x 3 rép = 48 échantillons de sol	16 parcelles x 7 dates = 112 échantillons de sol (16 pour la mesure à t <sub>0</sub> , 96 pour les 6 autres dates)	16 parcelles x 3 dates x 2 rép = 96 échantillons de sol (32 pour la mesure à t <sub>0</sub> , 64 pour les 2 autres dates)
Matériel incubation	- 96 coupelles en verre (48 pour le sol, 48 pour l'eau déminéralisée) - 48 bocaux hermétiques de 0.5 L	- 144 coupelles en verre (96 pour le sol, 48 pour l'eau déminéralisée) - 48 bocaux hermétiques de 1L (échantillons regroupés 4 par 4)	- 96 coupelles en verre (64 pour le sol, 32 pour l'eau déminéralisée) - 32 bocaux hermétiques de 1L (échantillons regroupés 4 par 4)
Préparation des incubations	- Peser 50 g de sol frais dans une coupelle de verre préalablement tarée - Déposer la coupelle de sol et d'eau dans le bocal - Fermer le bocal hermétiquement	- Peser 50 g de sol frais dans une coupelle de verre préalablement tarée - Déposer la coupelle de sol et d'eau dans le bocal - Fermer le bocal hermétiquement	
Extraction et analyses	- Chaque jour de mesure, peser la coupelle de sol et ajuster l'humidité si besoin - Prélèvement à la seringue de l'air contenu dans le bocal - Analyse des gaz prélevés au MicroGC	- Chaque jour de mesure, peser la coupelle de sol et ajuster l'humidité si besoin - Congeler échantillon si extraction reportée dans le temps - Extraction de l'N minéral des 50g de sol par 100 mL de solution de KCl 1M	
Remarques	Chaque bocal de 1 L contient 1 coupelle d'eau déminéralisée afin de maintenir une humidité ambiante dans le bocal		

#### Préparation du matériel

- Nomenclature des échantillons: 12,1 ; 12,2 ; 13-1, 13,2 ; 14,1 ; 14,2 ; 15,1 ; 15,2 ; 16,1 ; 16,2 ; 17,1 ; 17,2 ; 18,1 ; 18,2 ; 19,1 ; 19,2 – et a b c pour les répétitions. Préparer un tableau avec la correspondance numéro et parcelle + répét. De 1 à 48 pour les CO<sub>2</sub>, puis suite pour les Nmin.
- Préparer 102 bocaux de 1L : 48 pour des mesures de CO<sub>2</sub> (donc couvercle avec septum) et 54 pour mesures Nmin (donc couvercles simples).
- Préparer 102 béciers avec eau à mettre dans les bocaux
- Préparer et tarer 256 contenants (coupelles), numérotées de 1 à 256
- Vérifier la teneur en eau du sol, ajuster si nécessaire (attention, bien différencier le sol sous SCV, parcelles 12

 <p>UMR 1402 EcoSys Versailles-Grignon INRA AgroParisTech</p>	Protocole de recherche / expérimental	Nom du fichier: abreviation_MotClef_PX_aaaammjj
	<p><b>Capacité de minéralisation des matières organiques d'un sol limoneux sous différents systèmes de culture</b></p>	Version : 1-1 <sup>er</sup> mars Date de création : Date de mise à jour Page 6 sur 9

et 17, des autres systèmes).

### **Lancement de l'incubation (JO incub)**

- Peser 256 fois 50 g de sol dans les coupelles, pour les différents échantillons, en suivant le tableau de correspondance.
- Placer les 48 échantillons CO<sub>2</sub> et les 160 échantillons azote dans les bocaux correspondants (3 échantillons azote par bocal), ainsi que les récipients contenant de l'eau.
- Fermer les bocaux, les placer dans les armoires à incubation
- Congeler les 48 échantillons Nmin du jour 0. (quels récipients prévoir ?)

## **5.4 Opération / Etape 4 – Mesure du CO<sub>2</sub> dégagé**

### **Principe :**

Utilisation d'un micro-chromatographe en phase gazeuse couplé à un catharomètre. L'échantillon est ainsi prélevé et injecté dans une colonne de chromatographie qui sépare les différents gaz selon leur poids moléculaire et leur affinité avec la colonne. Chaque composé chimique a un temps de rétention qui lui est propre permettant ainsi de détecter le gaz dans la colonne. Une fois séparés, les gaz passent à des temps différentiels à travers le catharomètre dont la conductivité électrique change au contact des gaz. Les différences de potentiels enregistrées sont ensuite converties en une concentration en gaz par un logiciel de calibration. (Leffèvre, 2015)

### **Matériel :**

- microGC + passeur
- logiciel easychrome elite

### **Mode opératoire :**

- Sur chaque emplacement du passeur, se trouve une aiguille qui permettra de capter le gaz dans le bocal. Percez les septums à l'aide de l'aiguille et caller les bocaux
- Réaliser la mesure du CO<sub>2</sub>
- Ajuster l'humidité si nécessaire
- Flusher les bocaux pour éliminer aux maximums le CO<sub>2</sub> contenue dans les flacons
- Ne pas oublier de faire la mesure sur les blancs après flush

## **5.5 Opération / Etape 4 – Mesure du N minéralisé**

### ***Extraction azote minéral amoniacal et nitrique au KCl – La Cage***

La mesure de N minéral est réalisée en 2 étapes : l'extraction puis le dosage

### **Principe de l'extraction:**

L'objectif de l'extraction est de faire passer en solution l'azote minéral (directement assimilable par la plante), c'est à dire l'azote sous forme ammoniacale (ion ammonium NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) et sous forme nitrique (ions nitrates NO<sub>3</sub><sup>-</sup> principalement et très faible quantité d'ions nitrites NO<sub>2</sub><sup>-</sup>).

Le protocole consiste à extraire l'azote minéral de 50 g de terre par 100 mL de chlorure de potassium à 1 mol.L<sup>-1</sup> sous agitation pendant 1 heure. Après 1 heure de décantation le surnageant est prélevé afin d'être dosé.




### **Principe du dosage :**

**Nitrate + Nitrite : Gamme : 0,2 -10,0 mg/l N**

L'échantillon est dilué dans un tampon puis passe sur une colonne de grains de cadmium recouverts de noir de cuivre, pour réduire les nitrates en nitrites.

Les nitrites résultants (ceux présents à l'origine plus ceux issus de la réduction) donnent une réaction de diazotation avec la sulfanilamide, puis un couplage avec le chlorhydrate d'α-naphtyl-ethylenediamine, pour former un complexe rose, dont l'intensité de la coloration, mesurée à 540 nm, est proportionnelle à la concentration initiale en Nitrates+Nitrites dans l'échantillon



 <p>Versailles-Grignon</p>  	Protocole de recherche / expérimental  <b>Capacité de minéralisation des matières organiques d'un sol limoneux sous différents systèmes de culture</b>	Nom du fichier: abreviation_MotClef_PX_aaaammjj Version : 1-1 <sup>er</sup> mars Date de création : Date de mise à jour Page 7 sur 9
--	--	---

### **Azote Ammoniacal : Gamme : 0,2 – 10,0 mg/l N**

La détermination de l'ammoniac utilise la réaction de Berthelot modifiée : L'ammoniac est chloré en monochloramine; celle-ci réagit avec le salicylate pour former le 5-aminosalicylate.

Après oxydation et couplage oxydant, il se forme un complexe coloré vert. L'intensité de sa coloration, mesurée à 660 nm, est en relation avec la concentration initiale en ammoniac dans l'échantillon.

#### **Matériel pour l'extraction:**

##### 1) Consommables

Eau osmosée

Chlorure de Potassium KCl pur à 99% minimum

Flacons plastiques 30 mL

Filtres en fibres de verre de diamètre 90 mm et de porosité 1,2 µm

Papier essuie-tout

##### 2) Matériel – Verrerie

Balance 10-2 g minimum

Agitateur magnétique et barreau aimanté

Distributeur Optifix 100 mL

Agitateur par retournement ou roue à agitation

Réfrigérateur et congélateur

Etuve

Spatules

Flacons d'extraction 250 mL

Fiole jaugée de 5 L.

Entonnoir

Béchers de 250 mL et 5 L

Bonbonne de 10 L

#### **Matériel pour le dosage :**

Godets incolores d'une contenance de 3mL

Parafilm

Chlorure d'Ammonium, NH<sub>4</sub>Cl, 53.49 g/mol, n°CAS [12125-02-9]

Solution d'ammoniaque, NH<sub>4</sub>OH (25%), M = 35,05 g/mol, n°CAS [1336-21-6]

Acide Ortho-Phosphorique, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (85%), M = 98 g/mol, n°CAS [7664-38-2]

Sulfanilamide, C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S, M = 172,21 g/mol, n°CAS [63-74-1]

Chlorhydrate d' α-naphtylethylenedianine, C<sub>12</sub>H<sub>16</sub>Cl<sub>2</sub>N<sub>2</sub>, M = 259,18 g/mol, n°CAS [1465-25-4]

Cadmium actif

Tartrate de potassium et sodium, C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O<sub>6</sub>KNa, M = 210,16 g/mol, n°CAS [304-59-6]

Citrate de sodium, C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>O<sub>7</sub>Na<sub>3</sub>, M = 291,1 g/mol, n°CAS [6132-04-3]


Hydroxyde de sodium, NaOH, M=40 g/mol, CAS n°[1310-73-2]

Salicylate de sodium, C<sub>7</sub>H<sub>5</sub>NaO<sub>3</sub>, 160,1 g/mol, n°CAS [54-217]

Nitroprussiate de sodium, C<sub>5</sub>FeN<sub>6</sub>Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, M = 297,95 g/mol, n°CAS [13755-38-9]

Dichloroisocyanurate de sodium, C<sub>3</sub>N<sub>3</sub>O<sub>3</sub>Cl<sub>2</sub>Na·2H<sub>2</sub>O, M = 219,95 g/mol, n°CAS [2893-78-9]

Brij 35 Détergent 30 %. (produit de marque Skalar)

<p>UMR 1402 EcoSys Versailles-Grignon</p> 	<p>Protocole de recherche / expérimental</p> <p><b>Capacité de minéralisation des matières organiques d'un sol limoneux sous différents systèmes de culture</b></p>	<p>Nom du fichier: abreviation_MotClef_PX_aaaammjj Version : 1-1<sup>er</sup> mars Date de création : Date de mise à jour Page 8 sur 9</p>
---	---	--

**Mode opératoire :**

*Cf. protocole du skalar*

**5.6 Opération / Etape 4 – Mesure de la biomasse microbienne**

Le mode opératoire décrit la méthode de Fumigation – Extraction pour mesurer le Carbone de la matière extractible totale de la biomasse microbienne d'un sol, selon la méthode de Vance et al. (1987)

**Principe :**

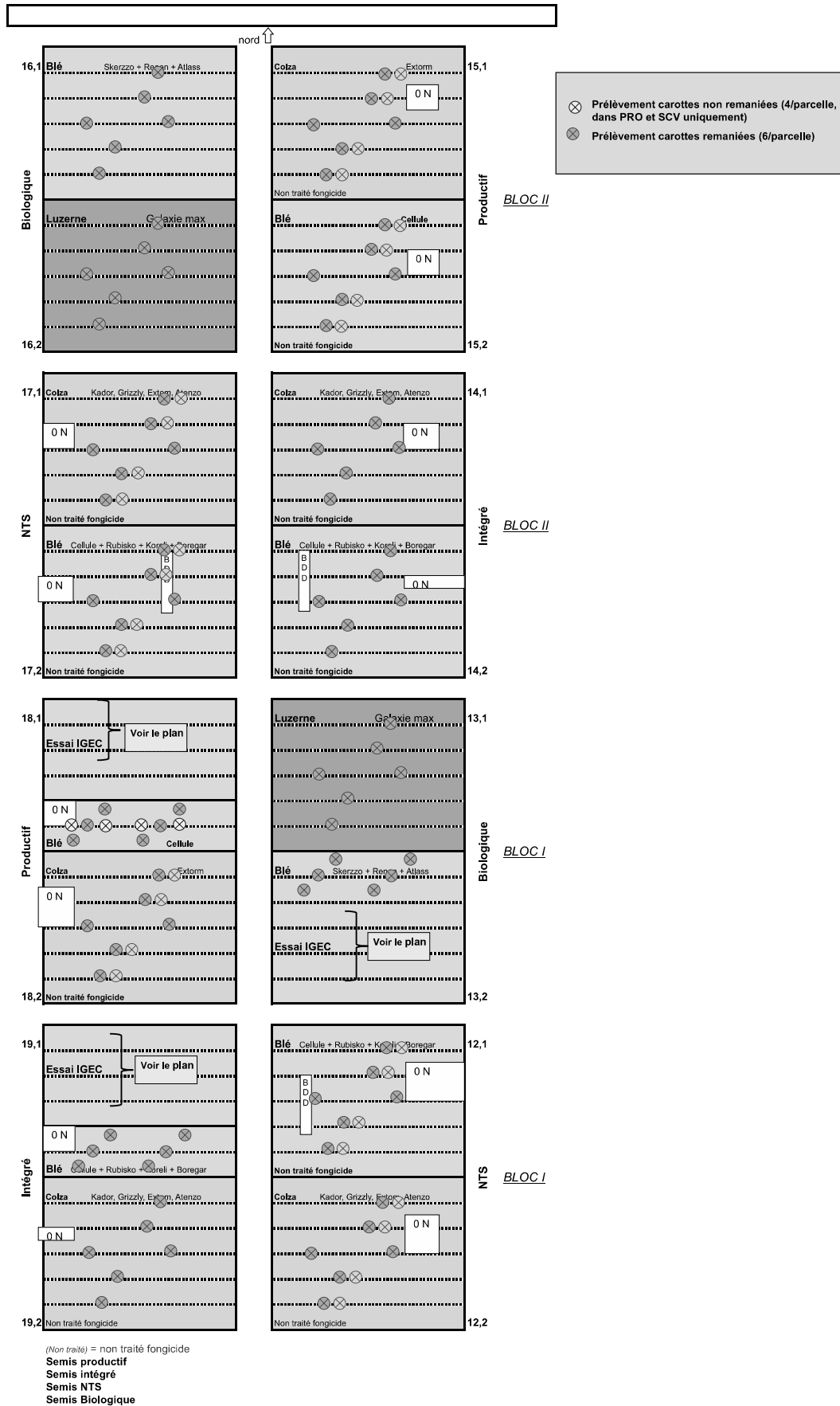
Par fumigation, les cellules microbiennes intactes sont lysées et la matière organique microbienne est libérée. La matière organique non vivante n'est pas sérieusement affectée par une telle fumigation. Les échantillons de sol sont fumigés au chloroforme perdant 24H. La carbone organique extrait par le sulfate de potassium est déterminé dans les échantillons fumigés et non fumigés, et l'augmentation du carbone organique extrait est utilisée pour déterminer la carbone de la biomasse.


**Mode opératoire :**

*Cf. protocole « mesure du C de la biomasse microbienne par fumigation-extraction, selon Vance & al »*

**10 Annexes :**

Plan d'échantillonnage



	Protocole de recherche / expérimental	Nom du fichier: Comparaison_mesureCO2_PX_20160817
	<b>Comparaison de 2 méthodes de dosage du C minéralisé = « méthode soude » vs « méthode du micro-chromatographe »</b>	Version : 1 Date de création : 2016-08-22 Date de mise à jour Page 1 sur 5

## Informations sur ce document

### Titre du Projet, code Projet :

**Comparaison de 2 méthodes de dosage du C minéralisé : « méthode soude » vs « méthode du micro-chromatographe », lors du stage de M2 d'Hélène Guillier encadré par Claire Chenu et Bénédicte Autret**

### Suivi des modifications de ce document :


Date	Nom du fichier	Modifications apportées / Justification	Intervenant
17-08-2016	Fiche comparaison des méthodes	Création du document	Hélène Guillier
22-08-2016	Comparaison_mesure_PX_20160817	Changement Trame	Valérie Pouteau

**Où trouver ce document : Classeur Plateau C13- Incubation et Ordinateur personnelle de personnes cités dans ce document**

### Sommaire :

1	Contexte - Objectif général.....	2
2	Ressources financières - contrat de recherche : SANS OBJET.....	3
3	Pilotage du protocole /Acteurs / ressources humaines :.....	3
4	Liste des opérations et planification : Sans Objet.....	3
5	Point de vigilance : .....	3
6	Détails des opérations et plans d'expériences .....	3
6.1	Réalisation de l'expérience : Mesure du CO2 .....	3
6.2	Résultat .....	4
7	Gestion des anomalies ou problèmes : voir 6-2 résultat .....	5
8	Retour d'expérience : Conclusion .....	5

	Rédacteur(s)	Vérificateur(s) éventuel(s)	Approbateur(s) éventuel(s)
<b>Nom :</b>	Guillier Hélène	Encadrants	Animateur Qualité
<b>Fonction :</b>	Stagiaire Master 2		
<b>Date du visa :</b>			

	Protocole de recherche / expérimental	Nom du fichier: Comparaison_mesureCO2_PX_201608 17
	<b>Comparaison de 2 méthodes de dosage du C minéralisé = « méthode soude » vs « méthode du micro-chromatographe »</b>	Version : 1 Date de création : 2016-08-22 Date de mise à jour Page 2 sur 5

## Contenu de ce document :

### 1 Contexte - Objectif général

#### Objectif scientifique :

Il existe de nombreuses méthodes qui permettent de suivre la cinétique de minéralisation du carbone (C) d'un sol notamment:

- **La méthode de piégeage statique, dite méthode de la soude:** Elle consiste à capter le CO<sub>2</sub> par de la soude (NaOH à 1 mol L<sup>-1</sup>), formant ainsi du carbonate de sodium (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). La quantité de CO<sub>2</sub> émise par le sol est estimée en pesant la quantité de carbonate de baryum (BaCO<sub>3</sub>) formée lors de la réaction de précipitation du carbonate de sodium Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> avec le dichlorure de baryum (BaCl<sub>2</sub>).
- **La méthode du micro-chromatographe en phase gazeuse couplé à un catharomètre :** Un échantillon d'air du bocal contenant le sol en incubation est prélevé et injecté dans une colonne de chromatographie. Cette dernière sépare les gaz selon leur poids moléculaire et leur affinité avec la colonne. Un détecteur de conductivité thermique (ou catharomètre) mesure une variation d'intensité au passage du gaz. Le logiciel converti par la suite les différences de potentiel en parties par million (ppm).

Ainsi, il est important de vérifier la concordance entre les valeurs de minéralisation obtenues par la méthode soude et celles obtenues par la méthode du micro-chromatographe. Cette vérification a été mise en place dans le cadre de l'étude s'intitulant « évaluation de la capacité de minéralisation du sol de systèmes de production alternatifs » faisant appel à ces deux types de méthodes de mesure. Ce document présente le matériel et méthodes ainsi que les résultats obtenus.

Champs thématique : Incubation de sol, mesure de CO<sub>2</sub>

#### Hypothèse & Principe du protocole : **Dispositif expérimental et échantillonnage du sol**

La sous-parcelle 18.2 du système de production conventionnel de la station expérimental de La Cage (Versailles : 48°48' N, 2°08' E), a été le support de cette expérimentation. Six carottes ont été prélevées de façons aléatoires dans cette sous-parcelle à l'aide d'une sonde cylindrique et ont été mélangées.


Par la suite, l'échantillon a été tamisé à 10 mm et 6 sous-échantillons de 50 g de sol ont été pesés (3 échantillons serviront pour mesurer le C à partir de la méthode soude et les 3 autres à partir de la méthode du micro-chromatographe). L'humidité du sol a été ajustée aux conditions d'incubation de 18% d'humidité (soit un pF de 3).

Pour la méthode de la soude, chaque échantillon a été conditionné dans un bocal de 1 L comprenant de l'eau au fond (pour limiter l'assèchement) et un flacon avec un volume défini de soude. Parallèlement 3 bocaux « blancs », sans sol, ont été préparés afin de connaître la quantité de CO<sub>2</sub> naturellement présente dans le bocal et de la déduire à la valeur obtenue dans les bocaux de minéralisation. Tous les bocaux sont fermés hermétiquement et placés dans l'incubateur (T°C = 20°C).

Pour la méthode du micro-chromatographe, chaque échantillon a été conditionné dans un bocal de 0,5 L avec de l'eau au fond. Trois bocaux « blancs », sans sol ont également été réalisés afin de s'assurer de l'efficacité du flush enlevant le CO<sub>2</sub> présent de l'atmosphère du bocal. L'ensemble de ces bocaux sont fermés hermétiquement et placés dans l'incubateur (T°C = 20°C).

#### Valorisation envisagée et livrable(s) demandé(s) par le projet : Méthode et archivage du plateau C13

	Rédacteur(s)	Vérificateur(s) éventuel(s)	Approbateur(s) éventuel(s)
<b>Nom :</b>	Guillier Hélène	Encadrants	Animateur Qualité
<b>Fonction :</b>	Stagiaire Master 2		
<b>Date du visa :</b>			

	Protocole de recherche / expérimental	Nom du fichier: Comparaison_mesureCO2_PX_201608 17
	<b>Comparaison de 2 méthodes de dosage du C minéralisé = « méthode soude » vs « méthode du micro-chromatographe »</b>	Version : 1 Date de création : 2016-08-22 Date de mise à jour Page 3 sur 5

## 2 Ressources financières - contrat de recherche : SANS OBJET

## 3 Pilotage du protocole /Acteurs / ressources humaines :

	Nom Prénom et coordonnées	contribution, compétences	Temps passé
Responsable scientifique	Claire Chenu, Bénédicte Autret	Formation	
Responsable Technique	Valérie Pouteau	Formation	
Liste Intervenants permanents	Cyril Girardin	formation	
Liste Intervenants Non-permanents	Hélène Guillier	Réalisation, analyse des résultat et rédaction de ce document	En même temps que son sujet d'étude

## 4 Liste des opérations et planification : Sans Objet

## 5 Point de vigilance :

Organisation, compétences: Sans objet

Prévention, sécurité : Sans objet

Traçabilité des opérations : Sans objet

Stockage Echantillons : Sans objet

Stockage des données : Archiver dans un classeur du plateau C13\_incubation et ordinateur des membres du plateau C13 (Claire Chenu, Valérie Pouteau, Cyril Girardin)

## 6 Détails des opérations et plans d'expériences

### 6.1 Réalisation de l'expérience : Mesure du CO2

#### Mesure du CO<sub>2</sub> émis :

Le suivi des émissions de CO<sub>2</sub> a été réalisé sur 8 dates (au bout de 1, 4, 7, 14, 29, 62, 91 et 118 jours d'incubation). Pour la méthode soude, à chaque jour de mesure, le flacon de soude est remplacé par un autre qui piègera le CO<sub>2</sub> dans l'ensemble des bocal jusqu'à la prochaine date de mesure puis la mesure est mise en place. Pour la méthode micro-chromatographe, les échantillons sont flushés après mesure du CO<sub>2</sub> par le micro-chromatographe, limitant ainsi la saturation en CO<sub>2</sub> du bocal.

	Rédacteur(s)	Vérificateur(s) éventuel(s)	Approbateur(s) éventuel(s)
<b>Nom :</b>	Guillier Hélène	Encadrants	Animateur Qualité
<b>Fonction :</b>	Stagiaire Master 2		
<b>Date du visa :</b>			

<p>UMR 1402 EcoSys Versailles-Grignon</p> <p>INRA AgroparisTech SCIENCE &amp; IMPACT</p>	Protocole de recherche / expérimental	Nom du fichier: Comparaison_mesureCO2_PX_201608 17
	<p><b>Comparaison de 2 méthodes de dosage du C minéralisé =</b></p> <p><b>« méthode soude » vs « méthode du micro-chromatographe »</b></p>	Version : 1 Date de création : 2016-08-22 Date de mise à jour Page 4 sur 5

### Matériel :

Méthode soude	Méthode micro-chromatographe
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 6 bocaux de 1 L</li> <li>- 3 flacons de 60 ml (contenant le sol)</li> <li>- 3 flacons de 30ml (contenant la soude)</li> <li>- Soude (1 mol L<sup>-1</sup>)</li> <li>- Chlorure de baryum à 10% (100g L<sup>-1</sup>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 6 bocaux de 0,5 L</li> <li>- 3 flacons de 60 ml (contenant le sol)</li> </ul>

## 6.2 Résultat

Le tableau et le graphique ci-dessous présentent la cinétique de minéralisation du C pour les deux méthodes. Pour la méthode du micro-chromatographe, le sous-échantillon 18.2A ayant des valeurs de minéralisation très inférieures aux deux autres sous-échantillons, il a été décidé de ne pas le prendre en compte dans la comparaison des deux méthodes. En effet, il semblerait que cet échantillon n'ait pas minéralisé à hauteur des autres ; cela peut être dû à un problème d'étanchéité du bocal.

**Tableau1:** Résultats de minéralisation du C selon les deux méthodes (tous les répliquas sont pris en compte)

		Jours de mesures						
		4	7	14	29	62	91	118
Méthode Soude	18,2SA	17.89	27.77	48.02	101.13	190.74	248.19	296.81
	18,2SB	13.88	22.75	36.13	82.20	158.18	227.49	271.22
	18,2SC	16.32	24.19	39.72	87.82	160.69	220.29	252.45
	moyenne	<b>16.03</b>	<b>24.91</b>	<b>41.29</b>	<b>90.38</b>	<b>169.87</b>	<b>231.99</b>	<b>273.50</b>
	ecart-type	2.02	2.58	6.10	9.72	18.12	14.49	22.27
	coefficient de variation	12.62	10.38	14.78	10.76	10.67	6.24	8.14
Méthode micro-chromatographe	18,2A	11.31	18.68	33.64	72.19	79.70	89.24	97.60
	18,2B	11.69	18.44	34.92	74.66	142.97	196.59	243.28
	18,2C	14.09	22.86	42.03	89.66	163.42	224.61	274.80
	moyenne	<b>12.36</b>	<b>19.99</b>	<b>36.87</b>	<b>78.84</b>	<b>128.70</b>	<b>170.15</b>	<b>205.23</b>
	ecart-type	1.51	2.49	4.52	9.45	43.65	71.45	94.53
	coefficient de variation	12.19	12.44	12.26	11.99	33.92	41.99	46.06

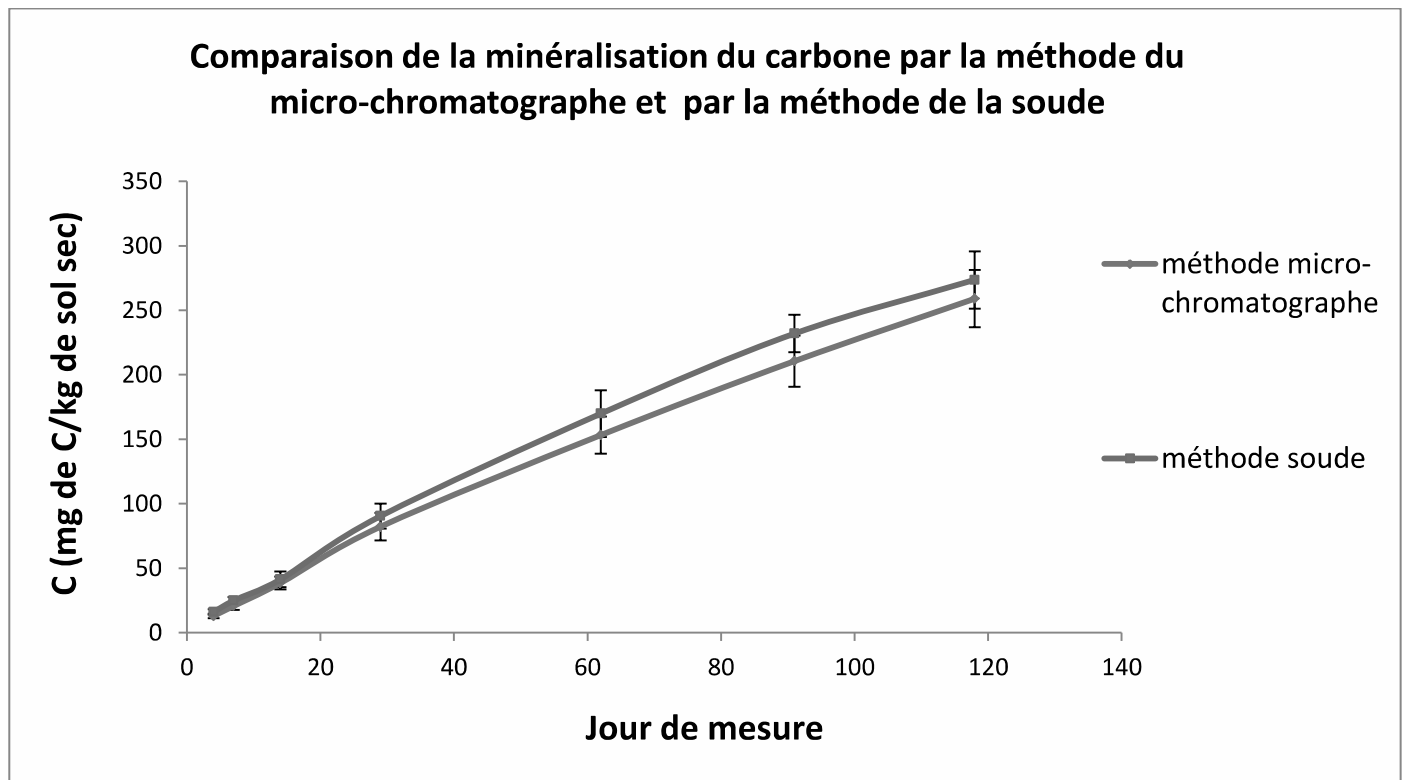
*échantillon supprimé*

expression des résultats = mg de C/kg de sol sec

	Rédacteur(s)	Vérificateur(s) éventuel(s)	Approbateur(s) éventuel(s)
<b>Nom :</b>	Guillier Hélène	Encadrants	Animateur Qualité
<b>Fonction :</b>	Stagiaire Master 2		
<b>Date du visa :</b>			

Ainsi, hormis l'échantillon 18,2A, les valeurs de minéralisation sont du même ordre de grandeur. Les valeurs très faible de ce répliquat augmente de l'écart-type ainsi que du coefficient de variation.

**Figure 1 :** Cinétique de minéralisation du C selon les deux méthodes de mesure (sans prendre en compte l'échantillon 18,2A)



Les deux méthodes donnent des valeurs très similaires et les écart-types se recoupent. On peut toutefois noter la tendance de la méthode soude à surestimer les concentrations de CO<sub>2</sub> émis.

**7 Gestion des anomalies ou problèmes : voir 6-2 résultat**

**8 Retour d'expérience : Conclusion**

Etant donnée la suppression d'un répliquat, le nombre de répliquats n'est pas suffisant pour réaliser une analyse statistique. Ainsi, il faut se contenter de l'appréciation des courbes et des écart-types qui se recoupent à toutes les dates de mesures, ce qui laisse présager **qu'il n'y aurait pas de différences significatives entre ces deux méthodes de mesure du C minéralisé à partir d'un sol**. Une nouvelle expérimentation pourrait être mise en place pour valider l'hypothèse d'équivalence des méthodes.

	Rédacteur(s) Guillier Hélène Stagiaire Master 2	Vérificateur(s) éventuel(s) Encadrants	Approbateur(s) éventuel(s) Animateur Qualité
<b>Nom :</b>			
<b>Fonction :</b>			
<b>Date du visa :</b>			



## Protocole des manipulations supplémentaires: effet de la perturbation du sol sur la minéralisation des MOS

### Version 3 : Détermination du C et de l'azote protégé dans les fractions grossières et dans les fractions fines

[VERSION RETENUE]

#### Objectif et hypothèses:

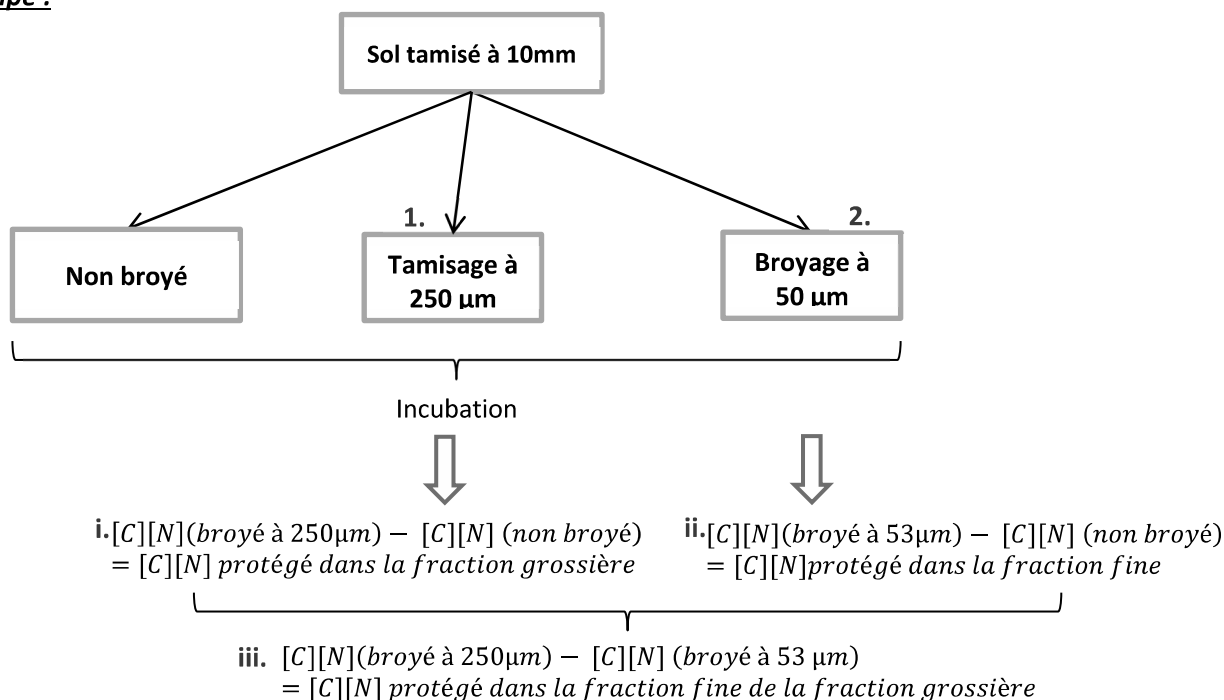
L'objectif est de déterminer l'effet du travail du sol (CONV vs SCV) sur :

- 1) le C et N Protocoles au sein des fractions grossières (macroagrégats) et des fractions fines (microagrégats) au travers de la minéralisation d'échantillons de sol broyé ou non.

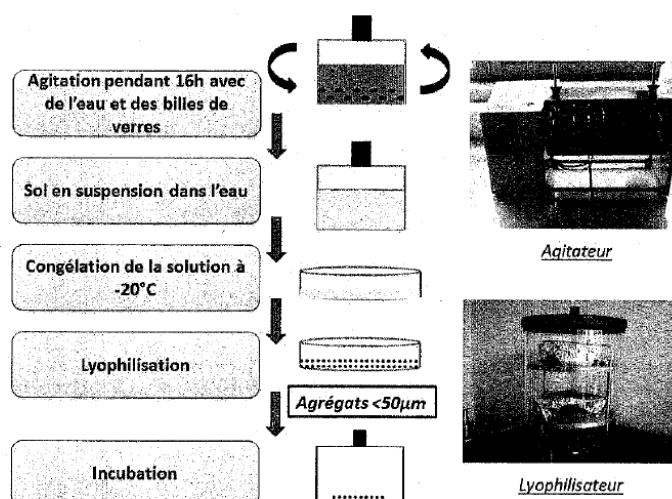
Etant donné que le travail du sol provoque la destruction des macroagrégats, rendant ainsi disponible le C et l'N Protocoles au sein de ces derniers ; les hypothèses sous-jacentes pour un système de culture sans travail du sol sont les suivantes :

- La minéralisation du C et N Protocoles est plus importante qu'en système labouré

#### Principe :



1. Avant d'être broyé à 250µm, les débris végétaux sont enlevés à l'aide d'une pince à épiler. Ils seront ensuite rajoutés aux échantillons broyés.
2. Broyage à 50µm selon le Protocole de Balesdent et al., 1998 (schéma repris du mémoire de Thomas Cozzi)



	<b>Minéralisation du C</b>	<b>Minéralisation du N</b>	<b>Biomasse microbienne</b>
<b>Principe</b>	Mesure du C émis sous forme de CO <sub>2</sub> lors d'une incubation dans des échantillons tamisés à différentes tailles.	Mesure du N émis sous forme de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> lors d'une incubation dans des échantillons tamisés à différentes tailles.	Le broyage ayant un impact sur les microorganismes, mesure du C microbien à J0 pour estimer la quantité de biomasse microbienne participant à la minéralisation
<b>Echantillons et répétitions</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 parcelles CONV (à définir)</li> <li>- 2 parcelles SCV (à définir)</li> <li>- 3 modalités (non broyé/ broyé à 250µm/broyé à 50µm)</li> <li>- 3 répétitions</li> </ul> 2 x 2 x 3 x 3 = 24 ech (6 ech/PE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 parcelles CONV (à définir)</li> <li>- 2 parcelles SCV (à définir)</li> <li>- 3 modalités (non broyé/ broyé à 250µm/broyé à 50µm)</li> <li>- 2 dates de mesure (J0 et J29)</li> <li>- 3 répétitions</li> </ul> 2 x 2 x 3 x 2 = 48 ech (12 ech/PE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 parcelles CONV (à définir)</li> <li>- 2 parcelles SCV (à définir)</li> <li>- 3 modalités (non broyé/ broyé à 250µm/broyé à 50µm)</li> <li>- 3 répétitions</li> </ul> 2 x 2 x 3 x 3 = 24 ech (6 ech/PE)
<b>Mode opératoire</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les débris végétaux sont enlevés</li> <li>- Broyage à 250µm à l'aide d'un tamis</li> <li>- Les débris sont rajoutés aux échantillons broyés à 250µm</li> <li>- En parallèle broyage à 50µm selon le Protocole si dessus</li> <li>- Réajustement de l'humidité à 18.3%</li> <li>- Incubation 29 jours avec 6 dates de mesure (1, 4, 7, 14, 22, 29)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les débris végétaux sont enlevés</li> <li>- Broyage à 250µm à l'aide d'un tamis</li> <li>- Les débris sont rajoutés aux échantillons broyés à 250µm</li> <li>- En parallèle broyage à 50µm selon le Protocole si dessus</li> <li>- Réajustement de l'humidité à 18.3%</li> <li>- Incubation 29 jours avec 2 dates de mesure( 0 et 29)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réalisation des broyages à l'identique du Protocole de minéralisation du C et de l'N</li> <li>- Extraction /fumigation</li> <li>- Dosage au TOC</li> </ul>
<b>Matériel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 24 bocaux hermétiques de 0.5l</li> <li>- 24 flacons en plastique contenant le sol</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 48 flacons de 40ml</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 48 flacons (24 fumigés/24 non fumigés)</li> </ul>
<b>Expression des résultats</b>	cf i./ ii./ iii.	cf i./ ii./ iii.	C-microbien/kg de sol sec C-microbien/g de C du sol

**Remarque :**

- Dans le cadre de ce Protocole, il n'y aura pas de pré-incubation pour prendre en compte le flush de minéralisation dû au broyage et à l'ajout d'eau

### Script ANOVA en moyennant les répliquats analytique :

```
library(nlme)
library(FactoMineR)
library(pgirmess)
library(agricolae)
library(lme4)
library(car)
library(lsmmeans)
repertoire <- ("C:/Users/inra/Desktop/stathelene/")
resultats <- ("C:/Users/inra/Desktop/stathelene/ResStatmoy.lme/")
data<- read.table(paste(repertoire,"R.moy.csv",sep=""),header = T, sep=";", na.strings="NA",dec = ".")
summary(data)
data$bloc <- as.factor(data$bloc)
summary(data)
#levelparcelle <- levels(data$parcelle)
levelbloc <- levels(data$bloc)
levelsystem <- levels(data$system)
nomcolonne <- colnames (data)
variable <- nomcolonne[-(1:3)]
variable

#boucle de repetition pour chaque variable
for (i in variable) {
  write.infile(" ",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
  write.infile("-----",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
  titre <- paste ("Variable : ", i)
  write.infile(titre,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),append=TRUE)

  data_1 <- aggregate(data[,i],by=list(parcelle= data$parcelle, system = data$system, bloc =
data$bloc),mean,na.rm=TRUE)
  colnames(data_1) <- c("parcelle", "system", "bloc", "i")

  k <- data_1$i
  parcelle <- data_1$parcelle
  bloc <- data_1$bloc
  system <- data_1$system

  #modele <- lm(k ~ system+bloc)
  modele <- lme(k ~ system ,data=data_1,random= ~1 | bloc/system)

  #validation de la normalité
  modele$res <- residuals(modele)

  shapiro <- shapiro.test(modele$res)

  #validation de l'homoscédasticité pour les variables system/cult/bloc
  levene_system <- leveneTest(k ~ system)
  #levene_bloc<-leveneTest(k~bloc)

  if((shapiro$p.value>=0.05)&(levene_system[1,3]>=0.05)){
```

```

write.infile("/ Shapiro: normalite de la distribution des residus
/",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),append=TRUE)
write.infile(shapiro$p.value, file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),append=TRUE)
write.infile(paste("/ Levene: homogeneite des variances /"),
file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),append= TRUE)
write.infile(paste("system",levene_system[1,3]), file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),append=
TRUE)

#analyse de variance
ano <- anova(modele)
write.infile(" ",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
write.infile("/ Anova /",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
write.infile(ano,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)

#Comparaison des moyennes si resultat significatif sur l'analyse de variance
if (ano[2,4]<=0.05) {
  lsm.k<-lsmmeans(modele,pairwise~system)
  write.infile("Comparaison des moyennes",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
  Comp1 <- as.data.frame(summary(lsm.k$lsmmeans))
  Comp2 <- as.data.frame(summary(lsm.k$contrasts))
  write.table(Comp1,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),sep = ";", row.names=FALSE,
append=TRUE)
  write.table(Comp2, file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),sep = ";", row.names=FALSE, append
=TRUE)
  write.infile("Groupes",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
  groupes<- as.data.frame(cld(lsm.k))
  write.table(groupe,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),sep = ";", row.names=FALSE,
append=TRUE)
}

}
else{
#TRANSFORMATION BOX COX si non respect Normalite r?sidus et homogeneite des variances
library(car)
bc <- powerTransform(k+0.0000001)
k_bc <- k^(as.numeric(bc$lambda))

#modele
options(contrasts=c("contr.sum","contr.poly"))
modele <- lme(k_bc ~ system,data=data_1,random= ~1 | bloc/system)

options(contrasts=c("contr.treatment","contr.poly"))
modele$fit <- fitted(modele)
modele$res <- residuals(modele)

#Validation du mod?le: Test de Shapiro (normalit? de la distribution des residus)
shapiro_bc <- shapiro.test(modele$res)

#Validation du modele: Test de Levene (homogeneite des variances) pour chaque variable (trait,
date et cult)

```

```

levene_systm_bc <- leveneTest(k_bc ~ systm)
#levene_bloc_bc <- leveneTest(k_bc ~ bloc)

if((shapiro_bc$p.value>=0.05)&(levene_systm_bc[1,3]>=0.05)){
  write.infile("/ Shapiro_bc: normalite de la distribution des residus
/",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),append=TRUE)
  write.infile(shapiro$p.value, file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),append=TRUE)
  write.infile(paste("/ Levene_bc: homogeneite des variances /"),
file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),append= TRUE)
  write.infile(paste("systm",levene_systm_bc[1,3]), file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),append=
TRUE)

  #Analyse de variance
  ano_bc <- anova(modele)
  write.infile(" ",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
  write.infile("/ Anova_bc /",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
  write.infile(ano_bc,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)

  #Comparaison des moyennes si resultat significatif sur l'analyse de variance
  if (ano[2,4]<=0.05) {
    lsm.k<-lsmeans(modele,pairwise~systm)
    write.infile("Comparaison des moyennes",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
    Comp1 <- as.data.frame(summary(lsm.k$lsmmeans))
    Comp2 <- as.data.frame(summary(lsm.k$lsmcontrasts))
    write.table(Comp1,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),sep = ";", row.names=FALSE,
append=TRUE)
    write.table(Comp2, file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),sep = ";", row.names=FALSE, append
=TRUE)
    write.infile("Groupes",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
    groupes<- as.data.frame(cld(lsm.k))
    write.table(groupe,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),sep = ";", row.names=FALSE,
append=TRUE)

  }

}

#Test de Mann-Withney si non respect de la normalite des residus et de l'homoscedasticite, meme
apres transformation BOX COX
if((shapiro_bc$p.value<=0.05)|(levene_systm_bc[1,3]<=0.05)){
  for(m in 2:4){
    nomcol_m <- colnames(data_1)
    kruskalwallis <- kruskal.test(k ~ (data_1[,m]))
    write.infile(paste("/ Kruskal.wallis ", "effet ",
nomcol_m[m],"/"),file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
    write.infile(kruskalwallis$p.value,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
    if ((kruskalwallis$p.value<=0.05)){
      kruskalwallisc<-kruskal(k , (data_1[,m]))#comparaison des moyennes 2 a deux
      Comp2 <- as.data.frame(kruskalwallisc$groups)
      write.infile(paste("/ Comparaison des moyennes ", "effet",nomcol_m[m],"/")
,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)

```

```

write.table(kruskalwallisc$means,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),sep = ";",
row.names=TRUE, append=TRUE)
write.table(Comp2, file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),sep = ";", row.names=FALSE, append
=TRUE)
}
}
}
}
}
}

```

### Script ANOVA en par répliquats analytique :

```

library(nlme)
library(FactoMineR)
library(pgirmess)
library(agricolae)
library(lme4)
library(car)
library(lsmmeans)
repertoire <- ("C:/Users/inra/Desktop/stathelene/")
resultats <- ("C:/Users/inra/Desktop/stathelene/ResStatparcelle.lme/")
data<- read.table(paste(repertoire,"RparcelleC.csv",sep=""),header = T, sep=";", na.strings="NA",dec
=".")
summary(data)
data$bloc <- as.factor(data$bloc)
#data$parcelle <- as.factor(data$parcelle)
summary(data)
#data$Cmax<-as.numeric(data$Cmax)
#data$k<-as.numeric(data$k)
levelparcelle <- levels(data$parcelle)
levelbloc <- levels(data$bloc)
levelsystem <- levels(data$system)
levelcult<- levels(data$cult)
nomcolonne <- colnames (data)
variable <- nomcolonne[-(1:5)]
variable

#boucle de repetition pour chaque variable
for (i in variable) {
write.infile(" ",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
write.infile("-----
",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
titre <- paste ("Variable : ", i)
write.infile(titre,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),append=TRUE)

data_1 <- aggregate(data[,i],by=list(etiquette= data$etiquette, systm = data$system, parcelle =
data$parcelle, bloc=data$bloc, cult=data$cult),mean,na.rm=TRUE)
colnames(data_1) <- c("etiquette","system","parcelle", "bloc","cult","i")

k <- data_1$i
parcelle <- data_1$parcelle
bloc <- data_1$bloc

```

```

cult <- data_1$cult
system <- data_1$system

# modele
options(contrasts=c("contr.sum","contr.poly"))
modele <- lme(k ~ system + cult,data=data_1,random= ~1 | bloc/system)
options(contrasts=c("contr.treatment","contr.poly"))
modele$fit <- fitted(modele)
modele$res <- residuals(modele)

#validation de la normalité
modele$res <- residuals(modele)

shapiro <- shapiro.test(modele$res)

#validation de l'homoscédasticité pour les variables system/cult/bloc
levene_system <- leveneTest(k ~ system)
levene_cult <- leveneTest(k ~ cult)

#levene_bloc<-leveneTest(k~bloc)

if((shapiro$p.value>=0.05)&(levene_system[1,3]>=0.05)&(levene_cult[1,3]>=0.05)){
  write.infile("/ Shapiro: normalite de la distribution des residus
/",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),append=TRUE)
  write.infile(shapiro$p.value, file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),append=TRUE)
  write.infile(paste("/ Levene: homogeneite des variances /"),
file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),append= TRUE)
  write.infile(paste("system",levene_system[1,3]), file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),append=
TRUE)
  write.infile(paste("cult",levene_cult[1,3]), file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),append= TRUE)

#analyse de variance
ano <- anova(modele,type="marginal")
write.infile(" ",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
write.infile("/ Anova /",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
write.infile(ano,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)

#Comparaison des moyennes si resultat significatif sur l'analyse de variance

if(ano[3,4]<=0.05) {
  lsm.k<-lsmmeans(modele,pairwise~cult)
  write.infile("Comparaison des moyennes",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
  Comp1 <- as.data.frame(summary(lsm.k$lsmmeans))
  Comp2 <- as.data.frame(summary(lsm.k$lsmcontrasts))
  write.table(Comp1,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),sep = ";", row.names=FALSE,
append=TRUE)
  write.table(Comp2, file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),sep = ";", row.names=FALSE, append
=TRUE)
  write.infile("Groupes",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
  groupes<- as.data.frame(cld(lsm.k))

```

```

write.table(groupe, file=paste(resultats, "anova_", i, ".csv"), sep = ";", row.names=FALSE,
append=TRUE)

if (ano[2,4]<=0.05) {
  lsm.k<-lsmmeans(modele, pairwise~system)
  write.infile("Comparaison des moyennes", file=paste(resultats, "anova_", i, ".csv"), append=TRUE)
  Comp1 <- as.data.frame(summary(lsm.k$lsmmeans))
  Comp2 <- as.data.frame(summary(lsm.k$lsmcontrasts))
  write.table(Comp1, file=paste(resultats, "anova_", i, ".csv"), sep = ";", row.names=FALSE,
append=TRUE)
  write.table(Comp2, file=paste(resultats, "anova_", i, ".csv"), sep = ";", row.names=FALSE, append
=TRUE)
  write.infile("Groupes", file=paste(resultats, "anova_", i, ".csv"), append=TRUE)
  groupe<- as.data.frame(cld(lsm.k))
  write.table(groupe, file=paste(resultats, "anova_", i, ".csv"), sep = ";", row.names=FALSE,
append=TRUE)

}

}
}
else{
#TRANSFORMATION BOX COX si non respect Normalite r?sidus et homogeneite des variances
library(car)
bc <- powerTransform(k+0.0000001)
k_bc <- k^(as.numeric(bc$lambda))

#modele
options(contrasts=c("contr.sum", "contr.poly"))
modele <- lme(k_bc ~ system+cult, data=data_1, random= ~1 | bloc/system)
options(contrasts=c("contr.treatment", "contr.poly"))
modele$fit <- fitted(modele)
modele$res <- residuals(modele)

#Validation du modele: Test de Shapiro (normalite de la distribution des residus)
shapiro_bc <- shapiro.test(modele$res)

#Validation du modele: Test de Levene (homogeneite des variances) pour chaque variable (trait,
date et cult)
levene_system_bc <- leveneTest(k_bc ~ system)
levene_cult_bc <- leveneTest(k_bc ~ cult)

if((shapiro_bc$p.value>=0.05)&(levene_system_bc[1,3]>=0.05)&(levene_cult_bc[1,3]>=0.05)){
  write.infile("/ Shapiro_bc: normalite de la distribution des residus
/", file=paste(resultats, "anova_", i, ".csv"), append=TRUE)
  write.infile(shapiro$p.value, file=paste(resultats, "anova_", i, ".csv"), append=TRUE)
  write.infile(paste("/ Levene_bc: homogeneite des variances /"),
file=paste(resultats, "anova_", i, ".csv"), append= TRUE)
  write.infile(paste("system", levene_system_bc[1,3]), file=paste(resultats, "anova_", i, ".csv"), append=
TRUE)

```



```

write.infile(paste("cult",levene_cult_bc[1,3]), file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),append=
TRUE)

#Analyse de variance
ano_bc <- anova(modele,type="marginal")
write.infile(" ",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
write.infile("/ Anova_bc /",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
write.infile(ano_bc,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)

#Comparaison des moyennes si resultat significatif sur l'analyse de variance
if(ano[3,4]<=0.05) {
  lsm.k<-lsmeans(modele,pairwise~cult)
  write.infile("Comparaison des moyennes",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
  Comp1 <- as.data.frame(summary(lsm.k$lsmeans))
  Comp2 <- as.data.frame(summary(lsm.k$contrasts))
  write.table(Comp1,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),sep = ";", row.names=FALSE,
append=TRUE)
  write.table(Comp2, file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),sep = ";", row.names=FALSE, append
=TRUE)
  write.infile("Groupes",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
  groupes<- as.data.frame(cld(lsm.k))
  write.table(groupe,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),sep = ";", row.names=FALSE,
append=TRUE)
}

if (ano[2,4]<=0.05) {
  lsm.k<-lsmeans(modele,pairwise~system)
  write.infile("Comparaison des moyennes",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
  Comp1 <- as.data.frame(summary(lsm.k$lsmeans))
  Comp2 <- as.data.frame(summary(lsm.k$contrasts))
  write.table(Comp1,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),sep = ";", row.names=FALSE,
append=TRUE)
  write.table(Comp2, file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),sep = ";", row.names=FALSE, append
=TRUE)
  write.infile("Groupes",file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
  groupes<- as.data.frame(cld(lsm.k))
  write.table(groupe,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),sep = ";", row.names=FALSE,
append=TRUE)
}
}

#Test de Mann-Withney si non respect de la normalite des residus et de l'homoscedasticite, meme
apres transformation BOX COX
if((shapiro_bc$p.value<=0.05)|(levene_system_bc[1,3]<=0.05)|(levene_cult_bc[1,3]<=0.05)){
  for(m in 1:5){
    nomcol_m <- colnames(data_1)
    kruskalwallis <- kruskal.test(k ~ (data_1[,m]))
    write.infile(paste("/ Kruskal.wallis ", "effet ",
nomcol_m[m],"/"),file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
    write.infile(kruskalwallis$p.value,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
  }
}

```

```
if ((kruskalwallis$p.value<=0.05)){
  kruskalwallisc<-kruskal(k , (data_1[,m]))#comparaison des moyennes 2 a deux
  Comp2 <- as.data.frame(kruskalwallisc$groups)
  write.infile(paste("/ Comparaison des moyennes ", "effet",nomcol_m[m],"/")
,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"), append=TRUE)
  write.table(kruskalwallisc$means,file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),sep = ";",
row.names=TRUE, append=TRUE)
  write.table(Comp2, file=paste(resultats,"anova_",i,".csv"),sep = ";", row.names=FALSE, append
=TRUE)
  }
}
}
```