



HAL
open science

Comparaison de différentes techniques de travail du sol en agriculture biologique : effet de la structure et de la localisation des résidus sur les microorganismes du sol et leurs activités de minéralisation du carbone et de l'azote

Jean Francois Vian

► To cite this version:

Jean Francois Vian. Comparaison de différentes techniques de travail du sol en agriculture biologique : effet de la structure et de la localisation des résidus sur les microorganismes du sol et leurs activités de minéralisation du carbone et de l'azote. Sciences du Vivant [q-bio]. AgroParisTech; Institut Supérieur d'Agriculture et d'Agroalimentaire Rhône-Alpes; ABIES, 2009. Français. NNT : 2009AGPT0004 . tel-02824085

HAL Id: tel-02824085

<https://hal.inrae.fr/tel-02824085v1>

Submitted on 6 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.



N° / / / / / / / / / / / / / / / /

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur

de

**l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement
(Agro Paris Tech)**

Spécialité : Agronomie

présentée et soutenue publiquement par

VIAN Jean-François

le 23 janvier 2009

**COMPARAISON DE DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE TRAVAIL DU
SOL EN AGRICULTURE BIOLOGIQUE :**

**EFFET DE LA STRUCTURE ET DE LA LOCALISATION DES
RESIDUS SUR LES MICROORGANISMES DU SOL ET LEURS
ACTIVITES DE MINÉRALISATION DU CARBONE ET DE L'AZOTE**

Directeur de thèse : Jean ROGER-ESTRADE

Codirecteurs de thèse : Joséphine PEIGNE et Rémi CHAUSSOD

INRA, UMR 1229 Microbiologie du Sol et de l'Environnement, F-21065 Dijon

Devant le jury :

**M. Denis ANGERS,
M. Michel ARAGNO,
M. Antonio BISPO,
M. Rémi CHAUSSOD,
Mme Joséphine PEIGNE,
M. Guy RICHARD,
M. Jean ROGER-ESTRADE,**

Professeur associé, AGROCAMPUS OUEST
Professeur, UNIVERSITE NEUCHATEL
Ingénieur de recherche, ADEME
Directeur de recherche, INRA
Enseignante-chercheuse, ISARA Lyon
Directeur de recherche, INRA
Professeur, AgroParisTech

**Rapporteur
Rapporteur
Examinateur
Encadrant
Encadrante
Examinateur
Directeur de thèse**

Comparaison de différentes techniques de travail du sol en agriculture biologique : effet de la structure et de la localisation des résidus sur les microorganismes et leurs activités de minéralisation du carbone et de l'azote

Résumé

Depuis quelques décennies, le labour, comme mode de travail du sol, tend à diminuer au profit de différents modes de préparation du sol, allant du travail du sol réduit sans retournement jusqu'au semis direct. De tels modes alternatifs de travail du sol méritent une étude approfondie avant leur diffusion en agriculture biologique (AB) car ils peuvent occasionner des problèmes de nutrition des cultures et une dégradation de la structure du sol au cours des premières années de leur application. L'objectif de ce travail a donc été d'étudier à court terme (< 5 ans) les modifications que génèrent l'adoption de différentes techniques de travail du sol en AB sur la structure du sol, la répartition des résidus de culture et des microorganismes au sein du profil cultural, puis d'en évaluer les conséquences sur la minéralisation potentielle du carbone et de l'azote. Pour cela, le travail s'est appuyé sur deux dispositifs agronomiques mis en place l'un sur sol alluvial sableux (Lyon), l'autre sur sol limoneux de Bretagne (Kerguéhennec) pour comparer les effets de quatre modes de travail du sol : labour traditionnel, labour "agronomique", travail réduit et superficiel. Dans chacun de ces sites, des prélèvements ont été réalisés à partir de l'observation des profils culturaux au sein de zones compactées (mottes Δ) et non compactées (mottes Γ) à différentes profondeurs correspondant aux limites de travail des outils étudiés. Cette stratégie d'échantillonnage a permis de relier la structure du sol au fonctionnement microbien et de mieux comprendre les facteurs qui gouvernent l'organisation spatiale des microorganismes à une échelle macroscopique et ce, aussi bien d'un point de vue quantitatif (biomasse microbienne, activités de minéralisation) que qualitatif (structure des communautés microbiennes). Ainsi, dès les premières années de différenciation des traitements, la quantité, l'activité mais aussi la structure des communautés microbiennes sont influencées par la profondeur et le mode d'enfouissement des résidus puis, dans les horizons où la quantité de substrat disponible n'est pas limitante, par le tassement du sol généré par chaque technique. La prise en compte de l'hétérogénéité spatiale de la structure du sol permet de préciser l'effet de chaque technique étudiée sur le potentiel de minéralisation du carbone et d'azote des microorganismes. Ainsi, dans les conditions expérimentales de ce travail, il apparaît que l'adoption de techniques de travail du sol réduit ou superficiel ne limite pas le potentiel d'azote minéralisable total (sur l'ensemble de la couche de sol) par rapport au labour au cours des premières années de leur application.

Mots clés

travail du sol, agriculture biologique, structure du sol, biomasse microbienne, activités potentielles de minéralisation du C et N, structure des communautés microbiennes

Comparison of different tillage systems in organic farming : effect of soil structure and organic matter repartition on soil micro-organisms and their activities of carbon and nitrogen mineralization

Abstract

Over the last decades, the surface traditionally ploughed has tended to decrease and replaced by shallow working tillage techniques without soil inversion, i.e., no tillage or reduced tillage with tines or discs. These techniques were mostly developed in conventional farming systems but nowadays they are also developed in organic farming systems. Nevertheless, these tillage techniques could generate crop nutrients deficiencies and a deterioration of soil structure, especially during the first years of their application. As the use of synthetic fertilizers is forbidden in organic farming, a decrease of the soil fertility could be very detrimental for crop growth. Indeed, soil micro-organisms are key contributors to the soil functioning in organic farming as nutrient supply is mainly dependent on the degradation of soil organic matter by their mineralization activity. The objective of this work was to study - during the first years of their application (< 5 years) - the effects of different tillage techniques on soil structure, crop residues distribution and to evaluate their consequences on soil micro-organisms as well as their potential activity to mineralize organic carbon and nitrogen. To fulfill this objective, a particular sampling scheme was used, based on a morphological characterisation of soil structure. In each horizon delimited by the working depth of the successive tillage tools, we sampled different areas with distinct physical properties : compacted clods (Δ clods) without any visible structural porosity and loose clods with a clearly visible structural porosity (Γ clods). This sampling method enabled us to make connections between soil structure and soil microbial functioning, and to reveal the spatial organisation of soil micro-organisms at a macroscopic scale, quantitatively (soil microbial biomass and its activities of C and N mineralization) and qualitatively (soil microbial community structure). In this way, during the first years of treatments differentiation, quantity, activity and soil microbial community structure were modified : firstly, by crop residue distribution and secondly, by soil compaction within the horizons where substrates availability was not restricted. The integration of the spatial heterogeneities of soil structure enabled us to precise the effects of each tillage technique on the potential ability of soil micro-organisms to mineralize organic carbon and nitrogen. Thus, in the experimental conditions of this work, the application of a reduced tillage technique in organic farming doesn't reduce the potential of nitrogen mineralization in comparison with mouldboard ploughing during the first years of its application.

Keywords

soil tillage, organic farming, soil structure, soil microbial biomass, potential activity of C and N mineralization, soil microbial community structure

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier L'ADEME et l'ISARA Lyon pour avoir accepté de financer ce travail.

Merci à Antonio Bispo, Ingénieur Sol et Environnement de l'ADEME, pour avoir soutenu ce projet et m'avoir suivi tout au long de ce travail.

Jean Roger-Estrade a encadré cette thèse, merci pour ses conseils et l'apport de son expérience pour la réalisation de ce travail.

Je remercie Michel Aragno et Denis Angers pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail ainsi que tous les membres du jury pour leur participation en tant qu'examineurs.

Merci à Annie Clays-Josserand, Pierre Curmi et Christian Morel pour leur participation aux comités de pilotage et leurs conseils.

Un immense merci à Joséphine Peigné qui a construit ce projet de recherche et qui m'a assisté "pas à pas" tout au long de ce travail. Elle m'a soutenu, guidé et souvent sorti la tête de l'eau dans les moments difficiles. Merci pour tout le travail qu'elle a réalisé, sur le terrain mais aussi dans l'analyse des données et l'écriture. Surtout merci, pour tous les moments partagés au long de ces trois années ! Ce travail ne serait jamais devenu ce qu'il est sans son aide précieuse.

Yvan Gautronneau a également largement contribué à l'élaboration de ce projet de recherche. Mes plus profonds remerciements pour m'avoir initié à la description des profils cultureux. J'espère avoir réussi à prendre, ne serait-ce qu'un tout petit peu, son coup de main (et de couteau !) pour décrire la structure du sol au fond des profils. Mais bon, en fait il me faudrait pour cela écumer, pendant de nombreuses années, les sols aux 4 coins du monde et brasser des kilos de terre pour arriver à son niveau d'expertise ! Mais je ne désespère pas !

Je tiens à remercier tout particulièrement Rémi Chaussod pour m'avoir accueilli à Dijon et initié à la microbiologie du sol. Un grand merci pour tout le travail qu'il a fait, ses nombreuses relectures, corrections et les pistes de recherche qu'il m'a ouvert ! Il m'a fait découvrir la complexité de la vie du sol, qui le passionne depuis de nombreuses années et à réussi à me transmettre ce virus !

Un très grand merci à Claude Barbet, agriculteur biologique à Thil, sans qui ce projet n'aurait pas été possible. Merci pour tout son savoir faire, sa précision inégalable dans la conduite des itinéraires techniques et aussi pour sa patience tant nous avons transformé ses parcelles en véritable ~~gruyère~~ (emmental !!!) à certaines périodes de l'année !!!

Je remercie Philippe Lemanceau de m'avoir accueilli au sein de l'UMR MSE de Dijon. Christian Steinberg pour son accueil au sein de l'équipe "Rôle des pratiques culturales sur l'écologie des agents phytopathogènes et la qualité des sols" à Dijon, ainsi que Véronique Edel-Hermann pour son aide dans l'analyse des données de T-RFLP. Merci à toutes les personnes de l'équipe 3 de Dijon, tous ces moments passés à la paille, au café, dans les pubs, à Prénoval...Merci à Marie-Christine Breuil pour son aide lors de la mesure de la biomasse microbienne ainsi qu'à Abdel,

toujours là pour m'aider, me faire rire et partager des bons plats ! Mais aussi Claude Alabouvette pour les discussions passionnées sur l'agriculture biologique, les abeilles et Léon Fayolle avec qui j'ai partagé le bureau pendant un bon moment ! La liste est longue à Dijon, beaucoup de personnes avec qui j'ai partagé de très bons moments : Lionel Ranjard "fan" de la rasette, Pierre-Alain Marron et Christophe Mougel qui m'ont apporté leur lumières sur la biomol et l'analyse de données, mais aussi Virginie Nowak, Mélanie Lelièvre, Fabrice Martin, Laurent Philippot, David Bru et Lejon, Sonia Henri, Marion Devers,...

Un grand merci également à Claire Chenu qui m'a accueilli au sein de son équipe à Grignon et qui s'est intéressée à ce travail en répondant patiemment à mes questions. Merci à tous les membres de son équipe, notamment à Valérie Pouteau et Gérard Bardoux pour leur aide dans la mesure des fractions organiques, Christophe Moni pour m'avoir transmis l'art du fractionnement des matières organiques ! Mais aussi Naoise Nunan pour les analyses...rugbystiques !

Merci à toutes les personnes de l'ISARA qui m'ont aidé et supporté pendant ce travail: Christophe David qui m'a poussé et encore poussé, un grand merci pour toute la confiance qu'il m'a accordé, et aussi Dominique Vallod, Joël Robin, Philippe Fleury, Florian Célette, Yves Saupin, Jean-Noël Giggon, Arnaud Hallier, Thomas Lhuillery et aussi Jean Marc et Benoît pour l'analyse de données et surtout Brigitte Bottolier pour son aide précieuse en statistiques.

Une pensée particulière pour les thésards "d'à côté la salle café"...pas facile d'avoir le bureau ici ! Cécile et Pascal avec qui j'ai partagé ce bureau et des moments de stress, de concentration et surtout d'éclats de rires !

Céline, tes mises en garde sur l'exercice de la thèse n'ont pas été assez fortes, j'ai plongé à mon tour, tout comme toi ! Merci énormément pour tout ce que tu m'as apporté, tes nombreux conseils sur la biomol et surtout, surtout, pour ton aide remarquable dans l'analyse des données de T-RFLP et pour être arrivée à me faire comprendre comment ça marche tout ça !!! Et oui tu étais passée aussi par là et tu savais tout le chemin que je devais faire...mais ça tu ne me l'as pas dit avant sinon...

Nadine, un bonheur d'avoir travaillé avec toi ! A tes côtés on a l'impression de tout savoir faire à la paillasse de biomol...et m'initier à cet art n'a pas été chose simple, habitué que je suis à travailler avec des kilos de terre plutôt qu'avec des μg d'ADN ! Merci pour toute la rigueur dans les manips que tu m'as apporté, ton aide m'a été plus que précieuse.

Une spéciale dédicace à mes "logeuses" de Dijon, sans qui j'aurais dormi sous les ponts ou fini déprimé dans les chambres universitaires ! Donc un immense merci à Fabiola et Noémie (et sa sœur Charline) qui m'ont supporté et avec qui j'ai partagé de vrais bons moments qui m'ont aidé à tenir ! Quand vous voulez en Auvergne ou à Lyon !

Attoll ? Zitoune ? JC ? Toujours là quand il faut et pas avares de conseils tous plus sérieux les uns que les autres !

Enfin, merci à Mousse, pas facile de vivre avec Raymond Babbitt durant ces derniers mois...

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	1
I / Contexte de l'étude	1
II / Objectifs et problématique	4
III / Présentation du document	6
Chapitre 1 : Synthèse bibliographique	10
I / Le travail du sol de conservation et les principes de l'agriculture biologique	11
I.1 / Le développement du travail du sol de conservation	11
I.2 / L'agriculture biologique	13
I.2.1 / Des concepts fondateurs à la législation actuelle	13
I.2.2 / Les systèmes de production en agriculture biologique : contraintes et spécificités	14
I.2.3 / Le travail du sol en agriculture biologique	17
II / Effets du labour et des techniques de conservation sur les propriétés physiques du sol et la circulation de l'eau	19
II.1 / Structure du sol	19
II.2 / La densité apparente du sol	20
II.3 / La porosité du sol et la circulation de l'eau dans le sol	21
III / Effets du travail du sol conventionnel et des techniques de conservation sur les teneurs et stocks en C et N	23
III.1 / Teneurs et stocks en C et N totaux	23
III.2 / Fractions granulométriques de la MOS	25
III.3 / Autres éléments nutritifs	25
IV / Effets du travail du sol conventionnel et des techniques de conservation sur les propriétés biologiques du sol	26
IV.1 / Influence des techniques de travail du sol sur les macro-organismes	27
IV.2 / Influence des techniques de travail du sol sur la biomasse microbienne	27
IV.3 / Influence des techniques de travail du sol sur la structure et la diversité des communautés microbiennes du sol	28
IV.4 / Influence des techniques de travail du sol sur la minéralisation du carbone et de l'azote	30
IV.4.1 / Influence de la profondeur d'enfouissement des résidus de cultures	30
IV.4.2 / Influence de la structure du sol	31
IV.4.3 / Variabilité des réponses dans diverses expérimentations	32
Chapitre 2 : Démarche expérimentale	35
I / Les sites expérimentaux	37
I.1 / Site expérimental de Lyon	37
I.1.1 / Caractéristiques de la parcelle d'essai	38
I.1.2 / Mesures réalisées avant la mise en place des traitements	38
I.1.3 / Rotation	39
I.2 / Site expérimental de Kerguéhennec	40

I.2.1 /	Caractéristiques de la parcelle d'essai	40
I.2.2 /	Mesures réalisées avant 2006	41
I.2.3 /	Rotation	42
II /	Les techniques de travail du sol étudiées	43
II.1 /	Le labour traditionnel	43
II.2 /	Le labour agronomique	43
II.3 /	Le travail du sol réduit	44
II.4 /	Le travail du sol superficiel	44
III /	Description de la structure du sol	48
III.1 /	Le profil cultural	48
III.2 /	Estimation de la proportion de zones Δ	52
III.3 /	Mesure de la densité apparente du sol ou masse volumique	52
IV /	Échantillonnage	53
V /	Mesures de laboratoire	55
V.1 /	Densité apparente des mottes Γ et Δ	55
V.2 /	Biomasse microbienne	55
V.3 /	Minéralisations potentielles de C et N organiques	56
V.4 /	Respiration spécifique apparente	57
V.5 /	Analyses qualitatives: structure des communautés microbiennes	57
V.5.1 /	Extraction de l'ADN du sol	59
V.5.2 /	Amplification d'ADNr par PCR	59
V.5.3 /	Analyse T-RFLP	60
V.5.4 /	Traitement des données de T-RFLP	61
V.6 /	Analyses chimiques	62
V.7 /	Fractionnement granulo-densimétrique des MOS	62
VI /	Analyses des données	64
VII /	Effets du mode de préparation et de conservation des échantillons sur les paramètres microbiens quantitatifs mesurés	65
Chapitre 3 : Effet du mode de travail du sol sur la structure du sol et l'évolution des stocks de carbone et d'azote		68
I /	Modifications de la structure du sol engendrées par les techniques de travail du sol	70
I.1 /	Description des profils culturaux en mars 2006 et 2007 sur le site de Lyon	70
I.2 /	Description des profils culturaux en mars 2006 et 2007 sur le site de Kerguéhennec	72
I.3 /	Proportion de zones Δ au sein des profils culturaux	75
I.4 /	Masse volumique des horizons de prélèvements	78
I.4.1 /	Site expérimental de Lyon	78
I.4.2 /	Site expérimental de Kerguéhennec	79
I.5 /	Taux de saturation en eau de la porosité (WFPS)	80
I.5.1 /	Site expérimental de Lyon	80
I.5.2 /	Site expérimental de Kerguéhennec	82
I.6 /	Effet du mode de travail du sol sur la structure du sol : discussion	84

II / Evolutions des teneurs et des stocks de C et N engendrées par les différentes techniques de travail du sol	89
II.1 / Evolutions des teneurs en C et N des différentes modalités	89
II.1.1 / Site de Lyon	89
II.1.2 / Site de Kerguéhennec	91
II.2 / Evolutions des stocks de C et N en fonction du mode de préparation du sol	92
II.2.1 / Site de Lyon	93
II.2.2 / Site de Kerguéhennec	94
II.3 / Fractionnement granulométrique des MOS	96
II.4 / Effet du mode de travail du sol sur les teneurs et stocks de carbone et d'azote : discussion	98
III / Conclusion	102

Chapitre 4: Effets de différentes techniques de travail du sol sur la microflore du sol : aspects quantitatifs et qualitatifs _____ **103**

I / Effets des modifications structurales et de la répartition des résidus de cultures sur la biomasse microbienne du sol et les activités potentielles de minéralisation du C et N	105
I.1 / Site expérimental de Lyon	105
I.1.1 / Biomasse microbienne du sol	105
I.1.2 / Biomasse microbienne du sol exprimée en pourcentage du C total	108
I.1.3 / Minéralisations potentielles du carbone et de l'azote	109
I.2 / Site expérimental de Kerguéhennec	112
I.2.1 / Biomasse microbienne du sol	112
I.2.2 / Biomasse microbienne du sol exprimée en pourcentage du C total	114
I.2.3 / Minéralisations potentielles du carbone et de l'azote	115
I.3 / Modifications des paramètres microbiologiques quantitatifs : discussion	118
I.3.1 / Influence de la répartition des résidus de culture	118
I.3.2 / Influence de la structure du sol (type de motte)	120
I.3.3 / Comparaison des traitements	123
II / Analyse de la structure des communautés microbiennes	124
II.1 / Evolution de la structure des communautés fongiques du sol	124
II.1.1 / Structure des communautés fongiques du sol avant la différenciation des traitements (février 2005, T0)	124
II.1.2 / Evolution de la structure des communautés fongiques du labour traditionnel (LT) entre février 2005 et mars 2006	125
II.1.3 / Evolution de la structure des communautés fongiques entre T0 et T1 pour le traitement travail du sol réduit (TR)	127
II.1.4 / Influence du LT et du TR sur la structure des communautés fongiques après un an de différenciation des traitements : horizon 0-7 cm	128
II.1.5 / Influence du LT et du TR sur la structure des communautés fongiques après un an de différenciation des traitements : horizon 7-17 cm	129
II.1.6 / Influence du LT et du TR sur la structure des communautés fongiques après un an de différenciation des traitements: horizon 17-30 cm	130
II.2 / Evolution de la structure des communautés bactériennes du sol	131
II.2.1 / Structure des communautés bactériennes du sol avant la différenciation des traitements (février 2005)	131
II.2.2 / Evolution de la structure des communautés bactériennes du labour traditionnel (LT) entre février 2005 et mars 2006	132

II.2.3 /	Evolution de la structure des communautés bactériennes du travail du sol réduit entre février 2005 et mars 2006	133
II.2.4 /	Influence du LT et du TR sur la structure des communautés bactériennes après un an de différenciation des traitements: horizon 0-7 cm	134
II.2.5 /	Influence du LT et du TR sur la structure des communautés bactériennes après un an de différenciation des traitements : horizon 7-17 cm	135
II.2.6 /	Influence du LT et du TR sur la structure des communautés bactériennes après un an de différenciation des traitements: horizon 17-30 cm	136
II.3 /	Evolution de la structure des communautés microbiennes : discussion	137
II.3.1 /	Structure des communautés microbiennes à T0	137
II.3.2 /	Evolution des communautés microbiennes entre T0 et T1	138
II.3.3 /	Effet de la technique de travail du sol sur les communautés fongiques	139
II.3.4 /	Effet de la technique de travail du sol sur les communautés bactérienne	141
III /	Conclusion	142
	DISCUSSION GENERALE	144
I /	Retour sur les questions de recherche	145
I.1 /	Evolution de la structure du sol (question de recherche I)	145
I.2 /	Evolution des stocks de MO (question de recherche II)	146
I.3 /	Influence globale des techniques de travail du sol sur les microorganismes (questions de recherche III et IV)	147
II /	Limites et perspectives	154
II.1 /	Remarques générales	154
II.2 /	Utilisation des indicateurs microbiens dans des systèmes agronomiques de plein champ	156
II.3 /	Adoption des techniques de travail du sol sans labour en agriculture biologique	158
	Références bibliographiques	160
	Annexes	172

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

I / Contexte de l'étude

Le travail du sol est une pratique ancestrale, dont un des buts premiers est de créer un environnement favorable à la germination des graines et au développement des racines (Köller, 2003). Le premier outil permettant d'enfouir et de recouvrir les graines est apparu il y a environ 10 000 ans dans la civilisation sumérienne, puis fut progressivement perfectionné au cours des siècles jusqu'à l'apparition de la première "charrue romaine" décrite par Virgile aux alentours de l'an 1. La "charrue moderne" fut dessinée aux Etats-Unis par Thomas Jefferson en 1784 et brevetée par Charles Newfold en 1796. Son utilisation s'est ensuite largement répandue et devint rapidement un des symboles de l'agriculture moderne (Lal *et al.*, 2007). La pratique du labour, avec une charrue à versoirs, reste encore aujourd'hui la technique de travail du sol la plus répandue dans le monde. Cette pratique a permis d'augmenter la productivité des cultures grâce notamment à son action de contrôle sur le développement des adventices et de fragmentation de la structure du sol. Cependant, au cours du XX^{ème} siècle de nouveaux problèmes de fertilité des sols sont apparus, notamment aux Etats-Unis où les graves problèmes d'érosion ("Dust Bowl") ont conduit au développement de techniques alternatives au labour. Ce mouvement a été initié par Edward Faulkner qui publia le livre "Plowman's Folly" en 1942 (Lal *et al.*, 2007). Depuis, les résultats de nombreuses recherches sous différentes zones climatiques dans le monde ont révélé des problèmes communs aux sols labourés : tassement, baisse des teneurs en matières organiques des sols (MOS), érosion, limitation de la circulation de l'eau (Köller, 2003; Lal *et al.*, 2007) et coût énergétique et financier de cette pratique (Monnier, 1994). On assiste donc depuis quelques décennies, à travers le monde entier, à une transition graduelle qui s'effectue entre le labour conventionnel (labour avec versoir, retournement de la couche arable sur 20-30 cm de profondeur) et des formes variées de préparation sans retournement des couches de sol, allant jusqu'au semis direct (travail uniquement sur la ligne de semis). Ces techniques ont été regroupées sous le terme de travail du sol de conservation, ou agriculture de conservation, lorsqu'elles laissent plus de 30 % des résidus de la culture précédente en surface (Köller, 2003;

Labreuche *et al.*, 2007). La présence d'un mulch en surface et la limitation des perturbations verticales du sol protègent le sol de l'érosion éolienne et hydrique, limitent les pertes de MOS, favorisent l'activité biologique des sols et permettent d'augmenter la largeur de travail des outils et de réduire ainsi la charge de travail des agriculteurs sans diminuer pour autant le rendement des cultures (Kern et Johnson, 1993; Köller, 2003). Cependant, le développement de ces techniques s'est accompagné d'une utilisation croissante d'herbicides nécessaire au contrôle du développement des adventices qui n'est plus assuré, en partie, par le labour. Les systèmes de conservation sont donc efficaces mais à des coûts élevés d'intrants chimiques accroissant ainsi leur potentiel de pollution des eaux de surface (Teasdale *et al.*, 2007).

L'agriculture de conservation s'est développée de façon quasi-exclusive dans les systèmes de production conventionnels. Depuis quelques années, l'IFOAM (International Federation of Organic Agriculture Movements standards) encourage les agriculteurs à adopter les techniques de conservation en agriculture biologique (AB) afin de limiter l'érosion des sols et d'améliorer la qualité des sols (Peigné *et al.*, 2007). Les systèmes de production conduits selon les principes de l'AB excluent le recours aux engrais et produits phytosanitaires de synthèse. Ils essaient de rechercher une autonomie énergétique sur la rotation afin de protéger la qualité environnementale et de favoriser les interactions et les processus biologiques favorables au développement des cultures (Marinari *et al.*, 2006). La plupart des techniques culturales employées en AB nécessitent donc un travail du sol fréquent voire intensif afin de palier, entre autres, l'absence d'utilisation d'herbicides. Le travail du sol, notamment le labour, est utilisé en AB pour limiter le développement des adventices mais aussi pour enfouir les cultures légumineuses pérennes au début de la rotation, les engrais verts ou les intercultures, incorporer les amendements organiques et préparer le lit de semence. Les effets bénéfiques des systèmes de culture agrobiologique peuvent être alors réduits ou annulés par l'utilisation intensive des interventions mécaniques sur les parcelles (pertes de MOS, tassement des sols, érosion) (Teasdale *et al.*, 2007). L'AB est donc confrontée à un paradoxe car le recours fréquent au travail du sol semble nécessaire mais il peut engendrer une dégradation de la qualité des sols.

En France, une enquête réalisée auprès de 68 exploitations agrobiologiques a montré que de plus en plus d'agriculteurs avaient recours à des méthodes

alternatives au labour (Peigné *et al.*, 2006). Ils s'interrogent sur l'effet de ces techniques sur le développement des adventices, l'adaptation de leur parc matériel, et plus globalement sur la qualité de leur sol¹. Les interrogations les plus nombreuses portent sur l'impact de ces techniques sur la biodiversité du sol, sa fertilité biologique (potentialités agronomiques liées à l'activité biologique des sols), son état sanitaire, ses impacts environnementaux et sur la capacité de résilience de l'agrosystème (Chaussod, 1996).

De nombreuses références techniques et scientifiques sur l'impact du mode de travail du sol sur la qualité du sol sont disponibles mais, de façon quasi-exclusive, ces références sont issues de l'agriculture conventionnelle. Ces résultats montrent que la minéralisation de la MOS est affectée par le type de travail du sol. Le labour augmente le turn-over de la MOS en favorisant l'aération et le réchauffement du sol, en incorporant de la MO fraîche au sol et en libérant de la MOS qui était physiquement protégée au sein des agrégats (Balesdent *et al.*, 2000). En revanche, dans les systèmes de conservation, les pools labiles de la MOS augmentent progressivement en surface, conduisant sur le long terme (>10 ans) à des potentiels de minéralisation du carbone (C) et de l'azote (N) similaires entre les systèmes de travail du sol de conservation et labourés (Andrade *et al.*, 2003). Il apparaît donc qu'à long-terme l'adoption des techniques de travail du sol de conservation n'affecte pas le potentiel agronomique des parcelles, car leurs effets négatifs (tassement, turn-over de la MOS) peuvent être contrebalancés par l'augmentation des activités des microorganismes et de la faune du sol (Kladivko, 2001). Cependant, sur le court terme (< 5 ans) leur adoption peut occasionner des problèmes de nutrition des cultures en raison d'une immobilisation de l'azote importante (Pekrun *et al.*, 2003) et d'une dégradation de la structure du sol (Guérif, 1994). Or, les systèmes agrobiologiques reposent, plus qu'en conventionnel, sur les processus chimiques et biologiques du sol pour la fourniture d'éléments assimilables pour la culture en place. Les microorganismes du sol sont des acteurs clefs de la nutrition des cultures en AB et une dégradation même transitoire de leur environnement physique et chimique, réduisant leur capacité à minéraliser la MOS et à libérer des éléments nutritifs pour la culture en place, peut être fortement préjudiciable pour les cultures et la situation

¹ La qualité d'un sol a été définie comme "la capacité d'un certain type de sol à fonctionner, dans les limites d'un écosystème naturel ou anthropisé, pour favoriser la productivité des plantes et des animaux, maintenir ou augmenter la qualité de l'air ou de l'eau, et améliorer la santé et l'habitat de l'homme" (Karlen *et al.*, 1997).

économique de l'exploitant agricole. Cependant, peu de références sur l'effet des techniques de travail du sol de conservation sont disponibles en AB. Pourtant, les sols conduits selon ce mode de production possèdent des caractéristiques particulières qui permettraient de contrebalancer les effets négatifs des systèmes de conservation durant les premières années de leur application : un pool labile de MOS plus grand qu'en conventionnel (Shepherd *et al.*, 2002), une diversité et une activité microbienne plus importantes (Mäder *et al.*, 2002) et une activité des vers de terre plus intense (Scullion *et al.*, 2002).

II / Objectifs et problématique

L'objectif principal de ce travail de thèse est d'étudier les modifications à court terme que génèrent l'adoption de différentes techniques de travail du sol en AB sur la structure du sol, la répartition de la MOS et des microorganismes au sein du profil de sol et d'évaluer leurs conséquences sur la minéralisation potentielle du C et N au cours des premières années de leur application. Deux des principaux facteurs sur lesquels le travail du sol a un effet direct et qui peuvent affecter la répartition et l'activité des microorganismes ont été étudiés :

- la structure du sol ;
- la répartition des pools organiques totaux et labiles (matières organiques particulaires).

La structure du sol sera, dans cette étude, appréhendée à l'échelle du profil cultural (4 m x 30 cm). La méthode employée rend compte de l'effet de chaque système de travail du sol sur l'organisation spatiale de la structure à l'échelle macroscopique. Cette approche permet de relier l'état structural du sol observé à son fonctionnement microbien en réalisant un échantillonnage stratifié au sein de chaque profil cultural qui prend en compte la profondeur de travail de l'outil considéré et le niveau de tassement de la zone échantillonnée. Les paramètres microbiens mesurés à partir de cet échantillonnage sont de deux ordres : quantitatifs (biomasse microbienne et potentiel de minéralisation du C et N) et qualitatifs (structure des communautés microbiennes). La mesure de la taille du pool microbien est un indicateur fiable de la qualité du sol, sa mesure contribue à la compréhension des cycles des éléments nutritifs à la fois sur le court et le long terme (Insam, 2001)

tandis que la mesure des flux de C et N donne une estimation globale du fonctionnement de l'écosystème et du niveau de productivité des parcelles (Aon *et al.*, 2001a). Enfin, l'étude de la structure des communautés microbiennes est une première approche de l'effet des techniques de travail du sol sur les modifications qualitatives de la microflore du sol, question récurrente chez les agriculteurs biologiques.

Ce travail devrait permettre, *in fine*, d'adapter les itinéraires techniques associés à chaque mode de travail du sol afin de minimiser ou d'éviter les effets délétères d'un changement de pratique culturale sur le développement des microorganismes du sol et sur leur capacité à minéraliser la MOS et à fournir des éléments assimilables par la culture en place dans le contexte de l'agriculture biologique.

Pour répondre à ces objectifs, quatre itinéraires techniques de travail du sol, allant du labour classique (référence) au semis direct sous couvert vivant ont été comparés dans deux situations pédoclimatiques et historiques différentes. Les traitements choisis représentent un gradient d'intensification du travail du sol et chaque système conserve un niveau minimal de mécanisation afin de maîtriser le développement des adventices et de préparer le lit de semence. Ces modes de travail du sol sont étudiés dans des systèmes de production basés sur une alternance de cultures légumineuses (luzerne, pois, soja) et de céréales (maïs, blé ou triticales), d'intercultures et d'apport de matière organique au sol.

Les sites ayant servi de support à la mise en place des expérimentations sont situés près de Lyon et en Bretagne. Le premier (Lyon), géré par l'ISARA Lyon, se situe dans la phase de transition labour-non labour (mis en place en 2005). Il permet d'étudier l'évolution des paramètres physiques, chimiques et biologiques au cours des trois premières années d'adoption des techniques de travail du sol en AB. Le second site (Kerguéhennec), géré par la chambre d'agriculture du Morbihan, entre dans la 4^{ème} année de différenciation des traitements. Sur ce site, le sol à, *a priori*, atteint un état dit de "pseudo-équilibre" (Guérif, 1994) et les différences entre les traitements doivent donc être théoriquement plus grandes que sur le site de Lyon. Les résultats obtenus sur ce site doivent permettre d'infirmer ou de confirmer les observations et hypothèses émises sur l'évolution de la structure du sol et des indicateurs microbiens mesurés sur le site de Lyon.

Ce mémoire a été organisé selon le schéma directeur de la Figure 1. Cette figure présente l'effet du mode de travail du sol sur la structure du sol, la localisation de la MOS et des résidus de culture et leurs conséquences sur les microorganismes du sol et leur potentiel de minéralisation du C et N. Selon la profondeur de travail de l'outil considéré et son mode de fragmentation de la structure (retournement ou non) le travail du sol modifie l'environnement abiotique (conditions de vie des microorganismes du sol) et biotiques (accessibilité des substrats) des microorganismes et modifie en retour leur capacité à minéraliser la MOS. Ce travail soulève plusieurs questions relatives aux modifications structurales, chimiques et microbiologiques engendrées par le travail du sol. Chacune de ces questions de recherche est indiquée sur la Figure 1 ainsi que les chapitres qui s'y réfèrent.

III / Présentation du document

Ce mémoire est composé de 4 chapitres.

Le premier chapitre est une revue de la littérature internationale qui permet de pointer les questions de recherche qui sous-tendent ce travail (Figure 1). La première partie de ce chapitre précise le contexte de l'étude en rappelant : (1) les enjeux du travail du sol de conservation et les surfaces agricoles mondiales et françaises converties à l'agriculture de conservation et (2) les concepts fondateurs de l'AB, les systèmes de production et la problématique du travail du sol en AB. La seconde partie de ce chapitre porte sur l'effet du mode de travail du sol sur la structure du sol, la répartition des résidus de cultures, les teneurs et stocks en C et N et les microorganismes du sol. Cette revue de la littérature internationale repose essentiellement sur les travaux menés en agriculture conventionnelle et se concentre sur les aspects abordés ultérieurement dans ce travail. Ainsi, l'influence du travail du sol sur l'enherbement, la réponse des cultures, les macro-organismes ou les émissions de N₂O ne sont pas, ou peu, abordés.

Le deuxième chapitre présente la démarche expérimentale adoptée pour répondre aux questions de recherche et aux objectifs de ce travail. Les sites

expérimentaux retenus sont présentés ainsi que la démarche d'analyse et les mesures réalisées.

Le troisième chapitre répond aux questions de recherche I et II (Figure 1) :

- I : Quel est l'impact des systèmes de travail du sol sur la structure du sol, la densité apparente du sol et le taux de saturation de la porosité au cours des premières années d'application des traitements en AB?
- II : Quelle est l'influence des techniques de travail du sol sur la répartition des résidus de cultures et quelle en est la conséquence sur les teneurs et les stocks de C et N ainsi que sur la dynamique des MOS à court terme en AB ?

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'évolution de la structure du sol (*via* l'observation de profils culturaux et de la mesure de la densité apparente du sol) et des teneurs et stocks de C et N sur chacun des sites expérimentaux. De plus, un "zoom" sur l'influence à court terme (3 ans) d'un changement de pratique culturale (labour traditionnel *versus* travail du sol réduit) sur les fractions granulométriques de la MOS est réalisé sur le site de Lyon. Ceci permettra de discuter de l'influence des zones tassées, de la répartition des résidus de cultures et du type de fragmentation de la structure du sol sur la dynamique des MOS et sur l'accessibilité des ressources trophiques pour les microorganismes du sol.

Le quatrième chapitre est divisé en deux parties. La première partie fait état des évolutions de paramètres microbiologiques quantitatifs qui interviennent dans le cycle de la MOS et la fourniture potentielle d'éléments nutritifs : biomasse microbienne, activités potentielles de minéralisation du C et N. La seconde partie présente quant à elle l'influence du travail du sol sur la structure des communautés bactériennes et fongiques du sol sur le site de Lyon. Elle permet d'étudier et de comparer à court terme (un an) les effets d'un labour traditionnel et d'une technique de conservation (travail du sol réduit) sur des changements qualitatifs de la microflore tellurique. Ce chapitre répond à la question de recherche III (Figure 1) :

- III : Quelles sont les répercussions des modifications de la structure du sol et de la répartition des résidus de cultures sur la biomasse microbienne, le potentiel de minéralisation du C et N et sur la structure des communautés microbiennes à court terme (< 5 ans) en AB ?

Enfin, la discussion générale revient sur l'influence globale des différents systèmes de travail du sol étudiés sur les relations entre la structure du sol, la répartition des résidus de cultures sur les microorganismes du sol et leur activité de minéralisation du C et N à l'échelle du profil cultural. Ces relations sont abordées à partir de schémas d'extrapolation des mesures réalisées afin de comprendre et expliquer la répartition spatiale de la quantité et de l'activité des microorganismes du sol au sein du profil cultural. Cette partie répond à la question de recherche IV (Figure 1) :

- **IV** : Quelle est l'influence globale de chaque technique sur les microorganismes du sol et quels facteurs limitent leur développement et l'activité microbienne suite à un changement de pratique culturale en AB ?

La discussion générale revient également sur les apports méthodologiques de ce travail, sur l'utilisation d'indicateurs microbiens dans des systèmes agronomiques de plein champ et sur la faisabilité d'adopter des techniques de travail du sol de conservation en AB.

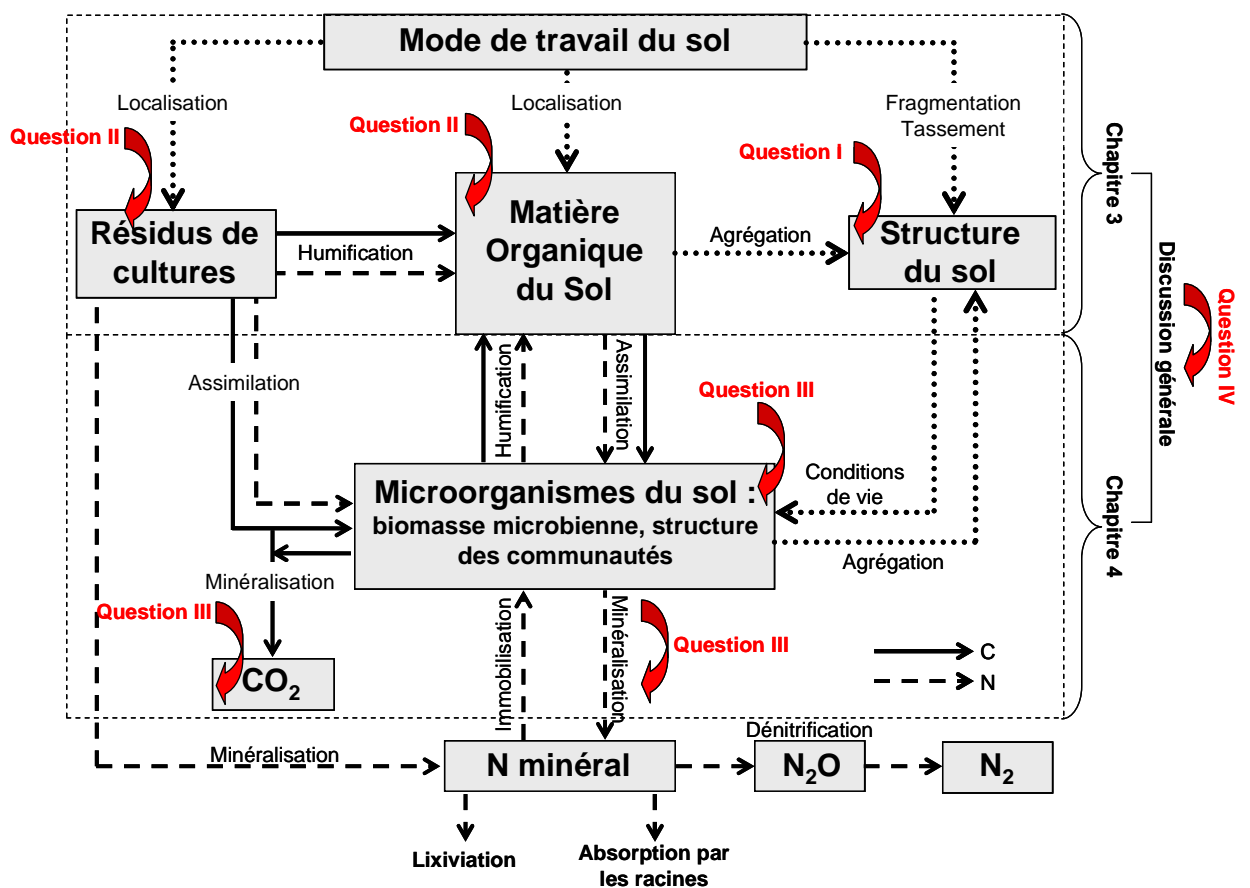


Figure 1 : Effet du mode de travail du sol sur la structure du sol, la localisation des résidus de culture et de la MOS et leurs répercussions sur les microorganismes et le cycle du C et N dans le sol. Les questions de recherche, et les chapitres qui s'y réfèrent, sont pointés sur les différents compartiments concernés.

Questions de recherche

Question I : Quel est l'impact des systèmes de travail du sol sur la structure du sol, la densité apparente du sol et le taux de saturation de la porosité au cours des premières années d'application des traitements en AB ?

Question II : Quelle est l'influence des techniques de travail du sol sur la répartition des résidus de cultures et quelle en est la conséquence sur les teneurs et les stocks de C et N ainsi que sur la dynamique des MOS à court terme en AB ?

Question III : Quelles sont les répercussions des modifications de la structure du sol et de la répartition des résidus de cultures sur la biomasse microbienne, le potentiel de minéralisation du C et N et sur la structure des communautés microbiennes à court terme (< 5 ans) en AB ?

Question IV : Quelle est l'influence globale de chaque technique étudiée sur les microorganismes du sol et quels facteurs limitent leur développement et l'activité microbienne suite à un changement de pratique culturale en AB ?

Chapitre 1 :
Synthèse bibliographique

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

Cette synthèse bibliographique présente dans un premier temps les enjeux du travail du sol de conservation et les surfaces agricoles mondiales et françaises converties à l'agriculture de conservation puis le mode de production en agriculture biologique et le travail du sol en AB. Cette première partie permet de préciser le contexte de ce travail de thèse et les problématiques inhérentes au travail du sol en AB. Ensuite cette revue bibliographique porte essentiellement sur l'effet de différentes techniques de travail du sol (du labour traditionnel au semis direct) sur la structure du sol (organisation structurale, porosité et circulation de l'eau dans le sol), les teneurs et stocks en carbone et en azote et sur les microorganismes du sol (biomasse microbienne et activités de minéralisations, structure des communautés microbiennes). Cette partie se concentre principalement sur les approches adoptées par la suite dans cette étude.

I/ Le travail du sol de conservation et les principes de l'agriculture biologique

I.1 / Le développement du travail du sol de conservation

Si les outils de travail du sol se sont aujourd'hui diversifiés, la charrue à versoirs reste l'outil le plus répandu. Le labour permet de contrôler le développement des adventices, d'enfouir les résidus de cultures et de fragmenter la structure du sol avant l'implantation des cultures. Cette technique a permis d'augmenter la productivité des cultures mais elle reste une technique consommatrice de temps, de main d'œuvre, de puissance tractrice et d'énergie (Monnier, 1994). Les problèmes de fertilité des sols communs aux sols labourés (baisse des teneurs en MO, érosion éolienne et hydrique, tassements) ont conduit au développement des techniques alternatives au labour, regroupées sous le terme de travail du sol de conservation lorsqu'elles laissent en surface plus de 30 % des résidus de la culture précédente (Köller, 2003). Ces techniques couvrent une large gamme d'opérations allant du semis direct au travail du sol réduit sans retournement de la couche de sol avec un

outil à dents ou à disques. Le labour quant à lui laisse moins de 15 % des résidus de culture en surface après l'implantation de la culture suivante (Köller, 2003; Labreuche *et al.*, 2007).

Depuis les années 50, les surfaces agricoles labourées diminuent à travers le monde entier au profit du travail du sol de conservation (Lal *et al.*, 2007). Ce mode de production se pratique sur environ 95 millions d'hectares à travers le monde (Lal *et al.*, 2007). Ces techniques se sont d'abord et surtout développées aux Etats-Unis et ont rapidement gagné l'Amérique du sud, notamment le Brésil, l'Argentine et le Chili, ainsi que l'Australie où les risques d'érosion éolienne sont élevés (Köller, 2003). D'autres raisons invoquées par les agriculteurs pour l'adoption des techniques de conservation sont l'efficacité, la largeur de travail des outils et le gain de temps, ainsi que leur potentiel de stockage du carbone dans les sols et leur capacité à favoriser l'activité biologique des sols (Kern et Johnson, 1993; Köller, 2003; Labreuche *et al.*, 2007; Lal *et al.*, 2007). Cependant, l'adoption de ces techniques a des conséquences sur le choix des rotations, l'utilisation de cultures intermédiaires, la gestion des résidus, la sélection des variétés et la densité de semis, le contrôle des ravageurs et des adventices, la gestion de la fertilité du sol et sur le choix du bon équipement (Labreuche *et al.*, 2007; Lal *et al.*, 2007).

En France, l'agriculture de conservation s'est développée dès la fin des années 60. L'extension des surfaces est restée très limitée jusqu'au début des années 90 (réforme de la PAC) et a fortement progressé entre 2001 et 2006. En 2004, 40 % des parcelles de blé tendre ont été implantées sans labour. En ce qui concerne les oléo-protéagineux, le pourcentage des surfaces implantées sans labour est d'environ 10 % en 2001 pour le tournesol et le pois, 35 % pour le soja en 2003 et plus de 40 % pour le colza en 2005. Pour le maïs, les surfaces cultivées sans labour ont également progressé entre 1994 et 2001. Elles sont passées de 2 % à 14 % pour le maïs grain et de 2 % à 8 % pour le maïs fourrage. Ces données sont issues de différentes enquêtes et sont résumées dans le rapport ADEME 2007 : "Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL) en France" (Labreuche *et al.*, 2007). Dans ce document les techniques d'implantation sans labour regroupent les techniques de travail du sol réduit sans retournement (maximum 15 cm de profondeur) et les techniques de semis direct.

I.2 / L'agriculture biologique

I.2.1 / Des concepts fondateurs à la législation actuelle

Les courants fondateurs de l'agriculture biologique (AB) apparaissent dans la première moitié du XX^{ème} siècle en Europe. Ils s'opposent à l'utilisation des engrais chimiques et des pesticides de synthèse et préconisent une fertilisation organique à base de composts. Une des valeurs clefs de l'AB est que la santé du sol, des plantes, des animaux et de l'homme sont "un et indivisible". Les fondements de l'AB constituent donc un cadre à la fois social et environnemental (Watson *et al.*, 2007). La création en 1972 de l'IFOAM (International Federation of Organic Agriculture Movements standards) a permis à l'AB d'être reconnue officiellement tant d'un point de vue professionnel qu'institutionnel au niveau mondial. En France, les premiers cahiers des charges de production apparaissent en 1981 tandis qu'au niveau de l'Union Européenne l'AB s'officialise avec les règlements EU 2092/91 du 24 juin 1991 et EU 1804/99 du 24 août 2000. Ces règlements élaborent respectivement les cahiers des charges des productions végétales et animales ainsi que les règles de contrôle et de certification des exploitations. Le tableau 1, rédigé à l'attention des organismes certificateurs et de tous les opérateurs en AB, présente les principaux points abordés par le cahier des charges de l'AB. La réglementation en AB repose sur une obligation de moyens et non de résultats.

L'AB se pratique, en 2007, dans 120 pays et représente environ 31 millions d'ha répartis dans le monde entier (Watson *et al.*, 2007). En Europe depuis 5 ans, les surfaces cultivées en AB augmentent fortement. L'AB représentait en 1999 moins de 3 % des surfaces agricoles (Lampkin, 2000) pour atteindre 4 % en 2005 en Europe. En France, la surface agricole conduite en AB est de 560 838 ha, soit 2 % de la surface agricole Française et environ 9 % de la surface totale Européenne (Llorens Abando et Rohner-Thielen, 2007).

Tableau 1 : Principaux points abordés par le cahier des charges de l'AB en 1991 (ENITA de Bordeaux, 2003).

Secteurs	Réglementation
Fertilité du sol	Fertilité et activité biologique du sol maintenues ou augmentées par : <ul style="list-style-type: none"> - cultures de légumineuses ou de plantes à enracinement profond, - rotation pluriannuelle et intercultures (engrais verts...), - matière organique et déchets verts compostés issus d'exploitations conventionnelles (...) ou de l'exploitation, - d'autres engrais et amendements du sol figurant dans le cahier des charges ne peuvent intervenir qu'en cas de danger immédiat pour la culture.
Protection des végétaux	Lutte contre les parasites, maladies et les mauvaises herbes axée sur : <ul style="list-style-type: none"> - interdiction de pesticides de synthèse. Substances d'origine animale et végétale traditionnelles uniquement, - choix d'espèces ou de variétés résistantes ou rustiques, - procédés mécaniques de culture, - rotation et polyculture, - protection et dissémination des ennemis naturels des parasites par des zones écologiques réservoirs, - produits de lutte à utiliser uniquement dans des pièges ou des distributeurs évitant la pénétration des substances dans l'environnement et les contacts entre les substances et les cultures devant être enlevés après utilisation et éliminés sans risques, - d'autres produits phytosanitaires figurant dans le cahier des charges peuvent intervenir en cas de danger immédiat menaçant la culture.
Semences, matériel de reproduction végétatif et plants	<ul style="list-style-type: none"> - semences et plants issus de l'AB, - plante mère pour les semences et plantes parentales pour le matériel de reproduction végétative non OGM et dérivés d'OGM, pendant au moins une génération ou, s'il s'agit de cultures pérennes deux périodes de végétation, - critères de choix variétal : rusticité, productivité et qualité, - favoriser les mélanges de variétés et d'espèces.

1.2.2 / Les systèmes de production en agriculture biologique : contraintes et spécificités

Les exploitations conduites selon le mode de production agrobiologique n'ont pas recours aux engrais et pesticides de synthèse. La recherche de l'autonomie énergétique sur la rotation, la protection de la qualité environnementale et la stimulation des interactions et processus biologiques naturels favorables au développement des cultures (Figure 2) est une des priorités de l'AB (Marinari *et al.*, 2006). Le but de l'AB est de développer une forme d'agriculture durable, tant d'un

point de vue économique qu'environnemental, basé sur l'autosuffisance énergétique et biologique du système plutôt que sur les apports externes (Watson *et al.*, 2002).

Les systèmes de cultures en AB sont basés sur des rotations des cultures longues (en général 4 à 6 ans) qui incluent une part importante de légumineuses (alternance légumineuse/culture arable), le recyclage des effluents organiques (fumiers/composts) et l'application d'engrais verts (Shepherd *et al.*, 2002). L'introduction de légumineuses et l'apport de fumiers ou composts dans la rotation ont plusieurs avantages agronomiques : ils contribuent à l'augmentation du stock de MOS et favorisent ainsi l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Les légumineuses dans la rotation fournissent l'N assimilable pour la culture suivante et libèrent une grande quantité de composés carbonés labiles favorisant ainsi le développement microbien et l'agrégation du sol (Shepherd *et al.*, 2002). Si la fourniture d'N est en général moins importante en AB qu'en conventionnel elle est plus régulière sur l'ensemble de la saison culturale (Berry *et al.*, 2002). L'introduction de légumineuses favorise également, tout comme l'emploi fréquent d'engrais verts, d'inter-cultures et d'associations végétales, la croissance lombricienne (Scullion *et al.*, 2002).

Les systèmes de cultures agrobiologiques mettent donc en avant, plus qu'en conventionnel, le rôle des processus chimiques et biologiques du sol pour la fourniture d'éléments assimilables par la culture en place (Figure 2), ceux-ci étant stockés de façon plus importante qu'en conventionnel sous forme organique (Stockdale *et al.*, 2002). La gestion des nutriments dans les systèmes biologiques est donc fondamentalement différente de celle des systèmes conventionnels. Les nutriments sont apportés au sol sous forme organique ou sous forme faiblement minéralisable (engrais phosphatés minéraux). Cependant, il reste difficile de comparer les systèmes AB aux systèmes conventionnels. En effet, si de nombreuses études montrent que les pratiques en AB favorisent la quantité, l'activité et la diversité des microorganismes du sol (Fließbach et Mäder, 2000; Gosling *et al.*, 2005; Mäder *et al.*, 2002; Melero *et al.*, 2006), peu d'entre elles comparent les systèmes AB à des systèmes conventionnels avec apport de matière organique (MO). Lorsque des systèmes AB sont comparés à des systèmes conventionnels avec apports de MO, aucune tendance générale se dégage (Shannon *et al.*, 2002). Certains auteurs avancent donc que ce n'est pas tant le mode de conduite qui est important mais plutôt la quantité et la qualité de la MO qui est retournée au sol

(Shepherd *et al.*, 2002). La même remarque peut être faite sur plusieurs points comme le niveau de lixiviation des nitrates qui peut être importante dans les systèmes AB (Stopes *et al.*, 2002), et sur l'abondance et la diversité des vers de terre (Scullion *et al.*, 2002). Toutefois, d'autres études montrent que le système de production agrobiologique comparativement aux systèmes conventionnels avec apports de MO, favorise l'activité biologique des sols. Il semblerait ainsi que les microorganismes en AB soient métaboliquement plus actifs qu'en conventionnel : la biomasse microbienne a une plus grande réserve de nutriments et a un plus fort potentiel de minéralisation de la MO (Marinari *et al.*, 2006; Shannon *et al.*, 2002; Smith et Collins, 2007). De plus, la structure des communautés microbiennes dans les systèmes conventionnels est dominée par des espèces qui ont un turn-over rapide aux dépens d'espèces compétitives qui ont une plus grande efficacité d'utilisation des ressources organiques (Birkhofer *et al.*, 2008). Par ailleurs, la biodiversité de la micro et macrofaune est généralement plus importante en AB qu'en conventionnel (Birkhofer *et al.*, 2008; Hole *et al.*, 2005). Les systèmes agrobiologiques favorisent également le développement d'insectes et espèces auxiliaires (araignées, carabes) et améliorent la résistance des plantes aux maladies et insectes ravageurs (Birkhofer *et al.*, 2008). Ainsi, les systèmes agrobiologiques auraient une capacité de résilience plus grande que les systèmes conventionnels car la biodiversité de ces systèmes leur conférerait une plus grande résistance aux stress et perturbations (Brussaard *et al.*, 2007).

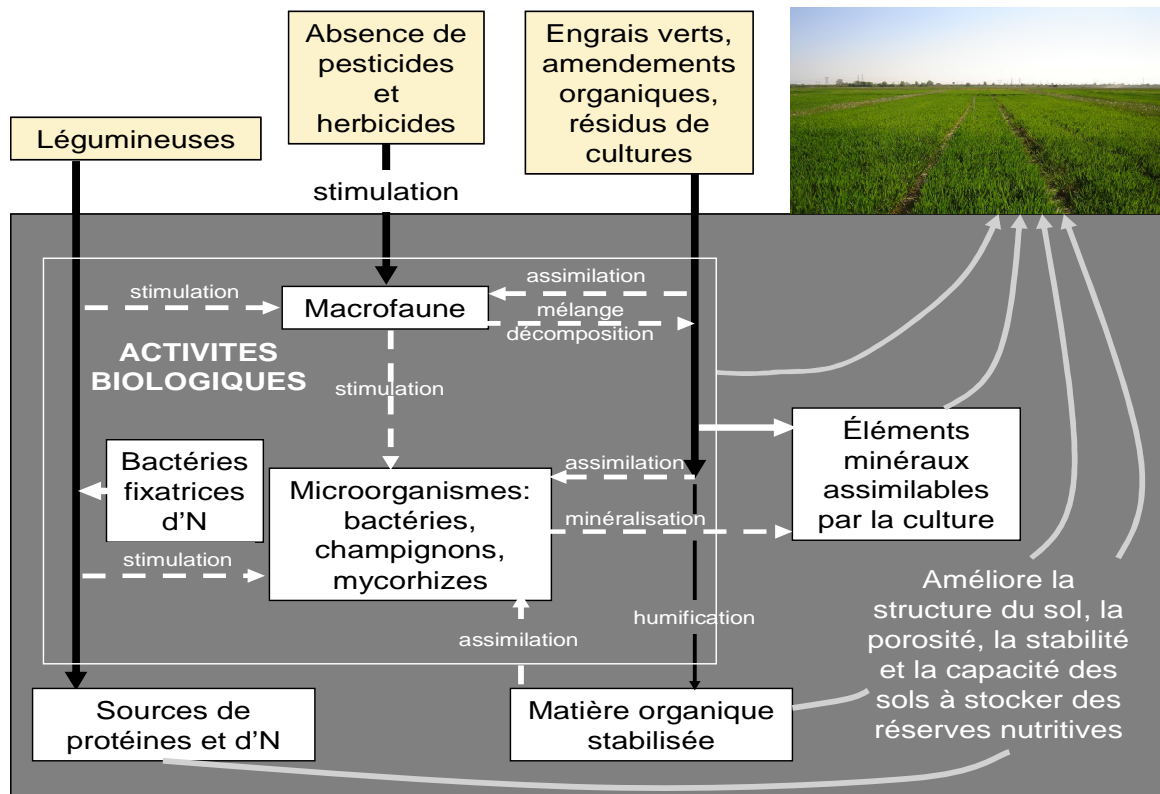


Figure 2 : caractéristiques de l'agro-système biologique (d'après ENITA Bordeaux, 2003).

1.2.3 / Le travail du sol en agriculture biologique

La plupart des techniques culturales employées en AB nécessitent un travail du sol fréquent voire intensif. En effet, le travail du sol et notamment le labour sont utilisés pour limiter le développement des adventices, enfouir les cultures de légumineuses pérennes au début de la rotation, les engrais verts ou les intercultures, incorporer les amendements organiques au sol et préparer le lit de semence (Teasdale *et al.*, 2007). Ainsi, les effets bénéfiques des systèmes de culture agrobiologiques peuvent être annulés ou réduits par l'utilisation intensive des interventions mécaniques sur les parcelles (pertes de MOS, risques accrus de dégradation de la structure du sol, érosion). Certains auteurs pensent que les systèmes conventionnels sans travail du sol (semis direct) ont plus d'effets bénéfiques pour la qualité du sol et l'environnement que les systèmes agrobiologiques (Trewavas, 2004). L'IFOAM encourage donc depuis quelques années les agriculteurs biologiques à adopter des techniques de travail du sol de conservation afin de limiter l'érosion et d'améliorer la qualité du sol (Peigné *et al.*, 2007). Des essais de réduction du travail du sol en AB ont été initiés, notamment aux Etats-Unis. Ils montrent l'effet potentiellement bénéfique à long terme des techniques

de conservation mais aussi les difficultés inhérentes à ce mode de production (Drinkwater *et al.*, 2000; Teasdale *et al.*, 2007).

Drinkwater *et al.* (2000) montrent que l'abandon total du travail du sol en AB est problématique et ce, malgré la présence d'un mulch vivant pour limiter le développement des adventices. Le rendement des cultures est fortement pénalisé par la concurrence des adventices pour la ressource azotée et l'eau. Par contre, avec des techniques de travail du sol réduit (chisel, disques) ou une alternance travail du sol-semis direct en AB, le rendement des cultures est comparable à celui obtenu en agriculture conventionnelle tant que le travail du sol (chisel plus désherbage mécanique) est suffisant pour limiter le développement des adventices (Drinkwater *et al.*, 2000; Teasdale *et al.*, 2007). Drinkwater *et al.* (2000) ont également montré que les techniques de conservation en AB sont réalisables si la présence d'un mulch en surface (provenant de l'interculture) est suffisante pour limiter le développement des adventices. Par ailleurs, ils soulignent que le désherbage mécanique (herse étrille, binage) au cours du développement de la culture permet d'accélérer la minéralisation de ce mulch et donc pourrait permettre de stimuler la fourniture d'azote au cours de la phase de croissance de la culture en place.

L'étude menée par Teasdale *et al.* (2007) montre que les techniques de conservation en AB (chisel, plus disques et interculture), malgré le développement des adventices, améliorent plus les propriétés du sol (teneurs en C et N, productivité) que les systèmes conventionnels en semis direct. Les systèmes de travail du sol de conservation en AB ont donc un fort potentiel pour améliorer la fertilité du sol, garantir un rendement satisfaisant des cultures et préserver les ressources environnementales. Mais, le principal frein à leur adoption reste la maîtrise du développement des adventices (Peigné *et al.*, 2007).

Les études sur l'adoption des techniques de travail du sol de conservation en AB se sont principalement intéressées aux effets de ces pratiques sur le rendement des cultures et l'enherbement du sol mais pas sur le fonctionnement physique et microbien du sol. Les parties suivantes de ce chapitre portent sur l'influence du mode de travail du sol sur la structure du sol, la répartition de la MOS et leurs conséquences sur les microorganismes du sol en agriculture conventionnelle.

II / Effets du labour et des techniques de conservation sur les propriétés physiques du sol et la circulation de l'eau

II.1 / Structure du sol

Le travail du sol affecte les facteurs biotiques et abiotiques du sol, soit directement en modifiant les propriétés structurales du sol comme l'arrangement des vides, les agrégats, la connectivité des pores, soit indirectement en changeant les conditions d'aération, de température et de pénétrabilité du sol par les racines (Huwe, 2003). La structure du sol est le résultat, à un moment donné, de l'équilibre entre les phénomènes de tassement (par le passage d'engins agricoles, conditions humides d'intervention), de fragmentation (par le climat, la faune et/ou le travail du sol), d'agrégation (par des compactations modérées ou par le climat et/ou la faune) et de déplacement du sol par le travail du sol (Roger-Estrade *et al.*, 2000). Il en résulte que la structure du sol est très variable au sein des couches de sol cultivées non seulement dans le temps (sous l'action des systèmes de cultures, du climat) mais aussi dans l'espace. Le sol présente donc une forte variabilité spatiale des conditions locales de circulation d'eau, d'activité biologique et d'aération (Boizard *et al.*, 2004).

Dans les systèmes labourés, la structure du sol est principalement créée par les opérations de travail du sol tandis que dans les systèmes non travaillés (semis direct) la structure est principalement créée par l'action du climat (en surface dans les régions tempérées) et par des processus biologiques (Oorts, 2006). Il en résulte que la structure d'un sol labouré est extrêmement hétérogène. Elle est composée de l'assemblage de sol fin, de mottes compactées ou non (décimétriques), de résidus de cultures répartis le long de la bande de labour, de vides et de fissures issus de l'action de retournement, de déplacement et de fragmentation de la charrue sur la couche de sol labourée (Roger-Estrade *et al.*, 2004b). A l'inverse, la structure d'un sol non travaillé est plus homogène et présente souvent une structure plus massive composée de macro-pores d'origine biologique. Les fissures et les vides sont en général moins importants dans les sols non travaillés ou dans les systèmes de travail du sol réduit du type chisel (Rasmussen, 1999). Par ailleurs, les résidus de cultures ne sont pas enfouis en profondeur et sont concentrés en surface ou dans les

premiers centimètres de sol, améliorant la stabilité structurale du sol (Tebrügge et Düring, 1999).

II.2 / La densité apparente du sol

Réduire l'intensité et la profondeur du travail du sol conduit en général à une augmentation de la densité apparente du sol mais pas au-delà de l'ancien fond de labour (Guérif, 1994; Rasmussen, 1999; Tebrügge et Düring, 1999). L'absence de fragmentation des anciennes couches de sol travaillées entraîne une diminution de leur espace poral (Guérif, 1994). L'augmentation de la densité apparente du sol est toutefois moins importante dans les systèmes de travail du sol réduit que dans les systèmes type semis direct (Kay et Vanden Bygaart, 2002), voire inférieure sur 0-10 cm (D'Haene *et al.*, 2008b). Les socs du chisel, en fragmentant le sol, réduisent la prise en masse du sol sur la profondeur de travail de l'outil et à long terme (> 11 ans), il semblerait que la densité apparente du sol soit identique à celle d'un sol labouré (D'Haene *et al.*, 2008b). Par contre, la densité apparente de la couche de sol de surface (0-5 cm) est favorisée dans les systèmes de non travail du sol ou de travail du sol réduit par rapport à un labour en raison de la présence d'un mulch en surface (Blanco-Canqui et Lal, 2007; Guérif, 1994; Tebrügge et Düring, 1999). L'effet des différentes techniques de travail du sol sur la structure diffère selon le type de sol. Les sols sensibles aux tassements, comme les sols sableux, se prêtent moins à l'abandon du labour car leur faible activité structurale limite la régénération de la structure du sol par les phénomènes naturels de retrait-gonflement (Munkholm *et al.*, 2003).

Le non retournement des couches de sols par la charrue ou les techniques de travail superficiel, surtout les techniques de semis direct, favorisent l'activité fouisseuse de la faune du sol, et la présence de biopores contribue donc à diminuer les effets de ces techniques sur la densité apparente du sol sur le long terme (au-delà de 10 années d'adoption de ces techniques) (Huwe, 2003; Munkholm *et al.*, 2003).

II.3 / La porosité du sol et la circulation de l'eau dans le sol

L'augmentation de la densité apparente du sol dans les anciennes couches labourées fait que la porosité totale du sol est globalement réduite dans les systèmes de conservation. La forme, la taille et la continuité de l'espace poral changent également selon le type de travail du sol appliqué. L'effet des techniques de travail du sol sur la micro (<0,2 μm) et la méso-porosité (0,2-30 μm) du sol (importante pour le stockage de l'eau et siège des activités microbiennes) varie selon le temps d'application et la profondeur de travail de l'outil considéré. Les résultats de différentes expérimentations sont contradictoires et il est donc difficile de généraliser l'effet de la réduction du travail du sol sur ces classes de pores (Kay et Vanden Bygaart, 2002). Par contre, la macroporosité d'origine biologique est généralement augmentée dans les sols non labourés par rapport aux sols labourés. L'absence de fragmentation et d'homogénéisation du sol due à l'action de la charrue favorise le développement de macropores d'origine biologique (racines, galeries de vers de terre), plus stables, continus et plus connectés les uns aux autres (Kay et Vanden Bygaart, 2002; Vogeler *et al.*, 2006). En favorisant la macroporosité biologique, les systèmes de conservation améliorent ainsi la conductivité hydraulique du sol en conditions saturées et la capacité d'infiltration tandis que le labour homogénéise et régularise l'infiltration de l'eau (Huwe, 2003).

Ces modifications de l'espace poral du sol ont des répercussions importantes sur la rétention en eau du sol et sur son réchauffement. La présence d'un mulch en surface dans les systèmes de conservation limite l'évaporation et augmente la rétention en eau dans les premiers centimètres de sol (Blanco-Canqui et Lal, 2007; Huwe, 2003; Lal *et al.*, 2007). Cependant, les sols non travaillés présentent une structure plus compacte et une porosité totale souvent plus faible que celle des sols labourés ou travaillés avec un outil à dent. Par conséquent la proportion de pores saturés en eau (% WFPS : Water Filled Pore Space) est souvent plus grande dans les systèmes non travaillés (Franzluebbers *et al.*, 1995). Cette proportion dépend de la porosité totale du sol, de la taille des pores et de la teneur en eau du sol et détermine ainsi l'aération du profil de sol (Oorts, 2006). Le risque d'anaérobiose semble donc être plus élevé dans les systèmes non travaillés par rapport aux systèmes de travail du sol conventionnel (Liu *et al.*, 2007; Pekrun *et al.*, 2003). Ainsi, les transferts de chaleur et le réchauffement des sols non travaillés ont tendance à

être plus lents au printemps à cause de la présence d'un mulch en surface (effet albédo en général supérieur pour les sols non labourés) et de leur structure plus dense et/ou plus humide (Baker *et al.*, 2007; Balesdent *et al.*, 2000; Germon *et al.*, 1994).

La présence d'un mulch en surface dans les systèmes de conservation augmente également la stabilité structurale des sols (Balesdent *et al.*, 2000; Kandeler et Murer, 1993), protège les sols des fortes pluies et limite les phénomènes de battance et les risques d'érosion hydrique (Blanco-Canqui et Lal, 2007; Köller, 2003; Rasmussen, 1999; Tebrügge et Düring, 1999). Par ailleurs, le mulch en surface et la structure du sol plus rigide dans les systèmes de conservation limitent l'incidence du passage des engins et du tassement qui en résulte, les sols étant plus portants (Tebrügge et Düring, 1999).

Les résultats décrits montrent que l'adoption des techniques de conservation modifie les caractéristiques de la structure du sol à l'échelle macroscopique et microscopique. La porosité du sol est en général réduite dans les systèmes de conservation mais, tout comme les systèmes biologiques, ils favorisent la formation de macro-pores d'origine biologique. Ces changements s'opèrent progressivement et les différences entre les systèmes sont mesurables après plusieurs années de différenciation. Or, ce sont principalement durant les premières années de différenciation des traitements que la structure du sol paraît être un facteur limitant du rendement des cultures car la prise en masse du sol peut ralentir, entre autres, la minéralisation de la MOS. Un des objectifs de cette étude est de suivre au cours des premières années d'application de différentes techniques de travail du sol (sur un sol sensible au tassement) la mise en place des "états types" correspondant à chaque technique étudiée et la proportion de zones compactées que chaque traitement engendre. Les systèmes de production biologiques, favorisant l'activité des lombrics, pourraient limiter les phénomènes de tassement durant cette période. La description de profils culturaux, les mesures de densité apparente et du taux de saturation de la porosité du sol répondent à la question de recherche I (Figure 1) :

- I Quel est l'impact des systèmes de travail du sol sur la structure du sol, la densité apparente du sol et le taux de saturation de la porosité au cours des premières années d'application des traitements en AB ?**

III / Effets du travail du sol conventionnel et des techniques de conservation sur les teneurs et stocks en C et N

Les résidus de culture sont enfouis plus ou moins profondément et régulièrement selon le mode de travail du sol appliqué. Ces modifications changent l'accessibilité et la disponibilité des substrats organiques pour les microorganismes du sol et le turnover de la MOS.

III.1 / Teneurs et stocks en C et N totaux

Les systèmes de travail du sol de conservation laissent plus de 30 % des résidus de cultures en surface ou les concentrent dans les premiers centimètres du sol. Le labour quant à lui enfouit et répartit ces résidus de cultures sur la profondeur de sol labourée. Ce changement dans la répartition des résidus de cultures au sein du profil de sol va avoir des conséquences à plus ou moins long terme sur les teneurs et stocks des matières organiques du sol et des éléments nutritifs.

Les concentrations en C et en N organique dans les systèmes de conservation sont en général supérieures dans les 10 premiers centimètres du sol par rapport à un sol labouré et décroissent fortement dans les horizons sous-jacents (Al-Kaisi et Yin, 2005; D'Haene *et al.*, 2008a; Gál *et al.*, 2007; Koch et Stockfisch, 2006; Needelman *et al.*, 1999; Pekrun *et al.*, 2003). Par conséquent, les stocks de C et N organiques ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) dans les systèmes de conservation sont supérieurs en surface par rapport aux systèmes labourés (Al-Kaisi et Yin, 2005; Franzluebbers *et al.*, 1995; Gál *et al.*, 2007) mais peu de différences apparaissent en profondeur (Balesdent *et al.*, 2000). Certains auteurs montrent même que malgré une concentration en C et N plus importante en profondeur en labour (15-30 cm), les stocks de C et N sont supérieurs en semis direct du fait de l'augmentation de la densité apparente de cette couche de sol (Gál *et al.*, 2007). Cette stratification verticale des stocks de C et N engendrée par les techniques de conservation se fait rapidement après leur adoption et les principaux changements apparaissent au cours des 3 premières années de leur application (Ahl *et al.*, 1999; McCarty *et al.*, 1998).

Quand les stocks de C et N organique sont rapportés à l'ensemble de la couche de sol labourée (en général 0-30 cm) certaines études montrent que les techniques

de conservation, notamment les techniques de semis direct, ont un potentiel de stockage de la MOS plus important que les techniques conventionnelles (Baker *et al.*, 2007; Franzluebbbers *et al.*, 1995; Gál *et al.*, 2007). A l'inverse, d'autres montrent que les techniques de travail du sol n'ont que peu d'effets sur ces stocks (Balesdent *et al.*, 2000; D'Haene *et al.*, 2008a; McCarty *et al.*, 1998; Needelman *et al.*, 1999). L'augmentation des stocks de C et N n'est également que transitoire car le gain obtenu après quelques années d'adoption des techniques de conservation peut être perdu lorsque le sol est labouré de nouveau (Conant *et al.*, 2007; Koch et Stockfisch, 2006). Cette augmentation dépend aussi du type de sol et semble moins importante voire nulle dans les sols sableux (McCarty *et al.*, 1998; Pekrun *et al.*, 2003). Par ailleurs, certains auteurs relèvent l'importance de la méthode d'échantillonnage dans l'estimation de ces stocks. En effet, si globalement les techniques de travail du sol de conservation stockent plus de MOS sur 0-30 cm, il apparaît que le stock de MOS est supérieur en dessous de 30 cm dans les sols labourés (Baker *et al.*, 2007; Gál *et al.*, 2007; Pekrun *et al.*, 2003) ce qui contribue à surestimer la capacité des techniques de conservation à augmenter le stockage du C dans les sols. Ainsi, Gál *et al.* (2007) indiquent que les stocks de C et N entre 30 et 50 cm de profondeur sont supérieurs de 32 et 23% dans les sols labourés et qu'en considérant la couche 0-50 cm, le gain de stockage supplémentaire du non travail du sol par rapport au labour n'est plus que de 6 et 11 % respectivement pour le C et N. Baker *et al.* (2007) montrent que cette perte de C en profondeur dans les systèmes de conservation conduit à une perte globale de C d'environ 0,23 t.ha⁻¹.an⁻¹ par rapport aux systèmes labourés. Cette baisse des stocks de C en profondeur est liée au système racinaire des cultures qui est plus dense en surface dans les systèmes de conservation mais qui explore une profondeur de sol moins importante que dans les systèmes labourés, d'où une diminution de la rhizodéposition en profondeur et une baisse des entrées de C (Baker *et al.*, 2007; Gál *et al.*, 2007).

Le rapport C/N de la MOS dans les systèmes de conservation est en général supérieur à celui des systèmes labourés en surface là où les résidus de culture s'accumulent, et peu de différences apparaissent en deçà (McCarty *et al.*, 1998; Stockfisch *et al.*, 1999).

III.2 / Fractions granulométriques de la MOS

La MOS est composée d'un mélange de divers composés allant des résidus de culture frais à des composés humiques relativement inertes dont le turn-over se mesure en millénaire (Haynes, 2005) et sa mesure ne fournit pas toujours une indication précoce d'un changement dans le statut organique du sol. Les pools labiles de la MOS (matières organiques particulaires, C soluble...) ont quant à eux un turn-over plus rapide et sont plus sensibles que la teneur totale en MOS aux changements de pratiques culturales ou de conditions environnementales (Haynes, 2005). Ainsi, ces pools peuvent être utilisés comme des indicateurs précoces des modifications de la MOS totale qui se manifestent à plus long terme. Les matières organiques particulaires (MOP) représentent un pool transitoire entre les résidus de culture frais et les MOS humifiées. Enrichi en C et en nutriments, elles représentent un attribut important de la qualité du sol puisque leur turn-over court en fait une source de C et d'énergie pour les microorganismes du sol hétérotrophes (Haynes, 2005). Le travail du sol en modifiant la répartition et parfois la quantité de résidus de cultures retournés au sol, affecte également la qualité des MOP. Ainsi, les systèmes de conservation ont une plus grande part de MOP (Franzluebbbers et Arshad, 1997) que les sols labourés en raison notamment de la protection physique des MOS qui protège la MOS de l'activité microbienne dans les systèmes de conservation (Balesdent *et al.*, 2000; Six *et al.*, 2000).

III.3 / Autres éléments nutritifs

La répartition des éléments nutritifs est également modifiée par les techniques de travail du sol. Ainsi, les micronutriments présentent une stratification verticale identique à celle des pools de C et N : le P, Zn et K s'accumulent en surface dans les systèmes de conservation et diminuent en profondeur tandis qu'ils sont répartis de façon homogène sur la couche de sol labourée (Al-Kaisi et Yin, 2005; Pekrun *et al.*, 2003; Wright *et al.*, 2007). La répartition des macronutriments (Ca, Mg, Na) semblent être plus liée à la nature et à la répartition des éléments minéraux du sol et sont en général plus concentrés en profondeur à proximité de la roche mère (Wright *et al.*, 2007).

La répartition, la quantité et la qualité des MOS changent selon le mode de travail du sol employé. Ces changements s'opèrent plus ou moins rapidement selon le type de sol et les traitements étudiés mais ils influencent rapidement la répartition des microorganismes du sol et leur activité de minéralisation de la MOS. Afin de mesurer cet impact, nous mesurerons l'influence de la profondeur d'enfouissement des résidus de cultures et de leur degré de dilution au sein du profil de sol les teneurs et stocks de C et N ainsi que sur les teneurs en C et N des MOP à court-terme (< à 5 ans). Ces différentes mesures permettent de répondre à la question de recherche II indiquée (Figure 1) :

- II Quelle est l'influence des techniques de travail du sol sur la répartition des résidus de cultures et quelle en est la conséquence sur les teneurs et les stocks de C et N ainsi que sur la dynamique des MOS à court terme en AB ?**

IV / Effets du travail du sol conventionnel et des techniques de conservation sur les propriétés biologiques du sol

Nous avons vu que le travail du sol modifie la structure du sol ainsi que la répartition des résidus de cultures et l'accessibilité de la MOS aux microorganismes. Ces modifications agissent sur la biologie du sol et notamment sur les microorganismes du sol. Les différentes relations entre ces "compartiments" sont synthétisées dans la Figure 1. Cette partie se concentre principalement sur les microorganismes du sol au travers des indicateurs utilisés par la suite dans ce travail : (1) la biomasse microbienne dont la mesure contribue à la compréhension des cycles des éléments nutritifs à la fois sur le court terme et le long terme (Insam, 2001) ; (2) la structure des communautés microbiennes qui permet d'apprécier les changements qualitatifs qui s'opèrent au sein de la microflore du sol (Spedding *et al.*, 2004), c'est une première approche de l'influence du mode de travail du sol sur la composition et la diversité des communautés microbiennes ; (3) les flux potentiels de C et N qui fournissent une estimation globale du fonctionnement de l'écosystème sol et du niveau de productivité des parcelles agricoles (Aon *et al.*, 2001a). Bien qu'il ne soit pas mesuré par la suite, l'effet du mode de travail du sol sur les macro-organismes

est évoqué, tant leur rôle "d'ingénieur du sol" est primordial, notamment dans les systèmes de conservation et en AB.

IV.1/ Influence des techniques de travail du sol sur les macro-organismes

La diminution de l'intensité du travail du sol favorise en général le développement des macro-organismes. La perturbation physique, l'abrasion du sol et la diminution du mulch à la surface du sol limitent le développement des populations de carabes et d'araignées (Kladivko, 2001). Cependant, la présence d'un mulch en surface dans les systèmes de conservation procure aussi un espace protecteur pour les ravageurs des cultures et notamment pour les limaces (Peigné *et al.*, 2007).

Le nombre et l'activité des vers de terre augmentent dans les systèmes de travail du sol de conservation par rapport aux systèmes labourés. Le labour détruit l'habitat des vers de terre, notamment des espèces anéciques, et les expose aux prédateurs et à la dessiccation. De plus, l'augmentation des résidus de cultures en surface constitue une réserve trophique pour les vers de terre et stimule leur activité fouisseuse (Aslam *et al.*, 1999; Kladivko, 2001; Peigné *et al.*, 2007). Le nombre de biopores verticaux est donc favorisé par l'adoption des techniques de travail du sol de conservation et peut atténuer l'effet à long terme de l'absence de fragmentation des anciennes couches de sol labourées. L'adoption des techniques de travail du sol de conservation en AB, deux systèmes qui favorisent le développement des macro-organismes, pourrait donc améliorer grandement l'activité des vers de terre (Peigné *et al.*, 2007).

IV.2/ Influence des techniques de travail du sol sur la biomasse microbienne du sol

Comme on l'a vu précédemment, le travail du sol agit sur l'environnement physique et biotique des microorganismes du sol (température, aération, humidité, répartition des résidus de culture) et modifie en retour la quantité, l'activité et la répartition de la biomasse microbienne dans le profil de sol. De nombreuses références sont disponibles sur ce thème et montrent que dans les systèmes de travail du sol de conservation, la biomasse microbienne présente une forte

stratification verticale tandis qu'elle est répartie de façon homogène sur la profondeur de la couche de sol labourée (Andrade *et al.*, 2003; Meyer *et al.*, 1996). La biomasse microbienne est significativement supérieure dans les premiers centimètres du sol (0-10 cm) dans les systèmes de conservation par rapport aux systèmes labourés (Andrade *et al.*, 2003; Kandeler *et al.*, 1998; McCarty *et al.*, 1998; Meyer *et al.*, 1996; Wright *et al.*, 2005) et devient inférieure (Ahl *et al.*, 1999; Meyer *et al.*, 1996) ou égale (McCarty *et al.*, 1998) dans les horizons sous jacents. En revanche, sur l'ensemble de la couche de sol arable (0-30 cm) l'augmentation de la biomasse microbienne dans les premiers centimètres du sol ne compense pas sa diminution en profondeur. Ainsi, la différence de biomasse microbienne devient faible voire nulle sur 0-30 cm entre les systèmes de conservation et les systèmes labourés (Ahl *et al.*, 1999; Aon *et al.*, 2001a; Meyer *et al.*, 1996).

Les techniques de travail du sol de conservation entraînent donc une stratification verticale de la biomasse microbienne au sein du profil de sol. Mais les résultats des différentes études restent contradictoires quand on compare la quantité de biomasse microbienne totale sur 0-30 cm entre un labour et une technique de conservation. De plus, peu d'études prennent en compte simultanément l'effet des modifications de la structure du sol sur la biomasse microbienne.

IV.3 / Influence des techniques de travail du sol sur la structure et la diversité des communautés microbiennes du sol

Les modifications abiotiques et biotiques de l'environnement des microorganismes affectent également la structure des communautés microbiennes du sol (Andrade *et al.*, 2003). Dans les systèmes les moins perturbés mécaniquement, l'augmentation de la biomasse microbienne en surface serait majoritairement due à l'expansion de la biomasse fongique, favorisée par l'humidité du sol (maintenue grâce à la présence d'un mulch) et non affectée par les perturbations mécaniques qui réduisent la longueur des hyphes mycéliens et le nombre de propagules dans les premiers horizons de sol (Frey *et al.*, 1999; Kennedy, 1999; Spedding *et al.*, 2004). Le type d'outil utilisé pour le travail du sol a également une influence sur les populations microbiennes : il semblerait que les outils animés (herse rotative) aient un effet encore plus délétère pour les populations

fongiques qu'un labour (Cookson *et al.*, 2008). Les sols travaillés intensivement seraient donc dominés par des espèces bactériennes tandis que les sols où le travail du sol est limité favoriseraient le développement de populations fongiques (Kladivko, 2001; Young et Ritz, 2000).

Les différentes études aboutissent à des résultats contradictoires, qui s'expliquent par des différences de stratégie d'échantillonnage (stratifiée ou composite), de date d'échantillonnage (de quelques jours après le travail du sol à plusieurs mois) et de la présence ou non d'une culture au moment des prélèvements. Ainsi, Spedding *et al.* (2004) montrent que la structure des communautés microbiennes d'un labour traditionnel est identique à celle d'un travail du sol réduit mais qu'elle diffère de celle d'un semis direct sur 0-10 cm de profondeur. Par contre, aucune différence n'apparaît en dessous de 10 cm de profondeur et les différences observées en début de cycle cultural sur 0-10 cm s'estompent au fil du temps (Spedding *et al.*, 2004). Ces résultats confirment ceux de Drijber *et al.* (2000) et d'Ibekwe *et al.* (2002) qui ont également montré qu'un sol labouré présentait une structure microbienne différente de celle d'un sol non travaillé et que la diversité génétique des microorganismes était plus importante en non labour (Drijber *et al.*, 2000; Ibekwe *et al.*, 2002). Mais, contrairement à ces résultats, l'étude de Feng *et al.* (2003) ne montre pas de différences de structure des communautés microbiennes entre un sol labouré et un sol non travaillé (semis direct). Par contre, leur étude confirme les variations saisonnières de la structure des communautés microbiennes (Feng *et al.*, 2003). Par ailleurs, Ibekwe *et al.* (2002) ont montré que la structure des communautés microbiennes était grandement variable au sein de la couche labourée tandis que Feng *et al.* (2003) ont trouvé des différences plus grandes entre les horizons de prélèvements en non labour, concluant ainsi à la moins grande variabilité des communautés microbiennes dans les sols labourés.

Il apparaît également que le travail du sol affecte plus particulièrement certains groupes microbiens comme les populations nitrifiantes ou les champignons mycorhiziens. Ces derniers sont plus abondants dans les systèmes les moins perturbés (Drijber *et al.*, 2000) et la communauté des bactéries nitrifiantes est plus diversifiée dans les systèmes non travaillés (Ibekwe *et al.*, 2002). Par ailleurs, il semblerait que les systèmes de conservation favorisent le développement d'espèces anaérobies dans les couches de sol qui ne sont plus fragmentées par les outils (Drijber *et al.*, 2000; Feng *et al.*, 2003) tandis que les sols labourés sont dominés par

des espèces microbiennes aérobies avec une haute activité métabolique (Spedding *et al.*, 2004). Cependant, l'influence du travail du sol sur la structure des communautés microbiennes est souvent masquée par les variations saisonnières et surtout par l'effet "tampon" de la rhizosphère du sol qui ont en général un effet plus important sur la structure des communautés microbiennes que le travail du sol (Drijber *et al.*, 2000; Feng *et al.*, 2003; Lupwayi *et al.*, 1998; Spedding *et al.*, 2004).

La structure des communautés microbiennes semble donc différer selon le mode de travail du sol appliqué, le labour ayant tendance à induire une simplification de leur structure par rapport aux systèmes de conservation. Cependant, nous avons vu que les résultats des différentes études, issues d'expérimentations de long terme (> 10 ans), étaient quelque peu contradictoires. La mesure de l'influence de la répartition des résidus de cultures, du type de fragmentation mécanique de la structure et du tassement du sol sur la structure des communautés microbiennes est une première étape pour évaluer l'influence du mode de travail du sol sur la composition de la microflore du sol et sur sa diversité.

IV.4 / Influence des techniques de travail du sol sur la minéralisation du carbone et de l'azote

Les modifications engendrées par le travail du sol déterminent en grande partie les transformations du C et N dans le sol. La Figure 1 rappelle les interactions entre la structure du sol, la MOS, les microorganismes du sol et leurs répercussions sur l'activité des microorganismes du sol.

IV.4.1 / Influence de la profondeur d'enfouissement des résidus de cultures

La décomposition des résidus de culture et de la MOS est le résultat de l'activité de minéralisation des microorganismes du sol (transformation des composés organiques des résidus et de la MOS en CO₂ et N minéral) qui utilisent les composés organiques et les nutriments minéralisés (N, P, S) pour leur croissance (Haynes, 2005).

Dans les systèmes de conservation, l'enfouissement n'est que partiel et les résidus de cultures s'accumulent à la surface du sol. La surface de contact entre les

substances organiques et les particules minérales du sol est limitée ce qui réduit la vitesse de minéralisation des résidus de cultures (Balesdent *et al.*, 2000). Mais cet effet n'est que transitoire et ne dure que quelques mois (Franzluebbers et Arshad, 1996), les vitesses de minéralisation deviennent ensuite identiques entre les systèmes labourés et les systèmes de conservation. Les plus faibles niveaux de minéralisation observés dans les systèmes de conservation sont renforcés par la protection physique des MOS. Celle-ci peut être localisée au sein d'agrégats stables, résistants aux dégradations hydriques, en quantité plus importante en surface dans ces systèmes que dans les systèmes labourés (Oorts, 2006). Mais paradoxalement, la minéralisation du C et N en surface (0-5 à 0-10 cm selon les systèmes) dans les systèmes de conservation est supérieure par rapport aux systèmes labourés (Kandeler *et al.*, 1999). Les systèmes de conservation ont en général une plus grande proportion de matières organiques particulaires qui présentent un turn-over plus rapide que les MOS associées aux particules minérales du sol (Balesdent *et al.*, 2000; Oorts, 2006). Par contre, en profondeur le rapport s'inverse. Le travail du sol, en enfouissant les résidus de cultures, crée des conditions favorables à la croissance microbienne et stimule l'activité de minéralisation des résidus de culture et de la MOS (Grigera *et al.*, 2007; Pekrun *et al.*, 2003; Young et Ritz, 2000). Ainsi, quand on rapporte les activités de minéralisation du C et N à l'ensemble de la couche de sol, peu de différences, voire aucune, sont observées entre les systèmes de conservation et les systèmes labourés (Oorts *et al.*, 2007; Pekrun *et al.*, 2003). Au-delà de 10 cm de profondeur, le travail du sol, notamment le labour, augmente la surface de contact entre les substances organiques et les particules minérales du sol (Balesdent *et al.*, 2000), il favorise l'aération et le réchauffement du sol (Pekrun *et al.*, 2003) et stimule ainsi la minéralisation des résidus de cultures.

IV.4.2 / Influence de la structure du sol

Le tassement du sol s'accompagne d'une réduction de la porosité du sol, de la circulation de l'oxygène et d'une augmentation du taux de saturation de la porosité en eau. Ces changements limitent le développement et l'activité des microorganismes aérobies et réduisent ainsi la minéralisation de la MOS et de l'azote organique (Lipiec et Stepniewski, 1995). Ainsi, Oorts *et al.* (2006) montrent que l'activité de minéralisation du C est inférieure au sein des zones compactées par rapport aux zones non compactées dans le profil de sol et Breland et Hansen (1996)

mesurent une diminution de la quantité d'azote minéralisé suite à un tassement du sol. Cependant, de nombreux auteurs ne vérifient pas ce postulat. Dans la même étude, Oorts *et al.* (2006) montrent que le tassement du sol n'a pas d'effet sur la quantité d'N minéralisé, tout comme Jensen *et al.* (1996) dans une étude sur la minéralisation de l'azote au champ ou encore Entry *et al.* (1996) sur la minéralisation des résidus de cultures. Ces études ne montrent pas de corrélations entre le niveau de tassement du sol (approché par la densité apparente) et les activités de minéralisation de la MOS, ou montrent des différences assez faibles. Cependant, la plupart des mesures de ces études ont été réalisées en conditions standards et sur des échantillons de sol tamisés à 2 mm. Le tamisage du sol peut libérer des substrats organiques qui étaient alors jusqu'ici inaccessibles pour les microorganismes du sol, notamment pour les échantillons compactés (Oorts *et al.*, 2006). En effet, les sols compactés ont une proportion importante de microporosité qui rend inaccessible les substrats organiques localisés au sein de cette classe de pores (Strong *et al.*, 2004). La structure du sol semble donc influencer les niveaux de minéralisation de la MOS à un niveau microscopique et non macroscopique. Le travail du sol intervient également à ce niveau car il désagrège les agrégats du sol et expose des microsites où la MOS était jusqu'alors protégée de la dégradation par les microorganismes (Balesdent *et al.*, 2000; Calderon *et al.*, 2000). Ce phénomène de "dé-protection" physique des MOS favorise la minéralisation de la MOS et les pertes de C dans les systèmes labourés.

IV.4.3 / Variabilité des réponses dans diverses expérimentations

Les effets des techniques de travail du sol varient selon le temps d'application des traitements. Il apparaît qu'à court terme le travail du sol favorise la minéralisation des résidus de cultures et de la MOS (Andrade *et al.*, 2003; Aon *et al.*, 2001a; Jackson *et al.*, 2003) mais les réponses observées dans diverses expérimentations sont variables et dépendent de l'histoire de la parcelle (niveau de MOS initial) et des conditions pédoclimatiques. Par exemple, la protection physique de la MOS est moindre dans les sols sableux (Pekrun *et al.*, 2003). Au cours de la période de transition labour-technique de conservation, l'accumulation de MOS en surface et la croissance microbienne entraînent souvent une immobilisation de l'N par les microorganismes du sol ce qui peut occasionner des problèmes de nutrition des cultures (McCarty *et al.*, 1998; Pekrun *et al.*, 2003). Cependant à plus long terme,

une fois qu'un nouvel équilibre s'est installé après plusieurs années d'application d'une même technique de travail du sol, le potentiel de minéralisation du C et N devient identique entre les systèmes de conservation et les systèmes labourés (Oorts *et al.*, 2007). L'augmentation des pools labiles de MOS dans les systèmes de conservation compense la diminution des vitesses de minéralisation des résidus de cultures et de la MOS. Sur l'année, les quantités de C et N minéralisées sont donc sensiblement identiques entre ces deux systèmes de travail du sol ; on observe des pics de minéralisation consécutifs au travail du sol tandis que la fourniture d'N et la minéralisation du C sont plus régulières sur l'ensemble de l'année dans les systèmes de conservation (Germon *et al.*, 1994; Oorts *et al.*, 2007; Pekrun *et al.*, 2003).

Le mode de travail du sol (labour, réduit, semis direct) modifie la microflore du sol, quantitativement et qualitativement. Les résultats décrits dans cette partie reposent majoritairement sur des expérimentations de long-terme (> 10 ans) en agriculture conventionnelle. Peu d'études ont été consacrées à l'effet de ces pratiques au cours des premières années de leur application. Par ailleurs l'influence de la structure du sol à l'échelle macroscopique sur la biomasse microbienne et les activités de minéralisation de la MOS sont parfois contradictoires et sont issus d'expérimentations de long terme. Il est donc nécessaire de mesurer l'influence à court terme (< 5 ans), de la profondeur d'enfouissement des résidus de cultures et de la structure du sol (tassement) sur (1) la répartition de la biomasse microbienne, (2) sur le potentiel de minéralisation du C et N et (3) sur la structure des communautés microbiennes à l'échelle du profil cultural. Ces différentes approches répondent à la question III (Figure 1) :

III Quelles sont les répercussions des modifications de la structure du sol et de la répartition des résidus de cultures sur la biomasse microbienne, le potentiel de minéralisation du C et N et sur la structure des communautés microbiennes à court terme (< 5 ans) en AB ?

Nous avons abordé plusieurs effets du travail du sol dans ce chapitre : son influence sur la structure du sol, sur l'enfouissement des résidus de cultures, la répartition et la qualité de la MOS et leurs conséquences sur les teneurs et stocks en

C et N. Ces différents facteurs modifient en retour la microflore du sol quantitativement et qualitativement et par conséquent ses activités de minéralisation du C et N. Ces changements s'opèrent progressivement et sont interactifs. Afin de comprendre les relations entre la répartition des résidus de culture, la structure du sol et le fonctionnement microbien du sol (répartition, activité, structure), propres à chaque système de travail du sol étudié, nous avons adopté un échantillonnage stratifié à partir de l'observation de profils culturaux. Cette approche permet de prendre en compte simultanément les effets de chaque facteur et d'estimer quels facteurs étudiés (profondeur d'enfouissement, qualité des MOS, structure du sol, quantité de microorganismes) limitent la capacité des microorganismes du sol à minéraliser la MOS. De plus, l'hétérogénéité de la structure du sol est rarement prise en compte et son intégration pourrait apporter plus de précisions sur l'effet global de chaque technique étudiée. L'utilisation du profil cultural comme base d'extrapolation des mesures réalisées permet de répondre à la question IV (Figure 1) :

IV Quelle est l'influence globale de chaque technique étudiée sur les microorganismes du sol et quels facteurs limitent leur développement et l'activité microbienne suite à un changement de pratique culturale ?

La réponse à cette question permet à terme d'adapter les itinéraires techniques associés à chaque mode de travail du sol afin de minimiser ou de corriger les effets délétères qu'ils pourraient avoir au cours des premières années de leur application sur le développement des microorganismes du sol et donc sur leur capacité à fournir des éléments assimilables pour la culture en place.

Chapitre 2 :
Démarche expérimentale

Chapitre 2 : Démarche expérimentale

Pour répondre aux questions de recherche, indiquées sur la Figure 1 et rappelées dans la synthèse bibliographique, on a choisi de travailler sur 2 sites expérimentaux aux conditions pédoclimatiques et historiques différentes. Le premier site expérimental (Lyon) permettra de mesurer les évolutions de la structure du sol, des teneurs et stocks de C et N et des composantes microbiennes durant les trois premières années d'application des traitements. Le second site expérimental (Kerguéhennec) a été mis en place en 2003. Les effets sur le sol des différentes techniques de travail du sol étudiées devraient donc être, *a priori*, plus marqués que sur le site de Lyon. Les mesures réalisées sur ce site devront permettre d'infirmer ou de confirmer les hypothèses émises sur le site de Lyon.

Sur chacun de ces sites expérimentaux, un point initial a été réalisé avant la mise en place des traitements. Le point initial du site de Lyon par exemple, a consisté en une analyse de la variabilité spatiale de différents indicateurs physico-chimiques et microbiologiques du sol avant la différenciation des traitements. Ces analyses initiales permettront de juger de l'évolution des paramètres physico-chimiques et biologiques du sol après 3 ou 5 ans d'application des traitements selon le site considéré.

Afin de prendre en compte les effets globaux des systèmes de travail du sol étudiés, nous avons adopté une stratégie d'échantillonnage stratifiée en utilisant le profil cultural comme base d'échantillonnage. Cette démarche d'observation du sol *in situ* et d'échantillonnage permet de prendre en compte l'ensemble des effets de l'itinéraire technique et de relier l'état structural du sol observé et mesuré à son fonctionnement microbiologique. L'analyse de la structure du sol a donc été appréhendée *via* l'observation des profils culturaux, des mesures de densité apparente et du taux de saturation de la porosité du sol.

A partir de l'échantillonnage réalisé au sein des profils culturaux, l'évolution des teneurs et stocks en C et N totaux a été mesurée. Mais, afin de mieux appréhender l'effet d'un changement de pratiques culturales sur le court-terme (< 3 ans), l'influence du labour traditionnel et du travail du sol réduit sur les teneurs en C et N des matières organiques particulières ont également été comparés. Ce pool labile de

la MOS est un pool transitoire entre les résidus de cultures frais et la MO humifiée. C'est un attribut important de la qualité du sol car son turn-over rapide représente une source importante de C et de nutriments (Haynes, 2005).

L'effet des différentes techniques de travail du sol sur les microorganismes du sol a été étudié *via* des paramètres quantitatifs et qualitatifs. L'approche quantitative repose sur l'étude de la biomasse microbienne et de ses activités potentielles de minéralisation du carbone (C) et de l'azote (N). La taille du pool microbien est un indicateur fiable de la qualité du sol ; sa mesure contribue à la compréhension des cycles des éléments nutritifs à la fois sur le court terme et le long terme (Insam, 2001). La mesure des flux de C et N donne quant à elle une estimation globale du fonctionnement de l'écosystème sol et du niveau de productivité des parcelles agricoles (Aon *et al.*, 2001a). L'approche qualitative retenue repose sur la caractérisation de la structure des communautés microbiennes du sol par T-RFLP (Terminal – Restriction Fragment Length Polymorphism). Cet indicateur permettra de vérifier si les changements microbiens quantitatifs s'accompagnent d'un changement dans la composition des communautés microbiennes du sol après un an de différenciation des traitements.

Ce chapitre présente donc la démarche expérimentale adoptée dans ce travail ainsi que les protocoles détaillés des mesures réalisées. La première partie de chapitre est consacrée à la description des caractéristiques de chacun de ces sites expérimentaux puis de celles des traitements de travail du sol étudiés. Les protocoles de chacune des mesures réalisées sont présentés en détail dans ce chapitre. Enfin, la dernière partie de ce chapitre présente brièvement les tests préliminaires effectués qui valident la stratégie d'échantillonnage et le mode de préparation et de conservation des échantillons adoptés pour la suite de ce travail.

I / Les sites expérimentaux

I.1 / Site expérimental de Lyon

La parcelle d'essai est située sur la commune de Thil (à proximité de Lyon) chez Claude Barbet, agriculteur biologique céréalier. Le climat est de type continental océanique dégradé, la pluviométrie annuelle est de 825 mm pour une

température moyenne de 11,4°C (normales saisonnières calculées sur les 30 dernières années).

1.1.1 / Caractéristiques de la parcelle d'essai

L'essai a été mis en place en 2005 sur un sol sablo-limoneux issu de dépôt d'alluvions (Fluvisol Luvic, IUSS Working Group WRB, 2006) ; 0,58 g.g⁻¹ sables, 0,27 g.g⁻¹ limons, 0,15 g.g⁻¹ d'argile). C'est un sol carbonaté au pH homogène (pH=8,2). Le dispositif expérimental est composé de trois blocs à l'intérieur desquels les 4 traitements étudiés sont randomisés (Figure 3). La parcelle d'essai fait 2 ha de surface, elle est plane et les parcelles expérimentales mesurent 80 m de long et 12 m de large. Elles sont séparées par des bandes enherbées de 2 m de large. Elle est conduite selon le mode de production AB depuis 1999 (EU 2092/91) et était labourée annuellement à 25 cm de profondeur avant la mise en place des traitements.

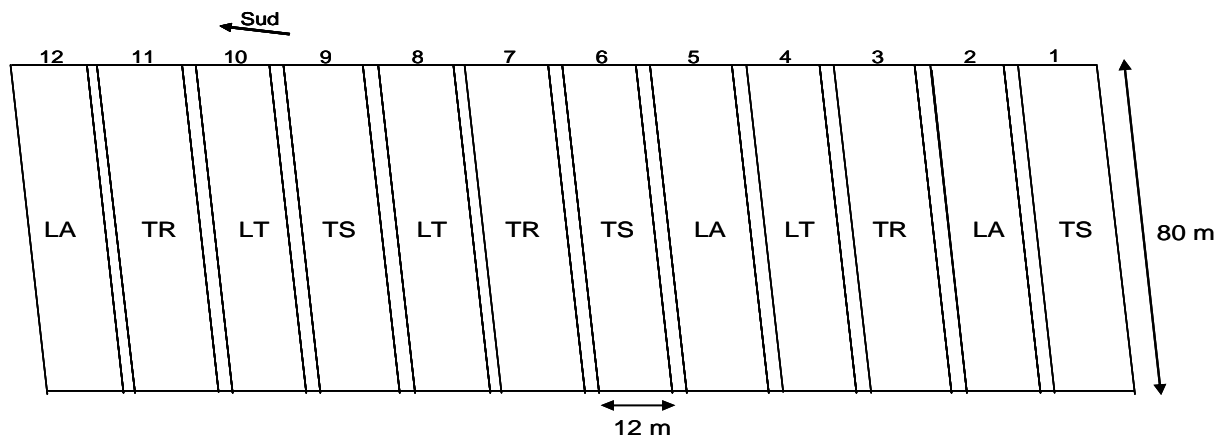


Figure 3 : Schéma du dispositif expérimental de Lyon. LT : Labour Traditionnel ; LA : Labour Agronomique ; TR : Travail Réduit ; TS : Travail Superficiel

1.1.2 / Mesures réalisées avant la mise en place des traitements

L'état initial physico-chimique et biologique de la parcelle d'essai de Lyon a été réalisé en février 2005 avant la mise en place des traitements (printemps 2005). Les prélèvements ont été effectués sur 0-5 / 5-15 / 15-20 et 20-25 cm de profondeur sur chaque parcelle élémentaire. Le tableau 2 présente les résultats des analyses réalisées. Ces résultats sont une moyenne sur 0-25 cm. Par ailleurs une analyse de la variabilité spatiale de différents indicateurs physico-chimiques et microbiologiques du sol a été réalisée à cette même période sur ce dispositif. Cette étude préalable a servi dans le choix des zones à échantillonner, son utilisation est décrite dans la partie "Echantillonnage" de ce chapitre.

Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques de la parcelle d'essai de Lyon (analyses sur 0-25 cm) avant la différenciation des traitements.

	Labour traditionnel	Labour agronomique	Travail réduit	Travail superficiel
C (g.kg ⁻¹)	11,3 ± 1,7	11,2 ± 2,5	10,6 ± 2,1	9,9 ± 1,6
N total (g.kg ⁻¹)	1,3 ± 0,15	1,3 ± 0,25	1,2 ± 0,19	1,1 ± 0,16
P ₂ O ₅ (g.kg ⁻¹)-Olsen	0,011 ± 0,002	0,011 ± 0,003	0,012 ± 0,003	0,011 ± 0,002
K ⁺ (cmol.kg ⁻¹)	0,084 ± 0,019	0,092 ± 0,018	0,072 ± 0,021	0,064 ± 0,010
Mg ⁺⁺ (cmol.kg ⁻¹)	0,116 ± 0,023	0,129 ± 0,023	0,111 ± 0,019	0,101 ± 0,018
Na ⁺ (cmol.kg ⁻¹)	0,016 ± 0,004	0,016 ± 0,003	0,014 ± 0,004	0,015 ± 0,003
Ca ⁺⁺ (cmol.kg ⁻¹)	10,1 ± 0,08	10,3 ± 0,12	9,9 ± 0,10	9,7 ± 0,21
CEC (cmol.kg ⁻¹)	6,7 ± 0,4	7,3 ± 0,5	5,9 ± 0,4	5,3 ± 0,6
Argiles (g.g ⁻¹)	0,12 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,10 ± 0,01	0,09 ± 0,01
Limons fins (g.g ⁻¹)	0,13 ± 0,003	0,12 ± 0,02	0,10 ± 0,02	0,10 ± 0,01
Limons grossiers (g.g ⁻¹)	0,08 ± 0,02	0,09 ± 0,04	0,09 ± 0,02	0,08 ± 0,003
Sables fins (g.g ⁻¹)	0,21 ± 0,02	0,21 ± 0,03	0,21 ± 0,02	0,23 ± 0,02
Sables grossiers (g.g ⁻¹)	0,20 ± 0,04	0,18 ± 0,02	0,23 ± 0,03	0,23 ± 0,01
Calcaire total (g.g ⁻¹)	0,22 ± 0,01	0,21 ± 0,01	0,22 ± 0,01	0,22 ± 0,01
Biomasse microbienne (mgC/kg)	331 ± 184	344 ± 186	320 ± 200	296 ± 161
Carbone minéralisable (mgC/kg)	423 ± 236	425 ± 244	421 ± 265	371 ± 210
Densité apparente (g.g ⁻¹)	1,52 ± 0,13	1,54 ± 0,08	1,56 ± 0,12	1,51 ± 0,09

1.1.3 / Rotation

La rotation mise en place sur ce dispositif est représentative de ce qui est réalisé dans les exploitations céréalières agrobiologiques de la région Rhône-Alpes. Les traitements ont été mis en place au printemps 2005 après 3 années de luzerne (*Medicago sativa* L., 2002-2005). La rotation réalisée est maïs (*Zea maïs* L.) 2005 / soja (*Glycine max*) 2006 / blé (*Triticum aestivum*) 2006-2007. Le détail de toutes les interventions culturales sur la parcelle d'essai est reporté dans l'annexe 1-A.

I.2 / Site expérimental de Kerguéhennec

La parcelle d'essai fait partie de la station expérimentale de la chambre d'agriculture du Morbihan, située sur la commune de Bignan, domaine de Kerguéhennec. Le climat de cette station est de type océanique, généralement doux et humide. La pluviométrie moyenne est de 1026 mm pour 171 jours de pluie (normales saisonnières calculées de 1993 à 2006). La température moyenne est de 11,7°C avec un minimum de 6°C en janvier et un maximum de 18,4°C en août. Le nombre moyen de jours de gelées est de 47 avec des risques importants pour les cultures de novembre à mars.

I.2.1 / Caractéristiques de la parcelle d'essai

L'essai a été mis en place 2003 sur un sol brun moyennement profond (de 50 cm à 1 m) reposant sur des micaschistes (Cambisol Dystric, IUSS Working Group WRB, 2006). C'est un sol de type limoneux (0,47 g.g⁻¹ de limons, 0,33 g.g⁻¹ sables et 0,20 g.g⁻¹ d'argile). Une étude de l'hétérogénéité topographique et texturale a été réalisée en 2003 avant la mise en place des traitements. Elle révèle que l'essai est sous l'influence de deux pentes. Le dispositif expérimental prend en compte ce facteur, les blocs étant disposés perpendiculairement à la pente la plus forte (en moyenne 6%). Le dispositif expérimental est composé de 3 blocs à l'intérieur desquels les 4 modalités de travail du sol étudiées sont randomisées (Figure 4). Les parcelles expérimentales font 25 m de long sur 12 m de large et sont séparées par des bandes enherbées de 2 m de large. Les caractéristiques physico-chimiques de la parcelle sont présentées dans le tableau 3. Cette parcelle est conduite selon le mode de production biologique depuis 1996 (EU 2092/91) et était cultivée et labourée annuellement à 25 cm de profondeur avant la mise en place des traitements.

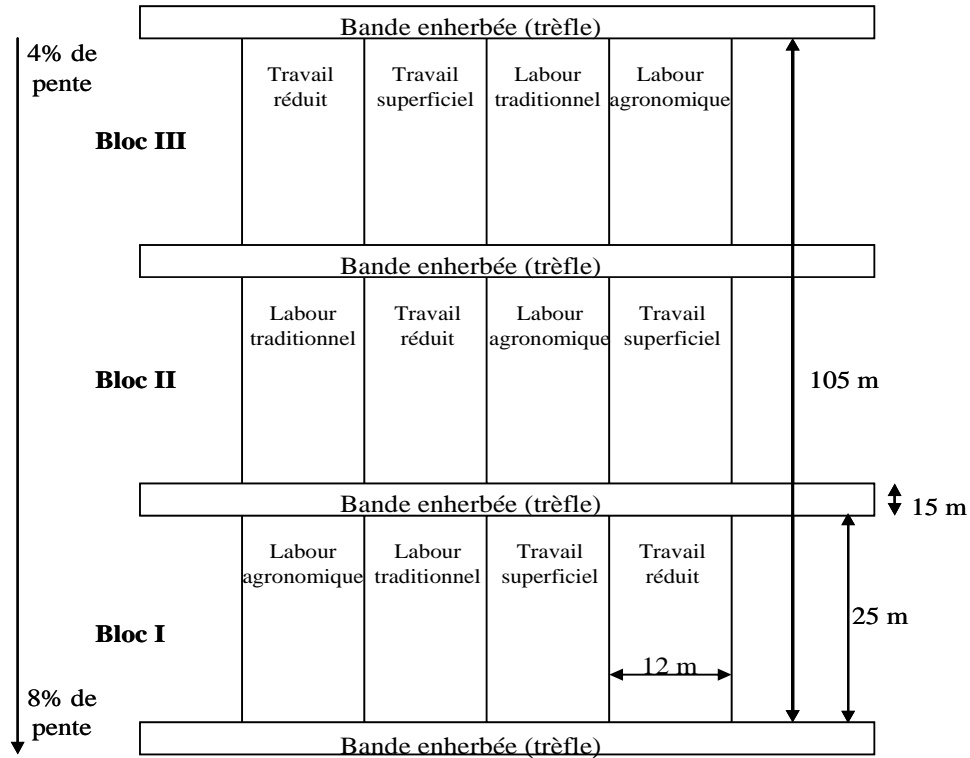


Figure 4 : Schéma du dispositif expérimental de la station de Kerguéhenec.

1.2.2 / Mesures réalisées avant 2006

Cet essai est suivi par la chambre d'agriculture du Morbihan ; des mesures physiques (porosité, structure du sol) chimiques (concentrations en éléments minéraux, teneurs en C et N) et biologiques (quantité, diversité des vers de terre) ont été effectuées annuellement. Aucune mesure microbiologique n'a été faite avant 2006.

Tableau 3 : Caractéristiques physico-chimiques de la parcelle d'essai de Kerguéhennec (analyses sur 0-30 cm) avant différenciation des traitements.

	Labour traditionnel	Labour agronomique	Travail réduit	Travail superficiel
pH eau	6,17 ± 0,06	6,20 ± 0,10	6,30 ± 0,10	6,13 ± 0,06
MO (%)	4,27 ± 0,12	4,33 ± 0,42	4,20 ± 0,00	4,40 ± 0,00
P ₂ O ₅ (mg.kg ⁻¹)-Olsen	0,039 ± 0,003	0,036 ± 0,008	0,035 ± 0,005	0,035 ± 0,002
K ⁺ (cmol.kg ⁻¹)	0,180 ± 0,29	0,159 ± 0,5	0,211 ± 0,9	0,210 ± 0,3
Mg ⁺⁺ (cmol.kg ⁻¹)	0,114 ± 0,3	0,121 ± 0,04	0,124 ± 0,17	0,115 ± 0,2
Ca ⁺⁺ (cmol.kg ⁻¹)	1,34 ± 0,06	1,39 ± 0,07	1,41 ± 0,13	1,41 ± 0,14
CEC (cmol.kg ⁻¹)	9,47 ± 0,23	9,43 ± 0,55	9,37 ± 0,76	9,63 ± 0,55
Argiles (g.g ⁻¹)	0,202	0,202	0,203	0,201
Limons fins (g.g ⁻¹)	0,228	0,23	0,235	0,228
Limons grossiers (g.g ⁻¹)	0,243	0,244	0,245	0,247
Sables fins (g.g ⁻¹)	0,191	0,185	0,177	0,189
Sables grossiers (g.g ⁻¹)	0,136	0,138	0,14	0,135

1.2.3 / Rotation

L'essai a été mis en place en 2003 après trois années de luzerne (*Medicago sativa* L., 1999-2002). Après destruction de la luzerne, un trèfle blanc (*trifolium repens* L.) a été semé en interculture sur toutes les parcelles. La rotation de l'essai à partir de mars 2003 est : maïs (*Zea maïs* L.) 2003 / triticales (*Triticosecale spp.*) 2003-2004 / blé noir (*Fagopyrum esculentum*) 2005 / pois d'hiver (*Pisum sativum*) 2005-2006 / triticales (*Triticosecale spp.*) 2006-2007. Toutes les opérations culturales réalisées sur chacune des parcelles sont reportées dans l'annexe 1-B. La rotation initialement prévue a été modifiée au cours de l'expérimentation. La concurrence du couvert végétal vivant pour la modalité semis direct sous couvert vivant a amené à modifier cette modalité et à la transformer en travail du sol superficiel (cf. partie *infra*). Par ailleurs, le choix d'implanter un blé noir en 2005 a été fait pour limiter la concurrence des adventices et "nettoyer" les parcelles du fait du fort pouvoir couvrant et concurrentiel de cette culture.

II / Les techniques de travail du sol étudiées

Quatre techniques de travail du sol qui diffèrent par le degré de fragmentation de la couche arable, par l'effet de retournement ou non de la couche de sol travaillée, par leur degré de mélange de la matière organique au sol et par le tassement du sol qu'ils engendrent ont été comparées sur chacun des deux sites expérimentaux :

- labour traditionnel (LT) ;
- labour agronomique (LA) ;
- travail du sol réduit (TR) ;
- semis direct sous couvert vivant transformé en travail du sol superficiel (TS).

II.1 / Le labour traditionnel

Ce traitement qui retourne et mélange les horizons de sol sur une profondeur de 30 cm sur le site de Lyon et de 20 cm sur le site de Kerguéhenec, est réalisé à l'aide d'une charrue à versoirs. Cette modalité sert de référence, c'est la pratique la plus répandue chez les agriculteurs biologiques qui labourent à une profondeur assez importante quand le type de sol le permet (cas du site de Lyon) (Gautronneau, comm. perso). Elle permet d'enfouir les résidus de cultures, les cultures intermédiaires et les amendements organiques sur la profondeur de labour, de limiter le développement des ravageurs, pathogènes et adventices, et d'ameublir le sol.

Le labour traditionnel (5-7 km/h) est effectué avec une charrue réversible (corps de 14 pouces) avec rasettes sur les deux sites expérimentaux. Le labour a été suivi d'une ou plusieurs opérations de reprise avec une herse rotative ou plate (5-7 cm de profondeur) selon les années et le site considéré et de plusieurs passages pour le désherbage mécanique (herse étrille ou binage selon le type de culture).

II.2 / Le labour agronomique

Ce traitement remplit les mêmes fonctions agronomiques que le labour et permet de réduire la dilution de la MO dans le profil de sol en diminuant la profondeur de travail. Par ailleurs, labourer sur une profondeur plus faible réduit la force de traction nécessaire et permet de diminuer ainsi la consommation d'énergie. L'absence de rasettes laisse en surface des résidus de cultures contrairement au

labour traditionnel qui les enfouit totalement. Cette technique est désignée par la suite sous le terme de "labour agronomique". Ce terme désigne un labour hors-raie sans rasettes à faible profondeur (environ 15 cm) (Gautronneau, comm. perso).

Le labour agronomique (5-7 km/h) a été réalisé à 15 cm de profondeur avec une charrue réversible de 8 corps de 12 pouces sur le site de Kerguéhennec, et à 18 cm de profondeur avec une charrue varie-large portée de 5 corps de 14 pouces sur le site de Lyon. Le labour a été suivi d'une ou plusieurs opérations de reprise avec une herse rotative ou plate (5-7 cm de profondeur) selon l'année et le site et de plusieurs passages pour le désherbage mécanique (herse étrille ou binage selon le type de cultures).

II.3 / Le travail du sol réduit

L'objectif de ce traitement est de limiter (par rapport au labour) les perturbations verticales du sol et de concentrer les résidus de culture dans les premiers cm du sol. Cette modalité peut être considérée comme une technique de travail du sol de conservation car la couche de sol travaillée n'est pas retournée et les résidus de cultures sont enfouis grossièrement et sont majoritairement concentrés à la surface du sol. Elle permet également de réduire la consommation d'énergie et de travailler une surface plus grande qu'en labour (réduction du temps de travail). Cette technique assure les fonctions de déchaumage, faux semis et d'ameublissement de la couche de sol travaillée.

Cette modalité a été réalisée avec un outil à dents de type chisel sur les deux sites expérimentaux. Le sol est travaillé sur toute sa surface à une profondeur de 15-18 cm sur le site de Lyon et à 15-17 cm sur le site de Kerguéhennec.

II.4 / Le travail du sol superficiel

La suppression totale du travail du sol en AB reste difficile du fait de la concurrence exercée par le développement incontrôlé des adventices (Drinkwater et al., 2000). Afin de limiter cette concurrence, de nouvelles techniques d'implantation des cultures dans un couvert végétal permanent vivant (semis direct sous couvert végétal ou SCV) se sont développées, notamment au Brésil (Labreuche *et al.*, 2007). Ces systèmes permettent de réduire la compétition des adventices et, si le couvert végétal est une légumineuse, la compétition pour les ressources azotées (Hiltbrunner *et al.*, 2007). Ces aspects sont particulièrement intéressants en AB où la

concurrence des adventices et la disponibilité de l'azote sont les principaux facteurs limitant du rendement des cultures (Berry *et al.*, 2002).

Afin de tester ces systèmes dans le contexte de l'AB, la luzerne (site de Lyon) et le trèfle (site de Kerguéhennec) ont été utilisés comme mulchs vivants pour le semis du maïs la première année de différenciation des traitements de travail du sol (respectivement en 2006 et 2003). Le maïs a été semé directement dans ces couverts végétaux une fois que ces derniers aient été roulés mécaniquement. Mais des problèmes sur chacun des sites expérimentaux ont conduit à l'abandon de cette technique pour les cultures suivantes. Elle a été remplacée sur les deux sites par un travail du sol superficiel effectué avant le semis de la culture sur la totalité de la surface du sol à une profondeur de 5-7 cm avec un mixter (outil à dents plus disques et rouleau cage) et/ou une herse rotative.

Les différentes interventions culturales réalisées sur chacun des sites expérimentaux sont décrites dans les Tableaux en annexe 1-A et 1-B. Les figures 5 et 6 présentent les profils que génèrent les itinéraires techniques étudiés (profondeur de travail, enfouissement des résidus de cultures), les principales interventions culturales et les périodes de prélèvements pour les mesures réalisées. Les zones de passage de roues ont été contrôlées, les engins passant toujours au même endroit.

D'après les figures 5 et 6 nous voyons que les techniques de travail du sol étudiées répartissent les résidus de cultures différemment. Ces 4 traitements représentent un gradient progressif de concentration de la MOS en surface. Le labour traditionnel (LT) répartit de façon homogène les résidus de cultures le long de la couche de sol retournée. Le labour agronomique (LA) les répartit également de façon relativement homogène sur la profondeur de la couche de sol retournée, mais l'abandon de la rasette laisse quelques résidus en surface. Les dents du chisel pour le travail du sol réduit (TR) enfouissent partiellement les résidus de cultures jusqu'à 15 ou 12 cm selon le site, mais la majeure partie des résidus est concentrée dans les 7 premiers cm du sol. A l'extrême, le travail du sol superficiel n'enfouit que très partiellement les résidus de cultures sur 0-7 cm de profondeur. Aucun résidu grossier ne se trouve en deçà de cette couche de sol.

On peut noter que l'échantillonnage de mars 2006 sur le site de Lyon pour la modalité TS a été réalisé sous un couvert d'avoine. Ce couvert devait servir de mulch vivant pour y implanter le soja mais, là encore, le développement des adventices

dans ce couvert nous a conduit à le détruire juste avant l'implantation du soja (annexe 1-A).

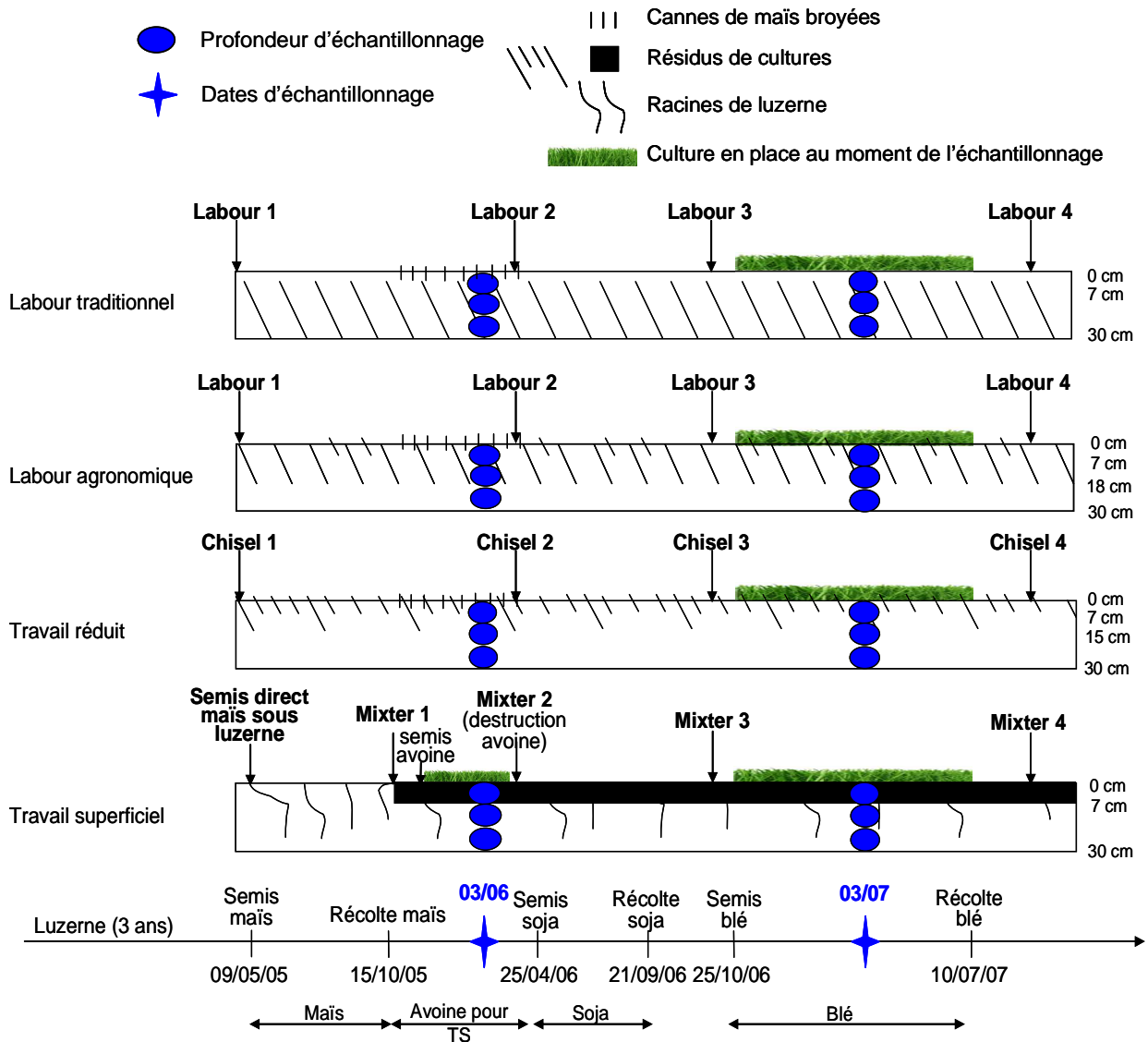


Figure 5 : Représentation simplifiée des principales interventions culturales sur les parcelles d'essai du site de Lyon et de l'effet des traitements sur la répartition des résidus de cultures.

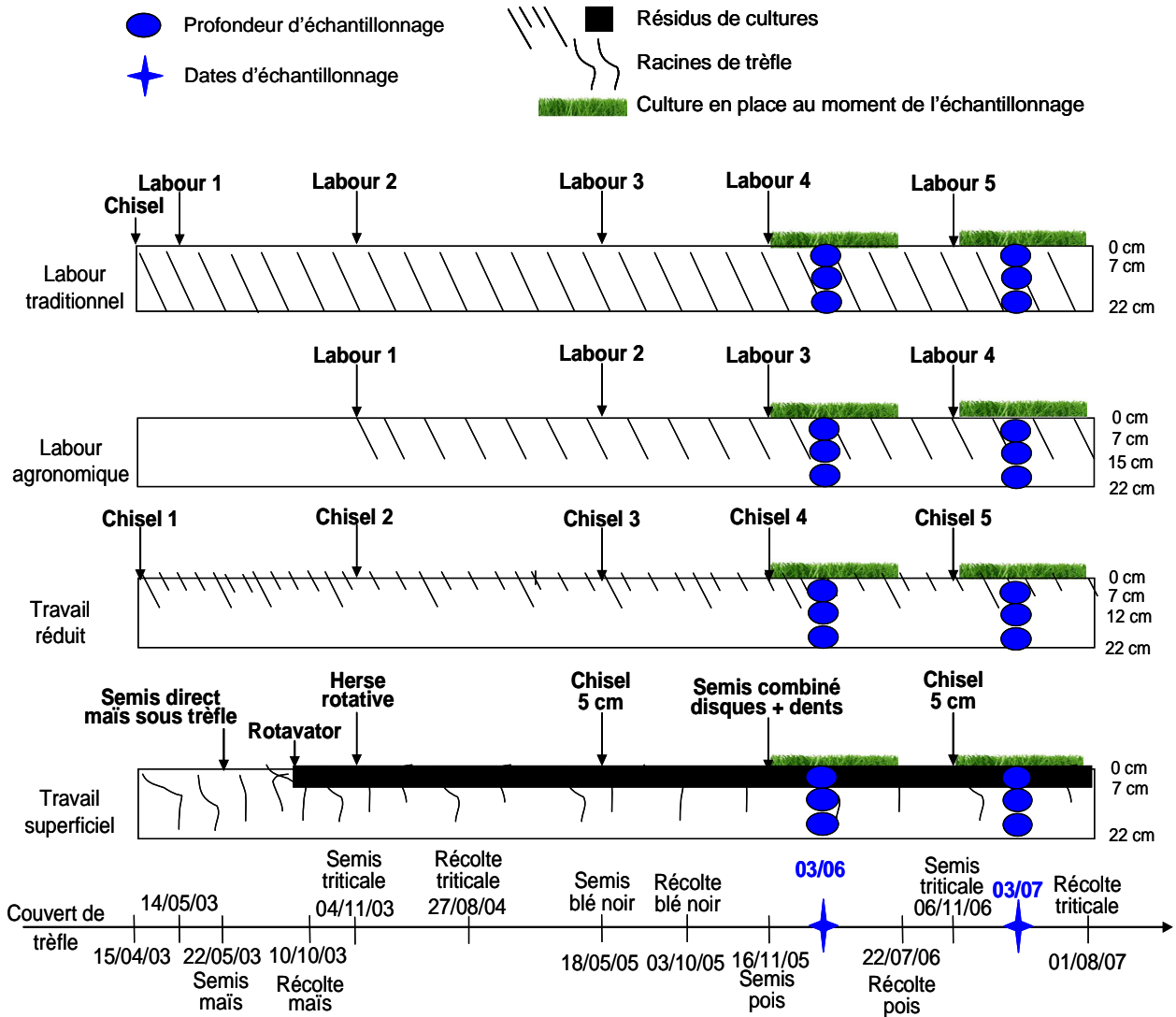


Figure 6 : Représentation simplifiée des principales interventions culturales sur les parcelles d'essai du site de Kerguéhennec et de l'effet des traitements sur la répartition des résidus de cultures.

III / Description de la structure du sol

III.1 / Le profil cultural

La structure du sol a été caractérisée par une description morphologique de l'état structural du sol grâce à la méthode du profil cultural (Gautronneau et Manichon, 1987; Manichon, 1982). Cette méthode permet de prendre en compte la variabilité spatiale de la structure du sol, due au fait que les contraintes mécaniques (passages d'engins, profondeur de travail des outils, effets du climat et de la faune) ne s'appliquent pas uniformément sur toute la couche de sol arable, créant ainsi des conditions locales particulières de fonctionnement biologiques, hydriques et physiques (Roger-Estrade *et al.*, 2004b). Par ailleurs, l'étude du profil cultural permet de relier la structure du sol observée aux opérations culturales responsables de son évolution (Roger-Estrade *et al.*, 2004a). Cette méthode donne à la variabilité spatiale des états structuraux un rôle déterminant pour l'analyse de l'histoire des contraintes subies par le sol (Manichon et Roger-Estrade, 1990).

La description du profil cultural repose sur un double partitionnement de la face à observer (Figure 7) : une partition latérale qui rend compte de l'effet des passages de roues et donc des contraintes locales de tassement, et une partition verticale qui met en évidence la succession des horizons anthropiques plus ou moins importants selon l'itinéraire technique et le type d'outils utilisés (Gautronneau et Manichon, 1987).

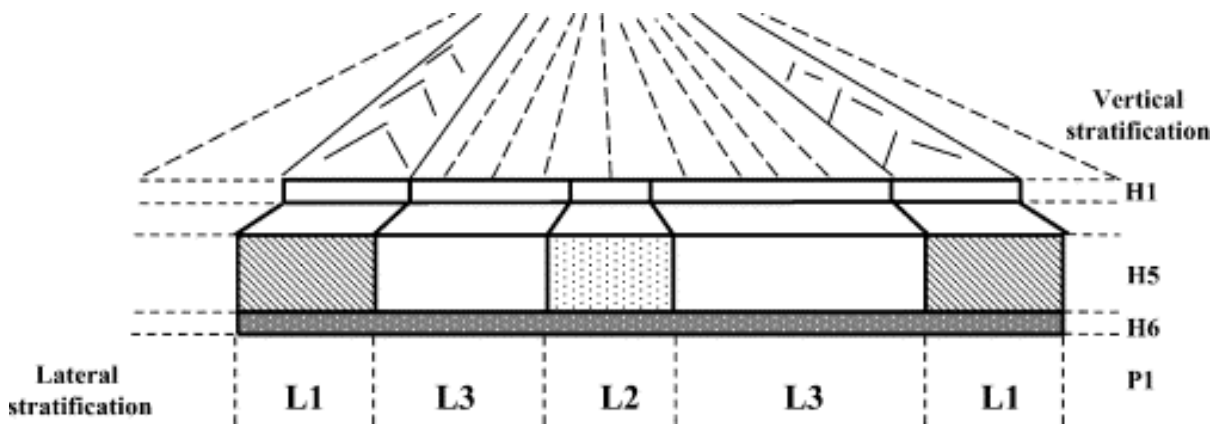


Figure 7 : Principe de la stratification d'un profil culturel. Stratification verticale : H1, lit de semence ; H5, horizon labouré (ou fragmenté) et non travaillé depuis le labour ou le passage du chisel ; H6, ancien horizon labouré ; P1, premier horizon non travaillé. Stratification latérale : L1, partie du profil située sous les zones de passages de roues des opérations culturales réalisées après la reprise de labour (visibles à la surface du sol) ; L2, partie du profil située sous les zones de passages de roues issues des reprises de labour ; L3, partie du profil non roulé depuis le labour ou le passage du chisel (Roger-Estrade *et al.*, 2004b).

Cette double stratification est un pré-requis nécessaire à une analyse plus poussée de la variation spatiale des états structuraux du sol au sein des strates précédemment identifiées (Roger-Estrade *et al.*, 2004a). Cette analyse plus fine consiste à caractériser le mode d'assemblage des mottes (nombre de mottes, calibres, degré de liaison). Ces modes d'assemblage peuvent alors être regroupés en 3 états types: **o**, **b** ou **c** (état structural **ouvert**, **bloc** ou **continu** respectivement ; Tableau 4).

Tableau 4: Les modes d'assemblage des mottes et les définitions des états types (Gautronneau et Manichon, 1987).

État structural	Définition
Ouvert : o	Structure fragmentaire (F) et éléments structuraux soudés et facilement discernables (SF) ; terre fine abondante
Bloc : b	Structure massive (M) mais les éléments structuraux restent toutefois soudés et facilement discernables (SF) ; peu de terre fine
Continu : c	Structure massive (M), les éléments structuraux sont soudés et difficilement discernables (SD) ; pas de discontinuités structurales

La porosité structurale entre les mottes décroît de **o** à **c**. L'évolution des états types sous l'action des agents climatiques peut être importante entre les périodes

des travaux culturaux : réduction des cavités, agglomération de la terre fine plus ou moins importante sous l'action de la pluie ou des passages d'engins (Gautronneau et Manichon, 1987). On peut également ajouter le suffixe "R" à l'état type c, qui rend compte des fentes de retraits et des plans de fragmentation d'origine climatique ou mécanique (exemple: c_{RR} , structure continue avec de nombreux plans de fragmentation; c_R : structure continue avec quelques plans de fragmentation).

Une fois les modes d'assemblages et les états types définis, on décrit alors l'état interne des mottes : delta : Δ , phi : Φ , ou gamma : Γ (Figure 8) (Gautronneau et Manichon, 1987).

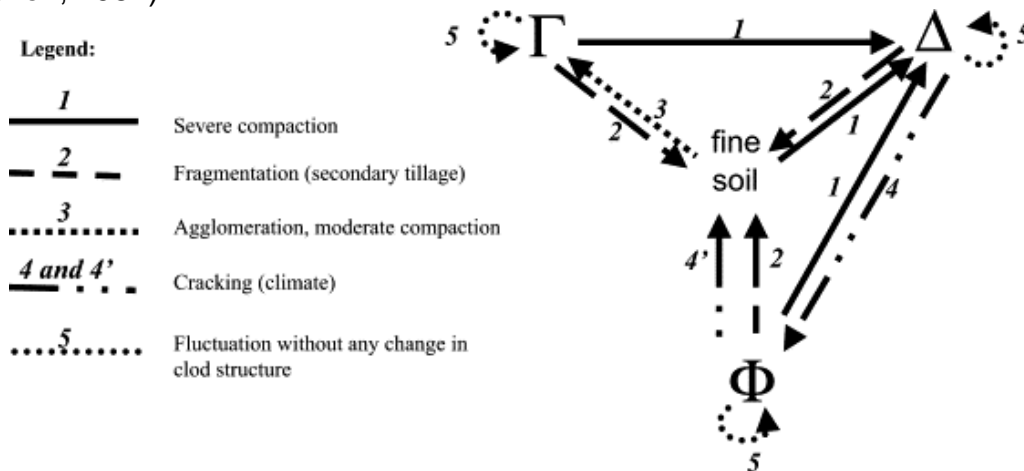


Figure 8 : Interrelations entre les différents types de mottes au sein de l'horizon travaillé (Roger-Estrade *et al.*, 2004b).

Les mottes Δ , Φ et Γ ont des propriétés physiques différentes. Les mottes Γ ont une porosité supérieure à celle des mottes Δ (Boizard *et al.*, 2004; Curmi, 1988). Ainsi, les volumes à porosité grossière (Γ) retiennent plus d'eau aux faibles succions et présentent un taux de saturation de leur porosité plus faible que les volumes à porosité grossière réduite (Δ ou Φ). Le risque d'anoxie est donc plus grand au sein des zones compactées Δ/Φ (Curmi, 1988). Cette méthode a permis de développer un indicateur qui quantifie l'évolution de la structure du sol sous l'effet de différents itinéraires techniques de travail du sol : la proportion de mottes Δ dans les horizons travaillés (Manichon et Roger-Estrade, 1990).

Par ailleurs, les mesures et observations réalisées au sein du profil cultural peuvent être extrapolées à l'échelle de la parcelle. Plusieurs études ont en effet montré que sa représentativité était satisfaisante (Boizard *et al.*, 2002; Boizard *et al.*, 2004; Roger-Estrade *et al.*, 2004a). Pour un type d'itinéraire technique, le nombre et la localisation verticale et latérale des compartiments identifiés au sein du profil est

fixé. Le volume de chacun de ces compartiments peut alors être calculé au sein de l'horizon anthropique (Ap). Ceux-ci se répètent ensuite dans la parcelle perpendiculairement au sens d'avancement des outils et avec une périodicité qui dépend de la largeur des outils utilisés (Manichon et Roger-Estrade, 1990).

Ces résultats justifient le choix d'utiliser le profil cultural comme base d'échantillonnage des mesures microbiologiques. Il sera ainsi possible de relier l'organisation structurale du sol à ses propriétés microbiologiques et d'extrapoler à l'échelle du profil cultural les mesures réalisées.

La description des profils culturaux sur les deux sites expérimentaux a été faite aux mois de mars 2006 et 2007. Les profils ont été ouverts perpendiculairement au sens du travail du sol, sur une profondeur de 80 cm à 1 m et sur 4 m de large au centre des parcelles élémentaires. Ainsi, chaque profil est représentatif de la largeur de travail des outils (4 m) et englobe donc des zones L1/L2 et L3. Au sein de chaque strate identifiée on décrit l'état structural du sol selon le système de notation présenté dans le tableau 5. Il précise les règles d'interprétation attachées à chaque modalité.

Tableau 5: quelques règles de diagnostic sur l'origine et le type de structure d'une parcelle habituellement labourée (Gautronneau et Manichon, 1987; Roger-Estrade *et al.*, 2004b).

Etat structural du sol en L3		Etat structural du sol en L1/L2	
Structure	Interprétation	Structure	Interprétation
o Γ	Etat initial structural non dégradé et	o Γ	Pas de compaction
	fragmentation intense durant le labour	c Γ	Compaction modérée
b Γ	Etat initial non dégradé et fragmentation limitée durant le labour (conditions sèches ou humides)	c Δ	Compaction intense
		b Γ	Pas de compaction
b Δ	Etat initial compacté (quelle que soit l'humidité du sol durant le labour)	c Γ	Compaction modérée
		c Δ	Compaction intense
c Γ	Structure non compactée; pas de labour récent	b Δ	Pas de compaction
		c Δ	Compaction modérée à intense
c Δ	Structure compactée; labour ancien	c Γ	Pas de compaction
		c Δ	Compaction intense
			Pas de compaction ou modérée ou intense

III.2 / Estimation de la proportion de zones Δ

Les mottes Δ sont mises en relief à l'aide d'un couteau sur toute la face d'observation. Une fois chaque motte identifiée (à l'aide d'une punaise par exemple) et mise en relief, les différents horizons de sol créés par les outils de travail du sol sont délimités par de la laine de couleur blanche. Ensuite la surface est photographiée comme indiqué sur la Figure 9.

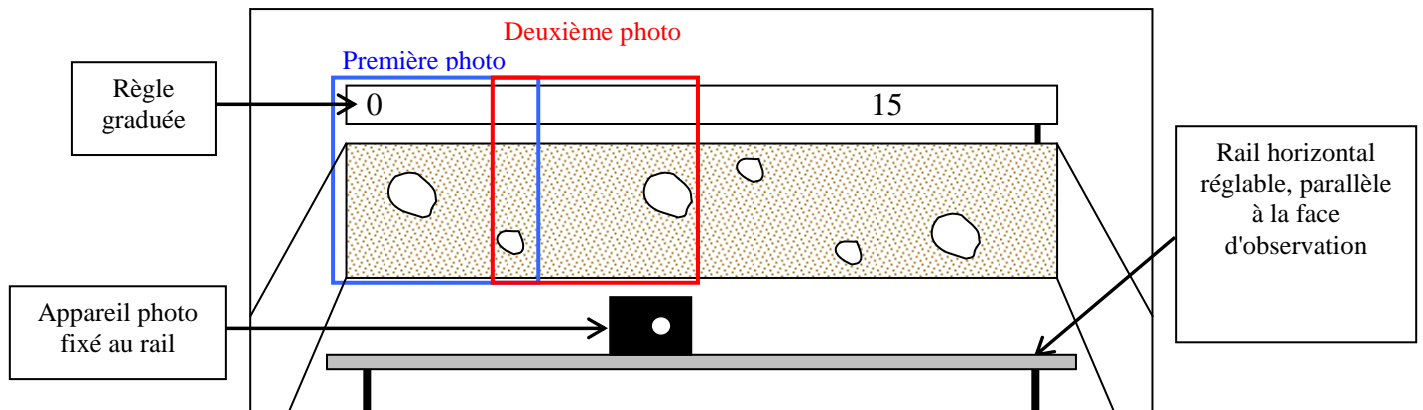


Figure 9 : Représentation schématique de la prise de vue photographique de la surface du profil culturel. Source : INRA Laon-Reims-Mons 2002 – Protocole de traitement de profil culturel par analyse d'image – Fiche protocole, document interne.

Les photographies sont ensuite traitées par analyse d'image afin de déterminer la surface des mottes Δ au sein du profil culturel (logiciel ImageJ 1.37v, Wayne Rasband, National Institute of Health, USA). Cette proportion est un indicateur de l'évolution de la structure du sol sous l'effet de différents itinéraires techniques de travail du sol (Manichon et Roger-Estrade, 1990).

III.3 / Mesure de la densité apparente du sol ou masse volumique

La mesure de la masse volumique du sol (ρ), est un indicateur du tassement du sol et de la porosité totale du sol. Elle a été mesurée lors de l'observation des profils cultureux en mars 2006 et 2007 sur les deux sites expérimentaux par la méthode du cylindre calibré (dimension de 5 cm x 5 cm). Les mesures ont été faites en distinguant horizontalement les zones de passages de roues (L1/L2) des zones non roulées dans le profil de sol (L3). Les mesures sont réalisées tous les 5 cm de

profondeur à raison de 3 répétitions pour les zones L3 et 2 répétitions pour les zones L1/L2. A partir de cette mesure nous en déduisons :

-la teneur en eau (TE) du sol (séchage 48 h à 105°C) exprimée en g.g^{-1} de sol sec ;

-la masse volumique du sol (ρ , g.cm^{-3}) est calculée selon l'équation :

$$\rho = \text{masse totale sol sec} / \text{volume du cylindre} \quad (1)$$

-la porosité totale (P) du sol exprimée en % : $P = 100 \times (1 - \rho / \rho_s)$ (2)

ou ρ_s est la densité de solide du sol, estimée à 2,654 (Baize, 2000) ;

-le taux de saturation de la porosité du sol (Water-Filled Pore Space : WFPS) :

$$\text{WFPS} = (\text{TE} \times 100 \times \rho) / (1 - (\rho / \rho_s)) \quad (3)$$

(Robertson et Groffman, 2007).

IV / Échantillonnage

Afin de relier l'organisation structurale du sol à ses propriétés microbiologiques nous prélevons au sein des trois horizons de sol définis par la profondeur de travail des outils étudiés (Figures 6 et 7) des mottes Γ et Δ sur lesquelles sont réalisés des mesures physiques (porosité totale des mottes), chimiques (C, N) et microbiologiques (biomasse microbienne, activités potentielles de minéralisation du C et N). Aucune motte de type Φ n'est présente sur les deux sites expérimentaux du fait de leur faible teneur en argile (< à 20 %), seul les types Γ et Δ sont représentés.

Pour chaque horizon, une trentaine de mottes Γ et Δ (de 10 à 20 cm^3) ont été prélevées et conservées en l'état. Une dizaine de mottes a été conservée à l'air libre pour déterminer leur porosité et le reste a été conservé à + 4°C pour les mesures chimiques et microbiologiques quantitatives lors des prélèvements de mars 2006. Pour les analyses microbiologiques qualitatives (structure des communautés microbiennes) les échantillons ont été tamisés à 2 mm et conservés à -20°C.

Pour l'échantillonnage de mars 2007 une troisième distinction a été faite : les mottes Δ positionnées en L3. Le versoir de la charrue (ou les dents du chisel, mais dans une moindre mesure) fragmente et déplace les zones compactées (souvent des zones L1/L2 vers les zones L3). Ces mottes Δ ont donc été créées par un tassement du sol l'année n-1 au contraire des mottes Δ créées par le passage des

engins agricole l'année n. Il semblait intéressant de vérifier l'effet "âge" du tassement sur les mêmes paramètres microbiologiques que ceux mesurés en 2006.

Sur le site de Kerguéhennec, du fait de la faible taille du dispositif et de la nature destructive de la mesure, les profils culturaux ont été ouverts uniquement sur le bloc 2. Les mesures réalisées sur ce dispositif n'ont donc pas de répétition expérimentale de terrain (cf. partie *infra*).

Les caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques de la parcelle de Lyon sont très variables dans l'espace (sol issu de dépôts d'alluvions). Or, l'étude des microorganismes et de leur capacité à fournir des éléments minéraux est parfois difficile à étudier en plein champ du fait de la forte variabilité spatiale des indicateurs microbiens qui peut masquer l'effet des traitements étudiés (Nael *et al.*, 2004). Afin de la minimiser, les profils culturaux ont été placés en mars 2006 sur des strates initialement homogènes en C, N, CEC et biomasse microbienne (Vian, 2005). Ainsi, les différences observées entre les traitements pourront être attribuées effectivement aux techniques de travail du sol et non à une différence initialement présente au sein de la parcelle (Stein et Ettema, 2003). La figure 10 indique l'emplacement des profils culturaux de mars 2006 (placés sur des strates homogènes) et mars 2007 sur le site de Thil. Ils ont été ouverts sur les deux premiers blocs du dispositif.

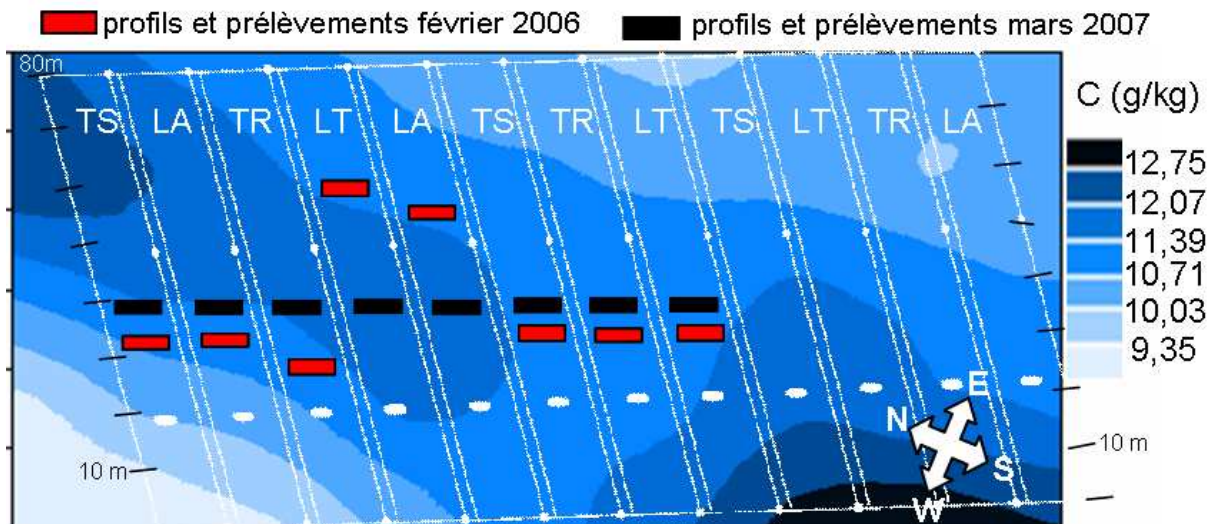


Figure 10 : Emplacements des profils culturaux sur le site de Thil. LT : labour traditionnel ; LA : labour agronomique ; TR : travail du sol réduit ; TS : travail du sol superficiel.

V / Mesures de laboratoire

V.1 / Densité apparente des mottes Γ et Δ

Afin de vérifier *a posteriori* la distinction morphologique des mottes Γ et Δ faite au champ lors de l'observation des profils culturaux, la masse volumique (g.cm^{-3}) et la porosité totale des mottes prélevées a été effectuée en laboratoire par la méthode au pétrole (Stengel, 1983). Après avoir séché les mottes à l'étuve (105°C , 48h), elles sont imbibées de pétrole (24 h). Ensuite chaque motte est plongée individuellement dans du pétrole (de densité connue) suspendue dans une nacelle de masse volumique connue afin de déterminer la poussée d'Archimède dans le pétrole. On obtient ainsi :

- le poids de la nacelle P0
- la masse volumique de la nacelle P1 (déplacement nacelle dans le pétrole)
- le poids de la motte sèche + poids de la nacelle P2
- la masse volumique de la motte imbibée de pétrole + masse volumique nacelle P3 (déplacement nacelle dans le pétrole + déplacement motte sèche dans le pétrole)
- le poids de la nacelle et de la motte imbibée P4 (nacelle et motte imbibée posée au fond du bécher rempli de pétrole)
- on connaît la densité du pétrole en fonction de sa température : ρ_{pl}^t

On en déduit :

$$\text{-la densité apparente de chaque motte } (\rho_M) : ((P2 - P0) / (P3 - P1)) \times \rho_{pl}^t \quad (4)$$

$$\text{-la porosité totale des mottes } (P_m) \text{ en } \% : P_m = (100 \times 1 - \rho_M / \rho_S) \quad (5)$$

Du fait de la forte variabilité de cette mesure, elle est répétée sur au moins 7 mottes Γ et 7 mottes Δ prélevées au sein des 3 horizons de prélèvements (Figures 6 et 7). Ces mesures permettent d'estimer la porosité totale de chaque motte et d'avoir ainsi une estimation des conditions de vie des microorganismes du sol : saturation de la porosité, circulation de l'air.

V.2 / Biomasse microbienne

La biomasse microbienne (BM) du sol a été mesurée par la méthode dite de "fumigation-extraction" (Chaussod *et al.*, 1988; Wu *et al.*, 1990). Les mottes

prélevées au champ sont déstructurées à la main juste avant le début de la mesure, et les résidus grossiers de MO sont enlevés.

Les échantillons de sol sont divisés en deux lots de 20 g (équivalent sol sec): un lot témoin et un lot fumigé (4 répétitions). L'échantillon fumigé est traité par des vapeurs de chloroforme (CHCl_3) pendant 16 h dans un dessiccateur sous vide. Le carbone organique soluble est extrait par agitation dans 100 mL d'une solution de K_2SO_4 (0,05N) pendant 45 mn à 20°C suivie d'une centrifugation à 6000 g pendant 5 mn. Le carbone organique du surnageant est dosé par oxydation au peroxydisulfate de potassium ($\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$) sous rayonnement UV (Dorhman DC 80).

La différence de carbone organique soluble entre les échantillons fumigés et non fumigés correspond à la quantité de carbone extractible d'origine microbienne. Cette quantité est directement proportionnelle à la biomasse microbienne (mgC/kg) : C extractible / 0,38 (Carter *et al.*, 1999).

La biomasse microbienne lorsqu'elle est exprimée en pourcentage du C total (BM%C), permet d'évaluer l'évolution du système sol (Chaussod et Houot, 1993), en déterminant si les entrées de matière organique alimentent la biomasse microbienne ou le stock total de MOS.

V.3 / Minéralisations potentielles de C et N organiques

La minéralisation du carbone (C_{min}) est mesurée lors d'une incubation de 28 jours à 28°C. Pour cette détermination les mottes Γ et Δ ne sont pas déstructurées. On place l'équivalent de 20 g de sol sec (une motte d'environ 20 g ou deux petites) en incubation dans un bocal hermétique de 0,5 L qui contient une fiole à scintillation contenant 10 ml de soude (NaOH à 0,25 N) afin de doser le CO₂ piégé et un peu d'eau distillée pour éviter le dessèchement de l'échantillon. La fiole est récupérée à 14 jours et remplacée par une autre qui sera récupérée à 28 jours afin de doser le CO₂ piégé (Dorhman DC 80).

L'azote minéral est dosé à T0 jours à partir du culot des échantillons de sol non fumigés, et à T28 jours à partir des mottes incubées (28 jours, 28°C). L'extraction se fait par agitation dans 100 ml de solution de K_2SO_4 . L'azote est dosé par colorimétrie en flux continu. La différence des mesures entre T28 et T0 donne la minéralisation de l'azote organique pendant 28 jours à 28°C (N_{min}).

V.4 / Respiration spécifique apparente

La respiration spécifique apparente (RS) représente le flux de C-CO₂ par unité de biomasse et par jour durant l'incubation de 28 jours à 28°C. C'est donc un flux de carbone respiré rapporté à la taille de la biomasse microbienne. On peut en déduire le temps de renouvellement apparent de la biomasse microbienne (1/RS). La RS varie selon la composition et l'état physiologique de la communauté microbienne, mais aussi selon la disponibilité du substrat et de différents facteurs abiotiques (Melero *et al.*, 2006). Cet indicateur est une approche indirecte de l'efficacité d'utilisation des substrats organiques par la biomasse microbienne du sol (Wardle et Ghani, 1995).

V.5 / Analyses qualitatives: structure des communautés microbiennes

Cette analyse a été effectuée pour deux traitements de travail du sol (labour traditionnel et travail du sol réduit) sur le site de Lyon, afin de comparer à court terme (1 an) l'effet d'un changement de pratique culturale et du niveau de tassement du sol sur la structure des communautés microbiennes. L'évolution de la structure des communautés microbienne a été mesurée à partir des échantillons prélevés lors du point initial (février 2005) et lors du premier prélèvement (mars 2006) effectué au sein des profils culturaux.

De nombreuses méthodes d'empreintes moléculaires récemment développées permettent de prendre en compte les microorganismes du sol cultivables et non cultivables. Ces techniques font appel à des méthodes d'extraction, de quantification et d'identification de molécules du sol qui sont spécifiques de certains microorganismes ou groupes de microorganismes du sol (Hill *et al.*, 2000). La plupart d'entre elles sont basées sur l'analyse du gène codant la petite sous unité ribosomale (ssu ADNr et/ou ARNr) ou sur l'analyse d'un marqueur biochimique d'un groupe fonctionnel ou d'une communauté (acide gras phospholipidiques par exemple). Dans cette étude, nous avons choisis d'utiliser la méthode de T-RFLP (Terminal-Restriction Fragment Length Polymorphism) pour comparer la structure des communautés bactériennes (Liu *et al.*, 1997) et fongiques (Edel-Hermann *et al.*, 2004). Cette technique permet de traiter un grand nombre d'échantillons (96 échantillons par analyse avec le matériel disponible au laboratoire) et de comparer des échantillons issus d'électrophorèses différentes grâce à l'utilisation d'un standard interne dans chaque échantillon (Janvier, 2007). Cette méthode repose sur

l'extraction directe de l'ADN du sol qui est ensuite amplifié par PCR (Polymerase Chain Reaction) à l'aide d'amorces spécifiques des communautés bactériennes et fongiques (ADNr 16S et ADNr 18S respectivement, Figure 11). Les fragments d'ADN amplifiés subissent ensuite une digestion enzymatique et les fragments terminaux ainsi obtenus sont séparés par électrophorèse ce qui permet de révéler le polymorphisme de longueur des fragments de restriction terminaux (Figure 12).

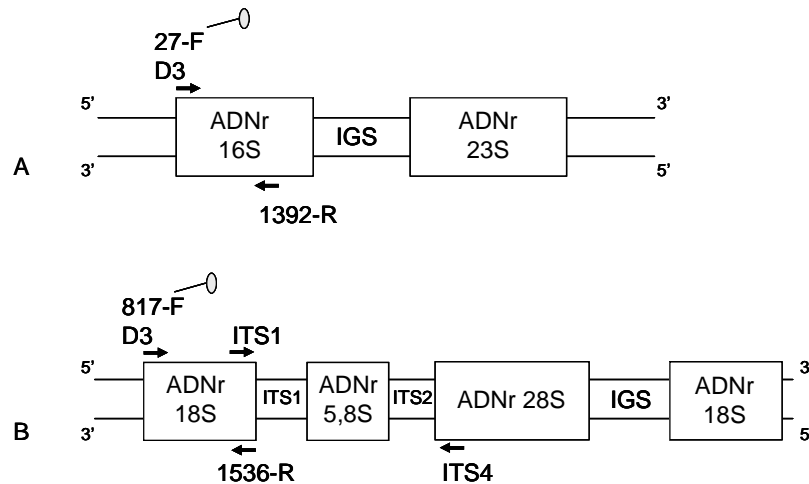


Figure 11 : Schéma de la structure de l'unité d'ADN ribosomique (ADNr) bactérien (A) et fongique (B) et position des amorces utilisées. IGS = InterGenic Spacer ; ITS = Internal Transcribed Spacer. D'après Janvier (2007).

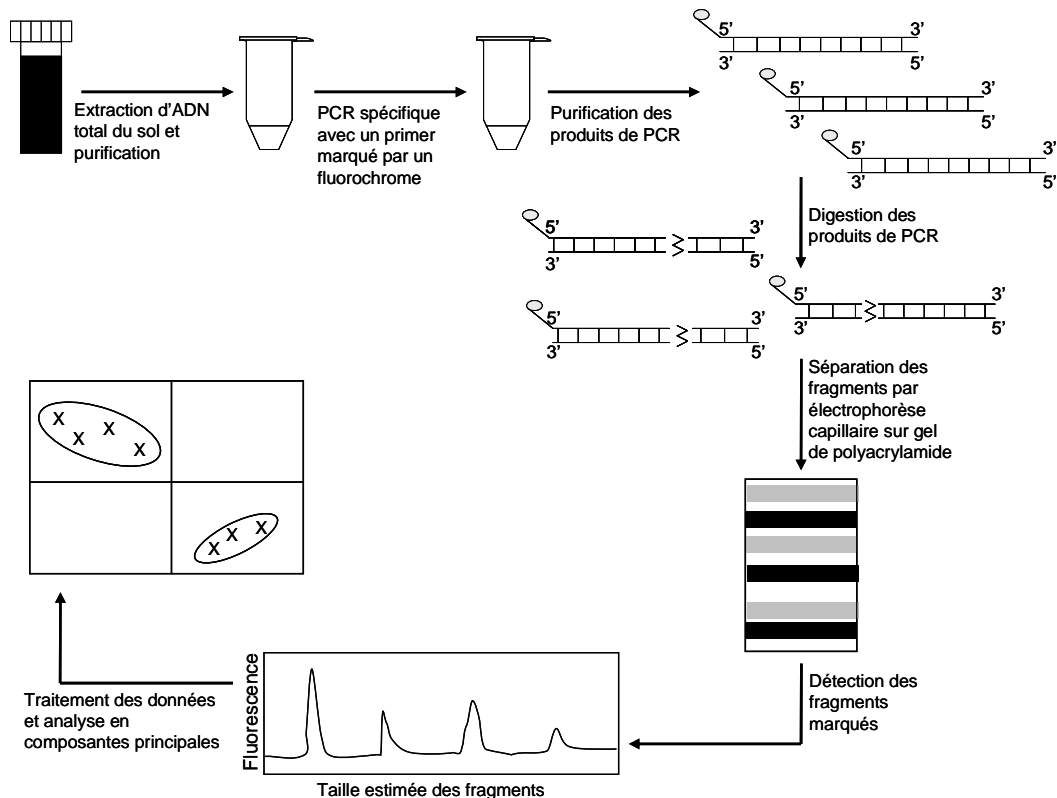


Figure 12 : Principe de l'analyse de la structure des communautés microbiennes du sol par T-RFLP. D'après Janvier (2007).

V.5.1 / Extraction de l'ADN du sol

L'ADN total du sol est extrait selon une méthode proposée par Martin-Laurent *et al.*, 2001 et modifiée par Edel-Hermann *et al.*, 2004. L'ADN génomique total est extrait à partir d'un gramme de sol. La lyse de l'échantillon de sol est à la fois mécanique et chimique (cf. encadré 1). La concentration en ADN extrait des échantillons est mesurée par quantification sur gel d'agarose (0,8 %, migration 40 mn, 100 V) par comparaison avec une gamme de thymus de veau de concentration connue. Les gels sont ensuite colorés par du bromure d'éthidium et analysés grâce au logiciel Bio-1D++ (Vilber Lourmat, Marne La Vallée, France) qui calcule l'intensité de chaque bande et estime la concentration en ADN des échantillons par comparaison avec la courbe étalon d'ADN de thymus de veau. Les ADN ainsi extraits sont conservés à -20°C.

Encadré 1 : Protocole d'extraction de l'ADN du sol :

Dans une cupule contenant le sol à extraire, on place de 2 g de billes de verre de diamètre 106 µm (Glass beads acid washed, Sigma) et 8 billes de verre de diamètre 2 mm auxquelles on ajoute 4 mL de tampon de lyse (TrisHCl 50 mM pH8, EDTA 20 mM pH8, Sodium Dodécyl Sulfate (SDS 1%), eau ultrapure (Eppendorf, Hambourg, Allemagne)). La lyse mécanique est assurée par agitation à 1600 rpm pendant 30 s (Bead Beater Mikro-dismembrator S., B. Braun). La lyse chimique permet de dénaturer les protéines et les lipides grâce à l'action du SDS à haute température (incubation 20 mn à 70°C avec agitation régulière). On récupère après centrifugation (10 mn, 8000g, 4°C) 2 mL de surnageant. Afin de séparer les protéines de l'ADN on précipite ce surnageant par ajout de 1/10^{ème} du volume d'acétate de potassium 5 M et centrifugation (10 mn, 14000 g, 4°C). L'ADN est ensuite précipité par ajout d'isopropanol (15 mn, -20°C, puis centrifugation 20 mn, 15000 g, 4°C). Le culot est récupéré et lavé par 300 µL d'éthanol (70°C, conservé à -20°C) puis centrifugé (5 mn, 4000 g, 4°C), séché puis re-suspendu dans 100 µL d'eau ultrapure. L'ADN est ensuite purifié par deux passages sur des colonnes de PVPP (Polyvinylpolypyrrolidone) et centrifugation (2 mn, 1000 g, 10°C), puis par une purification avec un kit Gene clean (Q-BIOgene, Illkirch, France). Deux éluions finales de 30 µL sont réalisées.

V.5.2 / Amplification d'ADNr par PCR

A partir des ADN extraits du sol, l'ADNr 16S et 18S des communautés bactériennes et fongiques respectivement est amplifié par PCR (cf. encadré 2). Les amplifications sont vérifiées sur gel d'agarose puis les produits PCR sont purifiés

avec le Kit MinElute (Quiagen, Courtaboeuf, France). Les produits PCR purifiés sont ensuite quantifiés par comparaison avec une gamme de Smart Ladder (marqueur de poids moléculaire, Eurogentec, Seraing, Belgique). Les gels sont ensuite colorés par du bromure d'éthidium et analysés grâce au logiciel Bio-1D++ comme cité précédemment pour quantifier les concentrations en ADN des produits PCR purifiés (même protocole que pour les ADN extraits du sol).

Encadré 2 : Protocole d'amplification d'ADNr par PCR :

L'ADNr 16S extrait est amplifié par PCR avec l'amorce 27F (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3', Edwards *et al.*, 1989) marquée à l'extrémité 5' par le fluorochrome D3 (Beckman Coulter, Fullerton, CA, USA) et par l'amorce 1392R (5'-ACGGGCGGTGTGTACA-3', Braker *et al.*, 2001). Les PCR sont réalisées dans un tampon final de 25 µL (tampon 1X, dNTP 200 µM, 27FD3 0,2 µM, 1392R 0,2 µM, *Taq* Polymerase 2U (Q-BIOgen), ADN extrait 20 ng). Les amplifications sont réalisées dans des thermocycleurs suivant le programme suivant: 3 mn 94°C (dénaturation initiale), 30 cycles de dénaturation-hybridation-élongation (respectivement 1 mn 94°C, 1 mn 57°C, 1 mn 72°C) puis une élongation finale de 10 mn 72°C. L'ADNr 18S des communautés fongiques est amplifié par PCR avec l'amorce ssu-0817F (5'-TTAGCATGGAATAATRRRAATAGGA-3'; R= G ou A) marquée à l'extrémité 5' par le fluorochrome D3 (Beckman Coulter, Fullerton, CA, USA) et par l'amorce ssu-1536R (ATTGCAATGCYCTATCCCCA-3'; Y= C ou T ; Borneman *et Hartin*, 2000). Les PCR sont réalisées dans un tampon final de 25 µL (tampon 1X, dNTP 200 µM, 817FD3 0,25 µM, 1536R 0,25 µM, *Taq* Polymerase 2U (Q-BIOgen), 1 µL de protéine T4 gp32 (Q-BIOgen), ADN extrait 20 ng). Les amplifications sont réalisées dans des thermocycleurs suivant le programme suivant: 3 mn 94°C (dénaturation initiale), 35 cycles de dénaturation (1 mn 94°C, 1 mn 57°C-hybridation, 1 m n 72°C-élongation) puis 10 mn 72°C.

V.5.3 / Analyse T-RFLP

Après digestion par des enzymes de restriction des produits PCR purifiés, les fragments terminaux sont séparés par électrophorèse dans un séquenceur automatique à capillaire (CEQ 2000 XL, Beckman Coulter). La taille des fragments de restriction terminaux séparés (TRF) et l'intensité des pics correspondant sont calculés à partir du logiciel CEQ 8000 (genetic analysis system version 9.0, Beckman Coulter). Afin de différencier le bruit de fond des pics réellement présents dans l'échantillon, la pente des pics à leur base doit être supérieure ou égale à 5% et leur

hauteur supérieure ou égale à 2% de la hauteur du pic le plus important. La taille des fragments est calculée avec la méthode de régression Local Southern (encadré 3).

Encadré 3 : Protocole de l'analyse T-RFLP :

120 ng de produits PCR purifiés sont digérés par 12 U d'enzyme de restriction dans un volume de 100 μ L (3 h, 37°C). Pour les analyses T-RFLP 16S l'enzyme utilisée est *HaeIII* (GG'CC, Q-BIOgene) et pour l'analyse T-RFLP 18S l'enzyme utilisée est *MspI* (C'CGG, Q-BIOgene). Les produits de digestion sont précipités avec 2 μ L de glycogène (2,5 mg/mL), 10 μ L d'acétate de sodium (3M, pH 5,2) et 150 μ L d'éthanol (96°, -20°C). Après centrifugation (15 mn, 15000 g, 4°C) les culots sont rincés deux fois avec 200 μ L d'éthanol (70°, -20°C) et centrifugés à nouveau (5 mn, 15000 g, 4°C). Après séchage, les culots sont re-suspendus dans 60 μ L de SLS (Sample Loading Solution, Beckman Coulter) et 30 μ L de mix T-RFLP (1,2 μ L de standard de taille, Size-Standard-600, Beckman Coulter, plus du SLS). Ainsi on obtient 90 μ L de mix que l'on répartit dans 3 puits d'analyse recouverts d'huile minérale (mineral oil, Beckman Coulter).

Le programme de l'électrophorèse du séquenceur à capillaire (CEQ 2000 XL, Beckman Coulter) consiste en une dénaturation (2 min, 90°C), une injection à 2000 V pendant 30 s et une séparation des fragments terminaux à 4800 V pendant 70 min.

V.5.4 / Traitement des données de T-RFLP

Les fragments séparés entre 60 et 640 pb sont analysés. L'intensité de fluorescence de chaque pic est divisée par la fluorescence totale de l'échantillon analysé. Les fragments sont ensuite répartis en classes de taille à partir du plus grand d'entre eux avec un pas de 1,25 pb. Cette étape permet d'avoir des classes communes entre les échantillons analysés et ainsi de pouvoir les comparer. Pour un échantillon, 3 séparations par électrophorèse ont été réalisées et donnent en général des profils assez semblables. Cependant, quelques problèmes relatifs au logiciel d'analyse ayant été détectés, on réalise une moyenne de ces trois profils pour n'en faire qu'un. Pour ce faire, seuls les fragments présents dans au moins 2 des 3 profils sont conservés et la valeur d'intensité de ce fragment est la moyenne des 2 ou 3 valeurs de chaque profil.

Les données de T-RFLP sont finalement arrangées dans une matrice d'intensités relatives contenant en ligne les échantillons à analyser (traitements) et en colonnes les classes de taille de fragments (Janvier, 2007).

V.6 / Analyses chimiques

Les analyses physico-chimiques ont été réalisées par le Laboratoire d'Analyse des Sols (LAS) de l'INRA-Arras : teneur en carbone organique (C) après décarbonatation (NF ISO 10694) et teneur en azote total (NF ISO 13878). Les résultats sont exprimés en g.kg^{-1} de sol. Ces mesures ont été réalisées sur le site de Lyon aux profondeurs 0-7 / 7-18 et 18-30 cm et aux profondeurs 0-7 / 7-12 et 12-22 cm pour le site de Kerguéhenec.

Les stocks de C et N (t.ha^{-1}) sont calculés pour chaque horizon en fonction des teneurs en C ou N, de la densité apparente et de la profondeur (p) de l'horizon correspondant ($C \times \rho_H \times p$).

V.7 / Fractionnement granulo-densimétrique des MOS

Cette analyse a été effectuée pour deux traitements de travail du sol (labour traditionnel et travail du sol réduit) sur le site de Lyon, afin de comparer à court terme (3 ans, prélèvements mars 2007) l'effet d'un changement de pratique culturale et du niveau de tassement du sol sur le pool labile de la MOS. Cet indicateur permet d'étudier l'effet du labour classique et d'une technique de conservation sur la localisation et la quantité de matière organique particulaire (MOP) au sein du profil de sol et au sein des zones structurales différentes (zones Γ ou Δ). Les MOP ont un turn-over plus rapide et sont donc une source de C et de nutriments pour les microorganismes du sol (Haynes, 2005). Cependant, l'utilisation de cette ressource trophique peut être limitée du fait de sa localisation au sein de pores inaccessibles aux microorganismes du sol (Balesdent *et al.*, 2000).

Les échantillons de sol analysés sont issus du prélèvement de mars 2007. On a ainsi 3 profondeurs de prélèvements : 0-7 / 7-17 / 17-30 cm et deux ou trois types de mottes par horizon : Γ , Δ L3 et Δ L1/L2. Une dizaine de mottes de chaque type sont déstructurées à la main et mélangées afin d'avoir un échantillon représentatif. Les résidus grossiers de MO ne sont pas retirés. Sur chacun des échantillons on récupère 3 fractions organiques ($\text{MOP} > 2$ mm, $0,2 < \text{MOP} < 2$ mm et $0,05 < \text{MOP} < 0,2$ mm), 3 fractions minérales (> 2 mm, $0,2-2$ mm et $0,05-0,2$ mm) et une fraction organo-minérale ($< 0,05$ mm) que l'on pèse. Les différentes fractions sont séchées (105°C) et leurs teneurs totales en C et N sont déterminées par combustion et réduction de l'échantillon sous flux d' O_2 à 1000°C avec un analyseur élémentaire

Carlo Erba NA 2500 à flux continu. Les teneurs en C et N des fractions minérales sont en général identiques entre les échantillons analysés pour un type de sol donné. Les teneurs en C et N de chacune des fractions minérales ont donc été mesurées sur quelques échantillons et extrapolées à l'ensemble des fractions. Par ailleurs, les teneurs en C et N de la fraction organo-minérale doivent être analysés après lyophilisation. Cette étape est consommatrice de temps (4 jours pour lyophiliser un échantillon). Afin de réduire le temps de manipulation, les teneurs en C et N de cette fraction ont été obtenues par différence entre la teneur totale en C et N de l'échantillon et les teneurs en C et N des fractions organiques et minérales supérieures à 0,05 mm. Les teneurs en C et N de cette fraction organo-minérale ont été mesurées sur quelques échantillons afin de vérifier la variabilité de la mesure de cette fraction. Cependant, le sol étudié contient une quantité élevée de carbonates (220 g.kg^{-1}) et les échantillons n'ont pas été décarbonatés avant le dosage des teneurs en C et N totales et de la fraction organo-minérale. Les résultats obtenus pour ces dosages n'ont donc pas été utilisés dans ce travail. L'influence des carbonates sur les fractions de MOP est par contre considérée comme nulle ou insignifiante car ces fractions sont exclusivement composées de résidus organiques "débarassés" des particules de sol.

Le protocole utilisé pour ce fractionnement granulo-densimétrique est illustré par la Figure 13.

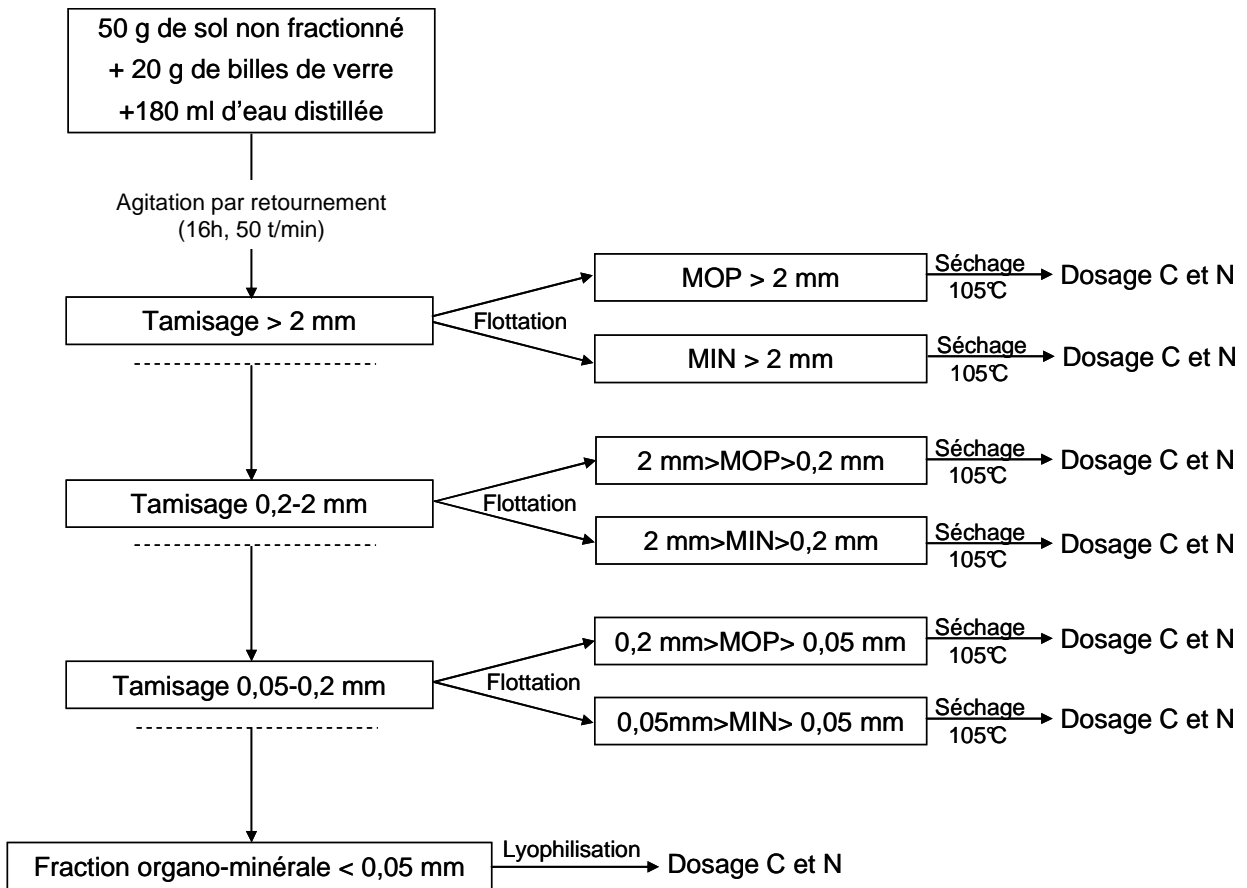


Figure 13: Méthode de fractionnement granulo-densimétrique utilisée. MOP: matière organique particulaire; MIN: fraction minérale

VI / Analyses des données

Les analyses statistiques ont été faites à partir du logiciel *StatView*. Le test statistique utilisé est celui de PLSD de Fisher ("least significant difference method"). Il est utilisé pour tester l'hypothèse nulle que toutes les moyennes de la population sont égales. Le seuil de significativité de ce test est de 5%. Les différences significatives entre deux échantillons sont marquées d'un astérisque (*) et les groupes homogènes (non différents significativement) sont symbolisés par une lettre commune.

Sur le site de Kerguéhennec, les prélèvements ont été effectués sur un seul bloc (bloc 2) ce qui "maximise" l'effet traitement du fait d'une variance résiduelle nulle. Les prélèvements sur le site de Thil ont été faits sur les 2 premiers blocs.

La structure des communautés microbiennes (T-RFLP) est appréhendée par analyse en composantes principales (ACP) avec le logiciel ADE-4 (Thioulouse *et al.*, 1997). C'est une projection d'une matrice de données (n dimensions) sur un plan factoriel à 2 dimensions dont les premiers axes factoriels (appelées composantes principales) conservent la plus grande part de la variabilité du jeu de données de départ. On obtient ainsi une représentation graphique d'un jeu de données complexes. Sur un plan factoriel donné, deux échantillons séparés graphiquement indiquent que la structure de leurs communautés microbiennes est *a priori* différente. La significativité des structures graphiques révélées par l'ACP est testée par des tests de Monte-Carlo. "Ce test consiste en des permutations aléatoires (1000) au sein des données : les valeurs des variables pour un échantillon sont affectées à un autre échantillon. Pour chaque observation, la statistique de test est calculée, et on obtient une distribution. La valeur de la statistique de test est aussi calculée pour le jeu de données réel. Si cette valeur se place dans la distribution, il n'y a pas de raison pour que la structure observée ne soit pas due au hasard. Si au contraire elle est extrême par rapport à la distribution du jeu de données réel, alors cette structure n'est pas due au hasard" (Janvier, 2007) et peut être attribuée aux traitements étudiés.

Lorsque les tests de permutation mettent en évidence une structure significative, des ACP inter-classes peuvent être réalisées (Culhane *et al.*, 2002). L'ACP est réalisée en prenant en compte l'échantillon "moyen" de chaque classe qui sont alors projetés sur le plan factoriel. Cette représentation permet d'améliorer la visualisation graphique des effets observés.

VII/ Effets du mode de préparation et de conservation des échantillons sur les paramètres microbiens quantitatifs mesurés

Nous avons tout d'abord voulu vérifier l'influence du mode de conservation et de préparation des échantillons sur la biomasse microbienne et l'activité potentielle de minéralisation du C. Ces mesures s'effectuent normalement sur des échantillons de sol composites (mélange entre plusieurs points de prélèvement par horizon) tamisés à 2 ou 4 mm. L'hypothèse de départ était que l'échantillonnage stratifié horizontal (type de motte) réalisé au sein du profil cultural et la conservation de la

structure des mottes jusqu'au moment de l'analyse, apportait plus de précisions sur le fonctionnement microbien du sol qu'un échantillonnage composite tamisé.

Avant toute chose, nous nous sommes assurés lors de chaque prélèvement que les teneurs en C et N entre plusieurs mottes d'un même type par horizon étaient comparables, et que les teneurs en C et N des mottes Γ et Δ n'étaient pas différentes. Cette vérification permet d'attribuer les éventuelles différences de fonctionnement microbien entre les types de mottes à leur structure et non pas à leur teneur respective en C et N.

Ensuite, pour vérifier l'hypothèse de départ nous avons comparé 3 modes de préparation des échantillons :

- la biomasse microbienne (BM) et le potentiel de minéralisation du C (Cmin) mesurés sur 4 mottes Γ et 4 mottes Δ individuelles, conservées à + 4°C en l'état et déstructurées juste avant analyse ;
- la BM et le Cmin mesurés sur un échantillon de plusieurs mottes Γ et de plusieurs mottes Δ tamisées à 4 mm et conservés à + 4°C ;
- la BM et le Cmin mesurés sur un échantillon composite issu du mélange entre plusieurs mottes Γ et Δ , tamisées à 4mm et conservées à + 4°C.

Ces tests ont été réalisés à partir des prélèvements effectués en mars 2006 sur le site de Kerguéhennec, au sein du profil cultural de la modalité travail du sol réduit (TR). Nous avons choisi ce site car les traitements sont différenciés depuis plus longtemps que sur le site de Lyon les éventuelles différences de teneurs ou d'activités biologiques entre les deux types de mottes devraient être plus prononcées que sur ce site.

Conclusion :

Les résultats montrent qu'il n'y a pas de différences significatives de teneurs en C ou N entre les mottes Γ et Δ . Les teneurs en C et N présentées par la suite dans ce travail correspondent à une moyenne des teneurs des mottes Γ et Δ par horizon.

Le mode de préparation et de conservation des échantillons à, par contre, un effet sur les paramètres biologiques mesurés. Le stockage des mottes en l'état et leur déstructuration juste avant l'analyse permet de mettre en évidence des différences plus fines en termes de fonctionnement microbien. Le tamisage des

mottes à 4 mm lisse les différences de BM entre les types de mottes, tandis que des différences significatives de BM apparaissent entre ces deux types de mottes lorsque leur structure est conservée jusqu'au moment de l'analyse (Annexe 2, Tableau 1). Ce résultat suggère que le tamisage des mottes libère des substrats organiques physiquement protégés au sein des mottes Δ . Kristenssen *et al.* (2000) ont en effet montré que la déstructuration des échantillons de sol libère des substrats organiques physiquement protégés. Cependant, ce résultat ne s'applique pas au C_{min} (Annexe 2, Tableau 2). Le tamisage n'engendre pas une augmentation du potentiel de minéralisation et aucune différence significative n'apparaît entre les mottes Γ et Δ . Ce résultat va dans le sens des observations de Oorts (2006) selon lesquelles la déstructuration des échantillons influence peu la minéralisation du C.

L'échantillonnage adopté au sein du profil cultural et le mode de conservation des échantillons apportent des indications plus précises sur le fonctionnement microbien du sol qu'un échantillonnage composite moyen par horizon. Dans la suite de ce travail nous avons donc conservé ce mode de traitement des échantillons, à savoir une conservation de la structure des mottes jusqu'au moment de l'analyse. Cependant, ce mode de conservation et de préparation des échantillons génère une plus forte variabilité des résultats (résidus grossiers de MO à l'intérieur des mottes non enlevés lors du tamisage), ce qui engendre des écarts-types importants sur les paramètres mesurés. Afin de corriger cet effet en éliminant des mesures "aberrantes", nous mesurerons les paramètres microbiologiques quantitatifs sur 4 mottes individuelles de chaque type par horizon en veillant à éliminer les résidus grossiers de MO à l'intérieur des mottes.

Chapitre 3 :
**Effet du mode de travail du sol sur la
structure du sol et l'évolution des stocks de
carbone et d'azote**

Chapitre 3 : Effet du mode de travail du sol sur la structure du sol et l'évolution des stocks de carbone et d'azote

Ce chapitre est consacré à l'étude des modifications structurales et de l'évolution des teneurs et stocks en C et N. Les méthodes utilisées pour les observations de la structure du sol et les mesures des teneurs, stocks et fractions granulométriques de la MOS ont été décrites dans le chapitre 2. Ces mesures ont été réalisées sur les deux sites expérimentaux. Les résultats du site de Lyon permettent d'étudier la mise en place progressive d'un état structural type, ou de "pseudo-équilibre", comme le définit Guérif (1994), ainsi que les évolutions à court terme des teneurs et stocks de MO. Les résultats du site de Kerguéhenec permettront de confirmer ou d'infirmer les tendances observées sur le site de Lyon, plus jeune et donc, *a priori*, moins différencié que celui de Kerguéhenec. De plus, ce chapitre contient les résultats issus du fractionnement granulo-densimétrique des MOS, effectué sur deux traitements du site de Lyon : labour traditionnel et travail du sol réduit. Ces résultats donnent des indications sur l'effet du mode de travail du sol et du tassement sur les dynamiques à court terme des MOS.

Deux parties composent ce chapitre. La première est consacrée aux modifications structurales, *via* l'observation des profils culturaux, à la quantification de la proportion de zones compactées au sein du profil de sol et à la mesure de la porosité totale des horizons et de l'évolution du pourcentage de saturation de la porosité du sol en eau (WFPS). Ces résultats sont ensuite discutés. La seconde partie est consacrée à l'étude de l'évolution des teneurs et stocks de C et N puis à l'effet du labour traditionnel et du travail du sol réduit sur les fractions granulo-densimétrique des MOS. Ces résultats sont discutés et une conclusion finale synthétise les résultats obtenus.

I / Modifications de la structure du sol engendrées par les techniques de travail du sol

I.1 / Description des profils culturaux en mars 2006 et 2007 sur le site de Lyon

Quelques exemples des photos à partir desquelles ont été réalisés les schémas des profils culturaux du site de Lyon sont présentés en Annexe 3. L'observation des profils s'est faite en mars 2006 et 2007 soit, respectivement, 11 mois après la première application des traitements et 4 mois après la troisième application des traitements (Figure 5).

En 2006, l'horizon H1 a été créé par le passage du mixter après la récolte du maïs. Cet horizon est riche en résidus de culture broyés (cannes de maïs) et en terre fine (Figure 14). Seul l'horizon H1 de la modalité TS se distingue des autres. Il a été créé par un passage de mixter et de herse rotative pour le semis de l'avoine ; sa structure est fragmentaire (F), la terre fine est agglomérée par le chevelu racinaire de l'avoine.

La structure des horizons H5 des modalités labourées (LT et LA) n'a pas subi de contraintes fortes depuis le labour. Elle est légèrement prise en masse sous l'action du climat. La structure en L3 est ouverte à tendance continue (o/c), voire continue avec de nombreux plans de fragmentations (C_{RR}). Sous les passages de roues (L1/L2) la structure est plus "rappuyée" et est de type C_{RR} . La structure de l'horizon H5 de la modalité TR est assez semblable à celles des modalités labourées, elle est également de type C_{RR} .

Les horizons non fragmentés et anciennement labourés (H6) des modalités LA, TR et TS présentent une structure continue avec de nombreux plans de fragmentation (C_{RR}) en L3. Sous les passages de roues (L1/L2) la structure du sol des modalités LA et TR prend en masse progressivement. Elle est continue avec peu de plans de fragmentation (C_R) voire plus dégradée (C_{Δ}). L'état structural de la modalité TS en L1/L2 semble moins affecté par les passages d'engins et l'absence de fragmentation mécanique que les modalités LA et TR (état structural de type C_{RR}).

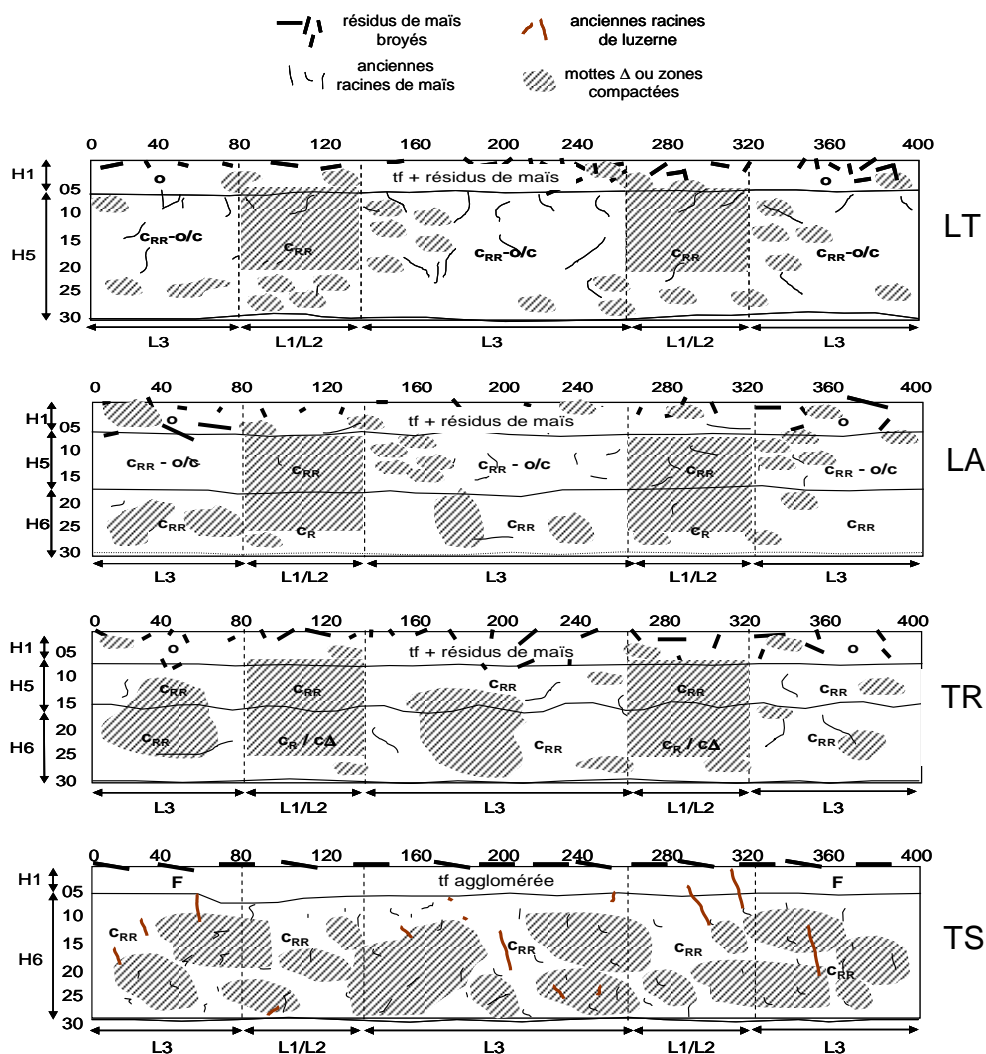


Figure 14 : Représentation schématique des profils cultureux du site de Lyon en mars 2006.

En 2007, l'horizon H1 (créé par la herse rotative) présente une structure non dégradée comparable entre les modalités. La structure est ouverte (o) ou soudée facilement discernable (SF) (Figure 15). Des zones fortement compactées en L1/L2 sont présentes ($c\Delta$), dues aux passages répétés sur la parcelle du tracteur pour le désherbage mécanique (herse étrille).

La structure des horizons H5 des modalités LT, LA et TR est également non dégradée, de type ouvert en L3 (o ou SF). Par contre, sous les passages de roues (L1/L2) la structure des modalités LA et TR est fortement dégradée ; elle est continue et fortement compactée ($c\Delta$). L'effet des passages de roues semble moins prégnant pour la modalité LT ; la structure est dégradée mais elle présente toutefois quelques plans de fragmentation (c_R).

La structure de l'horizon H6 de la modalité LA est homogène et peu dégradée (prise en masse sous l'action du climat). Elle est continue avec de nombreux plans de

fragmentation (c_{RR}). En revanche, la structure des horizons H6 des modalités TR et TS est fortement dégradée et compactée ($c\Delta$).

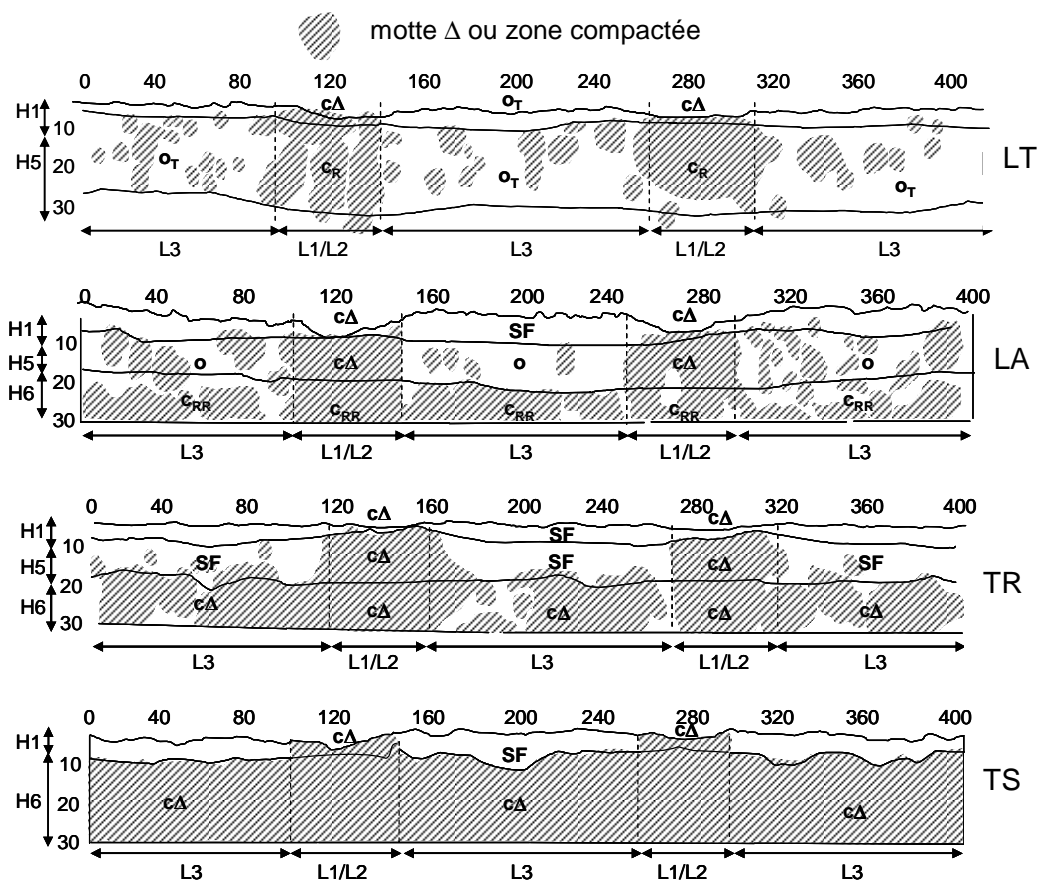


Figure 15 : Représentation schématique des profils culturaux du site de Lyon en mars 2007

I.2/ Description des profils culturaux en mars 2006 et 2007 sur le site de Kerguéhenec

Sur le site de Kerguéhenec, les profils culturaux ont été décrits en mars 2006 et 2007, soit respectivement, 4 mois après la 4^{ème} et la 5^{ème} année d'application des traitements sous des cultures de pois d'hiver et de triticale (Figure 6). Quelques exemples des photos à partir desquelles ont été réalisés les schémas des profils culturaux du site de Kerguéhenec sont présentés en annexe 4.

La structure de l'horizon H1 est comparable entre les modalités ; elle est ouverte (o) et présente quelques zones plus compactées sous les passages de roues (c_{RR}), sauf pour la modalité TS (Figure 16).

La structure des horizons H5 des modalités labourées (LT et LA) n'a pas subi de contrainte forte depuis le labour. La structure du sol s'est légèrement prise en

masse sous l'action du climat et présente une structure ouverte à tendance continue (o/c) voire continue avec de nombreux plans de fragmentations (C_{RR}) par endroits. La structure de l'horizon H5 de la modalité TR est plus homogène que celle des modalités labourées ; elle est ouverte à tendance continue (o/c) en L3 et continue avec de nombreux plans de fragmentation en L1/L2 (C_{RR}).

La structure des horizons H6 des modalités LA, TR et TS est identique et homogène. La structure du sol est légèrement prise en masse sous l'action du climat, elle est continue avec de nombreux plans de fragmentation (C_{RR}) sous et hors des passages de roues.

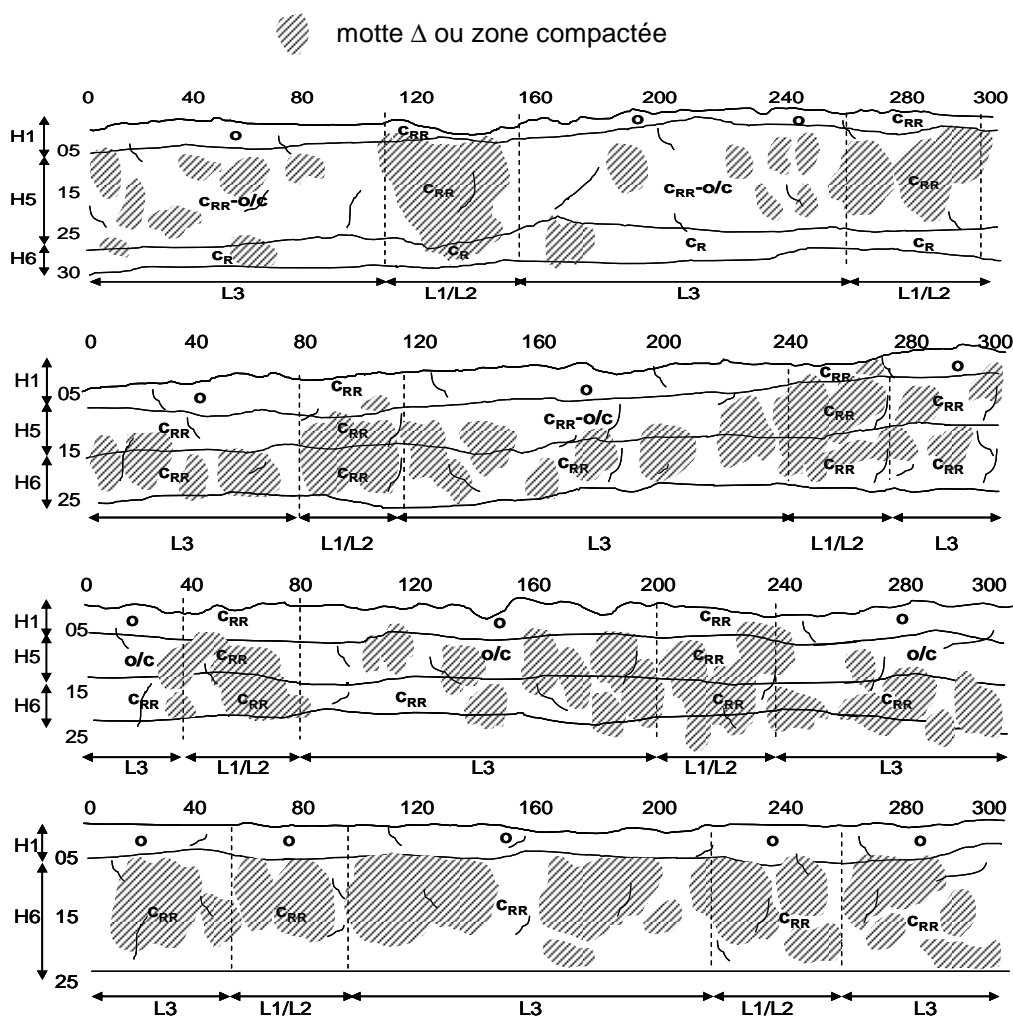


Figure 16: Représentation schématique des profils culturaux du site de Kerguéhenec en mars 2006.

En 2007, la structure de l'horizon H1 est identique entre les modalités LT, LA et TR. Elle est ouverte dans les zones L3 (o) et plus rappuyée sous les passages de roues (o_T) (Figure 17). La structure de H1 de la modalité TS a quant à elle subi une

dégradation modérée et est de type continu avec de nombreux plans de fragmentation (C_{RR}).

La structure des horizons H5 des modalités LT et LA est identique et non dégradée en L3 (structure ouverte, o) et plus rappuyée sous les passages de roues (C_{RR}). La structure en H5 de la modalité TR est légèrement plus dégradée que celle des modalités labourées en L3 ; elle est continue avec de nombreux plans de fragmentation (C_{RR}). En revanche, sous les passages de roues (L1/L2) elle est fortement dégradée et compactée (C_{Δ}).

La structure des horizons H6 des modalités LA et TR est identique ; elle est dégradée et compactée mais conserve toutefois quelques plans de fragmentation ($C_{R\Delta}$). La structure de la modalité TS semble peu affectée par l'absence de fragmentation mécanique. Le sol prend en masse sous l'action du climat ; la structure est homogène et continue avec de nombreux plans de fragmentation (C_{RR}).

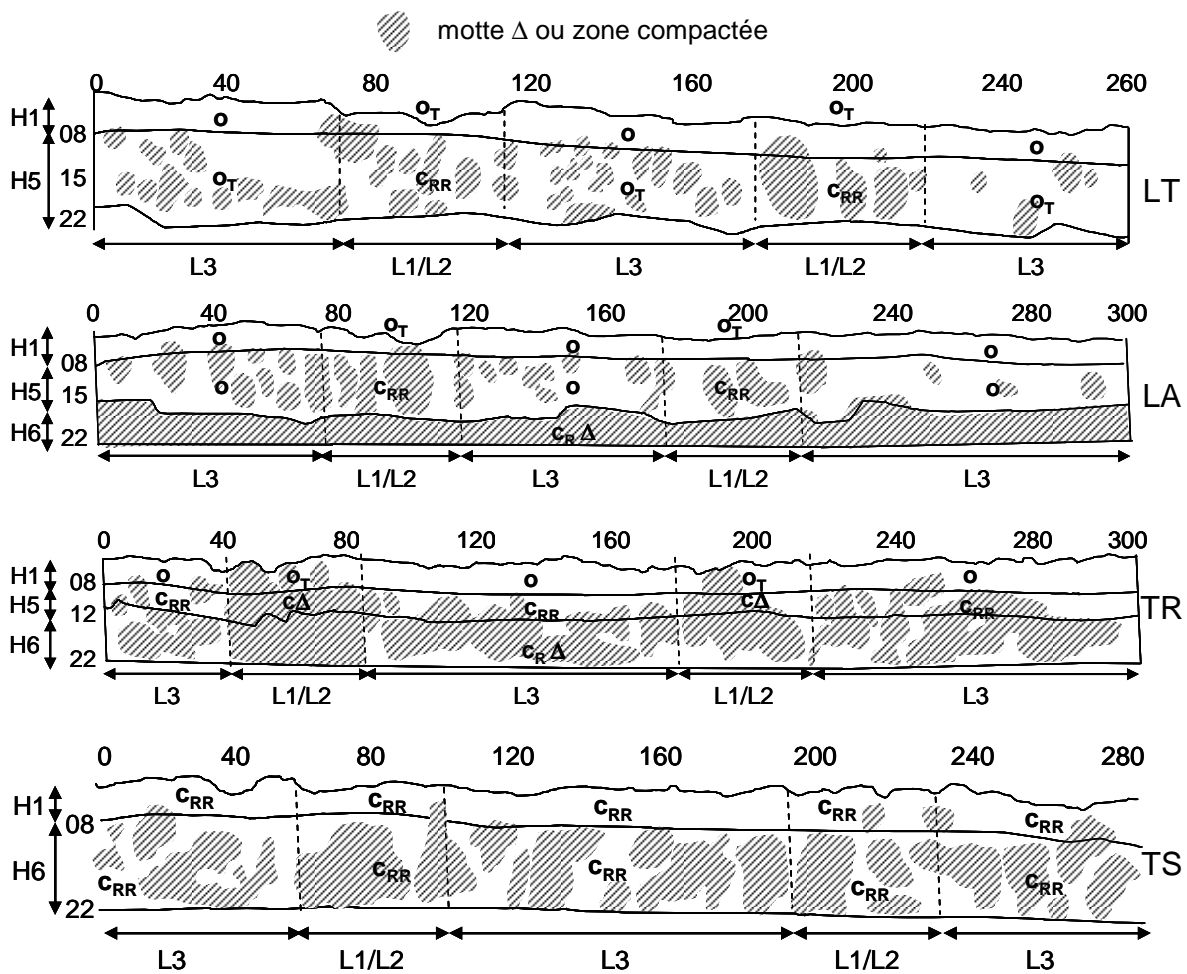


Figure 17 Représentation schématique des profils culturaux du site de Kerguéhenec en mars 2007.

I.3 / Proportion de zones Δ au sein des profils culturaux

Les zones tassées d'état interne Δ au sein de chaque profil cultural ont été mesurées à l'aide de prises de vues photographiques puis d'analyses d'images (cf. chapitre 2). Les proportions indiquées dans la figure 18 représentent la surface occupée par des zones compactées (assemblage de mottes Δ) par rapport à la surface totale de l'horizon ou par rapport à la surface totale de chaque profil. En 2006 sur le site de Lyon, l'écart-type n'a pu être calculé en raison d'un problème de prises de vues photographiques sur le bloc 2.

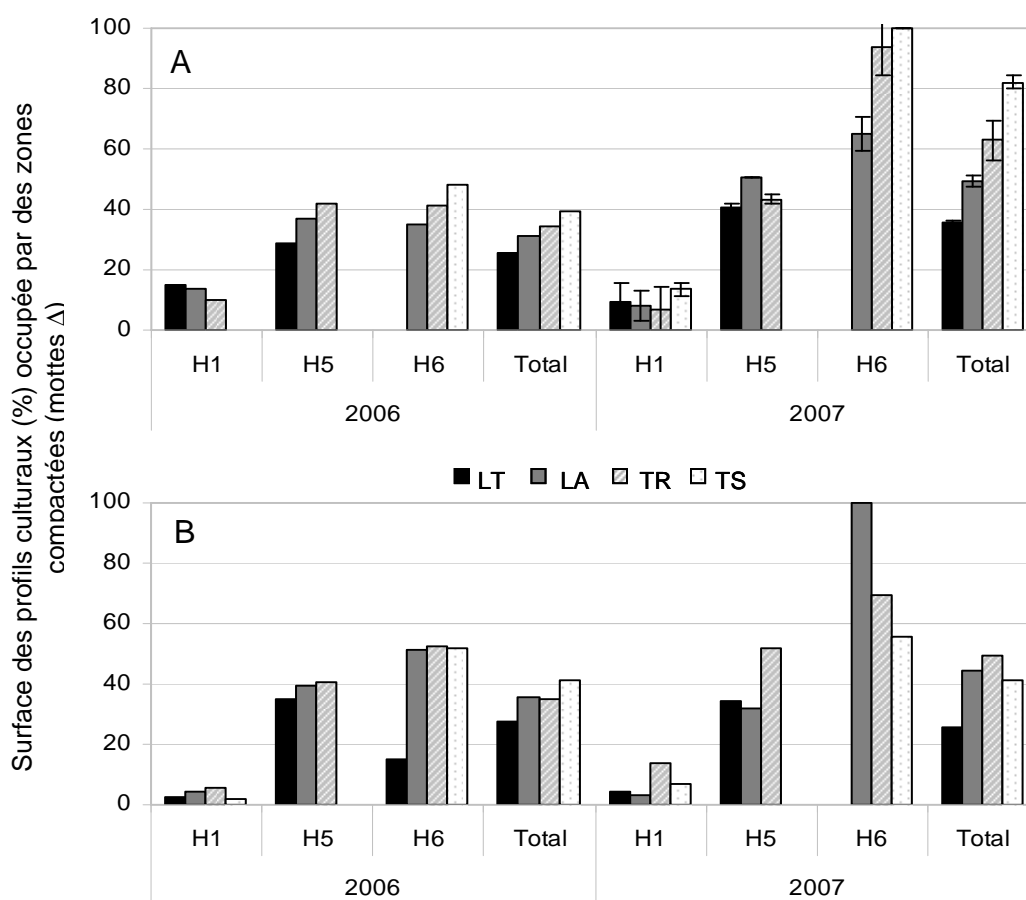


Figure 18: Proportions de zones compactées au sein de chaque profil cultural sur le site de Lyon (A) et Kerguéhennec (B) par année et par horizon.

Pour le site de Lyon, le labour traditionnel (quels que soient l'année et l'horizon) permet de réduire la surface du profil occupée par des mottes Δ par rapport aux autres modalités. Quand on considère la surface totale occupée par des mottes Δ , la modalité TS a une proportion de zones compactées plus importante que les autres modalités : 40% de sa surface totale contre 35, 30 et 25% de la surface totale des modalités TR, LA et LT respectivement (Figure 18).

En 2007, la surface totale des profils culturaux occupée par des zones compactées a augmenté par rapport à 2006 : +10 % pour LT, 18 % pour LA, 29 % pour TR et 43 % pour TS. Ceci est dû à l'augmentation des surfaces compactées en H5 pour les modalités LT et LA (+ 12 et 14 % respectivement) et surtout à une prise en masse globale des horizons H6 des modalités LA, TR et TS (+ 30, 52 et 52 % par rapport à 2006 respectivement).

Sur le site de Kerguéhennec en 2006 (Figure 18-B), peu de différences apparaissent entre les modalités LT, LA et TR pour l'horizon H5. Par contre la surface totale des profils occupée par des zones compactées est inférieure pour LT par rapport aux autres modalités (28 % pour LT contre 35 % pour LA et TR et 41 % pour TS). Cette différence vient de la surface occupée par des zones compactées au sein de l'horizon H6 des modalités LA, TR et TS (environ 50%).

En 2007, la surface occupée par des zones compactées au sein des horizons H5 reste constante pour LT par rapport à 2006 et augmente de 11 % pour TR et diminue de 8 % pour LA. La surface totale des profils occupée par des zones compactées en 2007 est également inférieure pour la modalité LT. Les surfaces totales restent constantes entre 2006 et 2007 pour LT et TS tandis qu'elles augmentent de 9 et 14 % pour LA et TR respectivement. Cette progression vient de l'augmentation des surfaces compactées au sein de H6 entre 2006 et 2007, augmentation de 49 et 17 % pour LA et TR respectivement.

En résumé, l'observation des profils culturaux apporte plusieurs indications sur :

- l'effet site : les états structuraux observés et les proportions de zones Δ dans les profils sont comparables en 2006. Mais, en 2007 la structure du sol sur le site de Kerguéhennec est moins dégradée que celle de Lyon notamment pour les traitements TR et TS et ce, malgré l'ancienneté du dispositif de Kerguéhennec ;
- l'effet année : la structure du sol sur le site de Lyon se dégrade et la surface des zones Δ au sein du profil augmente entre 2006 et 2007 alors que la structure des différentes modalités est comparable entre les deux années sur le site de Kerguéhennec ;
- l'effet traitement : le LT permet de réduire la surface des zones Δ au sein des profils culturaux par rapport aux autres modalités et les horizons qui ne sont plus fragmentés se prennent en masse.

Les mesures microbiologiques ont été réalisées sur les mottes Γ et Δ prélevées dans les profils culturaux au moment de leur observation. Leur masse volumique a été mesurée (méthode au pétrole, cf. chapitre 2) afin de vérifier *a posteriori* leur distinction faite au champ et d'estimer les conditions de vie des microorganismes du sol au sein de ces éléments structuraux. La Figure 19 présente les résultats de cette mesure pour chaque site, année et horizon de prélèvement.

Quels que soient le traitement, l'horizon, le site ou l'année, la masse volumique des mottes Δ est significativement supérieure à celle des mottes Γ (en moyenne + 0,14 et + 0,11 g.cm^{-3} sur le site de Lyon et de Kerguéhennec respectivement). Les lettres sur la figure 19 indiquent les différences significatives ($p < 0,05$) entre les mottes Γ et Δ d'un même horizon et d'un même traitement.

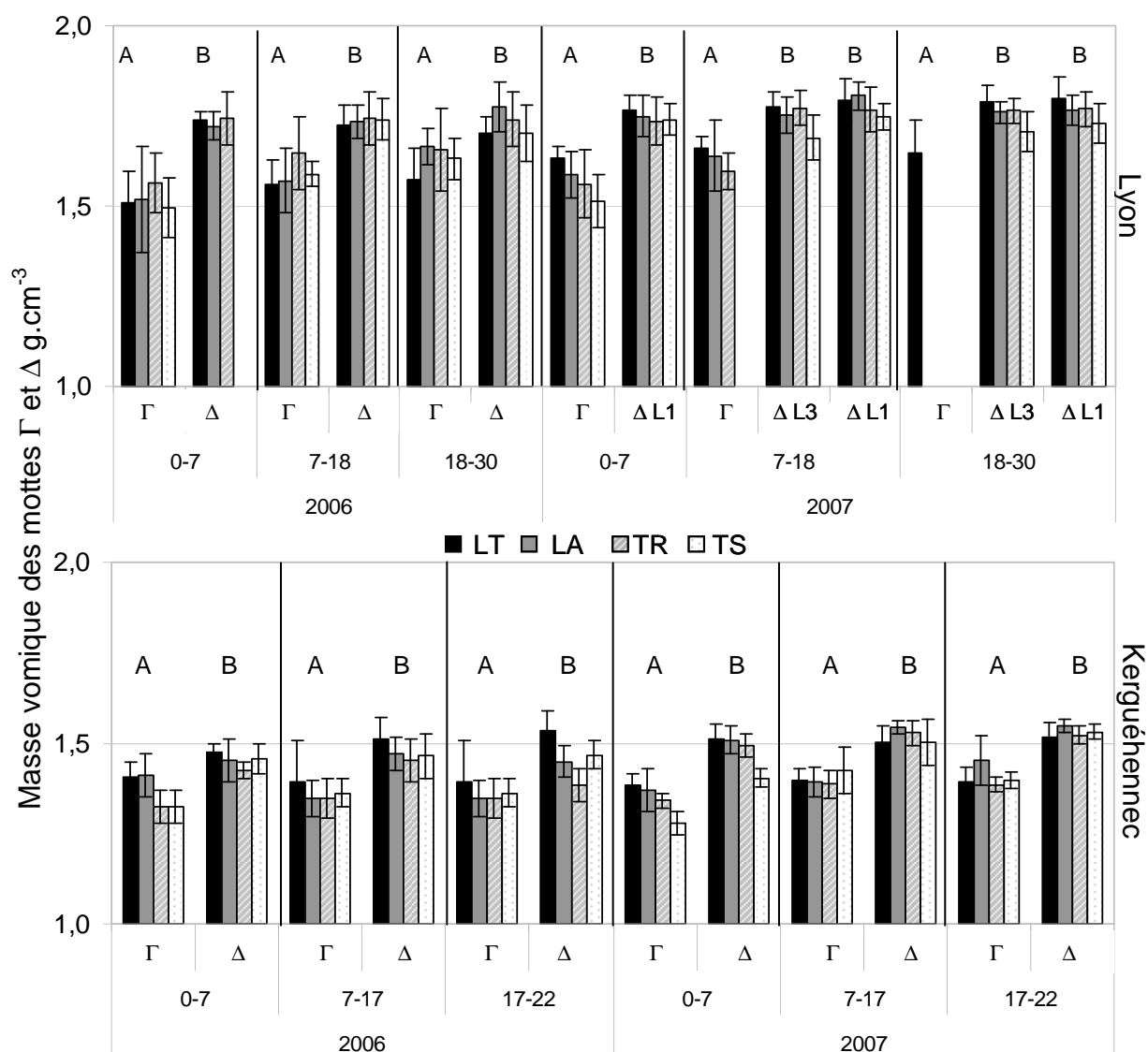


Figure 19: Masse volumique des mottes Γ et Δ (g.cm^{-3}) prélevées par horizon (cm) et par traitement sur le site de Lyon (A) et de Kerguéhennec (B) en mars 2006 et 2007.

I.4 / Masse volumique des horizons de prélèvements

I.4.1 / Site expérimental de Lyon

La mesure de la masse volumique des différents horizons du sol (méthode du cylindre calibré, cf. chapitre 2) révèle un début de stratification verticale sur le site de Lyon en 2006 (Tableau 6). La masse volumique du sol est moins importante en surface (0-7 cm) quelle que soit la modalité considérée, et elle diminue en deçà, notamment dans les horizons qui ne sont plus fragmentés par les outils de travail du sol (17-30 cm pour LA et TR et 7-30 cm pour TS). L'effet des passages d'engins agricoles sur les parcelles ne semble pas affecter la masse volumique des horizons (zone L1/L2). Au bout d'un an de différenciation des traitements sur le site de Lyon aucune différence significative entre les traitements n'est mise en évidence entre les traitements quel que soit l'horizon considéré et ce, malgré l'augmentation de la masse volumique des horizons des modalités LA, TR et TS qui ne sont plus mécaniquement fragmentés.

En 2007, la stratification verticale de la masse volumique des différents horizons s'accroît (Tableau 6). Elle augmente en profondeur dans les horizons qui ne sont plus fragmentés mécaniquement (17-30 cm pour les modalités LA et TR et 12-30 cm pour TS) tandis qu'elle reste homogène le long du profil de la modalité LT. En 2007, on observe une influence des zones de passage de roues sur les masses volumiques du sol. L'effet des passages d'engins (semis, désherbages mécaniques) est visible jusqu'à 17 cm de profondeur en général (22 cm pour LT et TS). Au-delà, le tassement qu'ils engendrent n'est plus significatif par rapport aux zones non roulées (L3). Après trois ans de différenciation des traitements sur le site de Lyon la masse volumique des différentes modalités se distingue à partir de 22 cm de profondeur. Au-delà de cette profondeur, la masse volumique de la modalité LT est significativement inférieure aux autres modalités ($p < 0,005$) qui ne se distinguent pas.

Tableau 6: Masse volumique des différents horizons en 2006 et 2007, site de Lyon.

Modalités	Mars 2006			Mars 2007		
	Profondeurs (cm)	Masse volumique (g.cm ⁻³)		Profondeurs (cm)	Masse volumique (g.cm ⁻³)	
		L3	L1/L2		L3	L1/L2
LT	2-7	1,39 ± 0,08 ^a	1,47 ± 0,08 ^a	2-7	1,19 ± 0,12^a	1,60 ± 0,07 ^b
	7-17	1,51 ± 0,09 ^b	1,53 ± 0,09 ^a	7-12	1,45 ± 0,12^b	1,62 ± 0,01 ^c
	17-27	1,54 ± 0,05 ^b	1,55 ± 0,08 ^a	12-17	1,44 ± 0,11^b	1,59 ± 0,03 ^{abc}
	27-32	1,55 ± 0,06 ^b	1,51 ± 0,04 ^a	17-22	1,46 ± 0,08^b	1,53 ± 0,05 ^a
				22-27	1,48 ± 0,08 ^b	1,54 ± 0,03 ^{ab}
			27-32	1,47 ± 0,11 ^b	1,53 ± 0,03 ^a	
LA	2-7	1,34 ± 0,10 ^a	1,30 ± 0,04 ^a	2-7	1,26 ± 0,09^a	1,58 ± 0,05 ^{ab}
	7-17	1,45 ± 0,05 ^b	1,50 ± 0,07 ^b	7-12	1,39 ± 0,09^b	1,54 ± 0,04 ^a
	17-27	1,51 ± 0,06 ^b	1,55 ± 0,10 ^b	12-17	1,42 ± 0,06^b	1,53 ± 0,05 ^a
	27-32	1,60 ± 0,05 ^c	1,55 ± 0,05 ^b	17-22	1,50 ± 0,06 ^c	1,60 ± 0,01 ^{bc}
				22-27	1,59 ± 0,05 ^d	1,64 ± 0,03 ^{bc}
			27-32	1,63 ± 0,04 ^d	1,65 ± 0,05 ^c	
TR	2-7	1,29 ± 0,12 ^a	1,27 ± 0,09 ^a	2-7	1,22 ± 0,07^a	1,61 ± 0,04 ^{ab}
	7-17	1,51 ± 0,07 ^b	1,46 ± 0,06 ^b	7-12	1,36 ± 0,10^b	1,58 ± 0,05 ^a
	17-27	1,55 ± 0,10 ^b	1,51 ± 0,07 ^b	12-17	1,47 ± 0,10^c	1,63 ± 0,04 ^{ab}
	27-32	1,58 ± 0,05 ^b	1,54 ± 0,03 ^b	17-22	1,59 ± 0,06 ^d	1,64 ± 0,01 ^{ab}
				22-27	1,64 ± 0,02 ^d	1,64 ± 0,02 ^b
			27-32	1,63 ± 0,02 ^d	1,65 ± 0,05 ^b	
TS	2-7	1,40 ± 0,04 ^a	1,43 ± 0,07 ^a	2-7	1,25 ± 0,06^a	1,53 ± 0,03 ^a
	7-17	1,48 ± 0,05 ^b	1,55 ± 0,07 ^b	7-12	1,39 ± 0,09^b	1,58 ± 0,03 ^{ab}
	17-27	1,56 ± 0,08 ^c	1,54 ± 0,04 ^b	12-17	1,52 ± 0,06^c	1,63 ± 0,05 ^b
	27-32	1,56 ± 0,04 ^c	1,52 ± 0,01 ^b	17-22	1,52 ± 0,06^c	1,63 ± 0,04 ^b
				22-27	1,58 ± 0,03 ^{cd}	1,62 ± 0,06 ^b
			27-32	1,61 ± 0,05 ^d	1,63 ± 0,03 ^b	

±: écart-type; les chiffres suivis d'une lettre commune ne sont pas statistiquement différents ($p < 0,005$) ; les chiffres en gras en L3 sont significativement supérieurs à leur homologue en L1/L2 ($p < 0,005$).

1.4.2 / Site expérimental de Kerguéhennec

En 2006, les horizons d'une même modalité se différencient peu (Tableau 7). Seules les masses volumiques des horizons 17-22 cm des modalités LA et TS augmentent par rapport à celles des horizons supérieurs. Sur ce site, après 4 années de différenciation des traitements les différences entre les traitements sont significatives. Curieusement la modalité TS présente une masse volumique significativement inférieure aux autres modalités quel que soit l'horizon considéré et ce, malgré toute absence de fragmentation mécanique.

En 2007, la masse volumique des horizons qui ne sont plus fragmentés mécaniquement a tendance à augmenter en L3 (Tableau 7). Elle augmente à partir de 17 cm de profondeur pour la modalité LA et à partir de 12 et 7 cm pour les modalités TR et TS respectivement. La masse volumique du sol est homogène sur l'ensemble du profil cultural de la modalité LT. Le tassement occasionné par les passages d'engins est peu visible sur ce site. Après 5 ans d'application des

traitements la masse volumique des différentes modalités se distingue. L'horizon 0-7 cm de la modalité TS présente une masse volumique significativement inférieure aux autres modalités ($p < 0,005$). Par contre, pour l'horizon 12-17 cm, la modalité TS a une masse volumique significativement supérieure à celle des modalités labourées (LT et LA). Aucune différence entre les modalités n'apparaît en dessous de 17 cm de profondeur.

Tableau 7: Masse volumique des horizons en 2006 et 2007 site de Kerguéhenec.

Modalités	Mars 2006		Mars 2007		
	Profondeurs (cm)	Masse volumique (g.cm ⁻³)	Profondeurs (cm)	Masse volumique (g.cm ⁻³)	
				L3	L1/L2
LT	2-12	1,23 ± 0,07 ^a	2-7	1,23 ± 0,08 ^a	1,26 ± 0,09 ^a
	12-17	1,27 ± 0,06 ^a	7-12	1,23 ± 0,05 ^a	1,30 ± 0,01 ^a
	17-22	1,31 ± 0,07 ^a	12-17	1,20 ± 0,01 ^a	1,24 ± 0,00 ^a
			17-22	1,22 ± 0,02 ^a	1,22 ± 0,08 ^a
LA	2-12	1,22 ± 0,06 ^a	2-7	1,19 ± 0,01 ^a	1,32 ± 0,04 ^a
	12-17	1,24 ± 0,04 ^a	7-12	1,22 ± 0,03 ^a	1,25 ± 0,05 ^a
	17-22	1,37 ± 0,04 ^b	12-17	1,16 ± 0,03 ^a	1,26 ± 0,07 ^a
			17-22	1,31 ± 0,07 ^b	1,26 ± 0,10 ^a
TR	2-12	1,28 ± 0,07 ^a	2-7	1,17 ± 0,03 ^a	1,17 ± 0,06 ^a
	12-17	1,32 ± 0,04 ^a	7-12	1,24 ± 0,04 ^a	1,23 ± 0,01 ^a
	17-22	1,32 ± 0,03 ^a	12-17	1,27 ± 0,06 ^{ab}	1,30 ± 0,02 ^{ab}
			17-22	1,27 ± 0,01 ^b	1,40 ± 0,07 ^b
TS	2-12	1,11 ± 0,06 ^a	2-7	1,06 ± 0,05 ^a	1,11 ± 0,07 ^a
	12-17	1,08 ± 0,05 ^a	7-12	1,19 ± 0,03 ^b	1,28 ± 0,01 ^b
	17-22	1,23 ± 0,05 ^b	12-17	1,29 ± 0,05 ^c	1,24 ± 0,05 ^{ab}
			17-22	1,25 ± 0,05 ^{bc}	1,25 ± 0,07 ^{ab}

±: écart-type; les chiffres suivis d'une lettre commune ne sont pas statistiquement différents ($p < 0,005$); les chiffres en gras en L3 sont significativement supérieurs à leur homologue en L1/L2 ($p < 0,005$).

I.5 / Taux de saturation en eau de la porosité du sol (WFPS)

I.5.1 / Site expérimental de Lyon

En mars 2006 sur le site de Lyon, l'effet profondeur sur le taux de saturation en eau de la porosité du sol n'est pas significatif, sauf pour les modalités LA et TR dont l'horizon 0-7 cm présente un taux de saturation moins important que les horizons sous jacents (Figure 20). L'influence des passages d'engins n'est pas visible sur les WFPS en 2006. En revanche, globalement, la porosité de la modalité LA est plus saturée en eau que celle des autres traitements ($p < 0,05$). La teneur en eau massique de cette modalité est en général plus élevée que celle des autres (Annexe 5, Tableau 1).

En mars 2007, on observe un gradient vertical de saturation de la porosité du sol en eau sur le site de Lyon (Figure 20). Le WFPS dans les zones non roulées (L3) est significativement inférieur sur 0-12 cm pour les modalités LT, LA et TR et sur 0-7 cm pour la modalité TS. Dans les zones du profil cultural compactées par les passages d'engins (L1/L2), ce rapport s'inverse et le WFPS des horizons de surface est généralement plus important que celui des horizons en deçà de 17 cm de profondeur. Ce taux est également plus élevé sous les passages de roues (L1/L2) qu'en dehors (L3). Cet effet demeure jusqu'à 12 cm de profondeur pour les modalités LA, TR et TS et jusqu'à 17 cm de profondeur pour la modalité LT. Globalement, la porosité de la modalité TS est moins saturée en eau que les autres modalités, et ce, quelle que soit la zone considérée (L3 ou L1/L2).

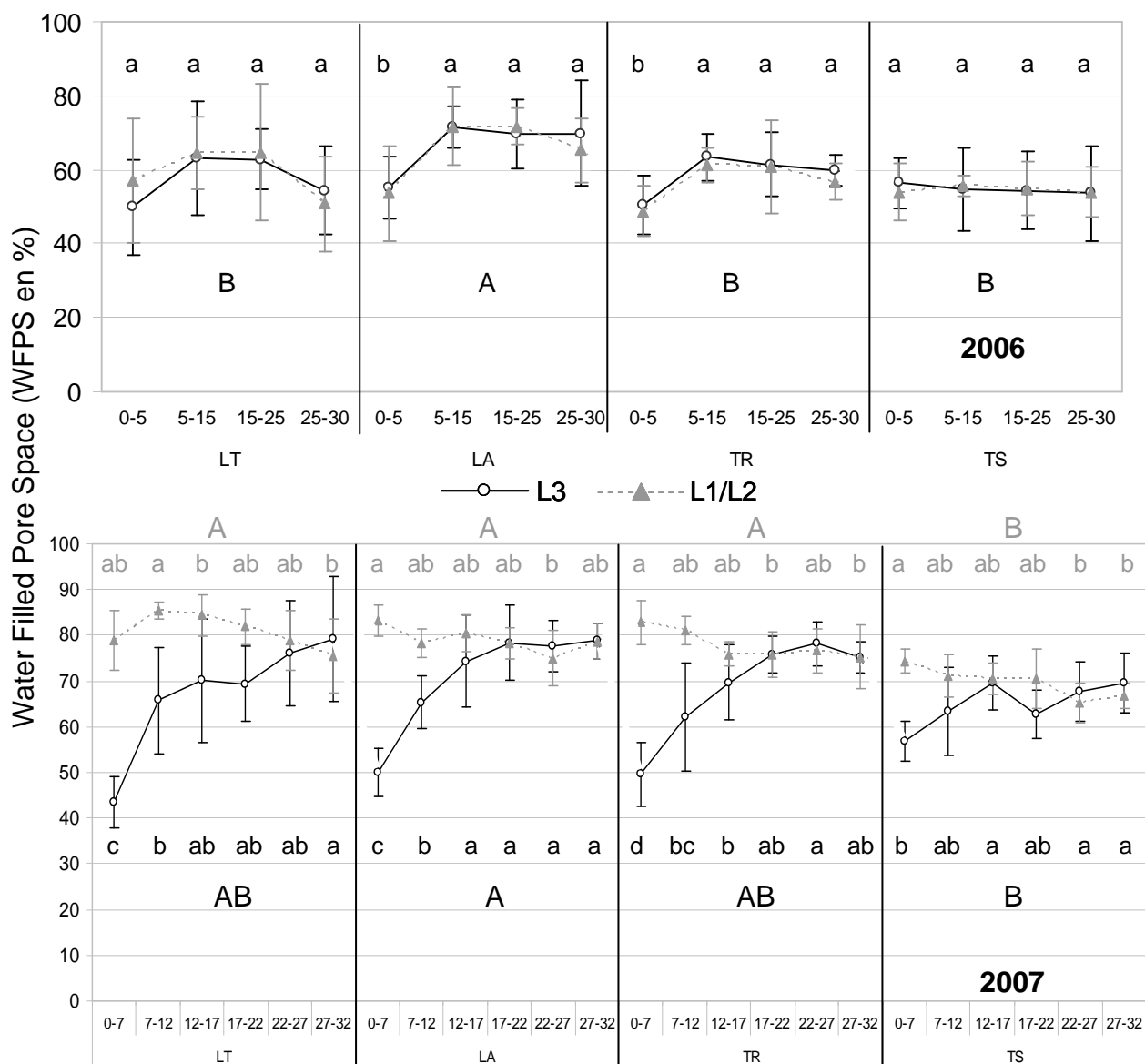


Figure 20: Pourcentage de porosité saturée en eau (WFPS en %) par modalité et par horizon (cm) en mars 2006 et 2007 sur le site de Lyon.

Les lettres minuscules indiquent les différences entre les profondeurs d'échantillonnage par modalité ; les lettres majuscules indiquent les différences entre les modalités (sans distinction des profondeurs d'échantillonnage).

1.5.2 / Site expérimental de Kerguéhennec

En 2006, l'effet de la profondeur sur le taux de saturation en eau de la porosité n'est pas significatif (Figure 21), sauf pour la modalité TS dont l'horizon 10-15 cm présente un WFPS inférieur aux deux autres horizons. Globalement, la porosité de la modalité TS est significativement moins saturée en eau que celle des autres modalités (les teneurs en eau sont présentées dans l'Annexe 5, Tableau 2).

En 2007, l'effet profondeur et l'effet traitement sur le taux de saturation en eau de la porosité ne sont pas significatifs. L'influence du passage des engins n'influe pas non plus sur ce paramètre.

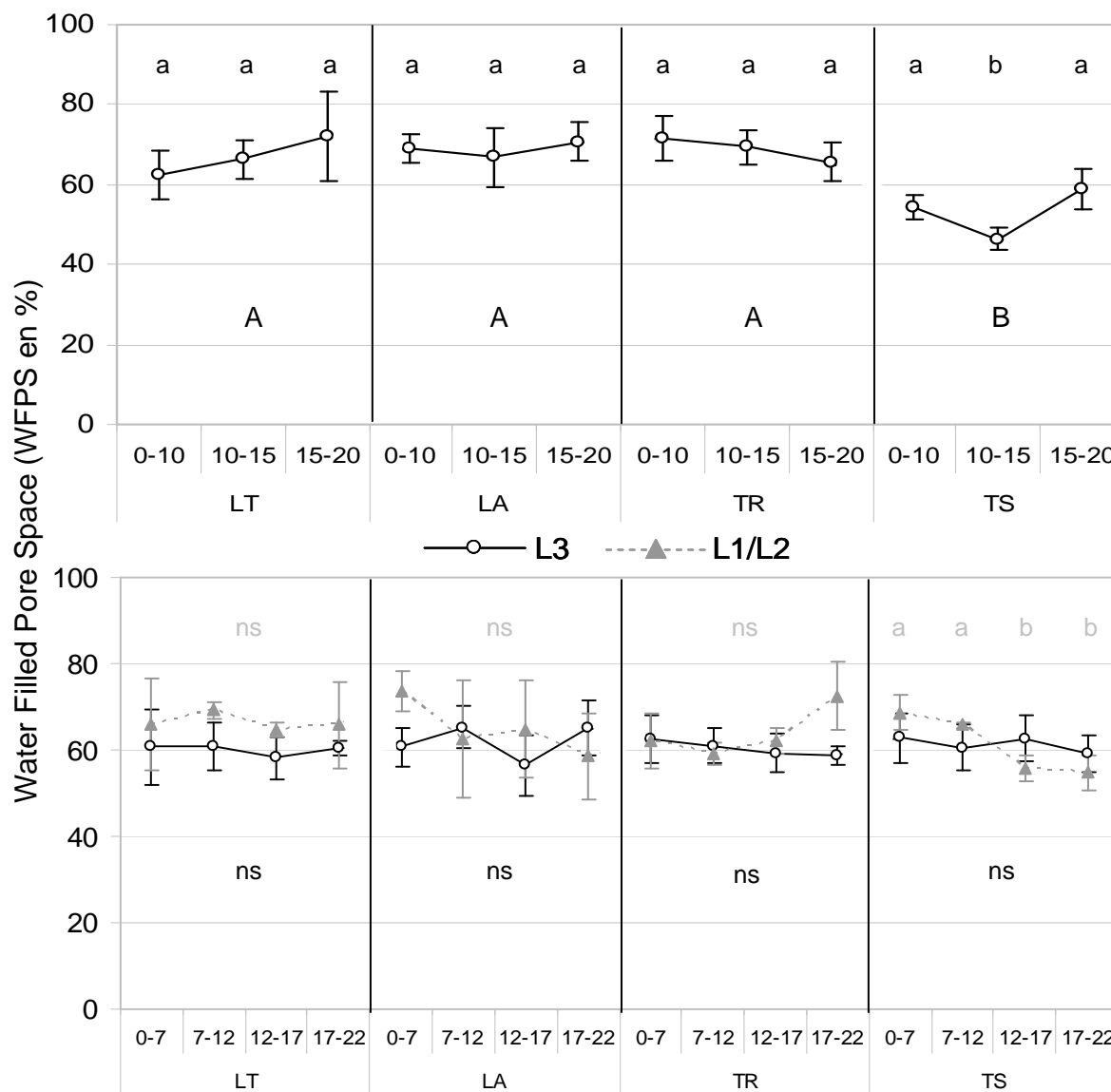


Figure 21: Pourcentage de porosité saturée en eau (WFPS en %) par modalité et par horizon (cm) en mars 2007 sur le site de Kerguéhennec.

Les lettres minuscules indiquent les différences entre les profondeurs d'échantillonnage par modalité; les lettres majuscules indiquent les différences entre les modalités (sans distinction des profondeurs d'échantillonnage) ; en noir: zone L3, en gris : zone L1/L2 ; ns : non significatif.

I.6 / Effet du mode de travail du sol sur la structure du sol : discussion

La structure du sol est le résultat, à un moment donné, de l'équilibre entre les phénomènes de tassement (par les passages d'engins agricoles notamment en conditions humides d'intervention), de fragmentation (par le climat, la faune et/ou le travail du sol), d'agrégation (par des compactations modérées ou par le climat et/ou la faune) et de déplacement par le travail du sol (Roger-Estrade *et al.*, 2000). Cette résultante a été mise en évidence par l'observation de profils culturaux et des mesures de masse volumique du sol en mars 2006 et 2007 sur les deux sites expérimentaux (Figures 14 à 17) ; soit 11 et 4 mois après le 1^{er} et le 3^{ème} travail du sol effectués sur le site de Lyon, et 4 mois après le 4^{ème} et le 5^{ème} travail du sol effectués sur le site de Kerguéhenec.

La structure du sol "type" de chacun des traitements étudié se met donc en place progressivement sur le site de Lyon tandis que celle du site de Kerguéhenec a atteint, *a priori*, un état dit de pseudo-équilibre" (Guérif, 1994). Ceci semble être vérifié pour les modalités LT et TS sur le site de Kerguéhenec. Les états structuraux de ces deux modalités sont identiques en 2006 et 2007 (Figures 16-17) et la surface de leur profil occupée par des zones compactées reste stable (environ 30 et 40 % respectivement, Figure 18-B). En revanche, si les états structuraux de l'horizon H5 des modalités LA et TR restent comparables entre 2006 et 2007, leur horizon H6 qui n'est plus fragmenté mécaniquement prend en masse (Figures 16-17). La surface relative de cet horizon occupée par des zones Δ augmente de 49 % pour LA et de 17 % pour TR entre 2006 et 2007 tandis que celle de l'horizon H5 diminue de 8 % pour LA et augmente de 11 % pour TR (Figure 18-B). Il apparaît donc que l'action de fragmentation des zones compactées sur la profondeur de travail du chisel est moins intense que celle de la charrue du LA. L'action de retournement de la couche de sol travaillée en labour permet, par rapport à l'action du chisel, de ramener les mottes Δ , localisées en H5, près de la surface du sol et donc de les désagréger sous l'action de la herse rotative et du climat (Roger-Estrade *et al.*, 2000) d'où une réduction des zones compactées en LA par rapport au TR en H5. Cependant, les variations des proportions de zones Δ au sein de l'ensemble du profil cultural entre 2006 et 2007 sont comparables à celles mesurées par Boizard *et al.* (2004) d'une saison culturale à une autre sous différents systèmes de cultures labourés. La prise en masse de

l'horizon H6 des modalités LA et TR sous l'action du climat peut être en partie expliquée par les épisodes pluvieux de l'hiver 2006-2007, plus fréquents et intenses que ceux de l'hiver 2005-2006 (Annexe 6, Figures 1 et 2) et par les nombreux passages d'engins agricoles (désherbages, récolte pois ; Annexe 1-B). Cependant, ceci n'est pas vérifié pour la modalité TS qui, malgré l'absence de fragmentation au-delà de 7 cm de profondeur, conserve une structure comparable à celle du LT. La présence d'un mulch en surface a permis d'augmenter la portance du sol et de réduire les risques de tassement liés aux passages d'engins (Tebrügge et Düring, 1999). Par ailleurs, les observations et mesures de l'activité fousseuse des vers de terre, réalisées en parallèle sur ce site expérimental, ont montré que le nombre de galeries verticales était 2 fois supérieur en TS par rapport aux autres modalités à 20 cm de profondeur (données non présentées). Leur activité fousseuse a également pu permettre de fragiliser les surfaces compactées et les rendre ainsi plus fragiles à l'action de fragmentation du climat (Boizard *et al.*, 2004). Ces observations macroscopiques sont confirmées par les mesures de la masse volumique des différents horizons (ρ_H). Peu de différences de masse volumique apparaissent entre les traitements et la modalité TS présente une masse volumique plus faible en surface et au-delà de 17 cm de profondeur que les autres traitements. Ces résultats confirment que la présence d'un mulch en surface réduit la masse volumique des horizons de surface (Blanco-Canqui et Lal, 2007) et que les biopores verticaux la diminuent en profondeur (Munkholm *et al.*, 2003).

Sur le site de Lyon, la structure du sol évolue entre mars 2006 et mars 2007 (Figures 14-15). En mars 2006 les états structuraux des différentes modalités sont peu différenciés. Les observations ont été faites 11 mois après le travail du sol et la structure des horizons H5 et H6 est révélatrice de la prise en masse "naturelle" des horizons sous l'action du climat (Gautronneau et Manichon, 1987; Roger-Estrade *et al.*, 2004) et du passage des engins qui se traduit par une réduction de la porosité structurale du sol (Guérif, 1994) et une augmentation de la masse volumique des horizons en profondeur (Tableau 6). Les traitements ne se différencient pas après un an d'application contrairement à ce qu'observent Munkholm *et al.* (2003) ou Elder et Lal, 2008 qui montrent que la masse volumique des sols non travaillés augmente par rapport aux sols labourés dès la première année de différenciation des techniques. Ces résultats vont plus dans le sens des observations de Guérif (1994) qui note que

les différences de porosité entre les techniques de travail du sol réduit et de labour ne sont généralement visibles qu'au bout de plusieurs années d'application des traitements.

En mars 2007, les horizons fragmentés par la charrue (7-30 et 7-18 cm pour LT et LA respectivement) ou le chisel (7-17 cm pour TR) conservent une structure peu dégradée proche de celle observée en 2006. Les autres, (qui ne sont plus mécaniquement fragmentés, horizons H6) présentent en 2007 une structure dégradée, continue et compacte (Figure 15). Ces observations macroscopiques sont vérifiées par la mesure des masses volumiques des différents horizons (Tableau 6). Sur la profondeur de travail des outils des modalités LA et TR, la masse volumique du sol est comparable à celle de la modalité LT. L'action du chisel semble donc être identique à celle du labour sur ce paramètre, tout comme l'avaient observé Kay et Vanden Bygaart (2002). Par contre, à partir de 22 cm de profondeur, les modalités LA, TR et TS présentent des masses volumiques supérieures à celles de la modalité LT. Seule la modalité LT fragmente la structure du sol à cette profondeur et crée ainsi de la porosité structurale qui diminue la masse volumique des sols.

La structure du sol évolue donc entre mars 2006 et 2007 sur le site de Lyon, durant les 3 premières applications des traitements. La surface des profils occupée par des mottes Δ (Figure 18-A) progresse entre ces deux dates pour les modalités LA, TR et TS de 18, 29 et 43 % respectivement. Par contre, elle reste stable pour la modalité LT, ou tout du moins dans les proportions de variations mesurées par Boizard *et al.* (2002). L'action de fragmentation de la charrue se fait moins profondément pour la modalité LA et l'action de retournement du sol n'est pas assuré pour les modalités TR et TS. Le chisel a également une action plus limitée sur le déplacement et la fragmentation des zones compactées que la charrue, ce qui explique l'augmentation des zones Δ au sein des profils de ces modalités.

La structure du sol et la surface des zones compactées au sein des profils culturaux évoluent constamment d'une année à l'autre pour un système de culture donné. Ces variations sont principalement dues aux conditions climatiques, à la variation des teneurs en eau au moment des interventions culturales (notamment au semis et à la récolte) et au matériel utilisé (pression des pneumatiques, charge sur essieu ; Richard *et al.* 1999; Boizard *et al.*, 2002). Les variations observées et mesurées sur le site de Kerguéhennec semblent dues à ces facteurs inhérents au

système de culture. L'état structural type de chaque modalité semble avoir été atteint après 5 ans d'application des traitements. En revanche, sur le site de Lyon, les variations importantes de structure observées et mesurées entre 2006 et 2007 semblent indiquer que les états types de chacune des modalités n'ont pas encore été atteints après 3 applications des traitements. Les résultats décrits sur ce site vont dans le sens de ceux de Mc Carthy *et al.* (1998) et Munkholm *et al.* (2003) qui ont montré que les différences entre les modalités s'accroissaient progressivement au cours des trois premières années de leur différenciation pour ensuite se stabiliser progressivement. Par ailleurs, sur le site de Kerguéhennec, la proportion de la surface totale des profils culturaux occupée par des zones compactées est moins importante que sur le site de Lyon en 2007 et identique en 2006 et ce, malgré l'ancienneté du dispositif breton. Il semblerait que la réduction de la profondeur de travail ou l'adoption de techniques de travail du sol de conservation, génère une prise en masse du sol dans les sols à texture grossière comme celui de Lyon. Les phénomènes de retrait-gonflement et de fragmentation des zones compactées par le climat sont limités dans ce type de sol (Munkholm *et al.*, 2003). Ils contribuent à régénérer la structure du sol au cours de la saison culturale (Sarmah *et al.*, 1996) comme ce peut être le cas pour le site de Kerguéhennec dont la teneur en argile avoisine les 20 %. De plus, les sols à texture grossières sont plus sensibles aux phénomènes de tassements car la pression exercée en surface se diffuse verticalement tandis que dans les sols à texture plus fine, la propagation du stress est multidirectionnelle (Hamza et Anderson, 2005). Ainsi, les techniques de travail du sol réduites adoptées sur ce type de sol peuvent engendrer des problèmes de circulation de l'eau, d'enracinement des cultures, de minéralisation de la MOS et de l'azote (Hamza et Anderson, 2005; Munkholm *et al.*, 2003). Les différences d'état structural entre ces deux sites peuvent également être dues à la différence de teneur en MO. Elle est plus élevée sur le site de Kerguéhennec ce qui améliore la stabilité structurale de ce sol par rapport à celui de Lyon.

Les résultats obtenus sur le taux de saturation en eau de la porosité (WFPS, Figures 20 et 21) ne vont pas dans le sens des observations de Franzluebbers *et al.* (1995) et de Liu *et al.* (2005) qui montrent que les WFPS des sols labourés sont inférieurs à ceux des sols non labourés. Or, le WFPS de la modalité TS est inférieur aux autres modalités, quels que soient le site et l'année. La teneur en eau de la

modalité TS est inférieure aux autres modalités sur le site de Lyon (Annexe 5, Figure 1) et les masses volumiques plus faibles de cette modalité sur le site de Kerguéhennec peuvent expliquer son plus faible taux de saturation en eau. Par contre, les résultats du site de Lyon confirment les observations des auteurs cités qui montrent que la porosité du sol est plus saturée en eau en profondeur qu'à la surface du sol (Franzluebbbers *et al.*, 1995; Liu *et al.*, 2005).

L'effet du tassement du sol sur la saturation en eau de la porosité du sol apparaît clairement sur le site de Lyon en 2007. Le tassement du sol augmente les WFPS, cet effet est visible jusqu'à environ 12-17 cm de profondeur pour les modalités LA, TR et TS et plus profondément pour LT. Ces limites correspondent à la profondeur de travail de la charrue pour le LA et du chisel pour le TR dont les masses volumiques augmentent à partir de 17 cm de profondeur.

II / Evolutions des teneurs et des stocks de C et N engendrées par les différentes techniques de travail du sol

II.1 / Evolutions des teneurs en C et N des différentes modalités

II.1.1 / Site de Lyon

Les différents types de mottes ont des teneurs en C et N similaires. Les résultats des teneurs en C et N présentés dans le tableau 8 sont une moyenne des teneurs de ces différents types de mottes par horizon de prélèvement.

En mars 2006, les teneurs en C et N des traitements TR et TS sont stratifiées verticalement (Tableau 8). Ces teneurs diminuent dans les horizons qui ne sont plus fragmentés et où aucun résidu de cultures n'est enfoui (17-30 cm pour TR et 7-30 cm pour TS). En revanche, les rapports C/N sont homogènes entre les horizons quel que soit le traitement considéré.

Au bout d'un an d'application des traitements de travail du sol sur ce site, les teneurs en C et N ne se différencient pas (à l'exception des teneurs en C des modalités TS et LA, horizon 0-7 cm). Par contre, le traitement LA a un rapport C/N inférieur à la modalité TR pour l'horizon 7-17 cm et aux modalités LT et TS pour l'horizon 17-30 cm.

Après 3 ans d'application des traitements de travail du sol, en mars 2007, les gradients verticaux de concentrations mesurés en mars 2006 sont renforcés, sauf pour la modalité TR où les écarts-types importants masquent les différences de teneurs en C entre les horizons (Tableau 8). Les teneurs en C et N sont homogènes sur 0-30 cm pour le labour traditionnel (LT) et diminuent généralement dans les horizons qui ne sont plus fragmentés par les outils de travail du sol (7-17 cm pour LA et TR et 7-30 cm pour TS).

Les teneurs en C des quatre modalités ne sont pas significativement différentes en mars 2007 mais, là encore, les écarts-types importants masquent les éventuelles différences entre les traitements de travail du sol. En revanche, la modalité TS présente une teneur en N significativement supérieure aux autres modalités pour l'horizon 0-7 cm tandis que les traitements labourés (LT et LA) présentent une teneur en N supérieure aux modalités TR et TS pour l'horizon 17-30 cm.

Le rapport C/N, à la différence des teneurs en C et N, ne présente pas de gradients verticaux, quelle que soit la modalité considérée. Les rapports C/N des différentes modalités de travail du sol ne sont pas significativement différents.

Tableau 8: Comparaison des teneurs en C et N total (g.kg^{-1}) et du rapport C/N des différents horizons de travail du sol et des modalités de travail du sol du site de Lyon en mars 2006 et 2007.

2006	Horizons (cm)	LT	LA	TR	TS
C g.kg^{-1}	0-7	$11,8 \pm 1,8^{a, AB}$	$11,2 \pm 0,1^{a, B}$	$11,8 \pm 0,2^{a, AB}$	$15,2 \pm 2,1^{a, A}$
	7-17	$11,9 \pm 3,9^{a, A}$	$12,2 \pm 1,8^{a, A}$	$12,1 \pm 0,3^{a, A}$	$9,3 \pm 0,1^{b, A}$
	17-30	$11,8 \pm 3,1^{a, A}$	$9,9 \pm 0,3^{a, A}$	$10,0 \pm 0,1^{b, A}$	$8,4 \pm 0,8^{b, A}$
N Total g.kg^{-1}	0-7	$1,1 \pm 0,3^{a, A}$	$1,3 \pm 0,2^{a, A}$	$1,3 \pm 0,1^{a, A}$	$1,5 \pm 0,1^{a, A}$
	7-17	$1,2 \pm 0,3^{a, A}$	$1,4 \pm 0,2^{a, A}$	$1,1 \pm 0,2^{a, A}$	$1,0 \pm 0,02^{b, A}$
	17-30	$1,1 \pm 0,3^{a, A}$	$1,2 \pm 0,1^{a, A}$	$1,0 \pm 0,1^{a, A}$	$0,9 \pm 0,1^{b, A}$
C / N	0-7	$10,8 \pm 0,8^{a, A}$	$8,6 \pm 1,2^{a, A}$	$9,0 \pm 0,5^{a, A}$	$9,8 \pm 0,5^{a, A}$
	7-17	$9,4 \pm 0,8^{a, AB}$	$8,9 \pm 0,03^{a, B}$	$11,0 \pm 1,1^{a, A}$	$9,4 \pm 0,1^{a, AB}$
	17-30	$10,6 \pm 0,2^{a, A}$	$8,1 \pm 0,1^{a, B}$	$10,3 \pm 1,1^{a, A}$	$9,1 \pm 0,01^{a, AB}$
2007					
C g.kg^{-1}	0-7	$12,9 \pm 1,0^{a, B}$	$15,3 \pm 2,3^{a, AB}$	$15,0 \pm 3,5^{a, AB}$	$16,7 \pm 0,2^{a, A}$
	7-17	$12,7 \pm 0,9^{a, B}$	$14,3 \pm 1,4^{a, A}$	$13,2 \pm 1,7^{a, AB}$	$12,9 \pm 0,7^{b, AB}$
	17-30	$12,5 \pm 0,8^{a, A}$	$11,6 \pm 1,5^{b, AB}$	$11,6 \pm 2,1^{a, AB}$	$10,7 \pm 0,6^{c, B}$
N Total g.kg^{-1}	0-7	$1,4 \pm 0,04^{a, B}$	$1,5 \pm 0,06^{a, B}$	$1,5 \pm 0,09^{a, B}$	$1,6 \pm 0,04^{a, A}$
	7-17	$1,4 \pm 0,03^{a, AB}$	$1,4 \pm 0,11^{a, A}$	$1,3 \pm 0,06^{b, BC}$	$1,3 \pm 0,04^{b, C}$
	17-30	$1,4 \pm 0,03^{a, A}$	$1,3 \pm 0,13^{b, B}$	$1,1 \pm 0,04^{c, C}$	$1,1 \pm 0,08^{c, C}$
C / N	0-7	$9,2 \pm 0,5^{a, A}$	$10,5 \pm 1,8^{a, A}$	$10,2 \pm 1,9^{a, A}$	$10,1 \pm 0,2^{a, A}$
	7-17	$9,1 \pm 0,7^{a, A}$	$10,2 \pm 1,4^{a, A}$	$10,0 \pm 1,4^{a, A}$	$10,2 \pm 0,3^{a, A}$
	17-30	$8,9 \pm 0,4^{a, B}$	$9,2 \pm 1,4^{a, AB}$	$10,3 \pm 1,9^{a, A}$	$10,0 \pm 0,2^{a, AB}$

±: écart-type; les nombres suivis par une lettre commune ne sont pas statistiquement différents ($P < 0,05$): a-b: comparaison des horizons d'une même modalité, A-B: comparaison des modalités de travail du sol par horizon.

II.1.2 / Site de Kerguéhenec

En mars 2006, les teneurs en C baissent significativement dans les horizons qui ne sont plus fragmentés par les outils de travail du sol et où les résidus de cultures ne sont plus enfouis, c'est-à-dire les horizons 17-22 cm des modalités LA et TR et l'horizon 7-22 cm de la modalité TS (Tableau 9). Les concentrations en N présentent également un gradient vertical pour la modalité TS uniquement. Le rapport C/N diminue significativement dans l'horizon 17-22 cm pour les modalités LA, TR et TS.

Après quatre ans de différenciation des modes de travail du sol, les concentrations en C et N sont significativement différentes entre les traitements : la concentration en C et N de l'horizon 0-7 cm de la modalité TS est significativement supérieure aux autres modalités, tandis que LT présente les plus faibles concentrations pour cet horizon. Pour les horizons 7-17 et 17-22 cm, les modalités TS et LA ont des teneurs en C et N supérieures aux modalités LT et TR. Le rapport C/N des modalités LA et TS est inférieur à celui des modalités LT et TR pour l'horizon 17-22 cm et la modalité TS a un rapport C/N généralement inférieur aux autres en dessous de 7 cm de profondeur.

En 2007, les teneurs en C et N des modalités TR et TS baissent avec la profondeur de prélèvement (Tableau 9). Les teneurs en C sont réparties de façon homogène pour la modalité LA tandis qu'elles augmentent en profondeur pour la modalité LT. En revanche, les teneurs en N des modalités labourées sont identiques entre les horizons de prélèvements. Seul le rapport C/N de la modalité TS varie entre les horizons de prélèvements, il est inférieur sur 0-7 cm par rapport aux horizons sous-jacents.

Les teneurs en C et N modalité TS sont significativement supérieures à celles des modalités LT, LA et TR au sein des horizons 0-7 cm et 7-17 cm tandis que la modalité LT présente les teneurs les plus faibles au sein de ces horizons. Par contre, il n'y a pas de différences entre les traitements au sein de l'horizon 17-22 cm. Le rapport C/N des différentes modalités n'est pas différent, quel que soit l'horizon de prélèvement considéré.

Tableau 9: Comparaison des teneurs en C et N total (g.kg^{-1}) et du rapport C/N des différents horizons de travail du sol et des modalités de travail du sol du site de Kerguéhennec en mars 2006 et 2007.

2006	Horizons (cm)	LT	LA	TR	TS
C g.kg^{-1}	0-7	$20,7 \pm 0,4^{a, C}$	$24,4 \pm 0,2^{a, B}$	$23,1 \pm 0,3^{a, B}$	$27,9 \pm 0,9^{a, A}$
	7-17	$21,4 \pm 0,1^{a, BC}$	$23,9 \pm 0,8^{ab, A}$	$20,7 \pm 1,3^{ab, C}$	$23,7 \pm 0,5^{b, AB}$
	17-22	$20,7 \pm 0,3^{a, AB}$	$21,6 \pm 1,0^{b, AB}$	$19,9 \pm 0,8^{b, B}$	$22,3 \pm 0,6^{b, A}$
N Total g.kg^{-1}	0-7	$1,7 \pm 0,03^{a, C}$	$2,0 \pm 0,04^{a, B}$	$1,9 \pm 0,04^{a, BC}$	$2,3 \pm 0,10^{a, A}$
	7-17	$1,8 \pm 0,01^{a, B}$	$2,0 \pm 0,08^{a, A}$	$1,7 \pm 0,10^{a, B}$	$2,0 \pm 0,03^{b, A}$
	17-22	$1,7 \pm 0,01^{a, BC}$	$1,8 \pm 0,07^{a, AB}$	$1,6 \pm 0,06^{a, C}$	$1,9 \pm 0,04^{b, A}$
C / N	0-7	$12,2 \pm 0,01^{a, B}$	$12,4 \pm 0,16^{a, AB}$	$12,5 \pm 0,10^{a, A}$	$12,2 \pm 0,13^{a, AB}$
	7-17	$12,2 \pm 0,02^{a, AB}$	$12,3 \pm 0,09^{ab, A}$	$12,4 \pm 0,05^{ab, A}$	$12,1 \pm 0,08^{ab, B}$
	17-22	$12,2 \pm 0,07^{a, A}$	$11,9 \pm 0,08^{b, B}$	$12,3 \pm 0,03^{b, A}$	$11,9 \pm 0,03^{b, B}$
2007					
C g.kg^{-1}	0-7	$19,3 \pm 0,1^{b, C}$	$22,5 \pm 0,2^{a, BC}$	$23,5 \pm 0,8^{a, B}$	$28,2 \pm 2,8^{a, A}$
	7-17	$19,5 \pm 0,1^{b, C}$	$22,3 \pm 0,4^{a, AB}$	$20,4 \pm 0,1^{b, BC}$	$24,4 \pm 1,7^{ab, A}$
	17-22	$20,1 \pm 0,3^{a, A}$	$20,9 \pm 1,8^{a, A}$	$19,8 \pm 1,3^{b, A}$	$21,2 \pm 0,9^{b, A}$
N Total g.kg^{-1}	0-7	$1,7 \pm 0,06^{a, C}$	$1,9 \pm 0,01^{a, B}$	$2,0 \pm 0,04^{a, B}$	$2,6 \pm 0,11^{a, A}$
	7-17	$1,7 \pm 0,06^{a, B}$	$1,9 \pm 0,03^{a, AB}$	$1,8 \pm 0,00^{b, B}$	$2,1 \pm 0,20^{b, A}$
	17-22	$1,7 \pm 0,01^{a, A}$	$1,8 \pm 0,11^{a, A}$	$1,7 \pm 0,08^{b, A}$	$1,8 \pm 0,03^{b, A}$
C / N	0-7	$11,6 \pm 0,4^{a, A}$	$11,7 \pm 0,1^{a, A}$	$11,8 \pm 0,2^{a, A}$	$11,0 \pm 0,6^{b, A}$
	7-17	$11,6 \pm 0,3^{a, A}$	$11,8 \pm 0,01^{a, A}$	$11,4 \pm 0,01^{a, A}$	$11,5 \pm 0,3^{a, A}$
	17-22	$11,7 \pm 0,2^{a, A}$	$11,4 \pm 0,3^{a, A}$	$11,7 \pm 0,2^{a, A}$	$11,5 \pm 0,3^{a, A}$

\pm : écart-type; les nombres suivis par une lettre commune ne sont pas statistiquement différents ($P < 0,05$): a-b: comparaison des horizons d'une même modalité, A-B: comparaison des modalités de travail du sol par horizon.

II.2/ Evolutions des stocks de C et N en fonction du mode de préparation du sol

Les stocks de C et N ont été calculés par rapport à la masse de terre sèche des différents horizons de la modalité LT sur la base des masses volumiques par horizon de 2007 soit :

- 945, 1510 et 1950 t.ha⁻¹ de terre sèche pour les horizons 0-7, 7-17 et 17-30 cm respectivement sur le site de Lyon (4405 t.ha⁻¹ de terre sèche sur 0-30 cm) ;
- 860, 1266 et 654 t.ha⁻¹ de terre sèche pour les horizons 0-7, 7-17 et 17-22 cm respectivement sur le site de Kerguéhennec (2780 t.ha⁻¹ de terre sèche sur 0-22 cm).

Ce mode de calcul en masse de terre constante permet de tenir compte de la réduction de volume due au tassement du sol entre les traitements et les années. Ainsi, par exemple, la masse de 4405 t.ha⁻¹ sur le site de Lyon correspond à une profondeur de 0-30 cm en 2007 pour LT *versus* 0-29 cm pour TS en raison de sa masse volumique plus élevée.

II.2.1 / Site de Lyon

En mars 2006 et 2007, les stocks de C et N de l'horizon 0-7 cm de la modalité TS sont significativement supérieurs aux stocks des modalités LT, LA et TR ($p < 0,05$) (Figure 22). En 2006 la modalité TS a un stock de C inférieur aux autres traitements, tandis qu'en 2007 le stock de C de la modalité LA est supérieur aux autres modalités qui ne se distinguent pas. Pour l'horizon 17-30 cm, en 2006 et 2007, la modalité TS a un stock de C inférieur aux autres modalités. Les stocks d'azote au sein des horizons 7-17 et 17-30 cm sont en général supérieurs pour les modalités labourées (LT et LA) par rapport aux modalités TR et TS quelle que soit l'année.

L'évaluation des stocks de C sur 0-30 cm ne fait apparaître aucune différence significative entre les modalités, quelle que soit l'année considérée. Par contre, en 2007, la modalité LT stocke plus d'azote total que la modalité TS.

Entre 2006 et 2007, les stocks de carbone et d'azote des différents horizons augmentent significativement pour tous les traitements sauf les stocks de C des différents horizons de la modalité LT et les stocks de N des horizons de la modalité LA. Cette évolution est principalement due à l'augmentation des teneurs en C et N entre ces deux dates (Tableau 8). En revanche, les stocks totaux de C et N sur 0-30 cm restent stables pour la modalité LT, tandis que les stocks de C progressent de 22, 17 et 24 % pour les modalités LA, TR et TS ($p = 0,10$; $0,098$ et $0,082$ respectivement) et les stocks de N augmentent de 15 et 16 % pour TR et TS, mais cette augmentation n'est pas significative ($p = 0,22$ et $0,11$ respectivement).

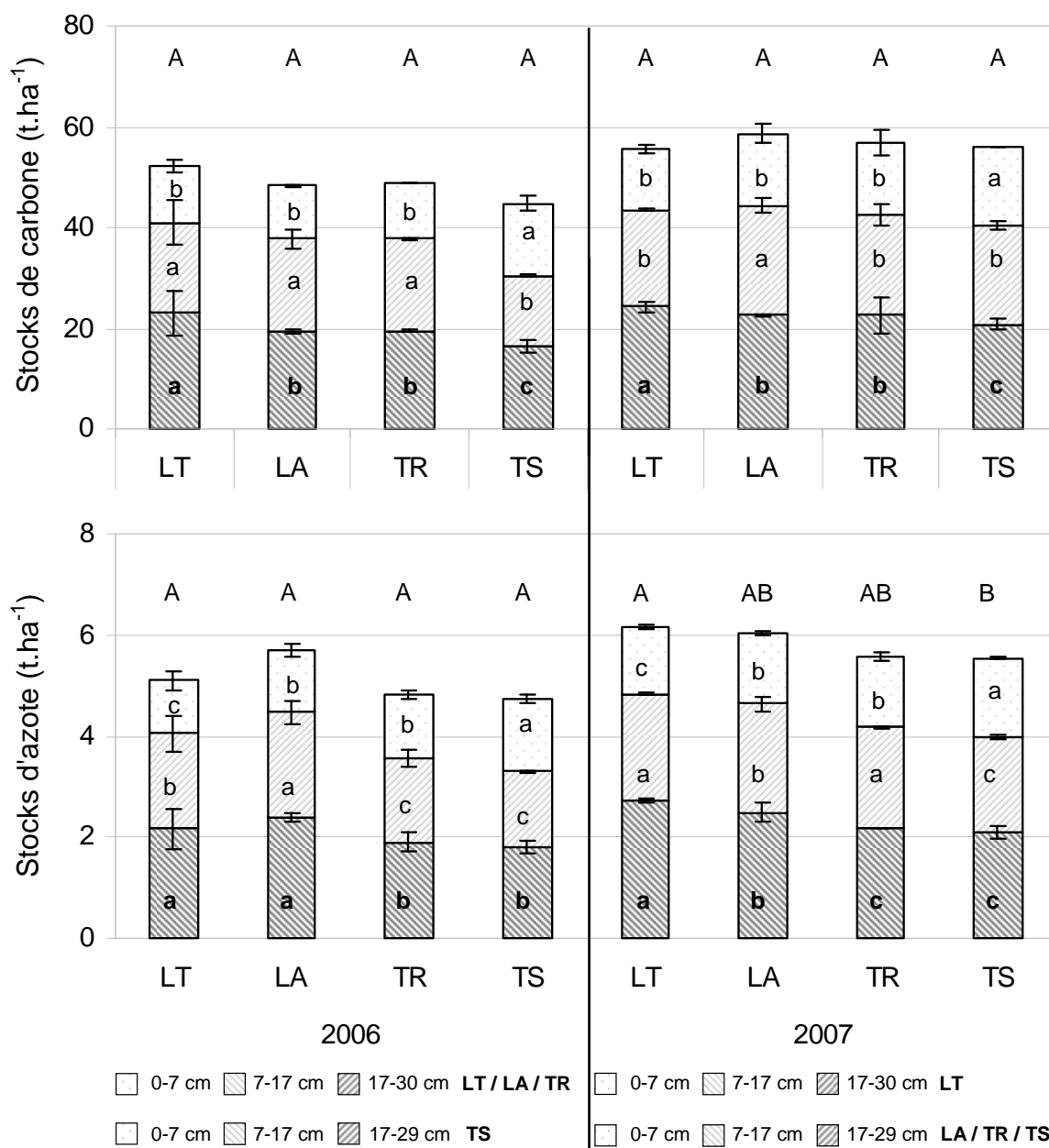


Figure 22 : Stocks de carbone (C) et d'azote (N) ($t \cdot ha^{-1}$) des horizons de travail du sol et totaux (0-30 cm pour LT, LA, TR et 0-29 cm pour TS en 2006 ; 0-30 cm pour LT et 0-29 cm pour LA, TR, TS en 2007) des modalités du site de Lyon en 2006 et 2007. Les lettres minuscules indiquent les différences de stocks entre les modalités par horizon et par année; les lettres majuscules indiquent les différences de stocks totaux (0-30 cm) des modalités par année.

II.2.2 / Site de Kerguéhenec

Sur le site de Kerguéhenec en 2006 et 2007, les stocks de C et N de l'horizon 0-7 et 7-17 cm du traitement TS sont supérieurs à ceux des autres modalités (Figure 23), le LT ayant les stocks les plus faibles pour ces horizons. Pour l'horizon 17-30 cm les stocks de C et N de la modalité TR sont inférieurs aux trois autres traitements.

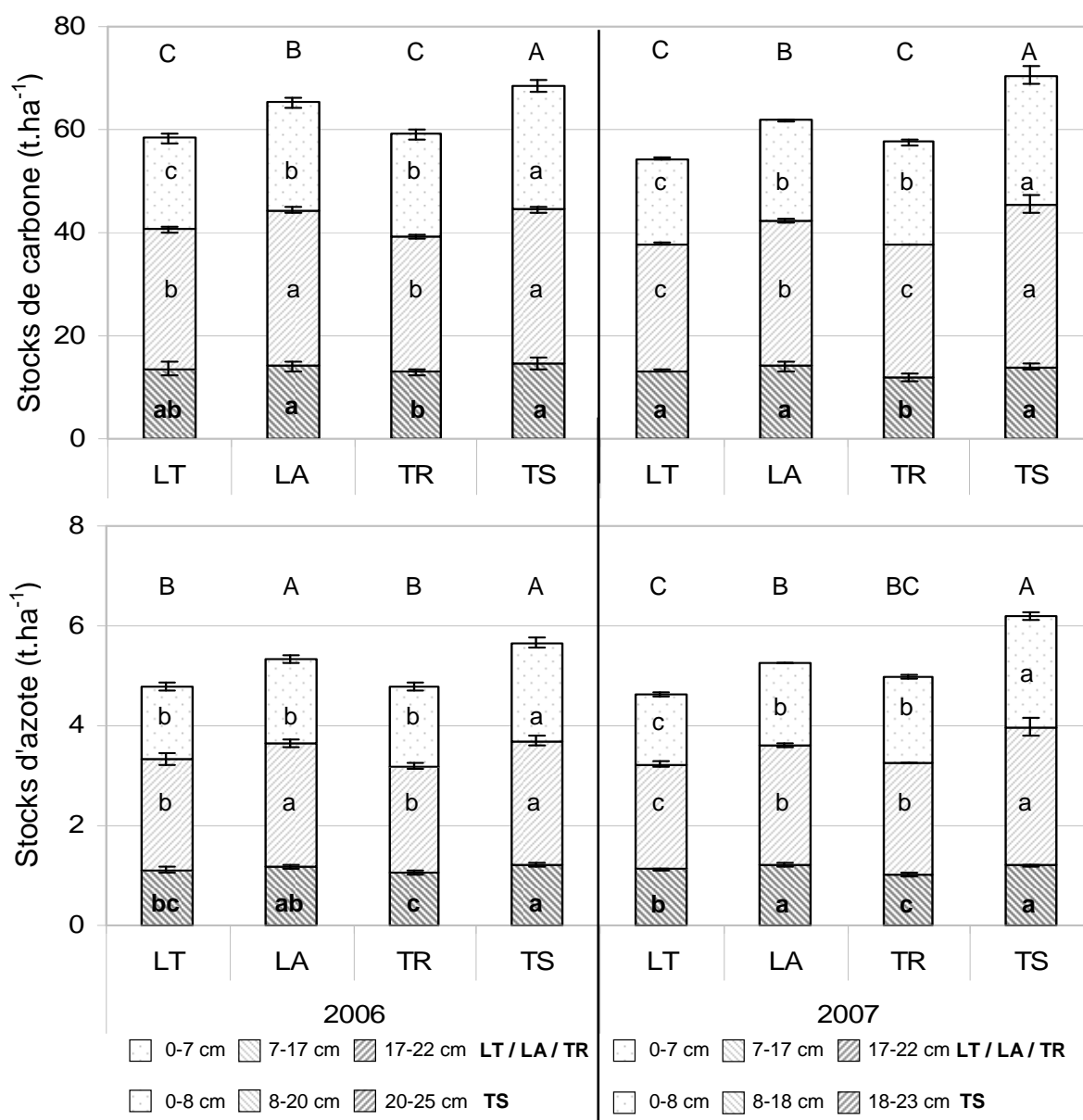


Figure 23 : Stocks de carbone (C; t.ha⁻¹) des horizons de travail du sol et totaux (0-22 cm pour LT, LA, TR et 0-25 cm pour TS en 2006 ; 0-22 cm pour LT, LA, TR et 0-23 cm pour TS en 2007) des modalités du site de Kerguéhennec en 2006 et 2007.

Les lettres minuscules indiquent les différences de stocks entre les modalités par horizon et par année; les lettres majuscules indiquent les différences de stocks totaux entre les modalités par année.

Quand on rapporte les stocks de C et N sur 0-22 cm, les stocks de la modalité TS sont en général supérieurs à ceux des autres modalités tandis que les modalités LT et TR présentent les stocks totaux les plus faibles.

Entre 2006 et 2007, les stocks de C et N des horizons 0-7 et 7-17 cm ont diminué significativement pour les modalités labourées LT et LA. En revanche, les stocks de C des modalités TR et TS sont restés stables entre ces deux dates quel que soit l'horizon considéré. Par contre, les stocks d'azote des horizons 0-7 et 7-17 cm de ces deux modalités ont augmenté de façon identique de + 7 et 13 %

respectivement ($p < 0,02$) tandis que les stocks d'azote de l'horizon 17-30 cm ont diminué de 5 % pour TR ($p = 0,022$) et 2 % pour TS ($p = 0,029$). Les stocks totaux de C sur 0-22 cm des modalités LT et LA ont diminués entre 2006 et 2007 de 7 et 5 % respectivement tandis que ceux des modalités TR et TS sont restés stables. Les stocks totaux d'azote sur 0-22 cm sont restés stables pour les modalités LT, LA et TR et ont augmenté de 10 % pour la modalité TS entre les deux dates de mesures.

II.3 / Fractionnement granulométrique des MOS

Cet indicateur de la dynamique des MOS a été mesuré sur deux modalités (LT et TR) du site de Lyon à partir des prélèvements de mars 2007 (3 profondeurs et 2 ou 3 types de motte par profondeur). La figure 24 présente les résultats des teneurs en carbone et azote total (mg.kg^{-1}) des matières organiques particulaires (MOP) par traitement, horizon et zone de prélèvement. Les données qui présentent les teneurs en C et N des fractions organo-minérales ($< 0,05$ mm) et minérales sont présentées en annexe 7.

Les résultats montrent que le type de motte n'a pas d'influence sur les teneurs en C et N des différentes fractions de MOP mesurées. La seule différence entre les zones de prélèvement apparaît pour la modalité TR, horizon 7-18 cm, où les teneurs en C et N des MOP des mottes Δ prélevées dans les zones L3 sont les plus faibles. La modalité LT n'a également pas d'influence sur les teneurs en C et N de toutes les fractions de MOP mesurées (aucune différence entre les horizons de prélèvement). En revanche, la modalité TR a une forte influence sur toutes les fractions de MOP mesurées. Un gradient vertical des teneurs en C et N des fractions de MOP est observé : 0-7 cm > 7-18 cm > 18-30 cm. L'addition des différentes fractions mesurées (MOP totales) ne fait ressortir aucune différence entre les horizons pour la modalité LT et le même gradient vertical apparaît pour la modalité TR (0-7 cm > 7-18 cm > 18-30 cm).

La comparaison des teneurs en C et N des différentes fractions de MOP des traitements LT et TR montre que toutes les fractions de la modalité TR sont significativement supérieures à celles de la modalité LT pour les horizons 0-7cm et 7-18 cm (sauf la fraction de MOP > 2 mm de l'horizon 7-18 cm) et inférieures dans l'horizon 18-30 cm. Les mêmes différences sont mises en évidence avec les teneurs en C et N des MOP totales : TR > LT pour les horizons 0-7 et 7-18 cm et LT > TR pour l'horizon 18-30 cm.

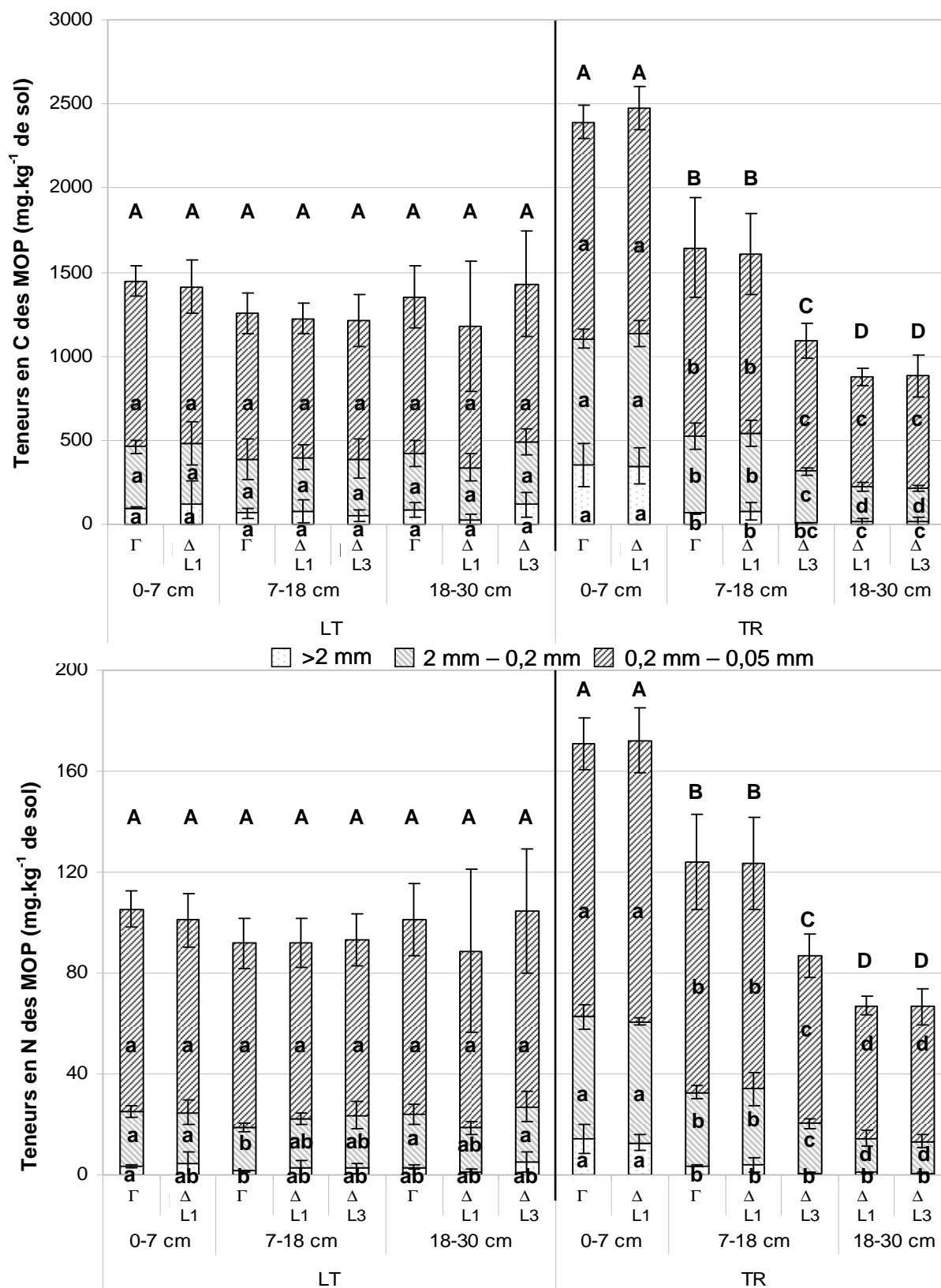


Figure 24: Comparaison des teneurs en C et N (mg.kg⁻¹ de sol) des matières organiques particulières (MOP) mesurées par traitement, horizon et par zone de prélèvement.

a-d: comparaison des teneurs des horizons par traitement pour une catégorie de MOP; A-D: comparaison des teneurs des horizons par traitement.

II.4 / Effet du mode de travail du sol sur les teneurs et stocks de carbone et d'azote : discussion

Les teneurs en C et N des différentes techniques de travail du sol sur le site de Lyon ne se différencient pas après une année de différenciation des traitements (Tableau 8). Cependant, on observe dès cette première année, un début de stratification verticale des teneurs en C et N pour les modalités LA, TR et TS. Ces teneurs baissent dans les horizons où aucun résidu de culture n'est enfoui, c'est-à-dire dans les horizons 17-30 cm pour les modalités LA et TR et 7-30 cm pour la modalité TS. Ces concentrations sont homogènes sur la profondeur d'échantillonnage pour le LT. En 2007, les différences entre les traitements deviennent significatives et la stratification verticale se renforce. Les teneurs sont plus élevées en surface pour la modalité TS par rapport à LT et ce rapport s'inverse pour l'horizon 17-30 cm. Ces résultats mettent en évidence une stratification verticale progressive des pools de C et N lorsque la profondeur de travail des outils est relevée ou lorsque le travail du sol s'opère uniquement sur 0-7 cm de profondeur ce qui confirme les observations de Mc Carthy *et al.* (1998) dans un dispositif expérimental récent (3 ans de différenciation des traitements).

Quand on exprime ces résultats en fonction de la masse volumique des horizons (Figure 22), les mêmes tendances se dessinent, confirmant ainsi la stratification substantielle de ces pools durant les premières années d'application des traitements. Les résultats montrent également que les stocks de C et N évoluent légèrement entre 2006 et 2007, pour les modalités LA, TR et TS tandis qu'ils restent stables pour la modalité LT. Les rendements des cultures ont été identiques entre les modalités LT, LA et TR et la quantité de résidus de culture laissée en surface était donc identique. Seuls les rendements obtenus en TS ont diminué par rapport aux autres modalités (résultats sur le rendement des cultures non abordés dans ce travail). L'augmentation des stocks de C et N ne vient donc pas *a priori* d'une différence de matière sèche enfouie mais plus d'une différence de vitesse de dégradation des résidus de cultures. Le labour traditionnel enfouit de façon plus ou moins homogène les résidus de cultures (selon la qualité de réglage de l'outil et de la rasette) et améliore ainsi le contact sol-MO accélérant la dégradation microbienne des résidus de culture et de la MOS stabilisée située à proximité des MO fraîches (Balesdent *et al.*, 2000). En revanche, la modalité LA (qui est un labour sans rasette)

fait que les résidus de cultures sont enfouis sur toute la profondeur de labour (et non pas principalement en fond de labour) et qu'une partie de ces résidus se retrouve en surface, diminuant de fait leur turn-over. Enfin, l'enfouissement des résidus de culture des modalités TR et TS est partiel et majoritairement localisé dans les premiers centimètres du sol, ce qui limite le contact sol-MO et ralentit ainsi la dégradation des résidus de cultures. L'augmentation des stocks de C et N total observée entre 2006 et 2007 pour ces modalités est donc certainement due à une diminution de la vitesse de dégradation des MOS en raison du mode et de la profondeur d'enfouissement des résidus de cultures. Toutefois, pour la modalité TS, l'augmentation importante des stocks de C et N est également due à l'enfouissement de l'avoine avant le semis du soja en 2006, culture intermédiaire non présente pour les autres modalités (cf. Chapitre 2) et au développement important des adventices pour cette modalité. Cependant, si ces stocks progressent pour trois des quatre modalités, ils ne permettent pas de les différencier après 3 applications des traitements.

Les résultats du site de Kerguéhennec confirment les tendances observées sur le site de Lyon : les teneurs en C et N diminuent dans les horizons qui ne sont plus fragmentés et où aucun résidu de culture n'est enfoui. Cependant, la stratification verticale des concentrations en C et N de la modalité TS est moins nette que sur le site de Lyon. L'activité fousseuse des vers de terre est plus importante pour cette modalité et peut contribuer à réduire cette stratification et atténuer les différences entre LT et TS en profondeur. Par ailleurs, les teneurs en MO sur sont plus élevées que sur le site de Lyon ce qui peut expliquer les différences entre ces deux sites.

Les stocks totaux de C et N sur 0-22 cm permettent de différencier les traitements. La modalité TS stocke significativement plus de C et N que les autres modalités tandis que la modalité LT présente les stocks les plus faibles. Ces observations confirment l'effet du mode et de la profondeur d'enfouissement des résidus de culture sur la vitesse de dégradation des MOS et montrent que les stocks totaux de C et N réagissent lentement aux changements de pratiques culturales et permettent de différencier les modes de travail du sol après plusieurs années de différenciation des traitements.

L'estimation d'un pool labile de la MOS, approchée par la mesure de teneurs en C et N des quantités de MOP (> 0,05 mm), apporte plusieurs précisions sur l'effet du mode d'enfouissement des résidus de culture et de fragmentation de la structure du

sol sur la dynamique des MOS. La composition de ce pool, associé aux fractions sableuses du sol ($> 0,05$ mm), est dominée par les résidus de cultures tandis que la composition des pools organiques associés aux fractions limoneuses et argileuses est dominée par les métabolites d'origine microbienne (von Lützow *et al.*, 2007). Il a un turn-over plus court que les fractions plus fines et représente une source importante de C et de nutriments pour les microorganismes du sol (Haynes, 2005). Ce compartiment de la MOS est donc plus sensible aux changements de pratiques culturales que les teneurs en C et N totales (Six *et al.*, 2002a). Les résultats de ces mesures (Figure 24) montrent que les MOP sont stratifiées verticalement pour la modalité TR tandis qu'elles sont réparties de manière uniforme sur 0-30 cm pour la modalité LT, tout comme l'étaient les teneurs totales en C et N. Par contre, les teneurs en C et N des MOP permettent de différencier les traitements étudiés sur toutes les profondeurs de prélèvement sur le site de Lyon contrairement aux teneurs totales en C et N qui ne les différenciaient qu'à la surface du sol et en profondeur respectivement. Les teneurs en C et N des MOP de la modalité TR sont significativement supérieures à celle mesurées pour la modalité LT sur 0-17 cm et inférieures sur 17-30 cm (quelle que soit la fraction de MOP considérée). Les différences entre ces deux traitements peuvent avoir plusieurs origines : (1) une différence de profondeur d'enfouissement des résidus de cultures (2) une différence de quantité de matière sèche enfouie ; (3) une différence de taux de minéralisation des MOP. La première raison évoquée est claire, la dilution des résidus de culture sur 0-30 cm est moindre en TR qu'en LT, ce qui explique en partie l'accumulation plus importante des MOP sur 0-17 cm pour la modalité TR. Aucun résidu n'étant enfoui en dessous de 17 cm, il est logique de mesurer une quantité de MOP plus importante en LT qu'en TR au sein de l'horizon 17-30 cm. La seconde explication n'est pas vérifiée car ni le rendement des cultures ni le niveau d'enherbement ne permettent de différencier ces deux traitements. Cependant, l'enherbement de la modalité TR est supérieur à celui de LT et pourrait contribuer à l'augmentation de la part de MOP issues de la décomposition des racines d'adventices. Enfin, la troisième raison évoquée a été vérifiée par plusieurs auteurs dans diverses expérimentations, rappelées par Six *et al.* (2002) dans leur revue sur les mécanismes de stabilisation de la MOS. Cette baisse apparente de la minéralisation des MOP serait principalement due à la protection physique des MOP au sein des macro (> 250 μm) et des micro-agrégats (53 μm -250 μm) du sol et à la différence de contact entre les

résidus de culture et la fraction minérale du sol (Balesdent *et al.*, 2000). La méthode utilisée dans ce travail ne permet pas de différencier les MOP incluses dans les agrégats des MOP libres. Cependant, nous avons vu que la fragmentation de la structure du sol par le chisel était moins intense que celle occasionnée par la charrue, et devrait donc générer *a priori*, une déstructuration moins intense des macro-agrégats du sol. Selon le schéma conceptuel du "cycle de vie" des macro-agrégats de Six *et al* (2002b) l'augmentation de leur turn-over diminue la formation des micro-agrégats à l'intérieur des macro-agrégats et contribue donc à la diminution de la stabilisation du C à l'intérieur de ces micro-agrégats (Six *et al.*, 2002b) qui ont une capacité protectrice de la MOS supérieure à celle des macro-agrégats (Pulleman et Marinissen, 2004). Cependant, ces mécanismes de protection physique des MOP augmentent avec la teneur en argile du sol (Six *et al.*, 2002a) et doivent donc être plus réduits sur le site expérimental de Lyon dont la teneur en argile est d'environ 15 %.

La Figure 24 montre également que la différence de structure entre les mottes Γ et Δ n'a pas d'influence sur les teneurs en C et N des MOP, et confirme les observations de Oorts (2006) qui indique que la structure du sol *in situ* n'influence pas les quantités de MOP (Oorts, 2006). Il semblerait donc que la plus faible diffusion d'oxygène à l'intérieur des mottes Δ par rapport aux mottes Γ (Curmi *et al.*, 1996) n'influe pas sur la vitesse de dégradation des MOP, au moins au cours des premiers mois suivant le travail du sol (prélèvements 4 mois après le travail du sol).

L'accumulation du pool labile de MOS sur 0-17 cm de profondeur pour la modalité TR favorise *a priori* la croissance microbienne et confère à ce système un plus grand potentiel de nutrition des cultures (Six *et al.*, 2002a) même si le C/N élevé des MOP > 0,2 mm (compris entre 16 et 18) peut occasionner une immobilisation temporaire de l'azote minéral du sol. Mais, l'accumulation plus importante des MOP montre que la vitesse de minéralisation des résidus de culture *in situ* est plus lente qu'en labour.

III / Conclusion

Nous avons vu que la structure type correspondant à chaque système de travail du sol étudié semblait être atteinte sur le site de Kerguéhennec mais pas sur le site de Lyon. Le labour traditionnel permet de réduire la surface du profil occupée par des zones compactées, et ce quels que soient le site et l'année considérés. Mais, sur le site de Lyon, la réduction de la profondeur de fragmentation de la structure du sol occasionne une dégradation de la structure du sol qui a tendance à se compacter progressivement. Cette observation confirme la difficulté d'adopter des techniques culturales alternatives au labour sur des sols à texture sableuse. Cette dégradation de la structure du sol peut occasionner des problèmes d'enracinement des cultures, de circulation hydrique et de minéralisation de la MOS. Il serait intéressant d'étudier l'effet à plus long terme de ces techniques sur la structure du sol, afin de vérifier si l'augmentation des biomasses de vers de terre et de leur activité fousseuse permettrait de pallier l'absence de fragmentation mécanique comme cela semble être le cas sur le site de Kerguéhennec après 5 ans de différenciation des traitements.

De la même manière que pour la structure du sol, les teneurs et les stocks C et N évoluent progressivement sur le site de Lyon au cours des premières années d'adoption des techniques de travail du sol. On observe une stratification verticale des teneurs et stocks par rapport aux systèmes labourés, la MOS s'accumule en surface du sol et diminue dans les horizons où aucun résidu de culture n'est enfoui tandis qu'elle se répartit de façon homogène sur la profondeur de labour. Après 4 ou 5 années de différenciation des traitements, les teneurs et stocks de C et N permettent de différencier les traitements sur le site de Kerguéhennec, tandis que les différences sur le site de Lyon sont faibles. Par contre, la mesure d'un pool labile de la MOS permet d'apporter plus de précisions sur l'effet du mode de fragmentation de la structure du sol sur les dynamiques des MOS. La quantité de MOP est plus importante dans un sol non labouré, ce qui montre que les ressources organiques labiles sont moins bien utilisées par les microorganismes *in situ* du fait de leur protection au sein des agrégats qui ne sont plus mécaniquement fragmentés. Par contre, à plus long terme, l'accumulation de ce pool labile pourrait permettre de soutenir la croissance microbienne et les activités de minéralisation du C et N malgré le plus faible turn-over apparent des MOS pour les modalités non labourée

Chapitre 4:
**Effets de différentes techniques de travail du
sol sur la microflore du sol : aspects
quantitatifs et qualitatifs**

Chapitre 4: Effets de différentes techniques de travail du sol sur la microflore du sol : aspects quantitatifs et qualitatifs

Ce chapitre est consacré à l'étude des modifications microbiennes quantitatives (biomasse microbienne, minéralisations potentielles du C et N) et qualitatives (structure des communautés microbiennes du sol) induites par les différentes techniques de travail du sol. Les sites expérimentaux, l'échantillonnage et les méthodes utilisées sont décrits dans le chapitre 2.

La première partie de ce chapitre porte sur les modifications quantitatives mesurées sur les deux sites expérimentaux : biomasse microbienne, activités potentielles de minéralisations du C et N, respiration spécifique apparente. Ces paramètres ont été mesurés sur des mottes Γ et Δ prélevées en mars 2006 et 2007 au sein des profils culturaux décrits dans le chapitre précédent. La seconde partie de ce chapitre est consacrée aux modifications de la structure des communautés bactériennes et fongiques engendrées par deux techniques de travail du sol sur le site de Lyon : labour traditionnel et travail du sol réduit. Cette partie permet d'étudier l'influence à court terme d'un changement de pratique culturale sur les communautés microbiennes du sol en mesurant l'évolution de la structure des communautés microbiennes entre février 2005 (avant la différenciation des traitements) et mars 2006, soit 11 mois après la première application des traitements. Cette partie est une première approche pour étudier l'influence du mode de travail du sol sur la composition de la microflore du sol et sa diversité. Enfin, la troisième partie de ce chapitre sera consacrée à la discussion générale de ces résultats.

I / Effets des modifications structurales et de la répartition des résidus de cultures sur la biomasse microbienne du sol et les activités potentielles de minéralisation du C et N

I.1 / Site expérimental de Lyon

I.1.1 / Biomasse microbienne du sol

La biomasse microbienne (BM) a été mesurée sur des mottes Γ et Δ prélevées au sein des profils culturaux à trois profondeurs: 0-7 / 7-18 et 18-30 cm. En 2007 on distingue les mottes Δ prélevées sous les passages de roues (L1) des mottes Δ prélevées dans les zones du profil non roulées (L3). La Figure 25 présente l'effet de la profondeur de prélèvement et du type de motte sur la BM du sol.

Effets de la structure du sol (type de motte) :

En 2006, l'effet du type de motte sur la biomasse microbienne du sol (BM) est significatif ($p < 0,001$). La BM mesurée au sein des mottes Γ est supérieure à celle mesurée des mottes Δ (+ 24 % globalement). Cet effet est clairement visible pour la modalité LA, et pour certains horizons des modalités LT, TR et TS (Figure 25). Par contre, en 2007 l'effet du type de motte n'est pas significatif.

Effets de la profondeur de prélèvement :

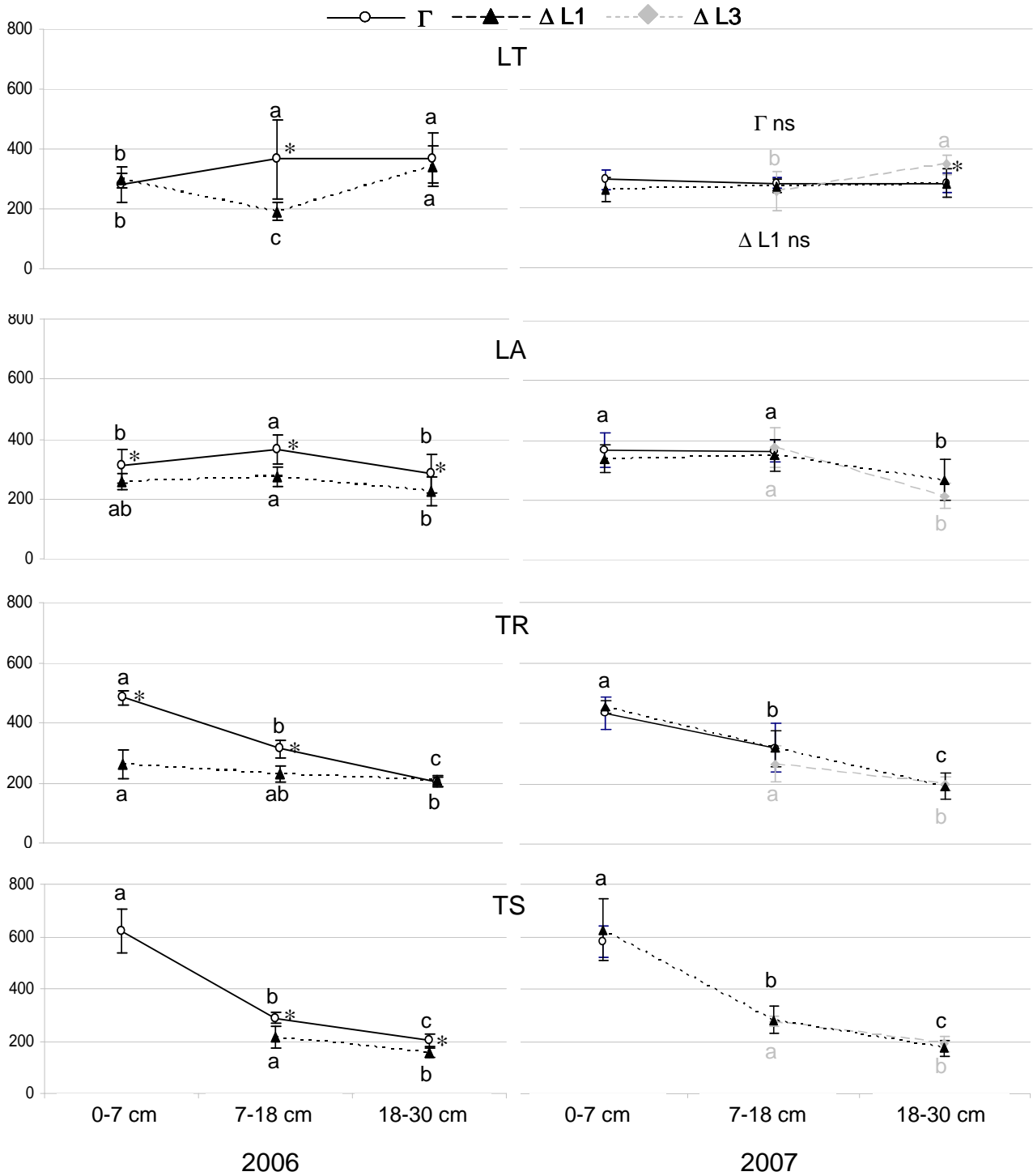
En 2006, la BM mesurée au sein des mottes Γ est supérieure dans les horizons de "fond de labour" pour les modalités LT et LA (18-30 et 7-18 cm respectivement) mais les différences entre les horizons restent toutefois assez faibles. A l'opposé, la BM des modalités TR et TS présente une stratification verticale importante : elle décroît avec la profondeur de prélèvement. Quand on considère la BM mesurée au sein des mottes Δ les mêmes tendances se dégagent bien que les différences de BM entre les horizons soient moins marquées que précédemment. En 2007, ces tendances se renforcent : la BM est répartie de façon homogène sur la profondeur du labour pour les modalités LT et LA (0-30 cm et 0-18 cm respectivement, mais décroît en dessous de 18 cm de profondeur pour LA) tandis qu'elle diminue avec la profondeur de prélèvement pour les modalités TR et TS ; ce gradient vertical est moins marqué pour la modalité TR que pour la modalité TS.

Comparaison des modalités par horizon et type de motte :

En 2006, la BM des modalités non labourées (TR et TS) mesurée au sein des mottes Γ de l'horizon 0-7 cm est significativement supérieure aux modalités labourées : on a $TS > TR > LA = LT$ (TS > de 22, 50 et 55 % respectivement), tandis qu'au sein des mottes Δ aucune différence n'apparaît. En 2007, les mêmes tendances se dessinent quel que soit le type de motte considéré : on a $TS > TR > LA > LT$ (TS > de 27, 42 et 54 % respectivement).

Pour l'horizon 7-18 cm, la BM de la modalité TS mesurée au sein des mottes Γ est inférieure à celle des modalités labourées (LT et LA) en 2006. En 2007, on a $LA > LT$ (+ 22%). Quand on considère la BM mesurée au sein des mottes Δ de l'horizon 7-18 cm, on a : $LA > LT = TR = TS$ en 2006 et 2007 (LA > de 30, 16 et 21% en 2006 respectivement et de 55, 17 et 23 % en 2007).

Enfin, pour l'horizon 18-30 cm la BM de la modalité LT, quel que soit le type de motte considéré, est supérieure à celle des autres modalités en 2006 et 2007 (LT > de 29, 43 et 49 % en 2006 et de 33, 45 et 49 % en 2007 par rapport à LA, TR et TS respectivement).



1.1.2 / Biomasse microbienne du sol exprimée en pourcentage du C total

Tableau 10: BM%C des différentes modalités sur le site de Lyon en mars 2006 et 2007 : effets de la profondeur de prélèvement et du type de motte.

a-c: différences entre les horizons par modalité et par type de motte ; les chiffres en gras indiquent

Horizons (cm)	2006		2007		
	Γ	Δ	Γ	Δ L1	Δ L3
0-7	2,37 ± 0,3 ^b	2,54 ± 0,4 ^a	2,30 ± 0,1^a	2,00 ± 0,2 ^b	
LT 7-18	3,02 ± 0,4^a	1,70 ± 0,5 ^b	2,31 ± 0,2 ^a	2,11 ± 0,7 ^{ab}	2,03 ± 0,2 ^b
18-30	2,74 ± 0,6 ^{ab}	2,53 ± 0,5 ^a	2,24 ± 0,3 ^a	2,37 ± 0,5 ^a	2,73 ± 0,5 ^a
0-7	2,77 ± 0,5^a	2,31 ± 0,2 ^a	2,54 ± 0,7 ^a	2,23 ± 0,6 ^a	
LA 7-18	2,99 ± 0,3^a	2,24 ± 0,2 ^a	2,55 ± 0,4 ^a	2,38 ± 0,6 ^a	2,72 ± 0,4 ^a
18-30	2,88 ± 0,7 ^a	2,29 ± 0,5 ^a		2,31 ± 0,4 ^a	1,83 ± 0,5 ^b
0-7	4,12 ± 0,2^a	2,23 ± 0,4 ^a	3,25 ± 0,8 ^a	2,89 ± 0,7 ^a	
TR 7-18	2,59 ± 0,3^b	1,89 ± 0,2 ^b	2,35 ± 0,8 ^b	2,39 ± 0,7 ^b	2,17 ± 0,4 ^a
18-30	2,01 ± 0,2 ^c	2,05 ± 0,2 ^{ab}		1,72 ± 0,4 ^c	1,68 ± 0,2 ^b
0-7	4,10 ± 0,4 ^a		3,47 ± 0,3	3,78 ± 0,7 ^a	
TS 7-18	3,11 ± 0,2^b	2,31 ± 0,5 ^a		2,14 ± 0,1 ^b	2,19 ± 0,4 ^a
18-30	2,44 ± 0,3^c	1,88 ± 0,3 ^b		1,66 ± 0,4 ^b	1,76 ± 0,3 ^b

que la BM%C mesuré au sein des mottes Γ est supérieur à celui des mottes Δ .

Les effets de la structure du sol et de la profondeur d'enfouissement des résidus de culture sur la BM exprimée en pourcentage du C total (BM%C) sont identiques à ceux observés sur la BM (Tableau 10). C'est-à-dire que :

- l'effet motte est significatif en 2006 (BM%C > au sein des mottes Γ de 23 % ; $p < 0,001$) et cet effet disparaît en 2007 ;
- les différences entre les horizons de prélèvements sont peu marquées en 2006 et 2007 pour les modalités labourées (LT et LA) tandis que la BM exprimée en % du C total décroît avec la profondeur de prélèvement pour les modalités TR et TS ;
- les techniques de travail du sol se distinguent pour les horizons 0-7 cm et 18-30 cm quelle que soit l'année : TR et TS sont significativement supérieurs en surface par rapport aux modalités labourées (LT et LA) et inversement en profondeur. En 2007, la modalité LA est supérieure aux autres modalités au sein de l'horizon 7-18 cm.

On peut noter que BM%C décroît entre les prélèvements de 2006 et 2007. Cette baisse est principalement due à l'augmentation des teneurs en C entre ces deux dates (Chapitre 3) car les niveaux de BM entre restent similaires.

1.1.3 / Minéralisations potentielles du carbone et de l'azote

Les résultats du potentiel de minéralisation de l'azote (Nmin) des modalités LA et TS de 2007 sont manquantes (problème de stockage et de dosage pour ces échantillons).

Effets de la structure du sol (type de motte) :

En 2006 et 2007, il y a un effet significatif du type de motte sur le potentiel de minéralisation du C et N (Cmin et Nmin). Le Cmin mesuré au sein des mottes Γ est supérieur au Cmin mesuré au sein des mottes Δ de 14 % en 2006 et de 10 % en 2007 (Figure 26). Le Nmin des mottes Γ est supérieur de 35 % en 2006 et de 28 % en 2007 par rapport au Nmin des mottes Δ (Figure 27). Cet effet se manifeste à différentes profondeurs selon les traitements (Figures 26 et 27).

Effets de la profondeur de prélèvement :

En 2006 et 2007, l'effet horizon est peu marqué pour les modalités labourées LT et LA (sauf pour le Nmin) tandis que le Cmin et Nmin des modalités TR et TS diminuent avec la profondeur de prélèvement (la stratification est moins marquée pour la modalité TR que pour la modalité TS). L'effet horizon est encore moins marqué quand on considère le Cmin ou le Nmin mesuré au sein des mottes Δ , notamment pour la modalité TS (Figures 26 et 27).

Comparaison des modalités par horizon et type de motte :

Pour l'horizon 0-7 cm, le Cmin et Nmin de la modalité TS, quel que soit le type de motte, sont supérieurs aux autres modalités en 2006 (TS>TR=LA=LT) ; en 2007, on a TS>TR>LA=LT pour Cmin et TR>LT pour Nmin.

Pour l'horizon 7-18 cm, le Cmin de la modalité LT mesuré au sein des mottes Γ est supérieur aux autres modalités qui ne se distinguent pas, tandis que le Cmin des mottes Δ ne permet pas de différencier les modalités entre elles. En 2007 quel que soit le type de motte considéré, le Cmin des modalités labourées est supérieur à celui des modalités TR et TS. Pour le Nmin on a LT=TR>LA=TS en 2006 et LT=TR en 2007 quel que soit le type de motte.

Enfin, pour l'horizon 18-30 cm en 2006, le Cmin et Nmin de LA sont supérieurs à ceux des autres modalités, quel que soit le type de motte pour Cmin tandis que les

mottes Δ lissent les différences entre les traitements pour le Nmin. En 2007 peu de différences apparaissent entre les modalités de travail du sol pour le Cmin tandis que le Nmin est supérieur en LT par rapport à TR.

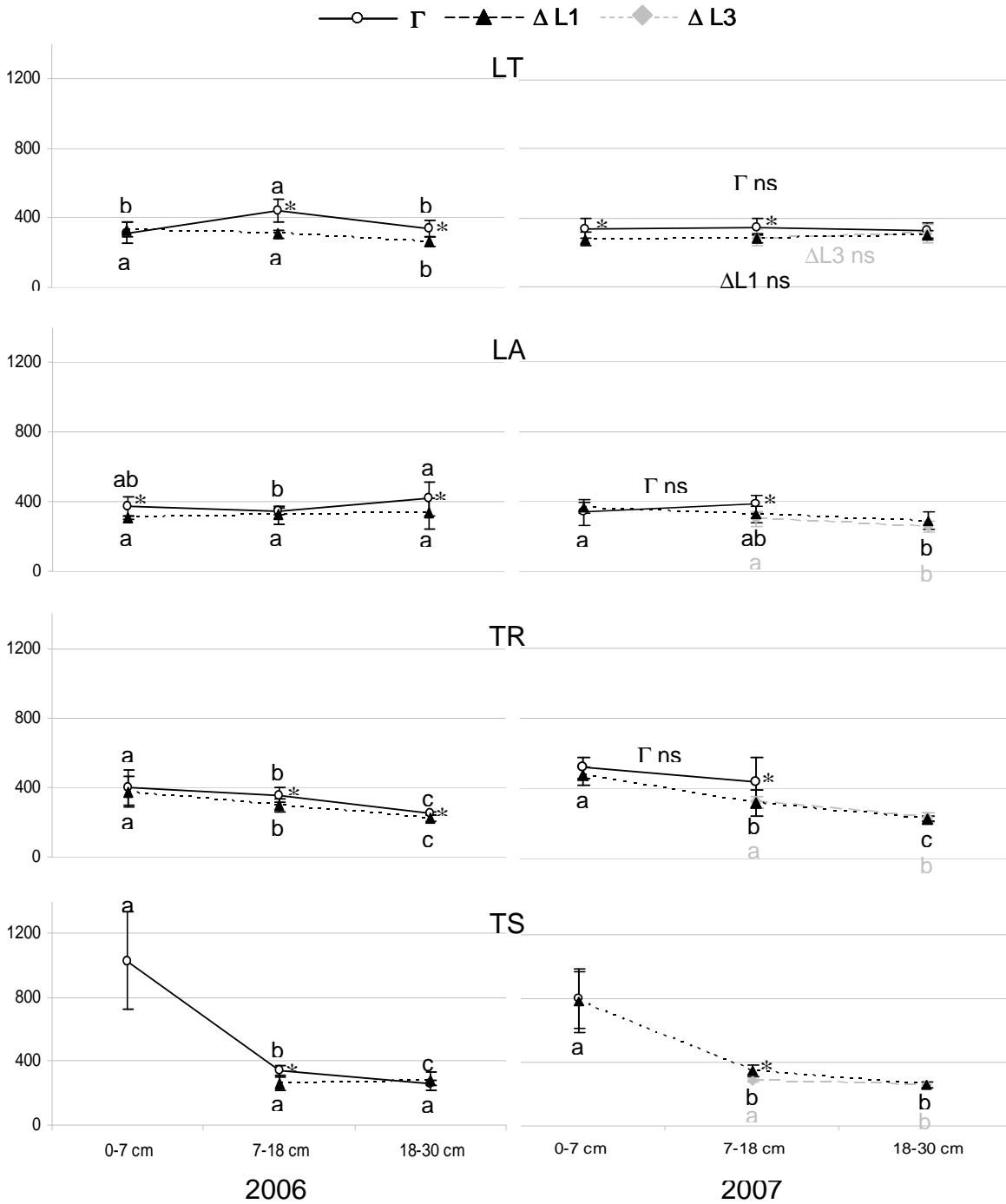


Figure 26: Carbone minéralisé (mgC.kg⁻¹) des différentes modalités de travail du sol en mars 2006 et 2007 sur le site de Lyon. a-c: comparaison des horizons par type de motte; *: différences significatives entre les mottes Γ et $\Delta L1/\Delta L3$ ou entre $\Delta L1$ et $\Delta L3$.

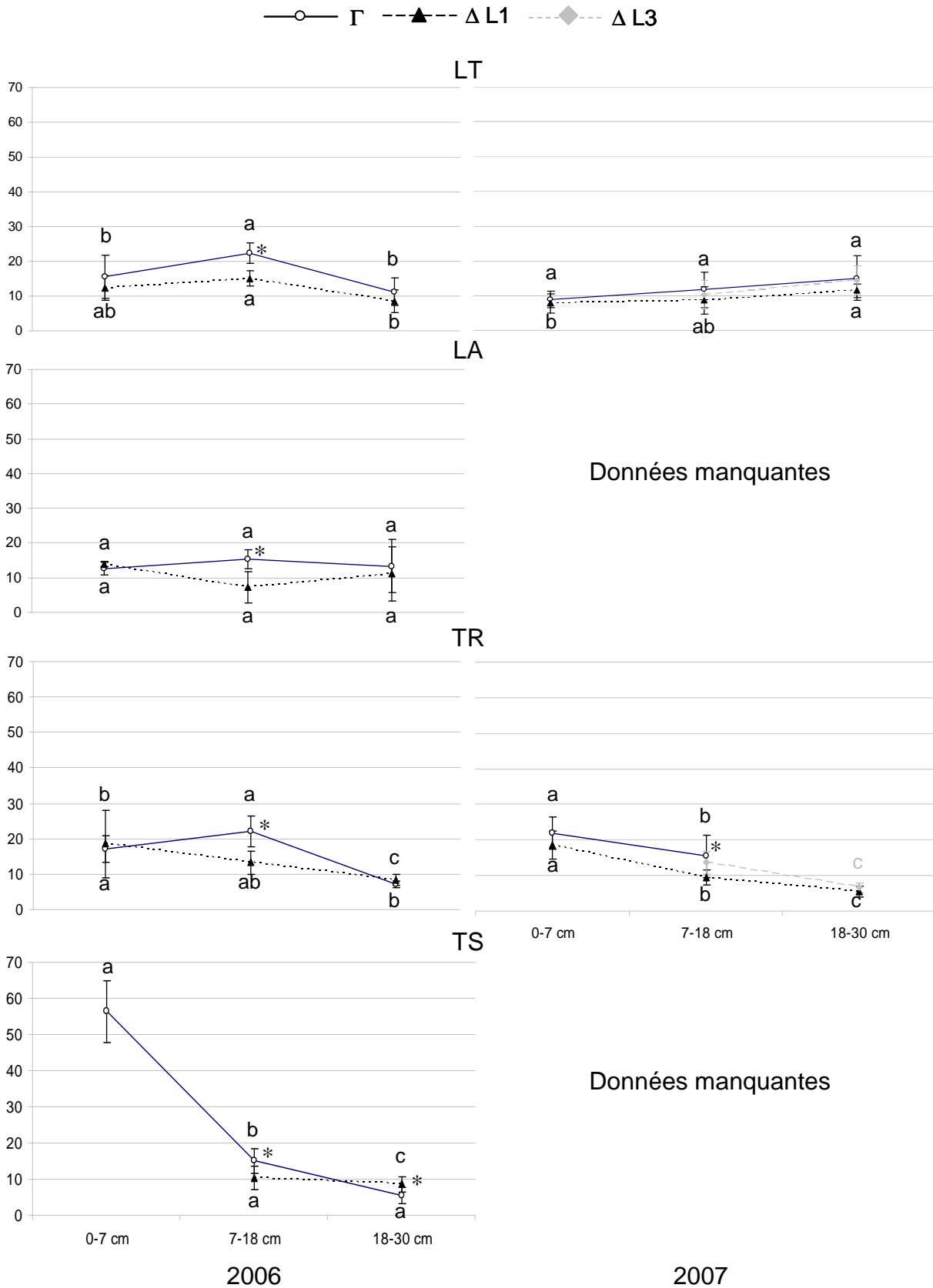


Figure 27: Potentiel de minéralisation de l'azote (Nmin, mgC.kg⁻¹) des différentes modalités de travail du sol en mars 2006 et 2007 sur le site de Lyon.

a-c: comparaison des horizons par type de motte ; *: différences significatives entre les mottes Γ et $\Delta L1/\Delta L3$ ou entre $\Delta L1$ et $\Delta L3$.

I.2 / Site expérimental de Kerguéhennec

I.2.1 / Biomasse microbienne du sol

Effets de la structure du sol (type de motte) :

L'effet du type de motte est significatif en 2006 mais non en 2007. En 2006, la biomasse microbienne au sein des mottes Γ est significativement supérieure à celle des mottes Δ de 16 % ($p=0,0013$). Cette différence se manifeste à différentes profondeurs selon les modalités (Figure 28).

Effets de la profondeur de prélèvement :

En 2006, la BM de la modalité LT au sein des mottes Γ augmente avec la profondeur de prélèvement tandis qu'elle diminue au sein des mottes Δ et en 2007 elle est répartie de façon homogène quel que soit le type de motte. La BM des modalités LA, TR et TS diminue avec la profondeur de prélèvement, quel que soit le type de motte considéré en 2006 (stratification verticale moins marquée pour LA et TR par rapport à TS). En 2007, les mêmes tendances se dessinent sauf pour la modalité LA dont la BM est répartie de façon homogène sur 0-22 cm (Figure 28).

Comparaison des modalités par horizon et type de motte :

La BM de la modalité TS de l'horizon 0-7 cm est significativement supérieure à celle des autres modalités, quels que soient le type de motte et l'année considérés ($TS > TR > LA = LT$).

En 2006, la BM mesurée au sein des mottes Γ de l'horizon 7-17 cm ne permet pas de différencier les modalités, tandis que la BM des mottes Δ des modalités labourées est significativement supérieure aux modalités TR et TS. En 2007, la modalité LA présente une BM supérieure aux autres modalités quel que soit le type de motte.

Enfin, pour l'horizon 17-22 cm, la modalité LT a une BM supérieure aux autres modalités en 2006 ainsi qu'en 2007 avec la modalité LA.

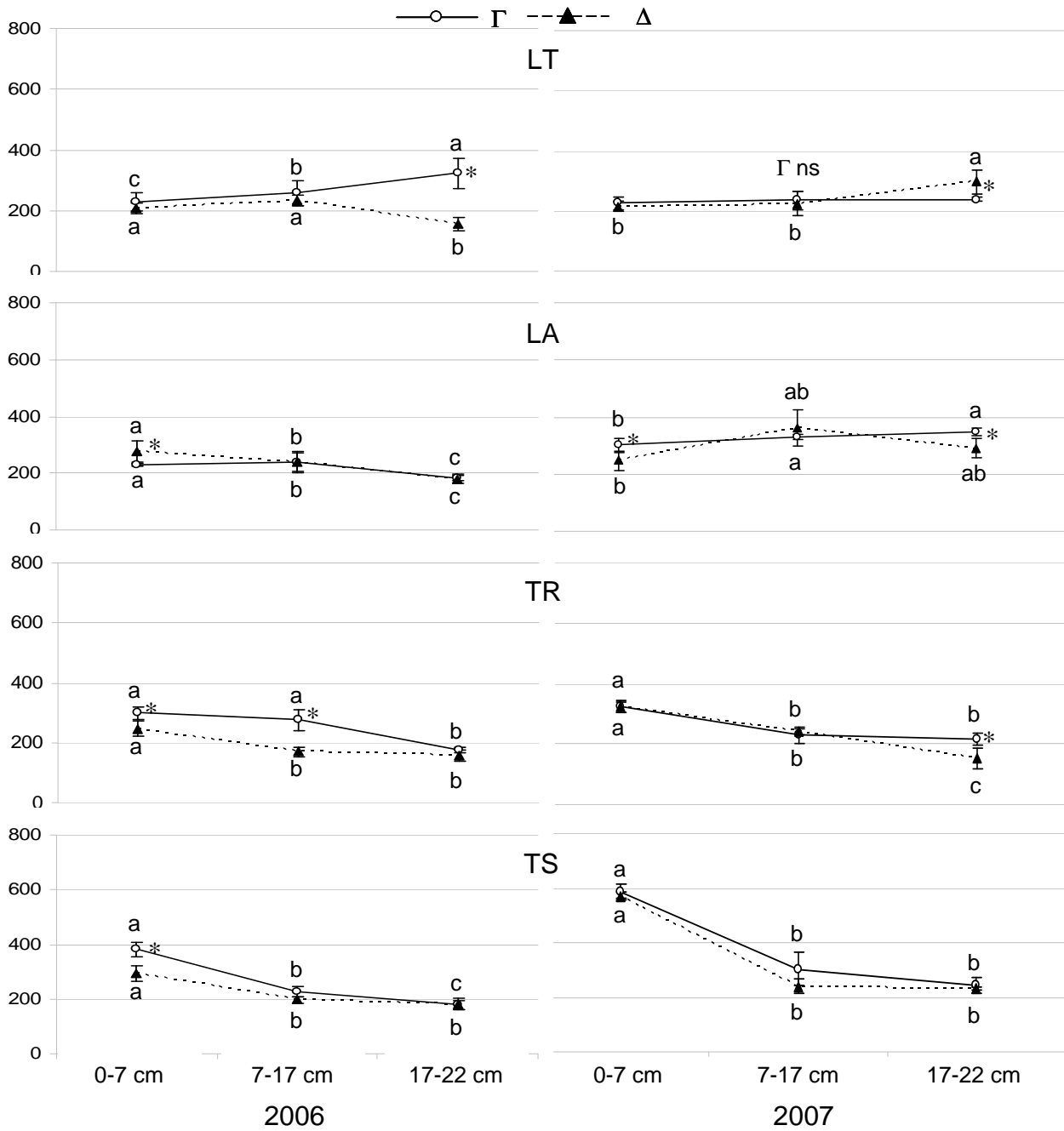


Figure 28: Biomasse microbienne (mgC.kg⁻¹) des différentes modalités de travail du sol en mars 2006 et 2007 du site de Kerguéhennec.

a-c: comparaison des horizons par type de motte; *: différences significatives entre les mottes Γ et Δ.

1.2.2 / Biomasse microbienne du sol exprimée en pourcentage du C total

Les effets de la structure du sol et de la profondeur d'enfouissement des résidus de culture sur la BM exprimée en pourcentage du C total (BM%C) sont identiques à ceux observés sur la BM (Tableau 11). C'est-à-dire que :

- l'effet du type de motte est significatif en 2006 (BM%C supérieur de 13 % au sein des mottes Γ par rapport aux mottes Δ en 2006 ; $p=0,0013$) mais cet effet disparaît en 2007 ;

- la BM exprimée en pourcentage du C total augmente dans les horizons de "fond de labour" des modalités LA et LT (17-22 cm et 7-17 cm pour LA et LT respectivement) tandis qu'elle diminue avec la profondeur de prélèvement pour les modalités TR et TS ;

- la BM%C est supérieure en surface pour les modalités TS et TR tandis que cette tendance s'inverse pour les horizons sous-jacents.

Tableau 11: BM%C des différentes modalités du site de Kerguéhenec en mars 2006 et 2007 : effets de la profondeur de prélèvement et du type de motte.

	Horizons (cm)	2006		2007	
		Γ	Δ	Γ	Δ
LT	0-7	1,10 \pm 0,14 ^b	1,02 \pm 0,09 ^a	1,18 \pm 0,11 ^a	1,12 \pm 0,09 ^b
	7-17	1,20 \pm 0,19 ^b	1,10 \pm 0,08 ^a	1,21 \pm 0,15 ^a	1,14 \pm 0,20 ^b
	17-22	1,54 \pm 0,24 ^a	0,76 \pm 0,11 ^b	1,18 \pm 0,03 ^a	1,49 \pm 0,20 ^a
LA	0-7	0,94 \pm 0,03 ^{ab}	1,13 \pm 0,16 ^a	1,34 \pm 0,11 ^b	1,11 \pm 0,15 ^b
	7-17	0,97 \pm 0,13 ^a	1,03 \pm 0,17 ^{ab}	1,46 \pm 0,05 ^a	1,65 \pm 0,29 ^a
	17-22	0,82 \pm 0,04 ^b	0,86 \pm 0,07 ^b	1,57 \pm 0,06 ^a	1,48 \pm 0,28 ^a
TR	0-7	1,30 \pm 0,09 ^a	1,06 \pm 0,12 ^a	1,41 \pm 0,08 ^a	1,34 \pm 0,09 ^a
	7-17	1,27 \pm 0,16 ^a	0,86 \pm 0,09 ^b	1,13 \pm 0,13 ^b	1,17 \pm 0,05 ^b
	17-22	0,87 \pm 0,05 ^b	0,81 \pm 0,10 ^b	1,05 \pm 0,09 ^b	0,80 \pm 0,17 ^b
TS	0-7	1,34 \pm 0,09 ^a	1,08 \pm 0,10 ^a	1,95 \pm 0,09 ^a	2,18 \pm 0,06 ^a
	7-17	0,95 \pm 0,08 ^b	0,85 \pm 0,05 ^b	1,19 \pm 0,24 ^b	1,04 \pm 0,11 ^b
	17-22	0,79 \pm 0,07 ^c	0,83 \pm 0,09 ^b	1,11 \pm 0,13 ^b	1,13 \pm 0,03 ^b

a-c: différences entre les horizons par traitement et type de motte; les chiffres en gras sont significativement supérieur au ratio mesuré sur les autres types de mottes.

1.2.3 / Minéralisations potentielles du carbone et de l'azote

Un problème de dosage de l'activité potentielle de minéralisation de l'azote fait que les données de 2006 sur ce site sont manquantes.

Effets de la structure du sol (type de motte) :

En 2006 l'effet du type de motte sur le Cmin est significatif ($p=0,0085$) mais en 2007 cet effet n'est significatif qu'à $p=0,14$ et $p=0,18$ pour le Nmin. La minéralisation potentielle du C (Cmin) est supérieure au sein des mottes Γ par rapport aux mottes Δ de 19 % en 2006 et de 10 % en 2007 (Figure 29), mais le type de motte n'a pas d'effet significatif sur le potentiel de minéralisation de l'azote malgré une augmentation de 14 % de ce potentiel au sein des mottes Γ par rapport aux mottes Δ (Figure 30).

Effets de la profondeur de prélèvement :

En général, les potentiels de minéralisation du C et N varient peu entre les horizons de prélèvements pour les modalités labourées LA et LT (à quelques exceptions près) et diminuent avec la profondeur de prélèvement pour les modalités TR et TS (Figures 29 et 30). Les mottes Δ , surtout en 2006, lissent les différences entre les horizons de prélèvements.

Comparaison des modalités par horizon et type de motte :

Pour l'horizon 0-7 cm les Cmin et Nmin de la modalité TS sont significativement supérieurs à ceux des autres modalités quels que soient le type de motte et l'année.

Pour l'horizon 7-17 cm le Cmin de la modalité LA en 2006 est supérieur aux autres modalités quel que soit le type de motte. En 2007, les Cmin et Nmin de la modalité TS mesuré au sein des mottes Γ sont significativement supérieurs aux autres modalités ($TS > LA = LT > TR$). Les mesures au sein des mottes Δ masquent les différences entre les traitements pour le Nmin, tandis que le Cmin de la modalité LA est supérieur à celui de TR et TS.

Enfin, pour l'horizon 17-22 cm, les modalités labourées (LT et LA) ont un niveau de Cmin et Nmin supérieurs aux modalités TR et TS en 2006 et 2007 quel que soit le type de motte.

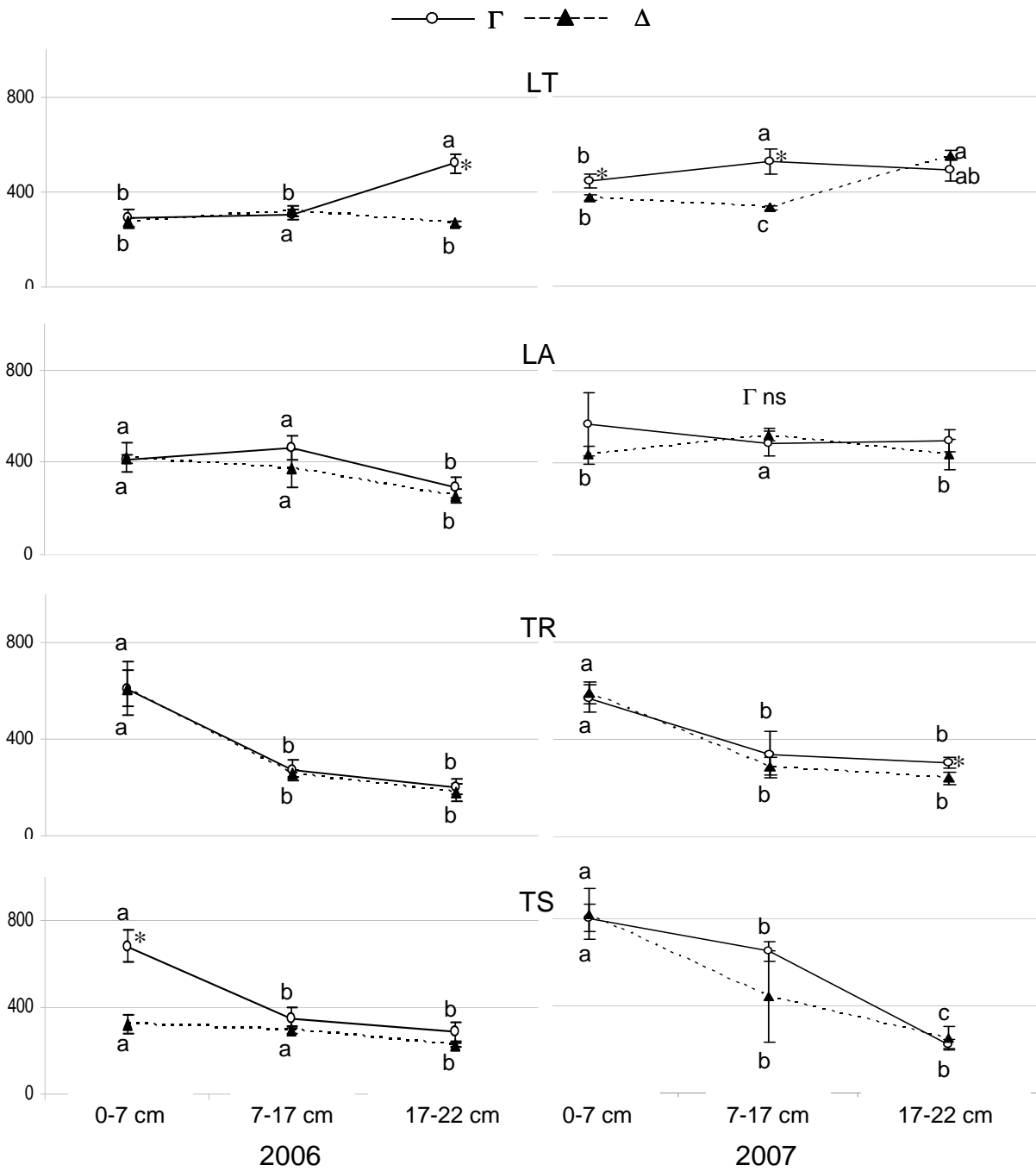


Figure 29: Carbone minéralisé (mgC.kg⁻¹) des différentes modalités de travail du sol en mars 2006 et 2007 du site de Kerguéhenec.

a-c: comparaison des horizons par type de motte; *: différences significatives entre les mottes Γ et Δ.

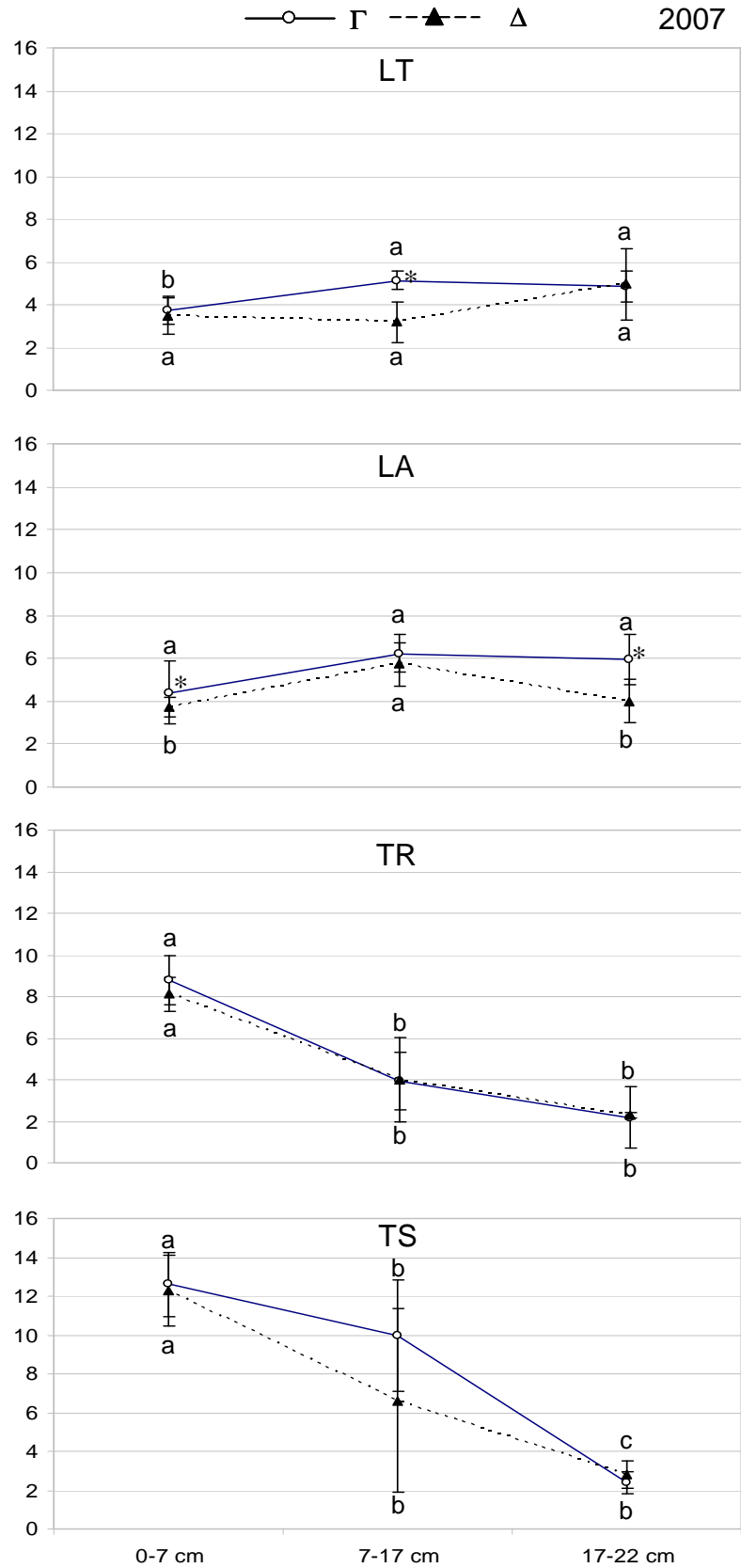


Figure 30: Potentiel de minéralisation de l'azote (Nmin, mgC.kg⁻¹) des différentes modalités de travail du sol en mars 2007 sur le site de Kerguéhenec. a-c: comparaison des horizons par type de motte ; *: différences significatives entre les mottes Γ et Δ.

I.3 / Modifications des paramètres microbiologiques quantitatifs : discussion

I.3.1 / Influence de la répartition des résidus de cultures

Quels que soient l'année et le site considérés, la quantité de microorganismes (BM) et les activités potentielles de minéralisation du carbone et de l'azote (Cmin et Nmin) sont fortement influencées par la profondeur d'enfouissement des résidus de cultures. En effet, la BM, le Cmin et le Nmin sont répartis de manière homogène sur la profondeur du labour des modalités LT et LA. La charrue, en retournant la couche de sol, enfouit les résidus de cultures de manière plus ou moins homogène (selon la qualité de réglage de l'outil) sur la profondeur de travail. En revanche, la BM, le Cmin et le Nmin présentent une stratification verticale pour les traitements TR et TS. Les valeurs de ces paramètres sont plus élevées à la surface du sol, là où les résidus de cultures sont abondants. Le chisel enfouit partiellement les résidus de cultures sur 0-17 cm de profondeur et les concentre principalement sur 0-7 cm de profondeur. Enfin, les outils utilisés pour la modalité TS (mixter, herse rotative) ne travaillent pas au-delà de 7 cm de profondeur et très peu de résidus de culture sont enfouis en dessous de cette profondeur. Ces résultats confirment ceux de nombreux auteurs qui ont également constaté que la biomasse microbienne était supérieure dans les premiers cm du sol dans les systèmes de conservation et diminuait en profondeur (Andrade *et al.*, 2003; Meyer *et al.*, 1996) suivant ainsi la répartition des résidus de culture dans le profil de sol et ce, dès les premières années de différenciation des traitements (McCarty *et al.*, 1998).

Les résidus de cultures offrent aux microorganismes du sol une source de MO labile, facilement assimilable pour la croissance microbienne (Parry *et al.*, 2000). En effet, la baisse de la BM exprimée en pourcentage de la teneur en C total (BM%C) dans les horizons qui ne sont plus travaillés mécaniquement, indique une diminution de la disponibilité de la MO pour les microorganismes (Nielsen et Winding, 2002), due à une diminution des entrées de C dans ces horizons (Meyer *et al.*, 1996). Cette baisse apparente de la disponibilité en C peut être également due à l'absence de fragmentation des agrégats qui protègent une partie des ressources organiques de l'activité microbienne (Balesdent *et al.*, 2000). Dans ces horizons, le C organique est donc plus ancien (ou C organique "natif") et permet à la BM de maintenir son niveau initial, en équilibre avec la quantité de MO disponible. Par contre, dans les horizons

où les résidus de culture sont enfouis, la quantité de C labile apportée permet une croissance microbienne importante. Cet effet de la répartition des résidus de cultures sur les microorganismes du sol est également confirmé par la mesure de la respiration spécifique (RS ; cf. annexe 8). Sur le site de Lyon, la RS augmente dans les horizons où il y a peu de résidus de culture frais qui sont enfouis (à l'exception de la modalité TS en 2006). La RS est un rapport entre le niveau C_{min} et la BM, son augmentation en profondeur est due ici à la baisse plus importante de la BM dans ces horizons par rapport à la baisse observée du C_{min} (Figures 25 et 26). L'augmentation de la RS en profondeur indique que dans un environnement trophique limitant, le C disponible est utilisé avant tout pour satisfaire les besoins énergétiques de la BM nécessaire à l'entretien de son niveau et non pas (ou très peu) pour sa croissance (Meyer *et al.*, 1996). Les substrats disponibles au sein de ces horizons sont donc minéralisés sous forme de CO₂ et non pas retenus au sein de la BM. La variation de ce paramètre peut également indiquer que des phénomènes de prédation s'exercent sur la biomasse microbienne. Les protozoaires libèrent ainsi des substrats labiles par leur activité de prédation et limitent la croissance microbienne. Mais l'augmentation de la RS peut également être attribuée à une augmentation des teneurs en MO labile dans le sol (Dilly *et al.*, 2003; Moscatelli *et al.*, 2007). Cette relation entre la RS et la quantité de MO labile disponible explique l'augmentation importante de la RS en surface de la modalité TS. Les résidus de cultures frais y sont plus abondants que pour les autres modalités et les exsudats racinaires de la culture d'avoine en 2006 contribuent à augmenter encore plus ce pool de MO labile en surface par rapport aux autres modalités (Parry *et al.*, 2000), d'où la mesure d'une croissance forte de la BM et d'un flush de minéralisation (dégagement de CO₂ et minéralisation de l'N importants) pour la modalité TS.

Sur le site de Kerguéhennec en 2006, la RS diminue dans les horizons où aucun résidu de culture n'est enfoui (annexe 8). La diminution de ce ratio est due à une baisse moins importante de la BM dans ces horizons par rapport à la baisse plus nette du C_{min} à la même profondeur (Figures 28 et 29). Ces variations indiqueraient donc une concurrence importante entre les microorganismes pour les ressources organiques sur ce site, comme le suggèrent Moscatelli *et al.* (2007). Les ressources trophiques seraient donc utilisées avant tout pour le maintien de la BM et non pour sa croissance, tout comme pour le site de Lyon, alors que ce paramètre varie en sens inverse sur les deux sites. L'utilisation de cet indicateur de l'état physiologique

des communautés microbiennes s'avère donc problématique car ses variations sont difficilement prédictibles et il confond les effets d'un stress de celui d'une perturbation (Wardle et Ghani, 1995).

En 2007 sur le site de Kerguéhennec, les ratios BM%C et RS indiquent une augmentation de la disponibilité des ressources organiques pour les microorganismes par rapport à 2006. Cette différence entre les deux années d'échantillonnage est certainement due à l'épandage d'un engrais azoté organique réalisé 15 jours avant l'échantillonnage (Annexe 1-B) et qui masque ou réduit l'effet des techniques de travail du sol sur les paramètres microbiens mesurés.

Ces résultats montrent que la présence de MO récemment enfouie et la désagrégation de la structure du sol par les outils favorisent la croissance microbienne et ses activités potentielles de minéralisation du C et N, et ce dès les premières années d'application des traitements.

1.3.2 / Influence de la structure du sol (type de motte)

La structure du sol (niveau de tassement du sol ; type de motte) a une influence sur la répartition de la biomasse microbienne et de ses activités potentielles au sein du profil cultural sur les deux sites expérimentaux, bien que cette influence soit plus marquée sur le site de Lyon. Cet effet est surtout visible en 2006 où on observe une baisse de la BM, du C_{min} et du N_{min} au sein des mottes Δ. Nous avons vu que la quantité de C et N totaux et de MOP étaient identiques entre ces deux types de mottes. La diminution de la BM et des activités potentielles au sein des mottes Δ semble donc liée à la structure des mottes plus qu'à la disponibilité des substrats entre ces deux zones de prélèvements. Les mottes Δ ont une masse volumique plus importante que les mottes Γ et une plus faible proportion de macro-pores (Curmi, 1988; Roger-Estrade *et al.*, 2004). Or, la macroporosité favorise la diffusion et la concentration de l'O₂ à l'échelle de la motte (Γ *versus* Δ; Curmi *et al.*, 1996) et de l'agrégat (Sierra et Renault 1996). De plus, le taux de saturation de la porosité en eau et le risque d'anoxie associé est plus important pour une plus large gamme de pF au sein des mottes Δ (Curmi, 1988). Les microorganismes du sol au sein des zones compactées seraient donc confrontés à des conditions anoxiques qui limiteraient leur croissance et diminueraient leur capacité à oxyder la MO du sol de façon exhaustive (Aon *et al.*, 2001b; McGill, 2007). De plus, l'accumulation de CO₂ et

la baisse de la concentration en O_2 du fait de l'activité respiratoire des microorganismes inhibent ou ralentissent l'activité des microorganismes. Or, diffusion de l' O_2 et les échanges gazeux sont déterminés en grande partie par le taux de saturation en eau de la porosité du sol (Sierra et Renault 1996; Aon *et al.*, 2001a). L'accumulation de CO_2 pourrait donc être supérieure au sein des mottes Δ par rapport aux mottes Γ car le renouvellement de l' O_2 et sa diffusion sont favorisés par les vides et les macro-pores (Sierra et Renault 1996).

Par ailleurs, dans un environnement compacté, la diffusion de substrats *via* la solution du sol est plus lente (Balesdent *et al.*, 2000; Ranjard et Richaume, 2001) et ralentirait ainsi le renouvellement de la quantité de substrats organiques disponibles pour la croissance microbienne au sein des mottes Δ . Cette hypothèse semble se vérifier en 2006, car la BM exprimée en pourcentage du C total (BM%C) est supérieure au sein des mottes Γ , confirmant que les microorganismes disposent d'une quantité de substrats organiques plus importante qu'au sein des mottes Δ . Certains auteurs estiment que la diminution de la BM et du Cmin au sein des horizons compactés est plus due à la réduction des entrées de C dans ces horizons qu'à la concentration en O_2 (Ahl *et al.*, 1999).

Cependant, l'effet de la structure du sol sur la BM n'est pas vérifié en 2007. Sur le site de Lyon, l'observation des profils culturaux et l'échantillonnage ont été réalisés 4 mois après le travail du sol en 2007 sous une culture de blé, contre 11 mois en 2006 sur sol nu. Plusieurs hypothèses pourraient expliquer la différence entre ces deux années : (1) le système racinaire du blé limiterait l'effet de la structure du sol, c'est à dire que les exsudats racinaires masquent l'effet de la structure du sol ; (2) il existe un effet "âge de la motte". L'hypothèse (1) est supportée par le fait que les exsudats racinaires sont une source de croissance importante pour les microorganismes (Franzluebbbers *et al.*, 1994) et qu'ils pourraient donc avoir réduit l'effet de la structure du sol sur les microorganismes. Plusieurs auteurs montrent en effet que le système racinaire des cultures masque l'effet des traitements étudiés sur les microorganismes du sol (Frey *et al.*, 1999; Kennedy *et al.*, 1999; Wiedland *et al.*, 2001). L'hypothèse (2) fait référence à l'origine des tassements occasionnés par les passages d'engins. En 2006, les mottes Δ sur lesquelles ont été réalisées les mesures microbiennes ont principalement été créées durant le printemps 2005 au cours de la saison culturale du maïs, notamment par les roues du tracteur pour le

désherbage mécanique et de la moissonneuse pour la récolte. Les mottes Δ prélevées en 2007, 4 mois après le travail du sol, sont donc *a priori* plus "jeunes" que celles prélevées en 2006, 11 mois après le travail du sol. Ainsi, l'enfouissement des résidus de cultures à proximité des zones compactées et la fragmentation de ces zones par les outils réduiraient l'effet du tassement sur les microorganismes. Mais, cet effet ne serait que transitoire car les substrats organiques se renouvelant moins rapidement au sein de ces zones (diffusion plus lente), leur quantité diminuerait au fur et à mesure que les microorganismes les minéralisent ou les assimilent et deviendrait donc limitante à plus long terme. Cette hypothèse semble vérifiée si l'on regarde la BM%C en 2006 et 2007. L'effet motte n'est plus visible sur cet indicateur en 2007, indiquant que la quantité de MO assimilable est similaire entre les mottes Γ et Δ en début de cycle cultural mais non après un temps plus long comme cela a été vérifié en 2006. Les mesures du fractionnement granulométrique viennent renforcer cette hypothèse. En effet, si la quantité de MOP est identique entre les mottes Γ et Δ L1, elle diminue significativement au sein des mottes Δ prélevées hors des zones de passages de roues de la modalité TR, horizon 7-17 cm (Δ L3 ; Figure 24, chapitre 3). Ces mottes ont une origine ancienne, car elles se situent hors des passages de roues des engins agricoles et n'ont pas été déplacées des zones compactées récentes (zones L1, sous les passages de roues) comme le fait la charrue pour la modalité LT. La BM mesurée au sein de ces mottes en 2007 sur le site de Lyon est inférieure à celle des mottes Δ L1 et Γ . Cette hypothèse n'est vérifiable que pour cet horizon de la modalité TR car l'horizon sous-jacent n'est pas fragmenté depuis 2 ans et "l'âge" des deux types de mottes (Δ L1 et Δ L3) est difficilement discernable.

Si l'effet du type de motte sur la BM n'est pas significatif en 2007, il a toujours un effet significatif sur le potentiel de minéralisation du carbone et de l'azote. Il semblerait que le Cmin et le Nmin soient des indicateurs plus sensibles des conditions environnementales des microorganismes que la biomasse microbienne. Les conditions d'anoxie au sein des mottes Δ peuvent en effet ralentir les vitesses de minéralisation des substrats organiques (Lipiec et Stepniewski, 1995) notamment en raison de l'accumulation du CO₂ et de la baisse de la concentration en O₂ au sein de ces mottes (Sierra et Renault 1996).

La diminution des activités microbiennes au sein des mottes Δ par rapport aux mottes Γ semble donc être liée à la fois à une diminution de la quantité de substrats

disponibles au sein des mottes Δ (renouvellement plus lent) et à la circulation limitée de l'O₂ au sein de ces mottes.

Sur le site de Kerguéhennec, l'effet de la structure du sol est moins important sur la BM et les potentiels de minéralisation (C_{min} et N_{min}) que sur le site de Lyon. Les prélèvements réalisés sur le site de Kerguéhennec ont été effectués 4 mois après le travail du sol sous une culture de pois et de triticales en 2006 et 2007 respectivement. La présence d'un système racinaire et la proximité de la date du travail du sol accrédiateraient l'hypothèse de "l'effet tampon" du système racinaire sur la structure du sol et l'hypothèse "âge de la motte". Mais, vu que les prélèvements ont été effectués dans les mêmes conditions les deux années sur ce site, elles ne peuvent pas expliquer l'absence d'effet du type de motte sur la BM en 2007. L'épandage d'un engrais organique azoté, facilement minéralisable, a eu lieu 15 jours avant l'échantillonnage en 2007 et pourrait masquer temporairement l'effet de la structure du sol sur les composantes microbiennes mesurées cette année. Par ailleurs, si l'effet du tassement du sol sur ces composantes microbiennes est moins intense sur ce site que sur celui de Lyon, cela peut également être dû aux différences de texture entre ces deux sites, la masse volumique apparente des mottes compactées étant moins élevée sur le site de Kerguéhennec que sur le site de Lyon (1,48 contre 1,75 g.cm⁻³ en moyenne).

1.3.3 / Comparaison des traitements

Les résultats sont similaires à ceux obtenus dans différentes études (Ahl *et al.*, 1999; Andrade *et al.*, 2003; Kandeler *et al.*, 1998; Meyer *et al.*, 1996). La BM et les potentiels de minéralisation du C et N sont supérieurs en surface (0-7 cm) dans les systèmes les moins perturbés (TS et TR) par rapport aux sols labourés, mais ce rapport s'inverse progressivement dans les horizons inférieurs. Ainsi, les modalités labourées (LA et LT) présentent une BM et des niveaux de C_{min} et N_{min} supérieurs en profondeur par rapport aux modalités TR et TS. Ces différences entre les modalités s'expliquent là encore par l'effet de la profondeur d'enfouissement des résidus de cultures qui fournissent aux microorganismes une source d'énergie pour leur croissance et leurs activités de minéralisation. Le fractionnement de la MOS réalisé sur les modalités LT et TR confirme qu'un pool labile de MO plus important se constitue en surface pour les modalités non labourées, soutenant une croissance microbienne et des activités de minéralisation du C et N importantes. Mais la baisse

de ce pool en profondeur va de pair avec une diminution de la croissance microbienne et des activités potentielles de minéralisation. On peut noter également que les différences entre les traitements se réduisent quand on considère les mesures réalisées au sein des mottes Δ . Le tassement du sol réduirait ainsi l'effet des traitements sur les microorganismes.

II / Analyse de la structure des communautés microbiennes

Dans cette partie l'évolution de la structure des communautés microbiennes entre 2005 (T0) et 2006 (T1) est analysée ainsi que l'effet des traitements LT et TR après un an de différenciation. Quand les graphiques sont issus des ACP inter-classes (lorsque cela est possible, cf. Chapitre 2) cela est précisé dans le texte ou dans le titre des graphiques. Les variables (longueur des fragments en paires de bases, pb) sont également représentées graphiquement, mais seules les variables les mieux corrélées aux axes factoriels sont cités dans le texte (non exhaustif). Par ailleurs, l'effet global de chaque traitement sur la structure des communautés microbiennes est présenté en Annexe 9 (Figures 1 à 4).

II.1 / Evolution de la structure des communautés fongiques du sol

II.1.1 / Structure des communautés fongiques du sol avant la différenciation des traitements (février 2005, T0)

L'ACP inter-classes réalisée sur les données de T-RFLP des échantillons prélevés avant la différenciation des traitements (T0) à 3 profondeurs (0-7 / 7-17 et 17-30 cm) indique que les deux premiers facteurs de l'ACP représentent 78,85 % de la variance totale des données (Figure 31). Le nombre de pics détectés et pris en compte dans l'analyse ACP est de 208. Les tests de permutation révèlent un effet bloc et horizon importants ($p < 0,001$). La structure des communautés fongiques est différente entre les horizons de prélèvements (Figure 31 A), notamment entre les horizons 0-7 et 17-30 cm dont les points sont séparés sur le plan factoriel par l'axe factoriel 1 ($F1 = 52,76 \%$). Les points prélevés dans le bloc 1 sont corrélés positivement avec l'axe factoriel 2 ($F2 = 26,09 \%$) tandis que les points issus du bloc 2 sont corrélés négativement à cet axe (Figure 31 A).

L'analyse du plan factoriel des variables (Figure 31 B) indique que les variables fragments de 97 et 325 pb sont corrélés positivement à F1, et les variables fragments de 75, 310, 315, 566, 571 et 307 sont corrélés négativement à F1. Pour F2, les fragments de 70, 67, 68 72 et 108 pb sont corrélés positivement à F2 tandis que les fragments de 307 et 97 pb sont corrélés négativement à cet axe.

Ainsi, il semble que les fragments de 97 pb sont caractéristiques des communautés fongiques de l'horizon 0-7 cm et les fragments de 307 pb sont caractéristiques de l'horizon 17-30 cm. Le bloc 1, quel que soit l'horizon semble être caractérisé notamment par les fragments de 108 pb.

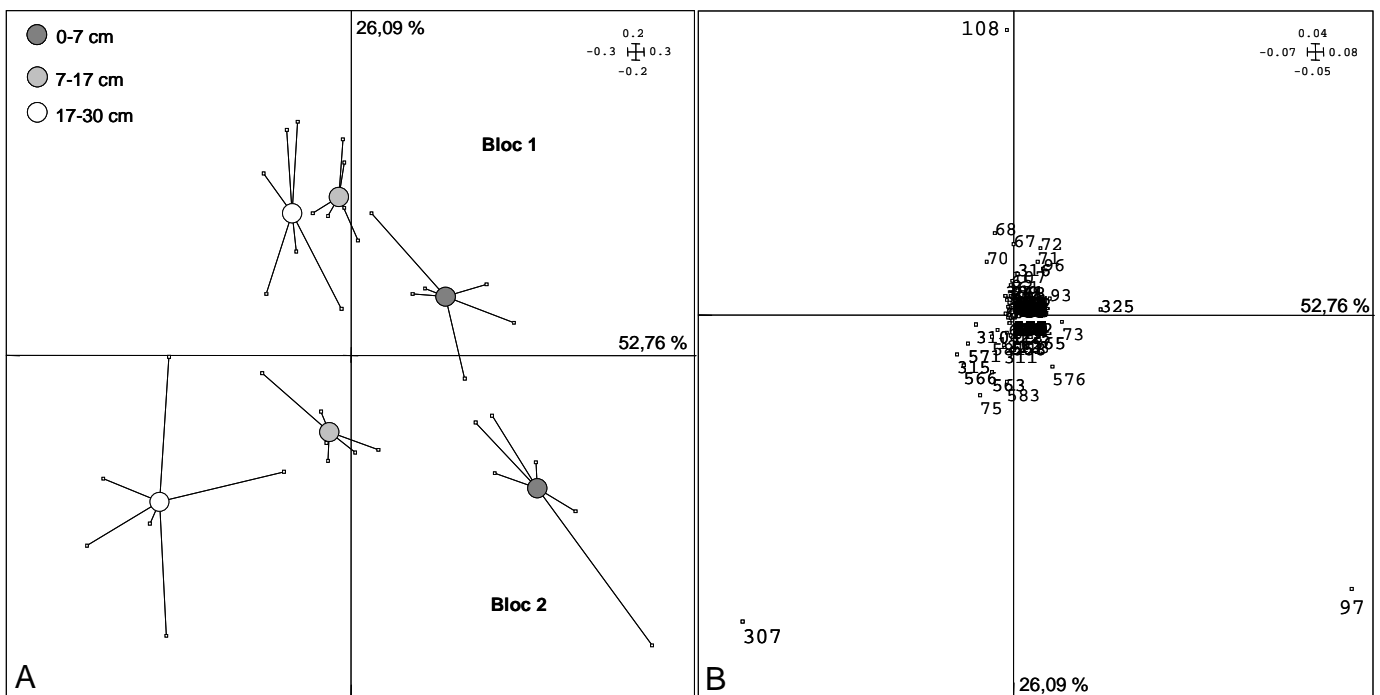


Figure 31 : Structure des communautés fongiques : ACP inter-classes (horizon-bloc) des données de T-RFLP 18S avant la différenciation des traitements (février 2005). A : carte factorielle des points ; B : carte factorielle des variables.

II.1.2 / Evolution de la structure des communautés fongiques du labour traditionnel (LT) entre février 2005 et mars 2006

Le plan factoriel de l'ACP inter-classes sur lequel sont projetés les points issus des 3 profondeurs de prélèvements à T0 et T1 représente 59,19 % de la variance totale du jeu de données (Figure 32).

Les tests de permutation révèlent que la structure des communautés fongiques est différente entre T0 et T1 et montrent également un effet bloc et horizon de prélèvement ($p < 0,001$). Les points issus de T0 sont corrélés positivement à F2 tandis

que ceux de T1 sont corrélés négativement à F2, à l'exception des points de l'horizon 0-7 cm à T1. Quelle que soit l'année considérée, la structure des communautés fongiques de l'horizon 0-7 cm se distingue nettement de celle des autres horizons (Figure 32 A) ; les différences entre les horizons 7-17 cm et 17-30 cm apparaissent moins clairement. La structure des communautés fongiques diffère également entre les blocs, cet effet est clairement visible pour l'horizon 0-7 cm à T1. Les points issus du bloc 1 sont corrélés positivement à F1 tandis que ceux issus du bloc 2 sont corrélés négativement à F1.

L'analyse du plan factoriel des variables (Figure 32 B) indique que les variables fragments de 70 et 68 pb sont corrélés négativement à F1 et positivement à F2, tandis que le fragment de 566 pb est corrélé négativement à F1 et F2. Le fragment de 97 pb est corrélé positivement à F1 et F2 tout comme les fragments de 73, 308, 108, 324 et 72 pb mais dans une moindre mesure. Les fragments de 68, 71, 66 et 70 pb sont corrélés négativement à F2.

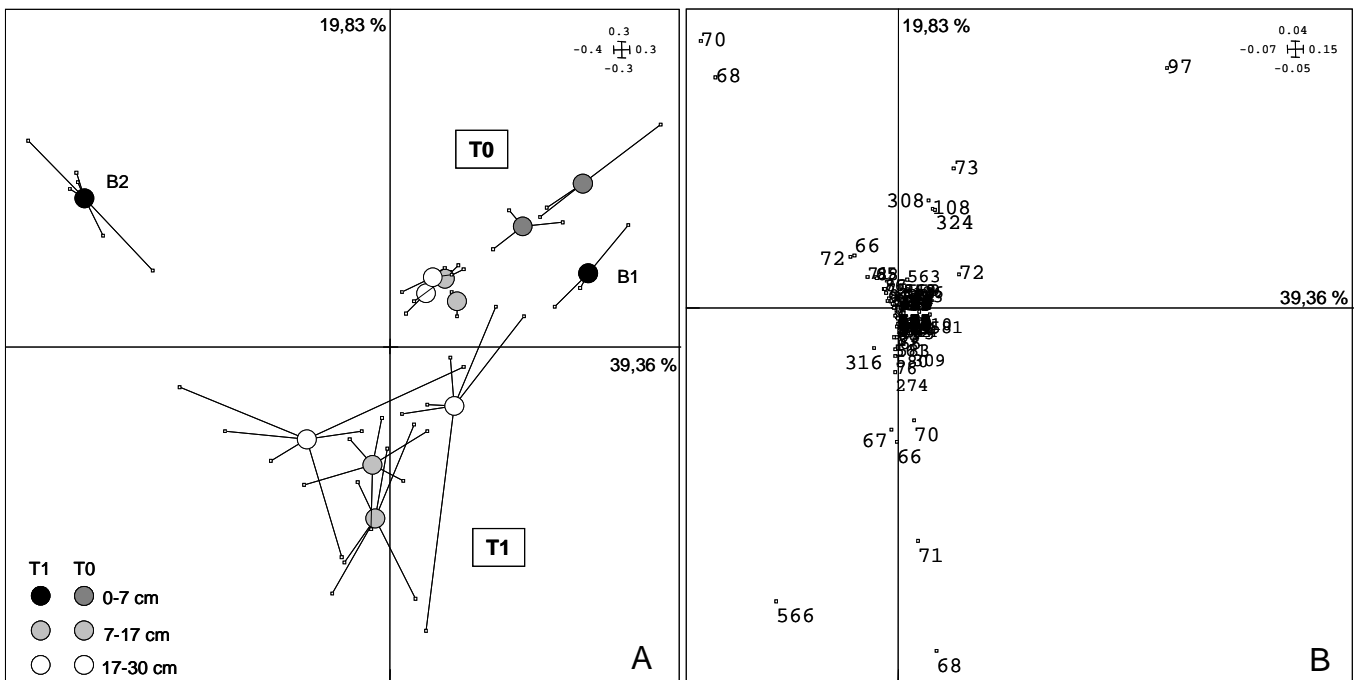


Figure 32 : Structure des communautés fongiques : ACP inter-classes (année, horizon, bloc) des données de T-RFLP 18S avant la différenciation des traitements (T0) et après un an d'application du labour traditionnel (T1 LT). A : carte factorielle des points ; B : carte factorielle des variables (B1 = bloc 1; B2 = bloc 2).

II.1.3 / Evolution de la structure des communautés fongiques entre T0 et T1 pour le traitement travail du sol réduit (TR)

Le plan factoriel de l'ACP inter-classes sur lequel sont projetés les points issus des 3 profondeurs de prélèvements à T0 et T1 représente 68,44 % de la variance totale du jeu de données (Figure 33). Le nombre de pics détectés et pris en compte dans l'analyse ACP est de 227. Les tests de permutation révèlent que la structure des communautés fongiques est différente entre T0 et T1 et montrent également un effet bloc ($p < 0,001$) et horizon de prélèvement ($p = 0,003$). L'effet le plus important est l'effet année de prélèvement. Les points issus de T0 sont corrélés positivement avec l'axe factoriel 1 (F1) tandis que la majorité des points issus de T1 sont corrélés négativement à F1 (Figure 33 A). Là encore, les points de l'horizon 0-5 cm se distinguent des autres. La structure des communautés fongiques diffère également entre les blocs 1 et 2 quelle que soit l'année de prélèvement.

L'analyse du plan factoriel des variables (Figure 33 B) indique que les variables fragments de 69, 68 et 566 pb sont corrélés négativement à F1. Les fragments de 307, 73, 109 et 71 pb sont corrélés positivement à F1 (sauf 71) et F2 et les fragments de 74 et 97 pb sont corrélés positivement à F1 et négativement à F2.

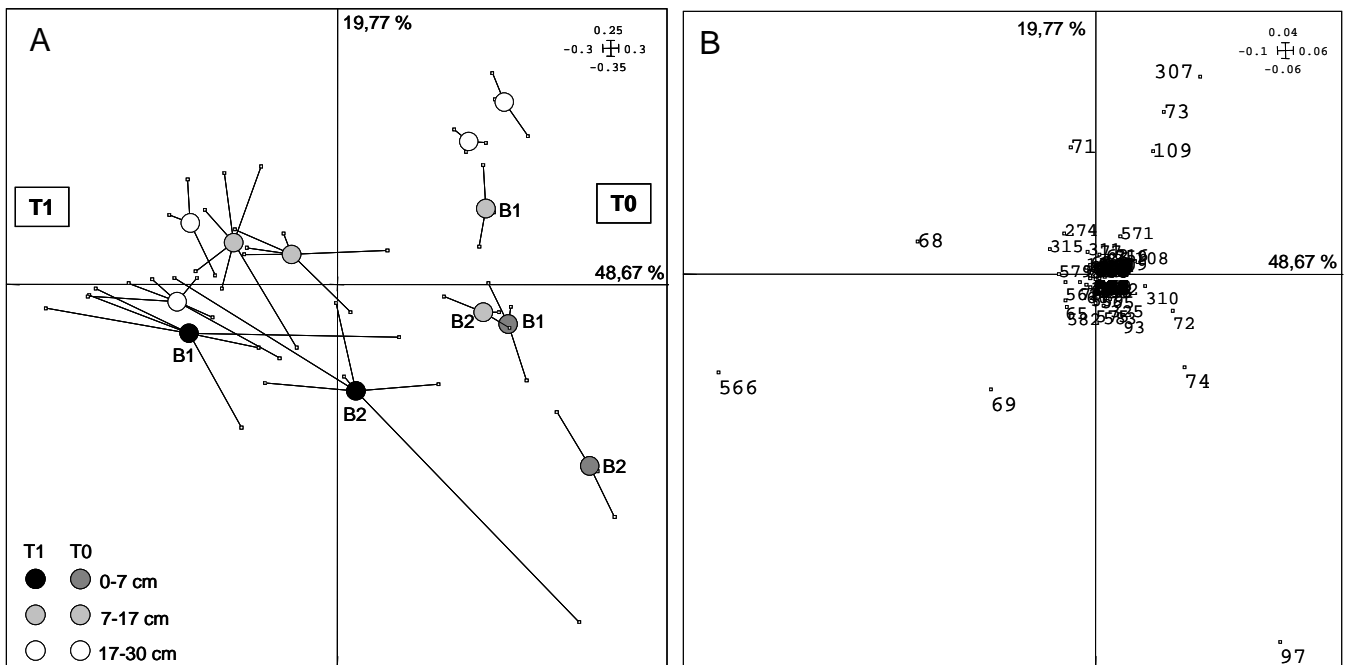


Figure 33: Structure des communautés fongiques : ACP inter-classes (année, horizon, bloc) des données de T-RFLP 18S avant la différenciation des traitements (T0) et après un an d'application du travail du sol réduit (T1 TR). A : carte factorielle des points ; B : carte factorielle des variables (B1 = bloc 1 ; B2 = bloc 2).

II.1.4 / Influence du LT et du TR sur la structure des communautés fongiques après un an de différenciation des traitements : horizon 0-7 cm

Le plan factoriel de l'ACP inter-classes ci-dessous représente 93,41 % de la variance totale jeu de données (Figure 34). Le nombre moyen de pics détectés et pris en compte dans les analyses ACP 18S est de 179 quel que soit l'horizon considéré.

L'analyse de ce plan factoriel révèle l'influence de la technique de travail du sol sur la structure des communautés fongiques de l'horizon 0-7 cm. Les tests de permutation réalisés confirment cette influence ($p < 0,02$). Les points issus du traitement TR sont corrélés négativement à F1 tandis que les points issus du traitement LT sont corrélés positivement à F1 (Figure 34 A). L'influence du type de motte que semble révéler l'analyse de ce plan factoriel n'est pas confirmé par les tests de permutation ($p = 0,176$), la structure graphique observée concernant ce facteur semble donc être due au hasard. L'effet bloc n'est pas significatif pour cet horizon ($p = 0,268$).

L'analyse du plan factoriel des variables (Figure 34 B) indique que les variables fragments de 67 et 566 pb sont corrélés négativement à F1 tandis que les fragments 97, 69 et 580 sont corrélés positivement avec F1.

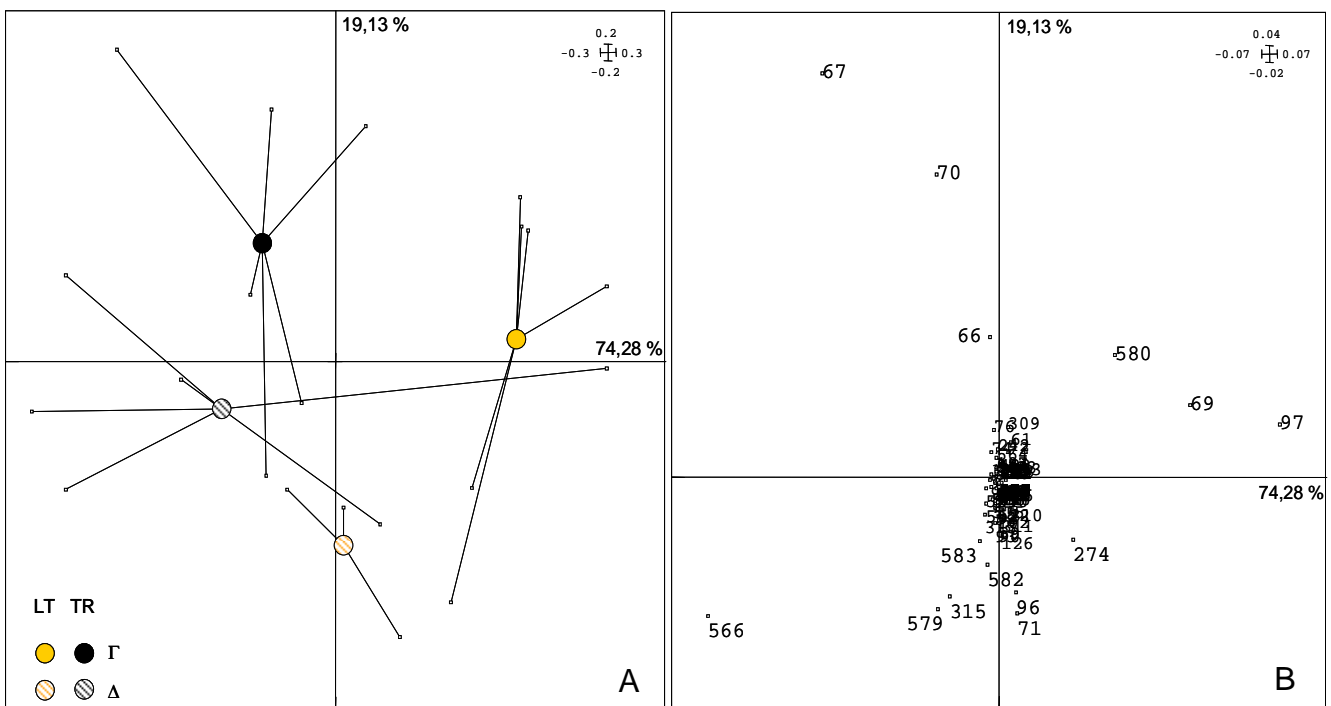


Figure 34: Influence de la technique de travail du sol et du type de motte sur la structure des communautés fongiques de l'horizon 0-7 cm après un an de différenciation des traitements LT et TR. A : carte factorielle des points ; B : carte factorielle des variables.

II.1.5 / Influence du LT et du TR sur la structure des communautés fongiques après un an de différenciation des traitements : horizon 7-17 cm

Le plan factoriel de l'ACP inter-classes (bloc-motte) représente 89 % de la variance totale du jeu de données (Figure 35).

L'ACP inter-classes a été réalisée en confondant les traitements (TR et LT) par type de motte, la structure des communautés des champignons du sol ne se distinguant pas entre ces deux techniques de travail du sol après un an de différenciation des traitements. Les tests de permutation révèlent par contre une influence des blocs ($p < 0,001$) et du type de motte ($p = 0,029$) sur la structure des communautés fongiques (Figure 33 A). Les points issus du bloc 2 sont corrélés négativement à F1 et ceux du bloc 1 sont corrélés positivement à F1. Les points issus des mottes Δ sont corrélés positivement à F2 tandis que ceux des mottes Γ sont corrélés négativement à F2.

L'analyse du plan factoriel des variables (Figure 35 B) indique que les variables fragments de 566, 315 et 274 pb sont corrélés positivement à F2 et les fragments de 97, 309, 69 et 313 sont corrélés négativement à F2.

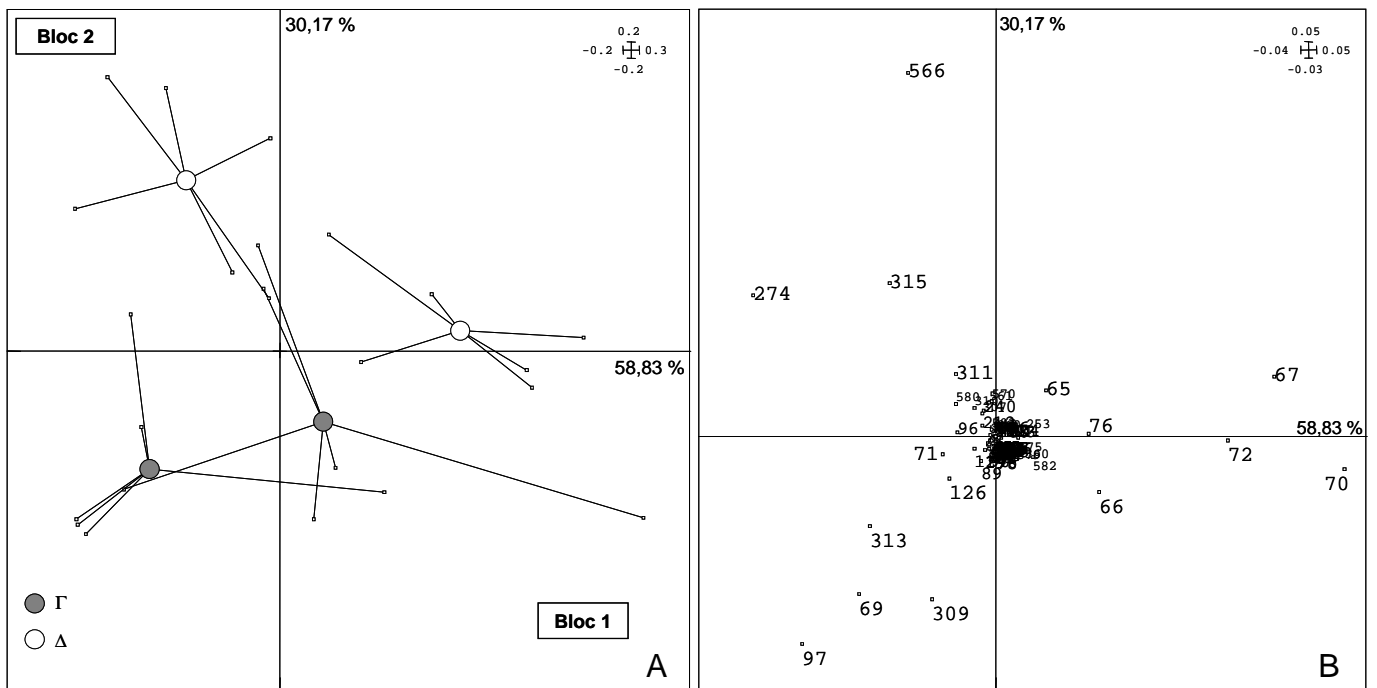


Figure 35: Influence de la technique de travail du sol et du type de motte sur la structure des communautés fongiques de l'horizon 7-17 cm après un an de différenciation des traitements LT et TR. A : carte factorielle des points ; B : carte factorielle des variables.

II.1.6 / Influence du LT et du TR sur la structure des communautés fongiques après un an de différenciation des traitements: horizon 17-30 cm

Le plan factoriel de l'ACP inter-classes représente 65,44 % de la variance totale du jeu de données (Figure 36).

Les tests de permutation révèlent une influence des blocs ($p=0,034$) et de la technique de travail du sol ($p<0,001$) sur la structure des communautés fongiques. Par contre, le type de mottes ne semble pas avoir d'influence sur la structure des communautés fongiques de cet horizon. L'ACP inter-classes a donc été réalisée par traitement et par bloc en confondant les types de mottes Γ et Δ (Figure 36 A). Les traitements sont séparés selon l'axe factoriel 1 (F1 = 60,14 %) et les blocs sont séparés selon l'axe factoriel 2 (F2 = 27,93 %). Cependant, l'effet bloc semble se manifester surtout pour le traitement TR et moins pour la modalité LT.

L'analyse du plan factoriel des variables (Figure 36 B) indique que les variables fragments de 67, 70 et 71 pb sont corrélés négativement à F1 et les fragments de 69 et 566 sont corrélés positivement à F1 et respectivement positivement et négativement à F2.

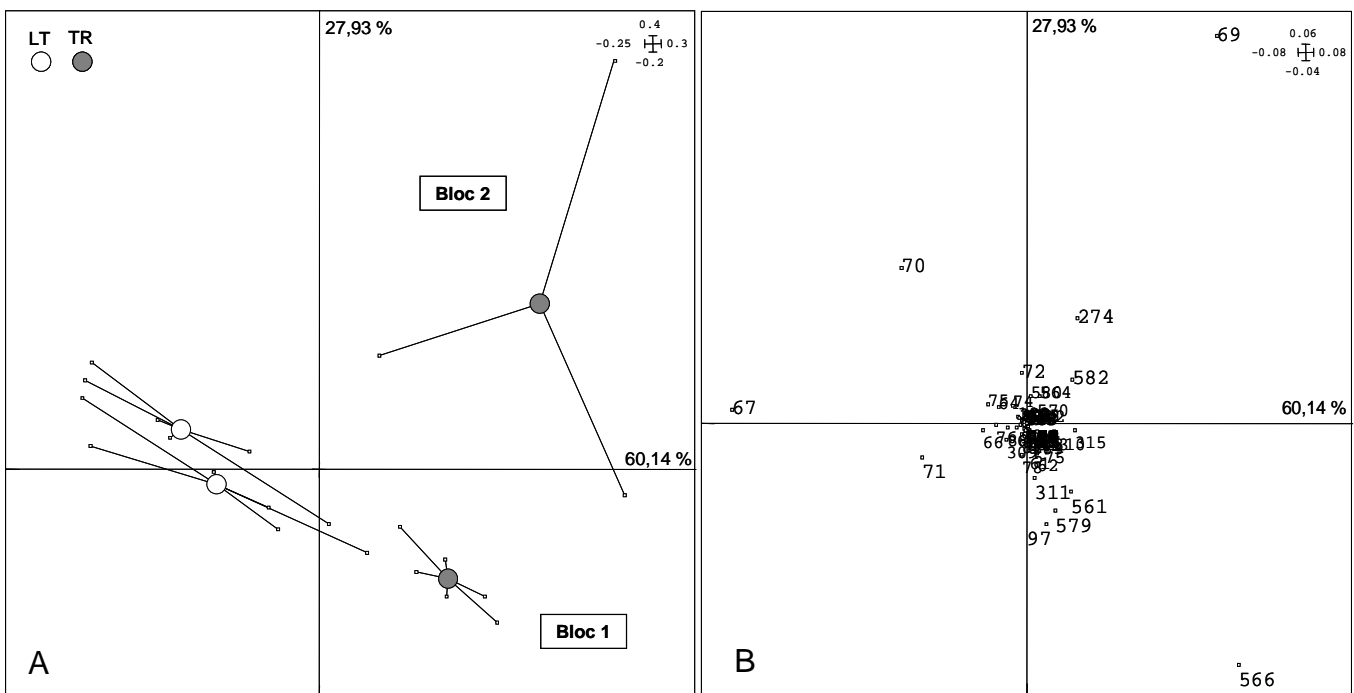


Figure 36: Influence de la technique de travail du sol et du type de motte sur la structure des communautés fongiques de l'horizon 17-30 cm après un an de différenciation des traitements LT et TR. A : carte factorielle des points ; B : carte factorielle des variables.

II.2 / Evolution de la structure des communautés bactériennes du sol

II.2.1 / Structure des communautés bactériennes du sol avant la différenciation des traitements (février 2005)

L'ACP inter-classes réalisée sur les données de T-RFLP des échantillons prélevés avant la différenciation des traitements (T0) à 3 profondeurs (0-7 / 7-17 et 17-30 cm) indique que les deux premiers facteurs de l'ACP représentent 93,19 % de la variance totale des données (Figure 37). Le nombre de pics détectés et pris en compte dans l'analyse ACP est de 239. L'effet bloc n'est pas significatif sur la structure des communautés bactériennes à T0. Par contre, les tests de permutations révèlent un effet horizon ($p=0,017$) et un effet des parcelles ($p<0,001$). Avant la différenciation des traitements, la structure des communautés bactériennes était donc différente entre les parcelles sur lesquelles ont été appliqués les traitements LT et TR ainsi qu'entre les horizons de prélèvements. Les traitements sont séparés selon l'axe factoriel 1 (F1 = 68,98 %) tandis que les horizons sont séparés selon l'axe factoriel 2 (F2 = 24,21 %), l'horizon 0-7 cm étant séparé nettement des autres horizons (Figure 37 A). L'analyse du plan factoriel des variables (Figure 37 B) indique que les variables fragments de 611, 615 et 222 pb sont corrélés positivement à F2 et le fragment de 613 pb est corrélé positivement à F1.

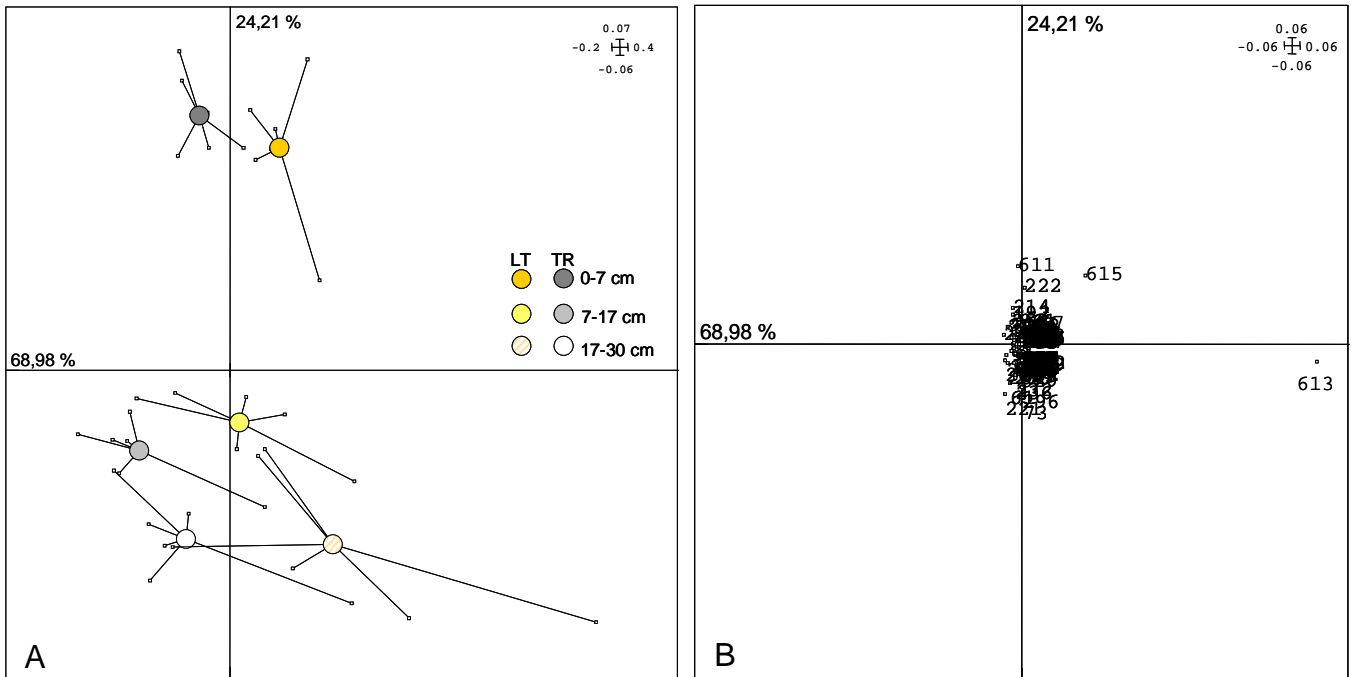


Figure 37: Structure des communautés bactériennes: ACP inter-classes (traitements-horizon) des données de T-RFLP 16S avant la différenciation des traitements (février 2005). A : carte factorielle des points ; B : carte factorielle des variables.

II.2.2 / Evolution de la structure des communautés bactériennes du labour traditionnel (LT) entre février 2005 et mars 2006

Le plan factoriel de l'ACP inter-classes représente 86,67 % de la variance totale du jeu de données (Figure 38). Le nombre de pics détectés et pris en compte dans l'analyse ACP est de 315.

Les tests de permutation révèlent un effet année important. La structure des communautés microbiennes est différente entre les prélèvements de T0 et T1 ($p < 0,001$), les années étant séparées selon l'axe factoriel 2 ($F_2 = 37,64 \%$) (Figure 38 B). L'effet bloc est également significatif ($p = 0,002$), cet effet se révèle notamment pour les prélèvements de T0, les blocs étant séparés selon l'axe factoriel 1 ($F_1 = 49,03 \%$). Par contre, la profondeur de prélèvement semble avoir une influence moins importante que les facteurs bloc et année sur la structure des communautés bactériennes ($p = 0,08$). L'effet année, "écrase" les différences entre les horizons de prélèvements à T1. L'analyse du plan factoriel des variables (Figure 38 B) indique que les variables fragments de 614, 615 et 613 pb sont corrélés positivement à F_2 et négativement à F_1 (sauf pour le fragment de 613 pb, corrélés positivement à F_1). Les fragments de 201, 222 et 328 pb sont corrélés négativement à F_2 . Les trois pics corrélés à F_1 sont très proches et peuvent être un artéfact dû au traitement des données de T-RFLP par plusieurs macros.

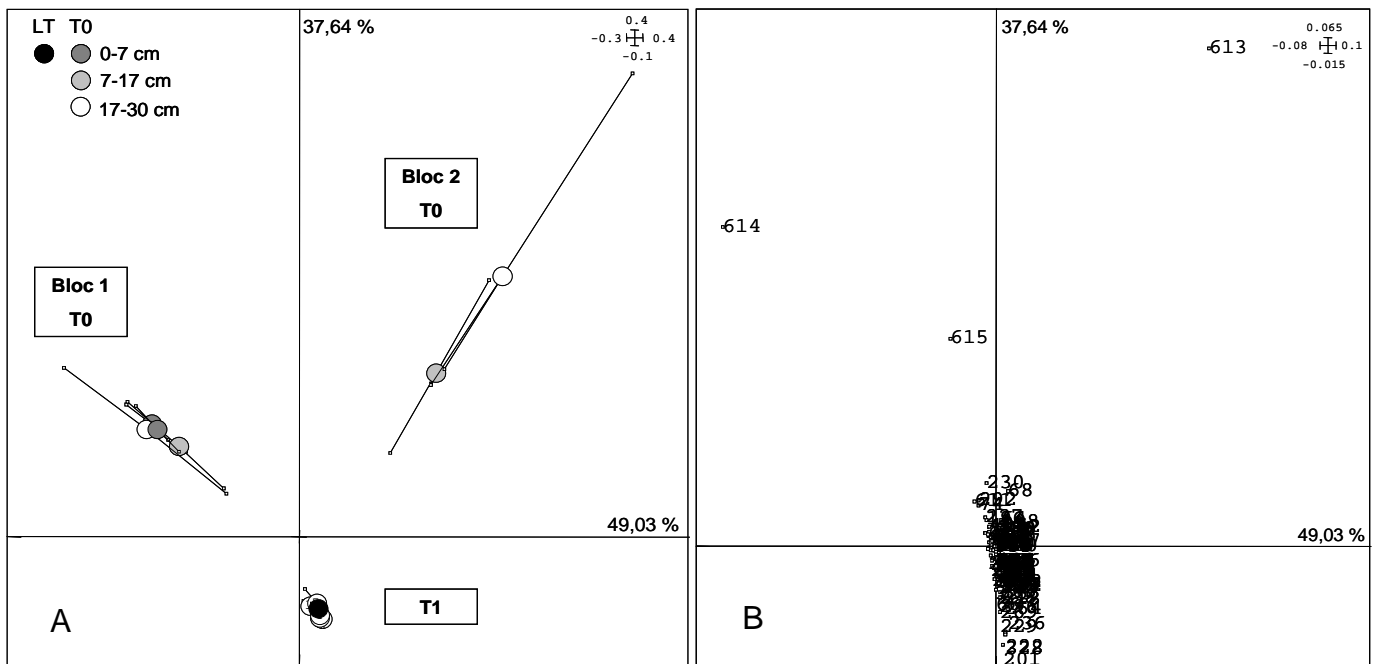


Figure 38: Structure des communautés bactériennes: ACP inter-classes des données de T-RFLP 16S avant la différenciation des traitements (T0) et après un an d'application du labour traditionnel (T1 LT). A : carte factorielle des points ; B : carte factorielle des variables.

II.2.3 / Evolution de la structure des communautés bactériennes du travail du sol réduit entre février 2005 et mars 2006

Le plan factoriel de l'ACP inter-classes représente 79,7 % de la variance totale du jeu de données (Figure 39). Le nombre de pics détectés et pris en compte dans l'analyse ACP est de 304.

La structure des communautés bactériennes est différente entre les prélèvements de T0 et T1 ($p < 0,001$), les années sont séparées selon l'axe factoriel 1 (F1 = 63,02 %), à l'exception du point de l'horizon 17-30 cm de T1 qui est corrélé négativement à F1 (Figure 39 A). L'effet bloc est également significatif ($p = 0,036$) ainsi que la profondeur de prélèvement ($p = 0,025$), mais ces effets ne semblent être dus qu'à 2 points issus respectivement des horizons 0-7 cm bloc 1 et 17-30 cm bloc 2 du prélèvement à T1.

L'analyse du plan factoriel des variables (Figure 39 B) indique que la variable fragment de 613 pb est négativement corrélée à F1. Les fragments de 326, 201 et 229 pb sont corrélés positivement à F1 tandis que les fragments de 202, 230, 75 et 61 sont corrélés négativement à F2.

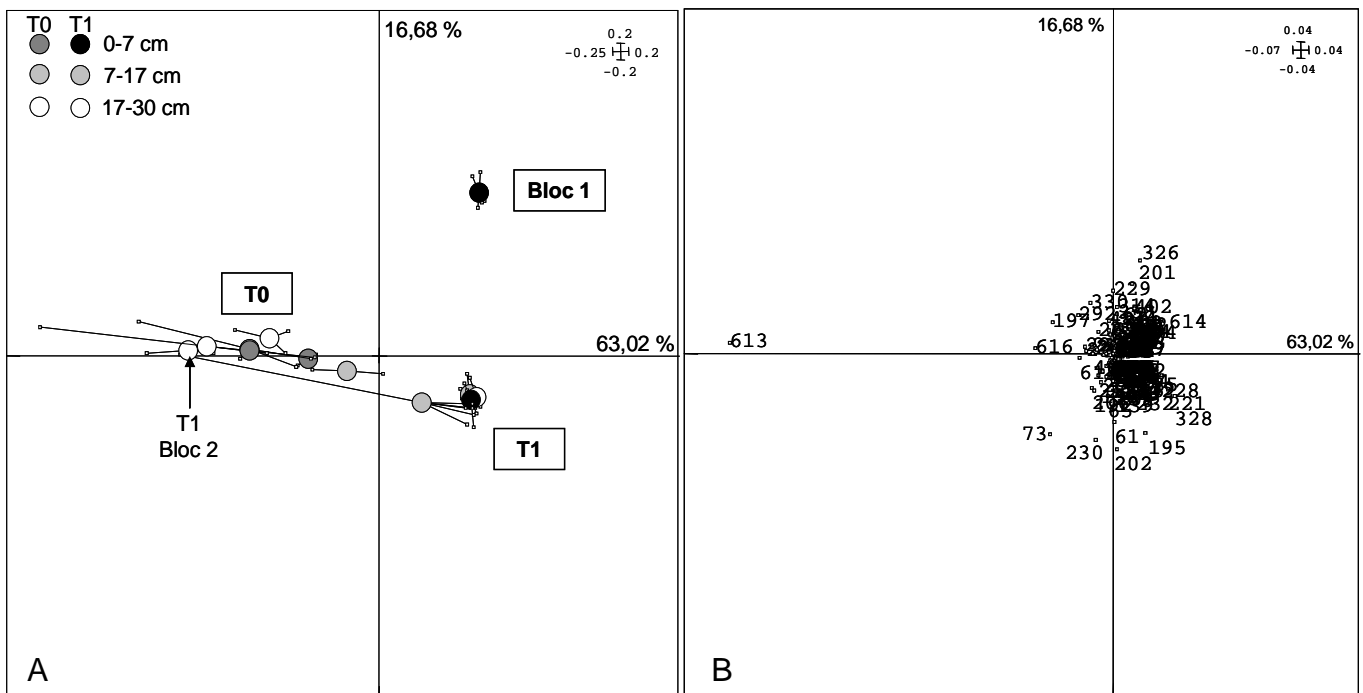


Figure 39: Structure des communautés bactériennes : ACP inter-classes des données de T-RFLP 16S avant la différenciation des traitements (T0) et après un an d'application du travail du sol réduit (T1 TR). A : carte factorielle des points ; B : carte factorielle des variables.

II.2.4 / Influence du LT et du TR sur la structure des communautés bactériennes après un an de différenciation des traitements: horizon 0-7 cm

Le plan factoriel de l'ACP représente 54,27 % de la variance totale du jeu de données (Figure 40). Le nombre moyen de pics détectés et pris en compte dans les analyses ACP 16S est de 334 quel que soit l'horizon considéré.

Le plan ACP ci-dessous révèle une influence importante du bloc sur la structure des communautés bactériennes, influence confirmée par les tests de permutation ($p < 0,001$). Les points issus du bloc 1 sont corrélés négativement à l'axe factoriel 1 ($F1=39,93\%$) tandis que ceux issus du bloc 2 sont corrélés positivement à cet axe (Figure 40 A). L'effet traitement et type de motte sur la structure des communautés bactériennes est moins important que celui du bloc. Les tests de permutation révèlent une influence à $p=0,06$ et $p=0,094$ respectivement de ces deux facteurs sur la structure des communautés bactériennes. L'effet de la structure du sol sur la structure des communautés bactériennes apparaît surtout pour la modalité TR et l'effet traitement se manifeste surtout sur le bloc 1. L'analyse du plan factoriel des variables (Figure 40 B) indique que les variables fragments de 329, 194, 74, 325, 402, 270, 311, 215 et 63 pb (entre autres) sont corrélés négativement à F1. Les fragments de 73, 196, 51, 328, 228 et 192 pb sont corrélés positivement à F1. Les fragments de 202 et 218 pb sont corrélés positivement à F2 tandis que le fragment de 201 pb est corrélé négativement à F2.

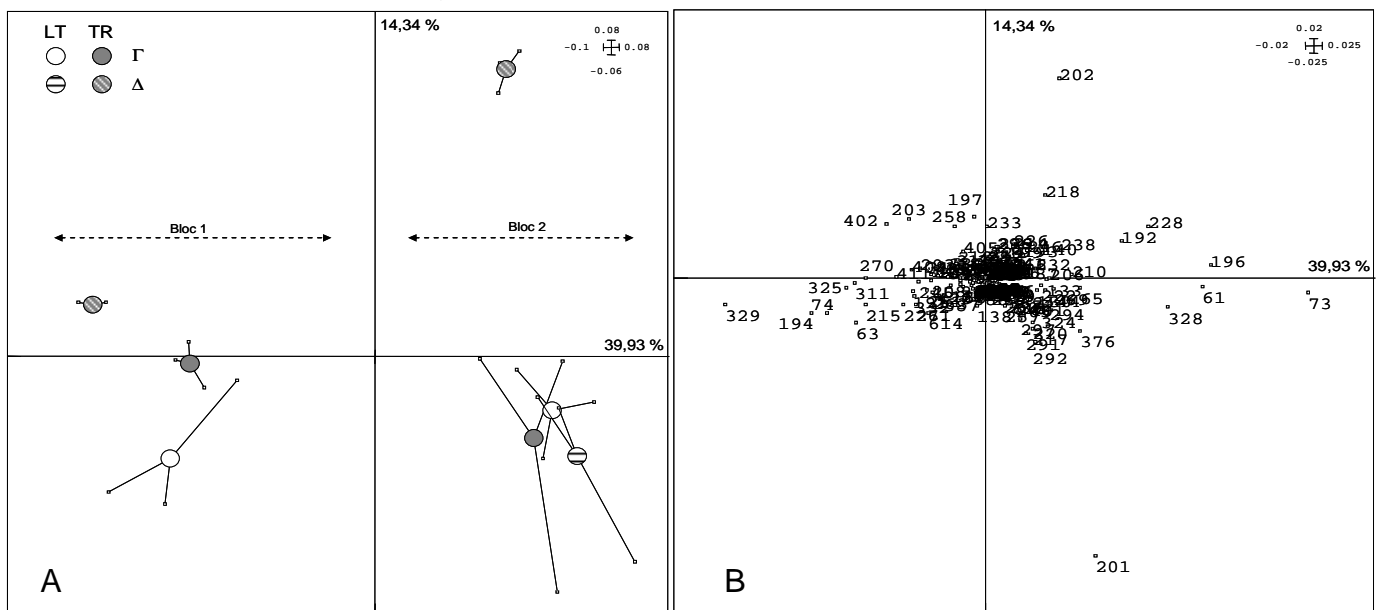


Figure 40: Influence de la technique de travail du sol et du type de motte sur la structure des communautés bactériennes de l'horizon 0-7 cm après un an de différenciation des traitements LT et TR. A : carte factorielle des points ; B : carte factorielle des variables.

II.2.5 / Influence du LT et du TR sur la structure des communautés bactériennes après un an de différenciation des traitements : horizon 7-17 cm

Le plan factoriel de l'ACP représente 41,27 % de la variance totale du jeu de données (Figure 41).

La Figure 39 A montre l'influence du bloc sur la structure des communautés bactériennes de l'horizon 7-17 cm, effet confirmé par les tests de permutation ($p < 0,001$). Cet effet est visible notamment sur les mottes Γ de la modalité LT ; celles issues du bloc 1 sont corrélées positivement à l'axe factoriel 1 ($F1=25,71\%$) et celles issues du bloc 2 sont corrélées négativement à cet axe ($F2=15,56\%$). L'effet de la technique de travail du sol est moins important que l'effet bloc sur la structure des communautés bactériennes. Les tests de permutation révèlent un effet significatif à $p=0,083$ après un an de différenciation du LT et du TR. Par ailleurs, on retrouve à cette profondeur une influence du type de motte sur la structure des communautés bactériennes ($p=0,002$). L'analyse du plan factoriel des variables (Figure 41 B) indique que les variables fragments de 202, 231, 297 et 329 pb sont corrélés négativement à F1 et positivement à F2, tandis que les fragments de 194, 53, 208, 191 et 222 pb sont corrélés positivement à F1 et positivement à F2. Les fragments de 196, 61, 73 et 228 pb sont corrélés négativement à F1 et F2 et les fragments 201, 328, 296, 203, 205 et 218 pb sont corrélés positivement à F1 et négativement à F2.

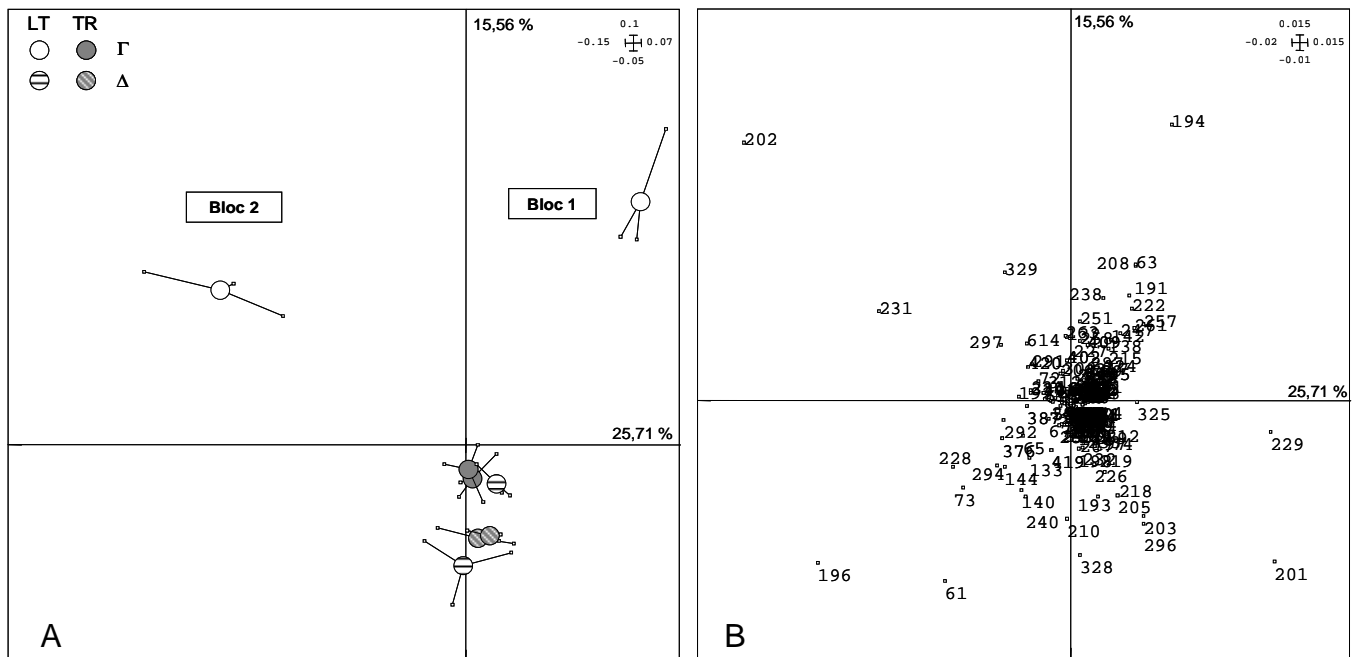


Figure 41: Influence de la technique de travail du sol et du type de motte sur la structure des communautés bactériennes de l'horizon 7-17 cm après un an de différenciation des traitements LT et TR. A : carte factorielle des points ; B : carte factorielle des variables.

II.2.6 / Influence du LT et du TR sur la structure des communautés bactériennes après un an de différenciation des traitements: horizon 17-30 cm

Le plan factoriel de l'ACP représente 38,47 % de la variance totale du jeu de données (Figure 42).

Les tests de permutation révèlent que les 3 facteurs testés (bloc, traitement et type de motte) ont une influence significative sur la structure des communautés bactériennes de l'horizon 15-30 cm ($p < 0,001$). Les points issus du traitement TR sont corrélés positivement avec l'axe factoriel 2 (F2=18,71 %).

L'analyse du plan factoriel des variables (Figure 42 B) indique que les variables fragments de 229, 202, 293, 218, 232, 193, 219, 74, 198 et 238 pb sont corrélés positivement à F2 et les fragments de 201, 328, 240, 73, 614, 420, 402 et 325 pb sont corrélés négativement à F2. Les fragments de 201, 329, 205 et 222 pb sont corrélés négativement à F1 et les fragments 203, 328, 206, 240 et 197 pb sont corrélés positivement à F1.

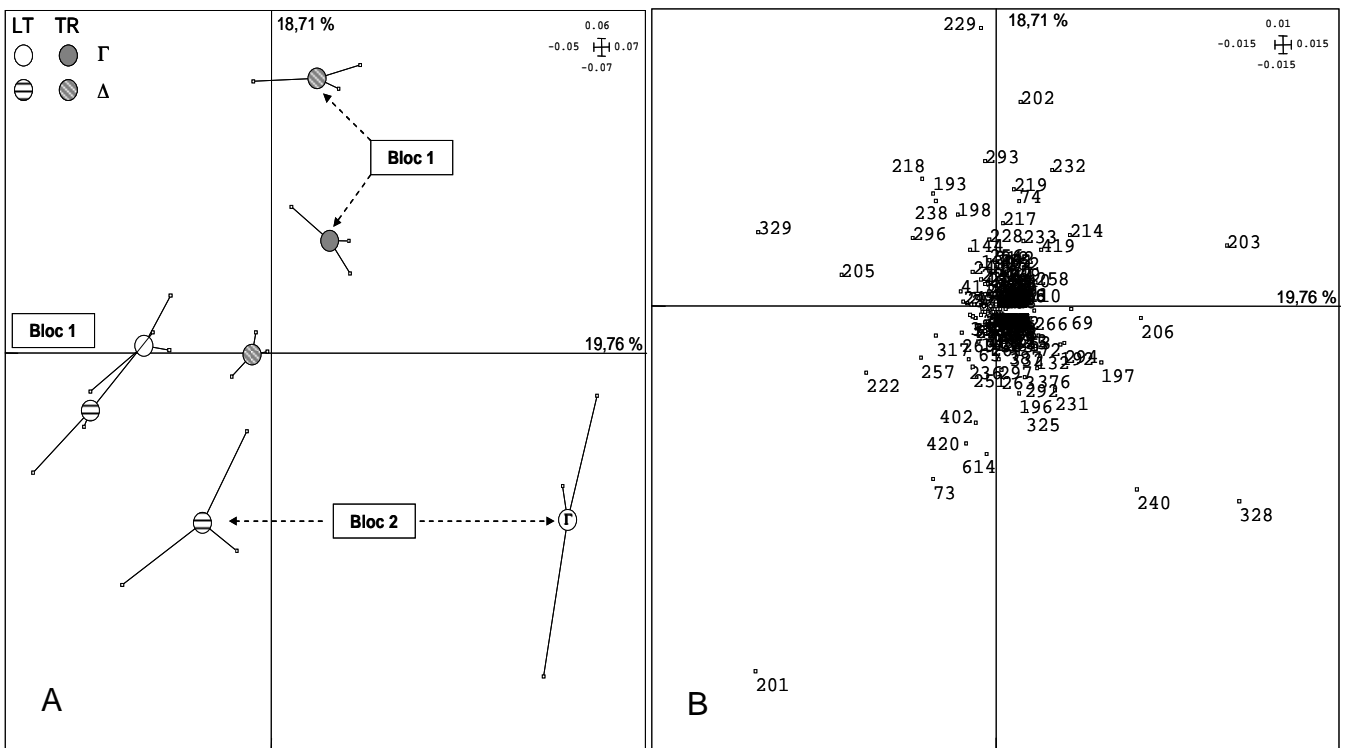


Figure 42: Influence de la technique de travail du sol et du type de motte sur la structure des communautés bactériennes de l'horizon 17-30 cm après un an de différenciation des traitements LT et TR. A : carte factorielle des points ; B : carte factorielle des variables.

II.3 / Evolution de la structure des communautés microbiennes : discussion

II.3.1 / Structure des communautés microbiennes à T0

L'analyse de la structure des communautés microbiennes avant la mise en place des traitements (T0 : échantillonnage en février 2005 sous luzerne) révèle qu'elles diffèrent entre les profondeurs de prélèvements (0-7 / 7-17 et 17-30 cm) aussi bien pour les communautés fongiques que bactériennes. L'horizon de surface (0-7 cm) se distingue nettement des horizons inférieurs dont les communautés microbiennes semblent plus proches. Pour les communautés fongiques, on observe une augmentation de l'importance relative des pics correspondants aux fragments de 97 et 325 pb pour l'horizon 0-7 cm et pour les communautés bactériennes une augmentation des pics correspondants aux fragments de 222, 611 et 615 pb par rapport aux horizons 7-17 cm et 17-30 cm. Ces changements dans la structure des communautés microbiennes avec la profondeur de prélèvement ont été également observés par plusieurs auteurs. Ils attribuent ces changements aux modifications des caractéristiques physico-chimiques du sol en profondeur : diminution de l'aération du sol, baisse des exsudats racinaires, baisse de la disponibilité en eau et en éléments nutritifs (Feng *et al.*, 2003; Fierer *et al.*, 2003; Hansel *et al.*, 2008). Le point 0 réalisé en février 2005 sous la culture de luzerne, montre que la masse volumique apparente du sol augmente en moyenne de $0,2 \text{ g.cm}^{-3}$ en dessous de 0-7 cm et que la biomasse microbienne et la matière organique labile (métabolites d'origine microbienne ; Lemaître *et al.*, 1995) diminuent de moitié entre l'horizon de surface et les horizons sous-jacents (données non présentées dans ce travail). Ainsi, la diminution de l'aération du sol (augmentation de la masse volumique) et de la matière organique labile en profondeur expliqueraient les variations de structure des communautés microbiennes entre les horizons de prélèvement à T0.

L'analyse de la structure des communautés microbiennes à T0 révèle également une variabilité préexistante entre les blocs pour les champignons (mais non pour les bactéries) et entre les futurs traitements pour les bactéries. Les différences entre les blocs de prélèvement pourraient être mises en relation avec la variabilité des caractéristiques physico-chimiques de la parcelle d'essai. La texture du sol varie entre le bloc 1 et le bloc 2, le second bloc ayant une texture moins grossière que le premier bloc (- 7 % de sables grossiers, + 1,2 % d'argiles et +2 % de

limons fins). Cette variabilité pourrait expliquer les différences de structure des communautés fongiques entre les blocs, la texture du sol étant un des premiers facteurs responsable de la variation des communautés microbiennes (Buyer *et al.*, 2002; Kennedy, 1999; Wieland *et al.*, 2001) notamment des champignons qui semblent y être plus sensibles que les bactéries (Wakelin *et al.*, 2008). Par contre, les différences de structure de communautés bactériennes entre les futures parcelles TR et LT sont difficilement explicables, elles peuvent être dues à la variabilité spatiale importante des communautés microbiennes du sol (Ettema et Wardle, 2002).

II.3.2 / Evolution des communautés microbiennes entre T0 et T1

Les communautés microbiennes évoluent entre T0 et T1 et ce, quel que soit l'horizon de prélèvement considéré ou le traitement (LT ou TR). L'influence du traitement (LT ou TR) sur cette évolution est difficile à juger car trop de facteurs environnementaux ont varié entre les dates de prélèvements, le plus important étant les espèces végétales présentes (ou non) au moment des prélèvements. Comme l'ont montré Wiedland *et al.* (2001) la présence d'une culture et le type de plante présent a un effet très important sur les communautés microbiennes du sol. Or, les prélèvements en 2005 ont été effectués sous une culture de luzerne alors que les prélèvements de 2006 ont été effectués sur sol nu après une culture de maïs. On retrouve toutefois des caractéristiques communes entre T0 et T1. Ainsi, les fragments de 97 et 315 pb semblent être caractéristiques des communautés fongiques des horizons 0-7 cm et 7-17 cm respectivement, chacun d'eux caractérisant fortement les communautés fongiques à ces profondeurs à T0 et à T1 quel que soit le traitement considéré. Par contre, d'autres pics qui ne ressortaient pas à l'analyse à T0 apparaissent à T1. Par exemple, on observe une augmentation de l'importance relative du pic correspondant au fragment de 71 pb pour l'horizon 0-7 cm des modalités LT et TR. Les communautés bactériennes de leur côté semblent plus sensibles que les champignons du sol à un changement d'occupation du sol car même si quelques pics caractéristiques des horizons 7-17 cm et 17-30 cm sont retrouvés à T0 et T1 (par exemple les fragments de 296 et 236 pb) de nombreux pics non détectés à l'analyse de T0 apparaissent à T1, notamment pour l'horizon de surface.

II.3.3 / Effet de la technique de travail du sol sur les communautés fongiques

On retrouve à T1 un effet bloc pour les traitements LT et TR ($p=0,045$ et $0,004$ respectivement), les communautés fongiques sont donc différentes entre les blocs de prélèvement. Par ailleurs, l'effet profondeur de prélèvement pour LT et TR est significatif également. La structure des communautés fongiques de l'horizon 0-7 cm se différencie nettement sur les plans ACP des autres horizons de prélèvement qui semblent plus proches (Annexe 9, Figures 1 et 2). Les changements en profondeur des communautés fongiques pour la modalité LT semblent être plus dus aux conditions physiques du sol (augmentation de la masse volumique en profondeur) car les différents pools labiles de la MOS mesurés (biomasse microbienne, BM%C, Cmin, Nmin, MOP) restent stables pour cette modalité au contraire de la modalité TR. Les variations entre les horizons de la modalité TR doivent être causés à la fois par les modifications physiques (prise en masse des horizons) et par une diminution des pools labile de la MOS.

La comparaison horizon par horizon de l'effet la technique de travail du sol et du type de motte sur les communautés fongiques apporte plusieurs précisions. Les communautés fongiques diffèrent entre LT et TR pour l'horizon 0-7 cm. Les résidus végétaux ne sont enfouis que partiellement pour la modalité TR alors que le labour laisse les premiers centimètres du sol "libres" de tout débris végétal grossier. Cette différence peut expliquer l'évolution des communautés fongiques entre LT et TR. En effet, d'autres auteurs ont montré que les systèmes de conservation, notamment les techniques de semis direct, favorisaient le développement des champignons du sol en surface par rapport au labour (Drijber *et al.*, 2000; Feng *et al.*, 2003; Frey *et al.*, 1999) notamment en raison de l'accumulation plus importante de matière organique particulaire grossière (Simmons et Coleman, 2008). Par contre, pour cet horizon la structure du sol (type de motte) et le bloc n'ont pas d'influence sur la structure des communautés fongiques. Il semblerait que l'effet des traitements, notamment l'accumulation des résidus de culture en surface, masque la variabilité spatiale et l'effet de la structure du sol sur les champignons.

Pour l'horizon 7-17 cm la structure des communautés fongiques n'est pas différente entre les traitements. En revanche, le type de motte et le bloc de prélèvement ont une influence significative ($p=0,029$ et $p<0,001$ respectivement). La structure du sol des modalités LT et TR est identique en 2006, la masse volumique

de l'horizon 7-17 cm est similaire, de même que le taux de saturation en eau de la porosité du sol. L'environnement abiotique des microorganismes (aération, teneur en eau) est donc similaire à cette profondeur entre LT et TR, de même que la quantité de MO qui, après un an de différenciation des traitements, diffère peu. Ces conditions physiques assez proches entre les modalités à cette profondeur expliqueraient la similarité des communautés fongiques entre les modalités LT et TR. Dans des conditions assez proches, Spedding *et al.* (2004) ne mettent également pas en évidence l'effet du travail du sol (labour *versus* travail du sol réduit ou semis direct) en dessous de l'horizon de surface. Par contre, on retrouve ici un effet bloc important. Comme nous l'avons indiqué auparavant, des changements dans la texture du sol peuvent générer des modifications des communautés microbiennes. Les communautés fongiques diffèrent également entre les mottes Γ et Δ et cet effet apparaît de la même manière entre les blocs 1 et 2. Les études qui ont mesuré l'effet de la structure du sol sur la structure des communautés fongiques, attribuent à la structure du sol un effet indirect *via* la modification des entrées de C labile dans les horizons compactés (Hansel *et al.*, 2008; Ponder et Tadros, 2002). Nous avons vu précédemment que la disponibilité de la MO au sein des mottes compactées de cet horizon était réduite, tout comme la concentration en O₂ qui est théoriquement plus faible au sein des mottes Δ (Curmi *et al.*, 1996). Les champignons du sol semblent donc être sensibles à la baisse de la disponibilité de la MO et à la réduction de l'aération du sol ou à l'augmentation de la concentration en CO₂.

Les communautés fongiques ne diffèrent pas entre les mottes Γ et Δ au sein de l'horizon 17-30 cm. Par contre, les communautés fongiques sont différentes entre les modalités étudiées. Seule la modalité LT enfouit des résidus de culture à cette profondeur et fractionne la structure du sol, ce qui se traduit par une augmentation de la biomasse microbienne et des activités de minéralisation des microorganismes par rapport à la modalité TR. Les différences de structure des communautés fongiques entre ces deux modalités semblent être dues aux différences de disponibilité des substrats et de pools labiles de MO. Les différences de structure du sol étant très faibles après un an de différenciation des traitements à cette profondeur, ce facteur ne semblent pas être à l'origine des différences observées.

II.3.4 / Effet de la technique de travail du sol sur les communautés bactériennes

En mars 2006, le bloc de prélèvement et la profondeur de prélèvement ont un effet sur la structure des communautés bactériennes ($p < 0,001$). Tout comme pour les champignons, les communautés bactériennes de l'horizon 0-7 cm se distinguent nettement de celles des autres horizons (Annexe 9, Figures 3 et 4). Les mêmes facteurs explicatifs que ceux évoqués pour les communautés fongiques peuvent être responsables des différences observées entre les blocs ou les horizons de prélèvement, à savoir : un gradient textural au sein de la parcelle, une diminution de l'aération du sol et une baisse de la disponibilité des substrats en profondeur.

La comparaison horizon par horizon de l'effet de la technique de travail du sol sur la structure des communautés bactériennes apporte les mêmes informations quel que soit l'horizon considéré. En effet, à toutes les profondeurs, les communautés bactériennes sont influencées par le traitement, le type de motte et le bloc de prélèvement. Toutefois, l'effet du type de motte n'est significatif qu'à $p = 0,094$ pour l'horizon 0-7 cm et l'effet traitement semble moins important pour l'horizon 7-17 cm ($p = 0,083$). Les communautés bactériennes semblent donc réagir de la même manière que les champignons du sol bien qu'elles apparaissent comme étant plus sensibles au tassement du sol.

Le bloc apparaît comme le premier facteur de variation des communautés bactériennes quel que soit l'horizon considéré. Ensuite des influences claires du traitement ou du type de motte apparaissent selon l'horizon considéré. Par exemple, les communautés bactériennes de l'horizon 0-7 cm au sein des mottes Δ de la modalité TR se distinguent nettement des autres modalités, l'accumulation de MO au sein de cet horizon ainsi que la diminution de l'aération du sol semblent avoir un impact important sur les communautés bactériennes à cette profondeur. Pour l'horizon 7-17 cm, on peut également remarquer que les mottes Γ de la modalité LT présentent des structures de communautés bactériennes particulières. Pour cet horizon le tassement lisserait les différences entre les traitements, les communautés bactériennes de la modalité LT Δ et TR Γ/Δ étant très proches sur le plan ACP. Enfin, pour le dernier horizon, les différences entre les traitements apparaissent quels que soient le bloc et le type de motte considérés. L'absence de fragmentation de la structure du sol et la baisse de la disponibilité de la MO à cette profondeur pour la

modalité TR semble avoir un impact important sur les communautés bactériennes du sol.

Les références bibliographiques concernant l'effet du travail du sol sur les communautés bactériennes sont plus nombreuses que celles sur les communautés fongiques. Peu d'entre elles mettent en évidence l'effet de la structure du sol sur les communautés bactériennes. Li *et al.* (2004) en mesurant la diversité d'utilisation des substrats des bactéries du sol (Biolog) ne mettent pas en évidence d'effet de la structure du sol sur la diversité fonctionnelle des bactéries. Par contre, Rahman *et al.* (2008) montrent que la population des bactéries anaérobies est corrélée positivement à la masse volumique du sol en étudiant le profil lipidique des communautés microbiennes (PLFA). La T-RFLP ne permet pas d'identifier les espèces bactériennes sensibles au tassement du sol comme cela est possible avec l'analyse des PLFA dans l'étude de Rahman *et al.* (2008), mais cette étude confirme les observations de ce travail, à savoir que le niveau de tassement du sol modifierait la structure des communautés bactériennes, soit en raison d'une limitation de l'aération du sol soit parce que les entrées de C labile diminuent au sein des zones compactées (Cookson *et al.*, 2008; Hansel *et al.*, 2008; Ponder et Tadros, 2002).

III / Conclusion

L'adoption d'une nouvelle technique de travail de sol modifie très rapidement les caractéristiques microbiologiques du sol, aussi bien quantitativement que qualitativement. Ainsi, après un an d'application des traitements sur le site de Lyon, la quantité et l'activité des microorganismes du sol a été modifiée au sein du profil cultural. Leur répartition suit celle de l'enfouissement des résidus de cultures d'où un développement en surface des microorganismes du sol dans les systèmes de conservation TR et TS et une répartition homogène sur la profondeur de labour pour les modalités LA et LT. Par conséquent, le pool labile de MO augmente en surface dans les systèmes non labourés et permet de soutenir une activité microbienne intense tandis que les systèmes labourés présentent une activité microbienne moins intense mais plus régulièrement répartie sur la profondeur du profil cultural. On a également vu que les modifications de la structure du sol ont un effet sur la quantité et l'activité potentielle des microorganismes. Ainsi, l'augmentation des zones

compactées dans les systèmes de conservation les premières années de leur application pourrait entraîner une réduction de la fourniture d'éléments minéraux pour la culture en place, notamment pour les sols sensibles au tassement. Reste à savoir si l'augmentation des pools labiles de la MO en surface et des activités microbiennes compenseraient leur diminution en profondeur quand on intègre les différences de structure du sol entre les traitements. Par ailleurs, on a également vu que les changements microbiens "quantitatifs" s'accompagnaient d'un changement dans la composition des communautés microbiennes et ce dès la première année d'application des traitements. Les modifications dans la répartition des résidus de cultures et des pools labiles de la MOS mais également de la structure du sol ont une influence sur la structure des communautés bactériennes et fongiques. Le mode de perturbation du sol (retournement pour LT *versus* fragmentation sans retournement pour TR) semble même avoir une influence sur la structure des communautés bactériennes car malgré les faibles différences de conditions biotiques et abiotiques entre les modalités LT et TR au sein de l'horizon 7-17 cm, la structure des communautés bactériennes diffère entre ces deux modalités. On peut également noter que cette étude montre que les bactéries semblent être plus sensibles que les champignons aux facteurs étudiés, notamment au tassement du sol, ce qui va à l'encontre de l'observation de plusieurs auteurs qui suggèrent que les champignons sont plus affectés par le mode de travail du sol employé que les bactéries (Drijber *et al.*, 2000; Frey *et al.*, 2003) et que leur distribution dans le sol est affectée par le diamètre des pores (Otten *et al.*, 2009).

DISCUSSION GENERALE

DISCUSSION GENERALE

I / Retour sur les questions de recherche

L'objectif principal de ce travail était d'étudier les modifications que génèrent l'adoption de différentes techniques de travail du sol sur la structure du sol, la répartition de la MOS et des microorganismes au sein du profil cultural puis d'évaluer leurs conséquences sur la minéralisation potentielle du C et N au cours des premières années de leur application en agriculture biologique.

I.1 / Evolution de la structure du sol (question de recherche I)

Après 5 années d'application des traitements sur le site de Kerguéhennec, nos résultats montrent que la structure du sol de chaque modalité semble avoir atteint un état type, qualifié par Guérif (1994) d'état de "pseudo-équilibre". Les variations mesurées entre 2006 et 2007 semblent être en effet davantage imputables aux caractéristiques du système de culture et du climat de l'année qu'à l'action des traitements. En revanche, sur le site de Lyon la structure du sol évolue fortement au cours des trois premières années, suggérant ainsi que les états types correspondant à chaque traitement n'ont pas encore été atteints. Si les différences entre les traitements sont relativement faibles après un an de différenciation, au bout de 3 successions culturales (maïs / soja / blé) celles-ci sont majeures. On observe une prise en masse importante des horizons qui ne sont plus mécaniquement fragmentés soit par la charrue, soit par le chisel. Cette dégradation de la structure du sol pose la question de l'applicabilité des techniques de travail du sol simplifiées, comme les modalités travail du sol réduit et travail du sol superficiel, sur des sols à texture sableuse (+ de 50 % de sable) pour lesquels l'action du climat et les phénomènes de retrait-gonflement sur la structure du sol sont moins intenses que dans les sols argileux ou à texture plus fine.

Les résultats obtenus sur la structure du sol diffèrent peu de ceux issus de l'agriculture conventionnelle (Kay et Vanden Bygaart, 2002; McCarty *et al.*, 1998), à l'exception notable de la modalité TS sur le site de Kerguéhennec qui présente une

structure du sol proche de celle du labour traditionnel. Les systèmes de production biologique et les techniques de travail du sol réduit favorisent le développement et l'activité des vers de terre et leur action combinée a pu ainsi atténuer, voire pallier, l'absence de fragmentation mécanique sur la structure du sol. Cette hypothèse reste à vérifier, notamment sur le site de Lyon à plus long terme où le sol est moins favorable au développement des lombrics et plus sensible au tassement.

I.2 / Evolution des stocks de MO (question de recherche II)

Les stocks de C et N total évoluent progressivement au cours des premières années après le changement de technique de travail du sol. La MO se répartit progressivement de manière stratifiée selon un axe vertical dans les systèmes de travail du sol TR et TS tandis qu'elle est répartie de façon plus homogène sur la profondeur du labour pour les modalités LT et LA. Les différences entre les traitements se manifestent après 3 successions culturales sur le site de Lyon même si les principales tendances se dessinent déjà dès la première année. Quand on rapporte les stocks de C et N sur l'ensemble de la couche de sol (0-30 cm) les traitements ne se différencient pas, ce qui indique que la MOS totale est un pool qui réagit lentement aux changements de pratiques culturales. La mesure d'un pool labile de la MOS (les matières organiques particulaires) permet en revanche de différencier les traitements plus rapidement et apporte des indications sur la dynamique des MOS à plus court terme, ce pool étant plus sensible aux changements de pratiques culturales que la MOS totale. Après 5 années de différenciation des traitements sur le site de Kerguéhennec, il apparaît que la modalité "travail du sol superficiel" (TS) stocke plus de MO que les autres traitements. Là encore, cette modalité pose plusieurs questions car la MO est moins stratifiée verticalement que sur le site de Lyon. Il semble que les vers de terre répartissent les résidus de cultures au sein du profil de sol par leur activité fousseuse et atténuent ainsi l'effet de l'absence d'enfouissement de résidus de cultures en profondeur.

I.3 / Influence globale des techniques de travail du sol sur les microorganismes (questions de recherche III et IV)

L'une des principales originalités de ce travail est la mise en relation des modifications de la structure du sol et de la répartition des résidus de culture avec les paramètres microbiens quantitatifs (biomasse microbienne, potentiel de minéralisation du C et N) et qualitatifs (structure des communautés microbiennes) à l'échelle du profil cultural. L'échantillonnage stratifié adopté permet d'extrapoler les mesures microbiennes quantitatives à l'échelle du profil cultural et de les visualiser à cette échelle en intégrant la variabilité spatiale de la structure du sol. Les figures 43 et 44 sont réalisées à partir des schémas décrivant l'organisation spatiale de la structure du sol (chapitre 3) et des mesures de biomasse microbienne et d'activité potentielle de minéralisation du C (chapitre 4) sur le site de Lyon (Figure 43) et de Kerguéhennec (Figure 44). Ces schémas permettent de voir simultanément l'effet de la répartition des résidus de cultures et des modifications de la structure du sol sur les microorganismes.

La biomasse microbienne et le potentiel de minéralisation du carbone et de l'azote sont supérieurs dans les horizons où les résidus de culture sont enfouis ; ces indicateurs présentent donc une stratification verticale plus marquée dans les systèmes TR et TS que dans les systèmes labourés. De plus, ces schémas montrent que l'activité des microorganismes est réduite au sein des zones compactées dans le profil de sol. Nous avons vu que la réponse des microorganismes du sol au tassement était différente selon la date de prélèvement (éloignée ou proche du travail du sol) et de la présence ou non d'un système racinaire. Sur le site de Lyon, l'effet de la structure du sol sur l'activité potentielle de minéralisation du C (Figure 43) se manifeste dans les horizons d'enfouissement des résidus de culture. En revanche, dans les horizons où la quantité de substrats organiques labiles est plus faible, le tassement du sol n'a pas d'influence sur le potentiel de minéralisation du C et N. Dès les premières années d'application de différentes techniques de travail du sol, il apparaît donc que l'activité microbienne au sein du profil cultural est modifiée, d'abord par la profondeur d'enfouissement des résidus de culture, puis par le tassement du sol occasionné par chaque technique (question de recherche IV). Le premier facteur limitant l'activité microbienne est la quantité de substrat disponible (issu de l'enfouissement des résidus de culture) puis, lorsque les microorganismes

ont à disposition une quantité suffisante de MO, le second facteur limitant la capacité des microorganismes à minéraliser les substrats organiques est le niveau de tassement du sol occasionné par les passages d'engins agricoles. Les zones compactées au sein du profil cultural semblent limiter la disponibilité et le renouvellement des substrats organiques qui deviennent alors limitants pour la croissance microbienne et les conditions anoxiques au sein de ces zones (aération et accumulation de CO₂) ralentissent les activités microbiennes de minéralisation du C et N.

La profondeur d'enfouissement des résidus de culture et le tassement du sol modifient également la structure des communautés bactériennes et fongiques et ce, dès la première année d'application des traitements. Malgré la variabilité spatiale de cet indicateur, les communautés bactériennes au sein d'un même horizon diffèrent selon le niveau de tassement du sol. En revanche, la structure des communautés fongiques ne diffère pas entre des unités structurales (type de motte) de masse volumique différentes au sein d'un même horizon.

L'échantillonnage adopté a permis de révéler l'influence de chaque technique de travail du sol sur la répartition spatiale des microorganismes du sol (d'un point de vue quantitatif et qualitatif) et de leur activité potentielle à l'échelle du profil cultural. Par ailleurs, on distingue l'effet de la profondeur d'enfouissement des résidus de culture de celui du tassement du sol sur les microorganismes. Cette stratégie d'échantillonnage permet également de calculer les stocks de C ou N minéralisables² en intégrant l'effet de la profondeur d'enfouissement des résidus de culture et de la structure du sol (Figures 45 et 46). Ce mode de calcul permet de préciser l'effet des techniques sur le potentiel de minéralisation du C et N. En effet, si on ne tient pas compte de la surface occupée par les zones compactées au sein du profil de sol on surestime, selon l'année, de 6 à 10 % et de 10 à 15 % les quantités de C et N potentiellement minéralisables respectivement. Le calcul de ces stocks (cf. Figure 43) montre également que la quantité de biomasse microbienne et l'activité importante des microorganismes du sol à la surface de la modalité travail du sol superficiel (TS) compensent leur baisse en profondeur. Ainsi, malgré des conditions

² Ces stocks ont été calculés en additionnant les stocks de C ou Nmin par horizon et type de motte, pondérés par la surface respective occupée par chaque type de motte au sein de l'horizon considéré (en %). Le calcul des stocks a été fait en masse de terre constante (cf. chapitre 3) ce qui permet de tenir compte de la réduction de volume due au tassement du sol entre les traitements et les années.

plus défavorables en profondeur pour les microorganismes sur le site de Lyon, le potentiel de minéralisation total du C et N de la modalité TS est supérieur aux autres modalités dès la première année de différenciation des traitements. Il apparaît donc que l'adoption de techniques de travail du sol de conservation en AB n'entraîne pas une diminution du potentiel de fourniture des éléments nutritifs pour la culture en place. Toutefois, il est toujours délicat de transposer les mesures de laboratoire aux conditions *in situ*, où les variations d'humidité et le réchauffement plus lent du sol dans les systèmes de travail du sol réduit (type TR et TS) peuvent diminuer ce potentiel. De plus, la concentration des activités microbiennes en surface et la prise en masse des horizons plus profonds peuvent limiter la profondeur d'enracinement des cultures et occasionner d'autres problèmes agronomiques comme une diminution de la nutrition hydrique des plantes en période sèche, ou sensibiliser les cultures au phénomène de verse en raison d'un enracinement plus superficiel.

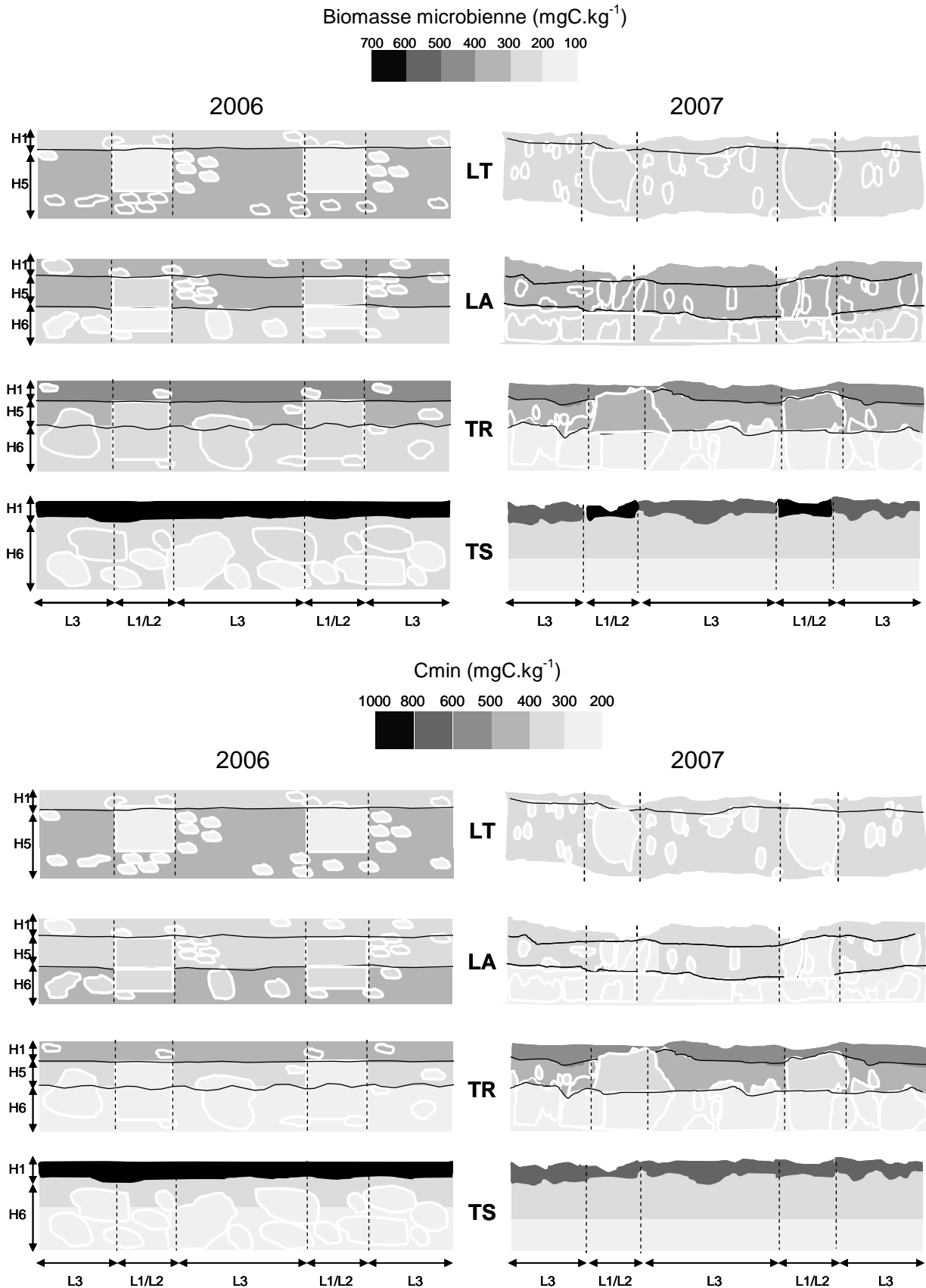


Figure 43 : Influence de la structure du sol et de la répartition des résidus de culture sur la répartition de la biomasse microbienne du sol et du potentiel de minéralisation du C (mgC.kg^{-1}) au sein du profil cultural (4 m x 30 cm) sur le site de Lyon. Les zones compactées sont délimitées en blanc.

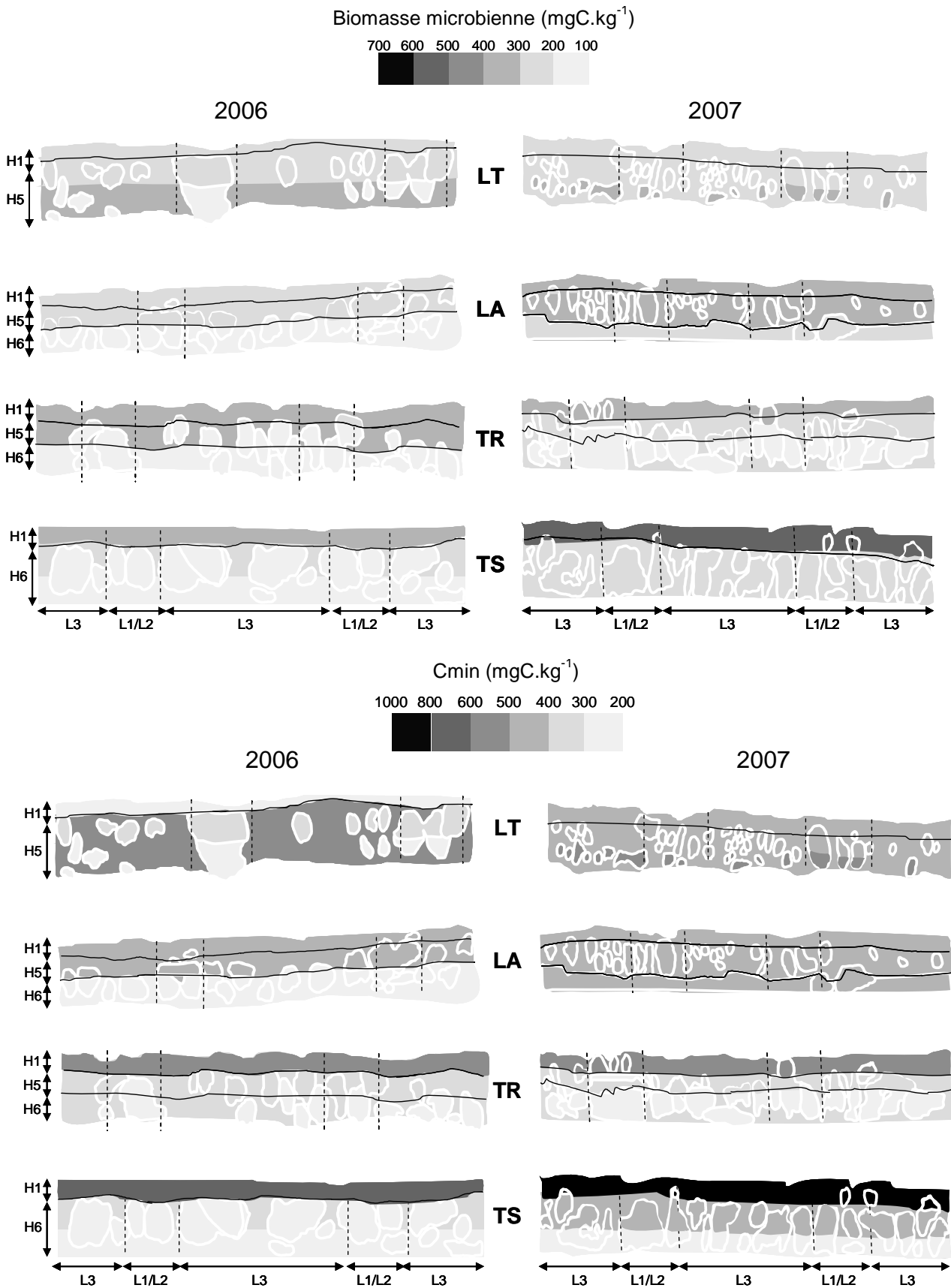


Figure 44 : Influence de la structure du sol et de la répartition des résidus de culture sur la répartition de la biomasse microbienne et du potentiel de minéralisation du C (Cmin , mgC.kg^{-1}) au sein du profil cultural (4 m x 30 cm) sur le site de Kerguéhennec. Les zones compactées sont délimitées en blanc.

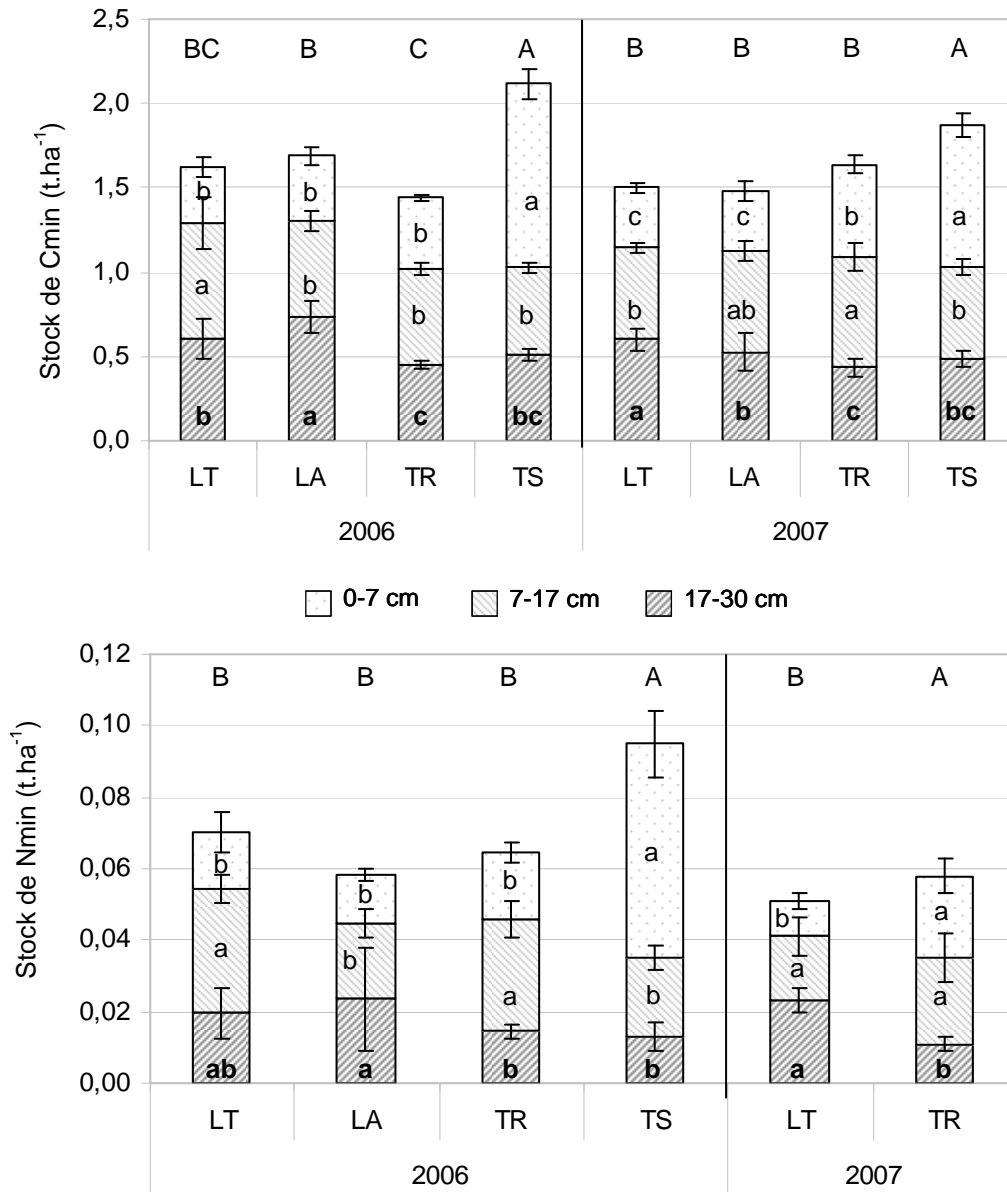


Figure 45 : Stocks de C et N minéralisables (t.ha⁻¹) des horizons de travail du sol et totaux (0-30 cm) des modalités du site de Lyon en 2006 et 2007.

Les lettres minuscules indiquent les différences de stocks entre les modalités par horizon et par année ; les lettres majuscules indiquent les différences de stocks totaux entre les modalités par année.

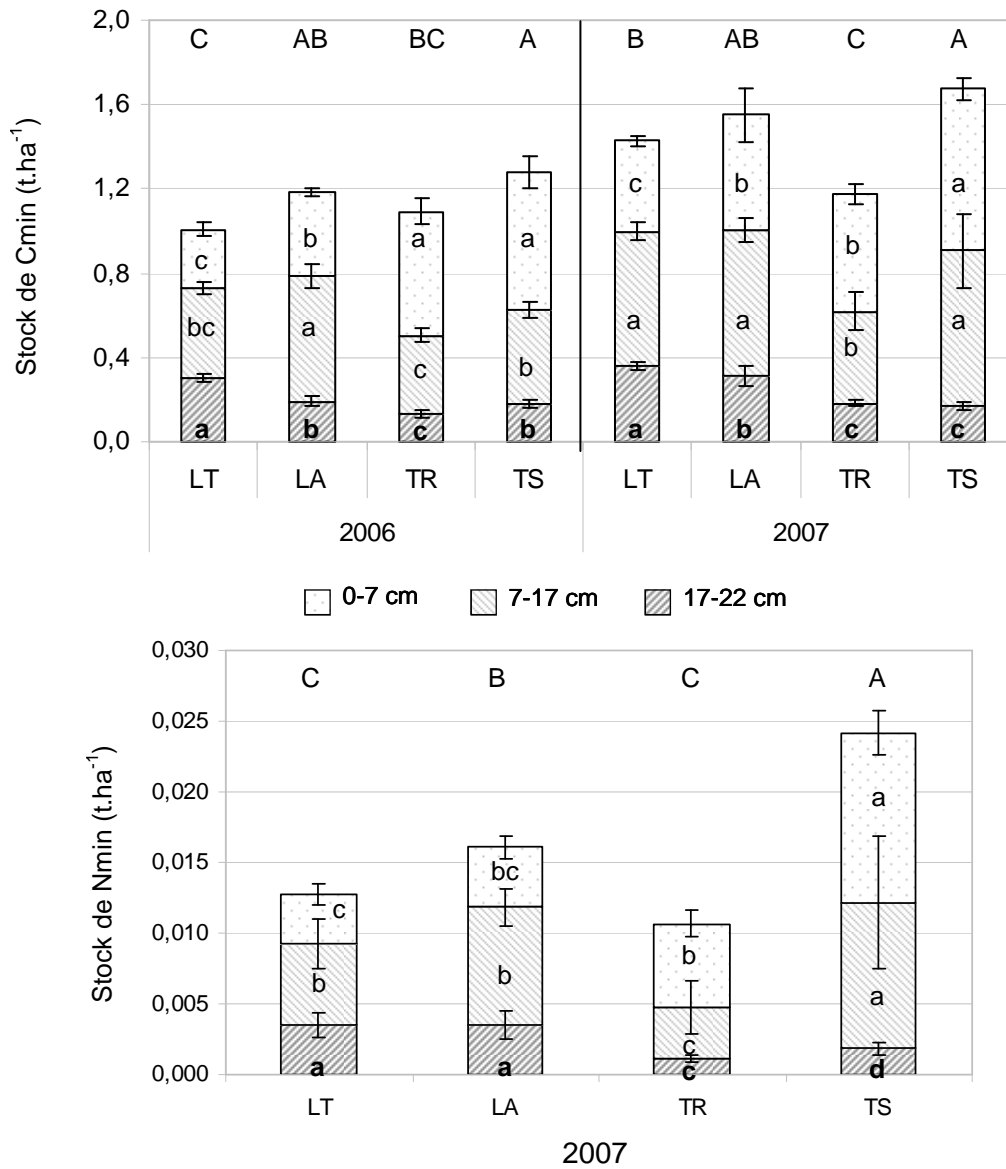


Figure 46 : Stocks de C et N minéralisables (t.ha⁻¹) des horizons de travail du sol et totaux (0-22 cm) des modalités du site de kerguéhennec en 2006 et 2007. Les lettres minuscules indiquent les différences de stocks entre les modalités par horizon et par année ; les lettres majuscules indiquent les différences de stocks totaux entre les modalités par année.

II / Limites et perspectives

II.1 / Remarques générales

Nous avons étudié l'effet global de différents systèmes de travail du sol sur les microorganismes afin de comprendre comment différentes techniques de travail du sol modifient la capacité des microorganismes à minéraliser les matières organiques du sol et donc leur capacité à fournir des éléments minéraux pour la culture en place au cours des premières années de l'application des traitements. Cet aspect est primordial en AB car une baisse même temporaire de l'activité microbienne peut pénaliser le rendement des cultures et compromettre l'adoption des techniques de travail du sol réduit par les agriculteurs biologiques.

Afin de rendre compte de ces modifications globales, le choix a été fait de travailler à une échelle macroscopique qui permet d'intégrer l'hétérogénéité spatiale de la structure du sol et de l'ensemble des effets de l'itinéraire technique sur la structure du sol. Cette approche met en évidence les paramètres qui gouvernent l'organisation spatiale des activités microbiennes à une échelle "appréciable" par un agronome ou un agriculteur. De nombreuses études (Aon *et al.*, 2001b; Ranjard et Richaume, 2001; Strong *et al.*, 2004) montrent les interactions entre la structure du sol et les microorganismes à l'échelle microscopique (au niveau de la macro et de la microporosité) et, du fait de la complexité de l'organisation structurale du sol, il est souvent difficile d'apprécier les conséquences de ces interactions à une échelle supérieure. La stratégie d'échantillonnage adoptée a donc permis de préciser l'effet global de chaque traitement sur les microorganismes du sol à l'échelle du profil cultural dans deux contextes pédoclimatiques différents, confortant la validité de cette stratégie. Cependant, les mesures microbiennes sont réalisées en conditions standard d'humidité et de température et il est donc toujours délicat d'extrapoler ces mesures aux conditions *in situ*, même si la structure des échantillons a été conservée. Au champ, la réponse des microorganismes à la profondeur d'enfouissement des résidus de culture et au tassement du sol peuvent différer. Par exemple, les phénomènes de minéralisation – immobilisation et de dénitrification peuvent limiter la quantité d'azote minéralisé disponible pour la culture, notamment dans les horizons où les résidus de cultures s'accumulent ou au sein de zones compactées. De plus, dans les systèmes de travail du sol réduit, l'humidité est

souvent supérieure et le réchauffement du sol plus lent au printemps peuvent réduire la capacité des microorganismes à minéraliser les matières organiques. Par ailleurs, les mesures ont été réalisées à une seule période de la saison culturale (début printemps), or les paramètres microbiens évoluent en fonction de la température, de l'humidité du sol et surtout en fonction du stade phénologique des cultures (influence du système racinaire).

Il serait intéressant d'approfondir l'étude du comportement des microorganismes au sein des mottes Δ afin de préciser les facteurs à l'origine de leur baisse d'activité : quelle est la part de microporosité au sein des mottes Γ et Δ ; quelle est la distribution de l' O_2 et du CO_2 ; est-ce que les "hots-spots" d'activité microbienne se situent dans les mêmes régions entre ces deux types de mottes ? Ces questions permettraient de préciser la part due aux phénomènes de protection physique de la MOS de celle due à la limitation de la disponibilité de l' O_2 pour les microorganismes au sein des mottes Δ et qui peut réduire la capacité des microorganismes à minéraliser les matières organiques. Pour cela, on pourrait s'inspirer des travaux de Sierra et Renault (1996) qui ont étudié les relations entre la porosité, la diffusion et la distribution de l' O_2 et la respiration au sein d'agrégats naturels (de 6 à 25 mm). Ils montrent que les vides et la macroporosité sont importants pour la circulation de l' O_2 à cette échelle. Or, est-ce que ces agrégats naturels, qui composent les mottes Γ et Δ , ont des caractéristiques physiques différentes (porosité) ou est-ce seulement leur mode d'assemblage qui diffère entre ces deux types de mottes ? La caractérisation physique de ces agrégats naturels et de leur mode d'assemblage permettrait alors de comprendre quels mécanismes sont à l'origine des différences observées dans cette étude entre les mottes Γ et Δ et de discuter de la question du changement d'échelle.

Nous avons également émis l'hypothèse selon laquelle la présence du système racinaire masquait ou réduisait l'effet de la structure du sol. Pour vérifier cette hypothèse, il faudrait mesurer la densité des racines dans les zones compactées et la quantité et la vitesse de diffusion des exsudats racinaires au sein des mottes Δ afin de vérifier l'effet "tampon" que les racines semblent exercer sur les microorganismes par rapport à la structure du sol.

Enfin, pour expliquer les différences de réponse des indicateurs microbiens au tassement du sol entre 2006 et 2007 sur le site de Lyon, un effet "âge de la motte" a

été évoqué. Il semblerait que les conditions biotiques et abiotiques au sein des mottes Δ évoluent au cours de la saison culturale différemment de celles des mottes Γ . Les mottes Δ constitueraient donc un "écosystème" particulier au sein du profil culturel. Cet écosystème aurait une dynamique propre et différente de celle des autres endroits au sein du profil culturel d'une même modalité. Cette dynamique différencierait également entre les traitements en fonction de la fréquence du travail du sol, de la localisation des mottes au sein du profil et de la localisation des résidus de culture.

II.2 / Utilisation des indicateurs microbiens dans des systèmes agronomiques de plein champ

Les indicateurs microbiens utilisés dans cette étude sont sensibles et discriminants. Ils réagissent dès la première année de différenciation des traitements et permettent de les discriminer. Les pools et les flux microbiens réagissent à la profondeur d'enfouissement des résidus de culture et à la structure du sol. Les flux de C et N sont toutefois plus sensibles au tassement du sol que la biomasse microbienne. Ces flux reflètent plus les conditions de vie *in situ* des microorganismes, même s'il est difficile de transposer ces résultats aux conditions de plein champ. Par ailleurs, l'utilisation de ces indicateurs microbiens quantitatifs sur deux sites expérimentaux aux conditions pédoclimatiques différentes montre leur robustesse : ils réagissent de la même manière aux facteurs testés sur ces deux sites. Cependant, malgré la prise en compte de l'hétérogénéité spatiale des paramètres physico-chimiques et de la structure du sol (notamment sur le site de Lyon), les indicateurs microbiens présentent une variabilité spatiale importante. Il est primordial lors des prélèvements d'identifier et de caractériser l'environnement biotique et abiotique des microorganismes (structure du sol, présence de résidus de cultures, éléments grossiers, présence de zones bioturbées par les vers de terre...) afin d'intégrer ces composantes à l'interprétation des résultats. La variabilité spatiale de la répartition et de l'activité des microorganismes du sol peut alors être expliquée et non plus considérée comme un bruit de fond pouvant masquer l'effet des facteurs étudiés. Les indicateurs microbiens quantitatifs utilisés s'avèrent donc être pertinents pour l'étude du travail du sol car ils sont sensibles, discriminants et robustes et leur

mesure donne une idée de la capacité globale du sol à recycler la MOS et à fournir des éléments minéraux pour la culture en place.

L'analyse de la structure des communautés microbiennes par T-RFLP est également un indicateur précoce d'un changement de pratique culturale. Cependant, la très grande variabilité spatiale de la composition des communautés microbiennes limite les conclusions que l'on peut en tirer dans des systèmes agronomiques de plein champ, notamment dans les parcelles où la texture du sol est variable. Par ailleurs, les approches moléculaires basées sur l'amplification par PCR d'ADN extrait directement à partir du sol souffrent de nombreux biais. Seule une fraction des ADN présents est extraite et durant la PCR certains ADN peuvent ne pas être amplifiés. De plus, au moment de l'analyse des pics détectés, (Chapitre 2, Figure 12), les espèces présentes en faible quantité peuvent ne pas être prises en compte. La communauté microbienne analysée peut donc ne pas être totalement représentative de celle présente *in situ*. L'ADN extrait peut également provenir de cellules mortes, il ne reflète donc pas forcément la communauté réellement présente et métaboliquement active au moment des prélèvements. Ce dernier point pourrait notamment expliquer les faibles différences de structure des communautés fongiques observées entre les types de motte dans cette étude. Par ailleurs, cette méthode d'empreinte moléculaire permet d'estimer semi-quantitativement l'importance relative de chacun des groupes microbiens correspondant aux pics détectés (Janvier, 2007). Elle ne permet pas d'identifier le genre et/ou l'espèce microbienne qui correspond à une longueur de fragment, car des groupes de bactéries phylogénétiquement proches peuvent avoir des fragments terminaux (T-RFs) de même longueur (Liu *et al.*, 1997) et pour les champignons du sol, les T-RFs peuvent être attribués à différentes espèces et même caractériser des genres différents (Edel-Hermann *et al.*, 2004). La T-RFLP est donc principalement utilisée pour analyser les variations de la structure des communautés microbiennes en situation comparative, mais elle ne permet pas de calculer des indices de diversité réels et ce, même en situation comparative (Blackwood *et al.*, 2007). Cette analyse est donc une étape préliminaire de l'étude de l'influence de différentes techniques de travail du sol sur la composition des communautés microbiennes. Il serait intéressant d'étudier la diversité fonctionnelle des microorganismes par d'autres approches comme l'analyse des marqueurs biochimiques caractéristiques de groupes fonctionnels ou de communautés (analyse des acides gras phospholipidiques par

exemple : PLFA) et d'identifier les espèces bactériennes et fongiques responsables des différences observées entre les traitements étudiés. Ces déterminations permettraient de préciser les effets des différentes techniques de travail du sol sur les communautés microbiennes et de répondre à l'interrogation des agriculteurs biologiques quant à l'impact de leurs pratiques sur la diversité fonctionnelle et totale des microorganismes du sol.

II.3 / Adoption des techniques de travail du sol sans labour en agriculture biologique

Les résultats de cette étude montrent que la dégradation de la structure du sol au cours des premières années de différenciation des traitements et la concentration de la MO et des activités microbiennes du sol en surface des traitements simplifiés (TR et TS) ne réduit pas le potentiel de fourniture en azote du sol, qui est l'un des principaux facteurs limitant le niveau de production en agriculture biologique (Berry *et al.*, 2002). Le tassement du sol, dû à la suppression du labour, notamment sur le site de Lyon, a d'autres implications agronomiques comme la limitation de l'enracinement des cultures et de la disponibilité en eau qui peuvent limiter le rendement des cultures. En outre, les résultats agronomiques sur les deux sites expérimentaux (données non présentées) montrent qu'un travail du sol uniquement appliqué en surface (0-7 cm) engendre une augmentation de la population d'adventices qui concurrencent la culture en place pour la nutrition hydrique et azotée et pénalisent fortement les rendements. En revanche, l'adoption d'une technique de travail du sol réduit, type chisel, est possible dans les systèmes biologiques. Ce mode de travail du sol ne réduit pas le potentiel de fourniture en N par rapport aux modalités labourées, il permet de maîtriser le développement des adventices et ne réduit pas le rendement des cultures. De plus, ce mode de travail du sol est moins coûteux en énergie et en temps de travail qu'un labour et apparaît donc comme une méthode alternative au labour dans le contexte de production biologique.

Cette étude montre également l'importance de réduire la surface des zones affectées par le tassement dû aux passages des engins agricoles. Les interventions culturales sur la parcelle (fertilisation, désherbage) avec des outils de différentes largeurs multiplient les traces de roues et il serait donc préférable, lorsque le parc

matériel le permet, de travailler avec des outils qui ont une largeur de travail identique afin de limiter l'incidence des passages d'engins.

Le non travail du sol total semble donc difficile à transposer au mode de production biologique du fait de la concurrence accrue des adventices. Des essais d'associations végétales ou de semis direct sous couverts vivants en AB sont en cours afin de mesurer la capacité de ces systèmes de culture innovants à limiter le développement des adventices grâce à la présence d'un couvert végétal permanent. Aujourd'hui, dans les conditions expérimentales de cette étude, l'itinéraire technique de travail du sol réduit paraît être une alternative au labour en AB. Ce mode de travail du sol est facilement réalisable d'un point de vue technique et peut générer des gains économiques par rapport à la pratique du labour, mais ses effets sur le sol et le rendement des cultures doivent être étudiés à plus long terme.

Références bibliographiques

- Ahl, C., Joergensen, R.G., Kandeler, E., Meyer, B., et Woehler, V. 1999. Microbial biomass and activity in silt and sand loams after long-term shallow tillage in central Germany. *Soil & Tillage Research* 49.
- Al-Kaisi, M.M., et Yin, X. 2005. Tillage and Crop Residue Effects on Soil Carbon and Carbon Dioxide Emission in Corn-Soybean Rotations. *Journal of Environmental Quality* 34:437-445.
- Andrade, D.S., Colozzi-Filho, A. et Giller, K.E. 2003. The Soil Microbial Community and Soil Tillage, p. 51-81, *In* A. El Titi, ed. *Soil Tillage in Agroecosystems*. CRC Press LLC, Boca Raton.
- Aon, M.A., Sarena, D.E., Burgos, J.L. et Cortassa, S. 2001a. (Micro)biological, chemical and physical properties of soils subjected to conventional or no-till management: an assessment of their quality status. *Soil & Tillage Research* 60:173-186.
- Aon, M.A., Sarena, D.E., Burgos, J.L. et Cortassa, S. 2001b. Interaction between gas exchange rates, physical and microbiological properties in soil recently subjected to agriculture. *Soil & Tillage Research* 60:163-171.
- Aslam, T., Choudhary, M.A. et Saggarr, S. 1999. Tillage impacts on soil microbial biomass C, N and P, earthworms and agronomy after two years of cropping following permanent pasture in New Zealand. *Soil and Tillage Research* 51:103-111.
- Baize, D. 2000. *Guide des analyses en pédologie*, Paris.
- Baker, J.M., Ochsner, T.E., Venterea, R.T. et Griffis, T.J. 2007. Tillage and soil carbon sequestration--What do we really know? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 118:1-5.
- Balesdent, J., Chenu, C. et Balabane, M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research* 53:215-230.
- Berry, P.M., Sylvester-Bradley, R., Philipps, L., Hatch, D.J., Cuttle, S.P., Rayns, F.W., et Gosling, P. 2002. Is the productivity of organic farms restricted by the supply of available nitrogen? *Soil Use and Management* 18:248-255.
- Birkhofer, K., Bezemer, T.M., Bloem, J., Bonkowski, M., Christensen, S., Dubois, D., Ekelund, F., Fließbach, A., Gunst, L., Hedlund, K., Mäder, P., Mikola, J., Robin, C., Setälä, H., Tatin-Froux, F., Van der Putten, W.H., et Scheu, S. Long-term organic farming fosters below and aboveground biota: Implications for soil quality, biological control and productivity. *Soil Biology and Biochemistry*. 40: 22-37

- Blackwood, C.B., Hudleston, D., Zak, D.R., et Buyer, J.S. 2007. Interpreting Ecological Diversity Indices Applied To T-RFLP Data: Insights From Simulated Microbial Communities. *Appl. Environ. Microbiol.* 73:5276-5283.
- Blanco-Canqui, H., et R. Lal. 2007. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till. *Soil and Tillage Research* 95:240-254.
- Boizard, H., Richard, G., Roger-Estrade, J., Dürr, C., et Boiffin, J. 2002. Cumulative effects of cropping systems on the structure of the tilled layer in northern France. *Soil & Tillage Research* 64:149-164.
- Boizard, H., Richard, G., Defossez, P., Roger-Estrade, J. et Boiffin, J. 2004. Etude de l'effet à moyen et long terme des systèmes de culture sur la structure d'un sol limoneux-argileux du Nord du Bassin Parisien: les enseignements de l'essai de longue durée d'Estrée-Mons (80). *Etude et Gestion des Sols* 11:11-20.
- Borneman, J., et R.J. Hartin. 2000. PCR Primers That Amplify Fungal rRNA Genes from Environmental Samples. *Appl. Environ. Microbiol.* 66:4356-4360.
- Brussaard, L., de Ruiter, P.C., et G.G. Brown. 2007. Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 121:233-244.
- Buyer, J.S., Roberts, D.P. et E. Russek-Cohen. 2002. Soil and plant effects on microbial community structure. *Canadian Journal of Microbiology* 48:955-964.
- Calderon, F.J., Jackson, L.E., Scow, K.M. et D.E. Rolston. 2000. Microbial responses to simulated tillage in cultivated and uncultivated soils. *Soil Biology and Biochemistry* 32:1547-1559.
- Carter, M.R., Gregorich, E.G., Angers, D.A., Beare, M.H., Sparling, G.P., Wardle, D.A., et R.P. Voroney. 1999. Interpretation of microbial biomass measurements for soil quality assessment in humid temperate regions. *Canadian Journal of Soil Science* 79:507-520.
- Chaussod, R. 1996. La qualité biologique des sols. Evaluation et implications. *Etude et gestion des sols* 3:261-277.
- Chaussod, R., et S. Houot. 1993. La biomasse microbienne des sols: perspectives d'utilisation de cette mesure pour l'estimation de la fourniture d'azote par les sols, p. 72-76, *In* J. Decroux et J. C. Ignazi, eds. *Matières organiques et agriculture. Actes des 4èmes journées de l'analyse de terre GEMAS et 5ème forum de la fertilisation raisonnée. GEMAS et COMIFER, Blois.*
- Chaussod, R., Houot, S., Guiraud, G., et J.M. Hetier. 1988. Size and turn-over of the microbial biomass in agricultural soils: laboratory and field experiments., p. 312-326, *In* J. Smith, ed. *Nitrogen Efficiency in Agricultural Soils. Elsevier Appl. Sci.*
- Conant, R.T., Easter, M., Paustian, K., Swan, A., et S. Williams. 2007. Impacts of periodic tillage on soil C stocks: A synthesis. *Soil and Tillage Research* 95:1-10.
- Cookson, W.R., Murphy, D.V., et M.M. Roper. 2008. Characterizing the relationships between soil organic matter components and microbial function and

- composition along a tillage disturbance gradient. *Soil Biology and Biochemistry* 40:763-777.
- Culhane, A.C., Perrière, G., Considine, E.C., Cotter, T.G., et D.G. Higgins. 2002. Between group analysis of microarray data. *Bioinformatics*:1600-1608.
- Curmi, P. 1988. Structure, espace poral du sol et fonctionnement hydrique. Quelques analyses de cas concrets. *Science du Sol* 26:203-214.
- Curmi, P., Mérot, P., Roger-Estrade, J., et J. Caneill. 1996. Use of environmental isotopes for field study of water infiltration in the ploughed soil layer. *Geoderma* 72:203-217.
- D'Haene, K., Vandenbruwane, J., De Neve, S., Gabriels, D., Salomez, J., et G. Hofman. 2008a. The effect of reduced tillage on nitrogen dynamics in silt loam soils. *European Journal of Agronomy* 28:449-460.
- D'Haene, K., Vermang, J., Cornelis, W.M., Leroy, B.L.M., Schiettecatte, W., De Neve, S., Gabriels, D., et G. Hofman. 2008b. Reduced tillage effects on physical properties of silt loam soils growing root crops. *Soil and Tillage Research* 99:279-290.
- Dilly, O., Blume, H.P., Sehy, U., Jimenez, M., et J.C. Munch. 2003. Variation of stabilised, microbial and biologically active carbon and nitrogen in soil under contrasting land use and agricultural management practices. *Chemosphere* 52:557-569.
- Drijber, R.A., Doran, J.W., Parkhurst, A.M., et D.J. Lyon. 2000. Changes in soil microbial community structure with tillage under long-term wheat-fallow management. *Soil Biology & Biochemistry* 32.
- Drinkwater, L.E., Janke, R.R., et L. Rossoni-Longnecker. 2000. Effects of tillage intensity on nitrogen dynamics and productivity in legume-based grain systems. *Plant and Soil* 227:99-113.
- Edel-Hermann, V., Dreumont, C., Perez-Piqueres, A., et C. Steinberg. 2004. Terminal restriction fragment length polymorphism analysis of ribosomal RNA genes to assess changes in fungal community structure in soils. *FEMS Microbiology Ecology* 47:397-404.
- Edwards, U., Rogall, T., Blöcker, H., Emde, M., et E. Böttger. 1989. Isolation and direct complete nucleotide determination of entire genes. Characterization of a gene coding for 16S ribosomal RNA. *Nucleic Acids Research* 17:7843-7853.
- Elder, J.W., et R. Lal. 2008. Tillage effects on physical properties of agricultural organic soils of north central Ohio. *Soil and Tillage Research* 98:208.
- ENITA de Bordeaux. 2003. Agriculture biologique. Synthèse Agricole ed.
- Entry, J., Reeves, D.W, Backman, C., et R. Raper. 1996. Influence of wheel traffic and tillage on microbial biomass, residue decomposition and extractable nutrients in a Coastal Plain Soil. *Plant and Soil* 180:129-137.

- Feng, Y., Motta, A.C., Reeves, D.W., Burmester, C.H., Santen, E.v., et J.A. Osborne. 2003. Soil microbial communities under conventional-till and no-till continuous cotton systems. *Soil Biology & Biochemistry* 35:1693-1703.
- Fierer, N., Schimel, J.P., et P.A. Holden. 2003. Variations in microbial community composition through two soil depth profiles. *Soil Biology and Biochemistry* 35:167.
- Fließbach, A., et P. Mäder. 2000. Microbial biomass and size-density fractions differ between soils of organic and conventional agricultural systems. *Soil Biology and Biochemistry* 32:757-768.
- Franzluebbers, A.J., Hons, F.M., et D.A. Zueberer. 1994. Seasonal changes in soil microbial biomass and mineralizable C and N in wheat management systems. *Soil Biology & Biochemistry* 26:1469-1475.
- Franzluebbers, A.J., Hons, F.M., et D.A. Zuberer. 1995. Tillage and crop effects on seasonal dynamics of soil CO₂ evolution, water content, temperature, and bulk density. *Applied Soil Ecology* 2:95-109.
- Franzluebbers, A.J., et M.A. Arshad. 1996. Soil organic matter pools during early adoption of conservation tillage in northwestern Canada. *Soil Science Society of America Journal* 60:1422-1427.
- Franzluebbers, A.J., et M.A. Arshad. 1997. Particulate organic carbon content and potential mineralization as affected by tillage and texture. *Soil Science Society of America Journal* 61:1382-1386.
- Franzluebbers, A.J. 1999. Potential C and N mineralization and microbial biomass from intact and increasingly disturbed soils of varying texture. *Soil Biology and Biochemistry* 31:1083-1090.
- Frey, S.D., Elliott, E.T., et K. Paustian. 1999. Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no-tillage agroecosystems along two climatic gradients. *Soil Biology and Biochemistry* 31:573-585.
- Gál, A., Vyn, T.J., Michéli, E., Kladvko, E.J., et W.W. McFee. 2007. Soil carbon and nitrogen accumulation with long-term no-till versus moldboard plowing overestimated with tilled-zone sampling depths. *Soil and Tillage Research* 96:42-51.
- Gautronneau, Y., et H. Manichon. 1987. Guide méthodique du profil cultural, Paris/Lyon.
- Germon, J.C., Taureau, J.C., et Thomas, J.M. 1994. Effets des méthodes simplifiées de travail du sol sur les transformations de l'azote et leurs conséquences sur le lessivage des nitrates, p. 125-154, *In* G. Monnier, et al., eds. Simplification du travail du sol, INRA (Les Colloques n°65) ed, Paris, 16 mai 1991.
- Gosling, P., Hodge, A., Goodlass, G., et G.D. Bending. 2005. Arbuscular mycorrhizal fungi and organic farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment?*
- Grigera, M.S., Drijber, R.A., et B.J. Wienhold. 2007. Redistribution of crop residues during row cultivation creates a biologically enhanced environment for soil microorganisms. *Soil and Tillage Research* 94:550-554.

- Guérif, J. 1994. Influence de la simplification du travail du sol sur l'état structural des horizons de surface. Conséquences sur leurs propriétés physiques et leurs comportements mécaniques, p. 13-33, *In* G. Monnier, et al., eds. Simplification du travail du sol, INRA (Les Colloques N°65) ed, Paris, 16 mai 1991.
- Hamza, M.A., et W.K. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research* 82:121-145.
- Hansel, C.M., Fendorf, S., Jardine, P.M., et C.A. Francis. 2008. Changes in bacterial and archeal community structure and functional diversity along a geochemically variable soil profile. *Appl. Environ. Microbiol.*:1620-1633.
- Haynes, R.J. 2005. Labile Organic Matter Fractions as Central Components of the Quality of Agricultural Soils: An Overview. *Advances in Agronomy* 85:221-268.
- Hill, G.T., N.A. Mitkowski, L. Aldrich-Wolfe, L.R. Emele, D.D. Jurkonie, A. Ficke, S. Maldonado-Ramirez, S.T. Lynch, and E.B. Nelson. 2000. Methods for assessing the composition and diversity of soil microbial communities. *Applied Soil Ecology* 15:25-36.
- Hiltbrunner, J., M. Liedgens, L. Bloch, P. Stamp, and B. Streit. 2007. Legume cover crops as living mulches for winter wheat: components of biomass and the control of weeds. *European Journal of Agronomy* 26:21-29.
- Hole, D.G., A.J. Perkins, J.D. Wilson, I.H. Alexander, F. Grice, and A.D. Evans. 2005. Does organic farming benefit biodiversity? *Biological Conservation* 122:113-130.
- Huwe, B. 2003. The role of soil tillage for soil structure, p. 27-50, *In* A. El Titi, ed. *Soil Tillage in Agroecosystems*. CRC Press LLC, Boca Raton.
- Ibekwe, A.M., Kennedy, A.C., Frohne, P.S., Papiernik, S.K., Yang, C.-H., et D.E. Crowley. 2002. Microbial diversity along a transect of agronomic zones. *FEMS Microbiology Ecology* 39:183-191.
- IFOAM. 2002. IFOAM basics standards for organic production and processing. IFOAM, Germany.
- Insam, H. 2001. Development in soil microbiology since the 1960s. *Geoderma* 100:389-402.
- IUSS Working Group WRB. 2006. World reference base for soil resources 2006. *World Soil Resources Reports n°103*. FAO, Rome.
- Jackson, L.E., Calderon, F.J., Steenwerth, K.L., Scow, K.M., et D.E. Rolston. 2003. Responses of soil microbial processes and community structure to tillage events and implications for soil quality. *Geoderma* 114:305-317.
- Janvier, C. 2007. Recherche d'indicateurs de la santé des sols, PhD thesis, AgroParisTech, Paris.

- Jensen, L.S., McQueen, D.J., et T.G. Shepherd. 1996. Effects of soil compaction on N-mineralization and microbial-C and -N. I. Field measurements. *Soil & Tillage Research* 38:175-188.
- Kandeler, E., et E. Murer. 1993. Aggregate stability and soil microbial processes in a soil with different cultivation. *Geoderma* 56:503-513.
- Kandeler, E., Tscherko, D., et H. Spiegel. 1998. Long-term monitoring of microbial biomass, N mineralisation and enzyme activities of a Chernozem under different tillage management. *Biology and Fertility of Soils* 28:343-351.
- Kandeler, E., Palli, S., Stemmer, M., et M.H. Gerzabek. 1999. Tillage changes microbial biomass and enzyme activities in particle-size fractions of a Haplic Chernozem. *Soil Biology and Biochemistry* 31:1253-1264.
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F., et G.E. Schuman. 1997. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal* 61:4-10.
- Kay, B.D., et A.J. Vanden Bygaart. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil and Tillage Research* 66:107-118.
- Kennedy, A.C. 1999. Bacterial diversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 74:65-76.
- Kern, J.S., et M.G. Johnson. 1993. Conservation Tillage Impacts on National Soil and Atmospheric Carbon Levels. *Soil Science Society of America Journal* 57:200-210.
- Kladivko, E.J. 2001. Tillage systems and soil ecology. *Soil & Tillage Research* 61:61-76.
- Koch, H.-J., et N. Stockfisch. 2006. Loss of soil organic matter upon ploughing under a loess soil after several years of conservation tillage. *Soil and Tillage Research* 86:73-83.
- Köller, K. 2003. Techniques of Soil Tillage, p. 1-25, *In* A. El Titi, ed. *Soil Tillage in Agroecosystems*. CRC Press LLC, Boca Raton.
- Kristensen, H.L., McCarty, G.W., et J.J. Meisinger. 2000. Effects Of Soil Structure Disturbance on Mineralization of Organic Soil Nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:371-378.
- Labreuche, J., Viloingt, T., Caboulet, D., Daouze, J.P., Duval, R., Ganteil, A., Jouy, L., Quere, L., Boizard, H., et J. Roger-Estrade. 2007. Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans labour (TCSL) en France. Partie I: La pratique des TCSL en France. ADEME.
- Lal, R., Reicosky, D.C., et J.D. Hanson. 2007. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil and Tillage Research* 93:1-12.
- Lampkin, N. 2000. Organic farming in the European Union - Overview, policies and perspectives, p. 23-35, *In* G. Allard, et al., eds. *L'agriculture biologique face à son développement. Les enjeux futurs*, INRA (Les Colloques N°95) ed. INRA, Lyon, 6-8 décembre 1999.

- Lemaître, A., Chaussod, R., Tavant, Y., et S. Bruckert. 1995. An attempt to determine a pool of labile organic matter associated with the soil microbial biomass. *European Journal of Soil Biology* 31:121-125.
- Li, Q., Allen, H.L., et A.G. Wollum II. 2004. Microbial biomass and bacterial functional diversity in forest soils: effects of organic matter removal, compaction, and vegetation control. *Soil Biology & Biochemistry* 36:571-570.
- Lipiec, J., et W. Stepniewski. 1995. Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. *Soil & Tillage Research* 35:37-52.
- Liu, W., Marsh, T., Cheng, H., et L. Forney. 1997. Characterization of microbial diversity by determining terminal restriction fragment length polymorphisms of genes encoding 16S rRNA. *Appl. Environ. Microbiol.* 63:4516-4522.
- Liu, X.J., Mosier, A.R., Halvorson, A.D., et F.S. Zhang. 2005. Tillage and nitrogen application effects on nitrous and nitric oxide emissions from irrigated corn fields. *Plant and Soil* 276:235-249.
- Liu, X.J., Mosier, A.R., Halvorson, A.D., Reule, C.A., et F.S. Zhang. 2007. Dinitrogen and N₂O emissions in arable soils: Effect of tillage, N source and soil moisture. *Soil Biology and Biochemistry* 39:2362-2370.
- Llorens Abando, L., et E. Rohner-Thielen. 2007. Different organic farming patterns within UE-25. An overview of the current situation [Online]. Available by Eurostat.
- Lupwayi, N.Z., Rice, W.A., et G.W. Clayton. 1998. Soil microbial diversity and community structure under wheat as influenced by tillage and crop rotation. *Soil Biology and Biochemistry* 30:1733-1741.
- Mäder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., et U. Niggli. 2002. Soil Fertility and Biodiversity in Organic Farming. *Science* 296:1694-1697.
- Mäeder, P., Fliessbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., et U. Niggli. 2002. Soil Fertility and Biodiversity in Organic Farming. *Science* 296:1694-1697.
- Manichon, H. 1982. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural: élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris.
- Manichon, H., et J. Roger-Estrade. 1990. Caractérisation de l'état structural et étude de son évolution à court et moyen terme sous l'action des systèmes de culture, p. 27-55, *In* L. Combe and D. Picard, eds. *Les systèmes de culture*. INRA, Paris.
- Marinari, S., Mancinelli, R., Campiglia, E., et S. Grego. 2006. Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy. *Ecological Indicators* 6:701-711.
- Martin-Laurent, F., Philippot, L., Hallet, S., Chaussod, R., Germon, J.C., Soulas, G., et G. Catroux. 2001. DNA Extraction from Soils: Old Bias for New Microbial Diversity Analysis Methods. *Appl. Environ. Microbiol.* 67:2354-2359.

- McCarty, G.W., Lyssenko, N.N., et J.L. Starr. 1998. Short-term changes in soil carbon and nitrogen pools during tillage management transition. *Soil Science Society of America Journal* 62:1564-1571.
- McGill, W.B. 2007. The Physiology and Biochemistry of Soil Organisms, p. 231-256, *In* E. A. Paul, ed. *Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry*, Academic press ed.
- Melero, S., Porras, J.C.R., Herencia, J.F., et E. Madejon. 2006. Chemical and biochemical properties in a silty loam soil under conventional and organic management. *Soil and Tillage Research* 90:162-170.
- Meyer, K., Joergensen, R.G., et B. Meyer. 1996. The effects of reduced tillage on microbial biomass C and P in sandy loess soils. *Applied Soil Ecology* 5:71-79.
- Monnier, G. 1994. Introduction à la simplification du travail du sol, p. 5-9, *In* G. Monnier, et al., eds. *Simplification du travail du sol*, INRA (Les Colloques n° 65) ed, Paris, 16 mai 1991.
- Moscatelli, M.C., Di Tizio, A., Marinari, S., et S. Grego. 2007. Microbial indicators related to soil carbon in Mediterranean land use systems. *Soil and Tillage Research* 97:51-59.
- Munkholm, L.J., Schjonning, P., Rasmussen, K.J., et K. Tanderup. 2003. Spatial and temporal effects of direct drilling on soil structure in the seedling environment. *Soil and Tillage Research* 71:163-173.
- Nael, M., Khademi, H., et M.A. Hajabbasi. 2004. Response of soil quality indicators and their spatial variability to land degradation in central Iran. *Applied Soil Ecology* 27:221-232.
- Needelman, B.A., Wander, M.M., Bollero, G.A., Boast, C.W., Sims, G.K., et D.G. Bullock. 1999. Interaction of tillage and soil texture: Biologically active soil organic matter in Illinois. *Soil Science Society of America Journal* 63:1326-1334.
- Nielsen, N.M., et A. Winding. 2002. *Microorganisms as Indicators of Soil Health*. Technical Report No. 388. National Environmental Research Institute, Denmark.
- Oorts, K. 2006. Effect of tillage system on soil organic matter stocks and C and N fluxes in cereal cropping systems on a silt loam soil in Northern France, PhD thesis, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris.
- Oorts, K., Nicolardot, B, Merckx, R., Richard, G., et H. Boizard. 2006. C and N mineralization of undisrupted and disrupted soil from different structural zones of conventional tillage and no-tillage systems in northern France. *Soil Biology and Biochemistry* 38:2576-2586.
- Oorts, K., Laurent, F., Mary, B., Thiebeau, P., Labreuche, J., et B. Nicolardot. 2007. Experimental and simulated soil mineral N dynamics for long-term tillage systems in northern France. *Soil and Tillage Research* 94:441-456.
- Otten, W., Binnie, K. Young, I. Villot, J. et Grinev, D. 2009. Interconnectivity of habitats in soil: combining X-ray micro tomography and thin sectioning to

- reveal fungal-soil structure interactions, p. 131-134, *In* C. Steinberg, *et al.*, eds. Proceedings of the IOBC / WPRS conference "Multitrophic Interactions in Soil " at Dijon 24-27 june 2007, France, Vol. 42.
- Parry, S., Renault, P., Chadoeuf, J., Chenu, C., et R. Lensi. 2000. Particulate organic matter as a source of variation in denitrification in clods of soil. *European Journal of Soil Science* 51:271-281.
- Peigné, J., Gautronneau, Y., Aveline, A., et M. Cannavacciuolo. 2006. Soil tillage systems under organic farming in France. *European Organic Congress in Denmark*, may 2006.
- Peigné, J., Ball, B.C., Roger-Estrade, J. et C. David. 2007. Is conservation tillage suitable for organic farming? A review. *Soil Use and Management* 23:129-144.
- Pekrun, C., Kaul, H.P., et W. Claupein. 2003. Soil tillage for sustainable nutrient management, p. 83-113, *In* A. El Titi, ed. *Soil Tillage in Agroecosystems*. CRC Press LLC, Boca Raton.
- Ponder, F., et M. Tadros. 2002. Phospholipid fatty acids in forest soil four years after organic matter removal and soil compaction. *Applied Soil Ecology* 19:173-182.
- Pulleman, M.M., et J.C.Y. Marinissen. 2004. Physical protection of mineralizable C in aggregates from long-term pasture and arable soil. *Geoderma* 120:273-282.
- Rahman, M.H., Okubo, A., Sugiyama, S., et H.F. Mayland. 2008. Physical, chemical and microbiological properties of an Andisol as related to land use and tillage practice. *Soil and Tillage Research* 101:10.
- Ranjard, L., et A. Richaume. 2001. Quantitative and qualitative microscale distribution of bacteria in soil. *Research in Microbiology* 152:707-716.
- Rasmussen, K.J. 1999. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: a Scandinavian review. *Soil & Tillage Research* 53:3-14.
- Robertson, G.P., et P.M. Groffman. 2007. Nitrogen Transformation, p. 341-364, *In* E. A. Paul, ed. *Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry*, Academic press ed.
- Roger-Estrade, J., Richard, G., Boizard, H., Boiffin, J., Caneill, J., et H. Manichon. 2000. Modelling structural changes in tilled topsoil over time as a function of cropping systems. *European Journal of Soil Science* 51:455-474.
- Roger-Estrade, J., Richard, G., Boizard, H., Defosse, P., Manichon, H., et J. Caneill. 2004a. SISOL: Un modèle d'évolution de l'état structural des couches de sol cultivées. *Etude et Gestion des Sols* 11:33-46.
- Roger-Estrade, J., Richard, G., Caneill, J., Boizard, H., Coquet, Y., Defosse, P., et H. Manichon. 2004b. Morphological characterisation of soil structure in tilled fields: from a diagnosis method to the modelling of structural changes over time. *Soil & Tillage Research* 79:33-49.
- Sarmah, A.K., Pillai-McGarry, U., et D. McGarry. 1996. Repair of the structure of a compacted Vertisol via wet/dry cycles. *Soil and Tillage Research* 38:17-33.

- Scullion, J., Neale, S., et L. Philipps. 2002. Comparisons of earthworm populations and cast properties in conventional and organic arable rotations. *Soil Use and Management* 18:293-300.
- Shannon, D., Sen, A.M., et D.B. Johnson. 2002. A comparative study of the microbiology of soils managed under organic and conventional regimes. *Soil Use and Management* 18:274-283.
- Shepherd, M.A., Harrison, R., et J. Webb. 2002. Managing soil organic matter - implications for soil structure on organic farms. *Soil Use and Management* 18:284-292.
- Sierra, J., et P. Renault. 1996. Respiratory activity and oxygen distribution in natural aggregates in relation to anaerobiosis. *Soil Science Society of America Journal* 60:1428-1438.
- Simmons, B.L., et D.C. Coleman. 2008. Microbial community response to transition from conventional to conservation tillage in cotton fields. *Applied Soil Ecology* 40:518.
- Six, J., Elliott, E.T., et K. Paustian. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 2099-2103.
- Six, J., Conant, R.T., Paul, E.A., et K. Paustian. 2002a. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* 241:155-176.
- Six, J., Feller, C., Denef, K., Ogle, S., de Moares Sa, J.C., et A. Albrecht. 2002b. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie* 22:755-775.
- Smith, J.L., et H.P. Collins. 2007. Management of Organisms and Their Processes in Soils, p. 471-502, *In* E. A. Paul, ed. *Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry*, Academic Press ed.
- Spedding, T.A., Hamel, C., Mehuys, G.R., et C.A. Madramootoo. 2004. Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems. *Soil Biology & Biochemistry* 36:499-512.
- Stein, A., et C. Ettema. 2003. An overview of spatial sampling procedures and experimental design of spatial studies for ecosystem comparisons. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 94:31-47.
- Stengel, P. 1983. Analyse de la porosité. Séminaire CEE-Agrimed, 14-18 Mars 1983, Avignon, France.
- Stockdale, E.A., Shepherd, M.A., Fortune, S., et S.P. Cuttle. 2002. Soil fertility in organic farming systems - fundamentally different? *Soil Use and Management* 18:301-308.
- Stockfisch, N., Forstreuter, T., et W. Ehlers. 1999. Ploughing effects on soil organic matter after twenty years of conservation tillage in Lower Saxony, Germany. *Soil and Tillage Research* 52:91-101.

- Stopes, C., Lord, E.I., Philipps, L., et L. Woodward. 2002. Nitrate leaching from organic farms and conventional farms following best practice. *Soil Use and Management* 18:256-263.
- Strong, D.T., Wever, H.D., Merckx, R., et S. Recous. 2004. Spatial location of carbon decomposition in the soil pore system. *European Journal of Soil Science* 55:739-750.
- Teasdale, J.R., Coffman, C.B., et R.W. Mangum. 2007. Potential Long-Term Benefits of No-Tillage and Organic Cropping Systems for Grain Production and Soil Improvement. *Agronomy Journal* 99:1297-1305.
- Tebrügge, F., et R.-A. Düring. 1999. Reducing tillage intensity -- a review of results from a long-term study in Germany. *Soil and Tillage Research* 53:15-28.
- Thioulouse, J., Chessel, D., Dole´dec, S., et J.-M. Olivier. 1997. ADE-4: a multivariate analysis and graphical display software. *Statistics and Computing* 7:75.
- Trewavas, A. 2004. A critical assessment of organic farming-and-food assertions with particular respect to the UK and the potential environmental benefits of no-till agriculture. *Crop Protection* 23:757-781.
- Vian, J.F. 2005. Analyse de la variabilité spatiale de descripteurs physico-chimiques et microbiologiques du sol. Caractérisation initiale d'une parcelle d'essai sur le travail du sol. Mémoire de Master 2 Recherche en Ecologie Microbienne, Université Lyon 1. ISARA-Lyon.
- Vogeler, I., Horn, R., Wetzels, H., et J. Krümmelbein. 2006. Tillage effects on soil strength and solute transport. *Soil and Tillage Research* 88:193-204.
- von Lütow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Flessa, H., Guggenberger, G., Matzner, E., et B. Marschner. 2007. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry* 39:2183.
- Wakelin, S.A., Macdonald, L.M., Rogers, S.L., Gregg, A.L., Bolger, T.P., et J.A. Baldock. 2008. Habitat selective factors influencing the structural composition and functional capacity of microbial communities in agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry* 40:803.
- Wardle, D.A., et A. Ghani. 1995. A critique of the microbial metabolic quotient (qCO₂) as a bioindicator of disturbance and ecosystem development. *Soil Biology and Biochemistry* 27:1601-1610.
- Watson, C.A., Atkinson, D., Gosling, P., Jackson, L.R., et F.W. Rayns. 2002. Managing soil fertility in organic farming systems. *Soil Use and Management* 18:239-247.
- Watson, C.A., Walker, R.L., et E.A. Stockdale. 2007. Research in organic production systems-past, present and future. *The Journal of Agricultural Science* 146:1-19.
- Wieland, G., Neumann, R., et H. Backhaus. 2001. Variation of Microbial Communities in Soil, Rhizosphere, and Rhizoplane in Response to Crop

- Species, Soil Type, and Crop Development. *Appl. Environ. Microbiol.* 67:5849-5854.
- Wright, A.L., Hons, F.M., et J. Matocha, John E. 2005. Tillage impacts on microbial biomass and soil carbon and nitrogen dynamics of corn and cotton rotations. *Applied Soil Ecology* 29:85-92.
- Wright, A.L., Hons, F.M., Lemon, R.G., McFarland, M.L., et R.L. Nichols. 2007. Stratification of nutrients in soil for different tillage regimes and cotton rotations. *Soil and Tillage Research* 96:19-27.
- Wu, J., Joergensen, R.G., Pommerening, B., Chaussod, R., et P.C. Brookes. 1990. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction: an automated procedure. *Soil Biology & Biochemistry* 22:1167-1169.
- Young, I.M., et K. Ritz. 2000. Tillage, habitat space and function of soil microbes. *Soil and Tillage Research* 53:201-213.

ANNEXES

Annexe 1-A : Itinéraire technique des différentes modalités du site de Lyon au cours des 3 premières années de leur différenciation_____1

Annexe 1-B : Itinéraire technique des différentes modalités du site de Kerguéhennec au cours des 5 premières années de leur différenciation_____4

Annexe 2: Effets du mode de préparation et de conservation des échantillons sur les paramètres microbiens quantitatifs mesurés_____7

Annexe 3 : Photos assemblées des profils cultureux du site de Lyon en mars 2007_8

Annexe 4 : Photos assemblées des profils cultureux du site de Kerguéhennec en mars 2007_____10

Annexe 5 : Teneurs en eau massique des différents traitements par horizon et par année_____11

Annexe 6 : Données météorologiques relevées sur les sites expérimentaux_____13

Annexe 7 : Fractionnement granulométrique des MOS. Dosage des teneurs en C et N des fractions organo-minérales et minérales_____15

Annexe 8 : Effet du mode de travail du sol sur la respiration spécifique apparente__18

Annexe 9 : Influence de la profondeur d'enfouissement des résidus de culture et de la structure du sol sur les communautés microbiennes en mars 2006_____20

Annexe 1-A : Itinéraires technique des différentes modalités du site de Lyon au cours des 3 premières années de leur différenciation

Date	Nature de l'intervention	Labour traditionnel	Labour agronomique	Travail réduit	Travail superficiel
04/05	Destruction de la luzerne	Herse rotative (5 cm)	1 ^{er} passage : mixer (5cm) ; 2 ^{ème} passage : herse rotative (5 cm) ; 3 ^{ème} passage : herse rotative (5 cm)		Aucune intervention
04/04/05	Fertilisation N		300 kg/ha de soies de porc (14% N)		
04/04/05	Destruction de la luzerne	Herse rotative (5 cm)			Aucune intervention
09/05/05	Travail du sol	Labour 30 cm, charrue Huard 4 corps, 14 pouces avec rasettes, 5-7 km/h	Labour 17 cm, charrue Vari-Large, hors raie sans rasettes, 5-7 km/h	Chisel 15 cm, plus rouleau spire et croskilette, 7 km/h	Aucune intervention
09/05/05	Préparation lit de semences	Herse rotative plus rouleau packer			Roulage de la luzerne
09/05/05	Semis maïs	Semoir 6 rangs monosem, densité 104000 grains/ha			
15/05/05	Désherbage	Herse étrille pré-levée			
01/06/05	Fertilisation N	700 kg/ha soie de porcs (14% N)	400 kg/ha soie de porc (14% N)		700 kg/ha soie de porcs (14% N)
02/06/05	Binage	Bineuse monosem 6 rangs + doigts rotatifs			
11/06/05	Binage	Bineuse monosem 6 rangs + doigts rotatifs			
17/06/05	Binage	Bineuse monosem 6 rangs			
	Irrigation	25/06 : 40 mm ; 03/07 : 35 mm ; 14/07/05 : 35 mm ; 19/07/05 : 35 mm ; 26/07/05 : 35 mm ; 03/08/05 : 35 mm ; 09/08/05 : 35 mm ; 15/08/05 : 35 mm ; 24/05/08 : 30 mm			
15/10/05	Récolte et broyage des cannes de maïs	Sur toutes les parcelles			

Date	Nature de l'intervention	Labour traditionnel	Labour agronomique	Travail réduit	Travail superficiel
17/10/05	Déchaumage	1 passage de mixter (5 cm)			2 passages de mixter (5 cm)
18/10/05	Préparation semis sous couvert	Rien			Herse rotative, 2 passages (5 cm) et semis d'avoine (150 kg/ha)
15 et 16/03/06	Travail du sol	Labour 30 cm, charrue Huard 4 corps, 14 pouces avec rasettes, 5-7 km/h	Labour 18 cm, charrue Vari-Large, hors raie sans rasettes, 5-7 km/h	Chisel 15 cm, plus rouleau spire et croskillette, 7 km/h	2 passages d'ECOMULCH pour destruction du couvert d'avoine
18/03/06	Faux semis	Herse plate 8,4 m (8 km/h)			
14/04/06	Travail du sol				Chisel à 5 cm
21/04/06	Faux semis	Herse rotative 5 cm (8 km/h)			
25/04/06	Préparation du semis	Herse rotative 5 cm (8 km/h)			
25/04/06	Semis soja	Semoir nodet 10 rangs, espacement des rangs de 40 cm ; 610000 pieds/ha, inoculum sur la ligne de semis			
02/05/06	Désherbage	Herse étrille pré-levée (7 km/h)			
10/05/06	Désherbage	2 passages en sens inverse herse étrille post-levée (3 km/h)			
27/05/06	Binage	Bineuse 6 rangs sans doigts rotatifs (2,5 km/h)			
01/06/06	Binage	Bineuse 6 rangs sans doigts rotatifs en sens inverse du premier binage (2,5 km/h)			
24/06/06	Binage	Bineuse 6 rangs sans doigts rotatifs en sens inverse du second binage (6 km/h)			
05/07/06	Désherbage	Manuel, élimination des espèces les plus préjudiciables qui montent en graines (amarantes, chénopodes)			
	Irrigation	12/06 : 35 mm ; 01/07 : 35 mm ; 11/07 : 35 mm ; 19/07 : 35 mm ; 22/07 : 30 mm ; 25/07 : 30 mm ; 31/07 : 30 mm ; 10/08 : 30 mm ; 25/08 : 30 mm			
21/09/06	Récolte	Sur toutes les parcelles, moissonneuse 6 m, broyage des résidus (formation d'andins)			
22/09/06	Déchaumage	Mixter 7 cm (7,5 km/h)			2 passages de mixter 7 cm en sens inverse

Date	Nature de l'intervention	Labour traditionnel	Labour agronomique	Travail réduit	Travail superficiel
16/10/06	Faux semis	Mixter 7 cm (7,5 km/h)			
30/10/06	Travail du sol	Labour 30 cm, charrue Huard 4 corps, 14 pouces avec rasettes, 5-7 km/h	Labour 18 cm, charrue Vari-Large, hors raie sans rasettes, 5-7 km/h	Chisel 15 cm, plus rouleau spire et croskillette, 7 km/h	Rien
30/10/06	Semis blé	Semis combiné avec herse rotative 4 m (5 km/h) ; 170 kg/ha			
22/02/07	Désherbage	Herse étrille			Herse étrille 2 passages
06/03/07	Désherbage	Herse étrille			Herse étrille 2 passages
29/03/07	Fertilisation N	400 kg/ha de 10-0-0 (organique)			
08/04/07	Fertilisation N	400 kg/ha de 10-0-0 (organique)			
	Irrigation	11/04 : 35 mm ; 17/04 : 35 mm ; 24/04 : 35 mm			
10/07/07	Récolte blé	Sur toutes les parcelles			

Annexe 1-B : Itinéraires technique des différentes modalités du site de Kerguéhennec au cours des 5 premières années de leur différenciation

Date	Nature de l'intervention	Labour traditionnel	Labour agronomique	Travail réduit	Travail superficiel
10/02	Semis couvert trèfle	Oui	Traitement pas encore mis en place lors de cette première année culturale	Oui	Oui
03/03	Broyage trèfle	Oui		Oui	Oui
15/04/03	Destruction trèfle	Chisel 15 cm		Chisel 12 cm	Non
14/05/03	Travail du sol	Labour 22 cm, charrue 3 corps			
21/05/03	Broyage du couvert				Girobroyeur
22/05/03	Semis maïs	Combiné herse rotative (88000 grains/ha)		Combiné herse rotative (88000 grains/ha)	Combiné rota-semis (88000 grains/ha)
05/06/03	Désherbage				Tonte inter-rangs
06/06/03	Désherbage	Herse étrille 6 m (5 km/h)		Herse étrille 6 m (5 km/h)	Herse étrille 6 m (5 km/h)
13/06/03	Désherbage	Herse étrille 6 m (7km/h)		Herse étrille 6 m (7 km/h)	
23/06/03	Désherbage				Tonte inter- rangs
23/06/03	Binage	Bineuse 8km/h		Bineuse 8km/h	Rien
07/07/03	Désherbage + binage	Bineuse 8km/h	Bineuse 8km/h	Tonte inter- rangs	
10/10/03	Récolte	Oui	Oui	Oui	
11/10/03	Broyage résidus	Girobroyeur	Girobroyeur	Girobroyeur	
12/10/03	Destruction trèfle			Rotavator 5 cm	
04/11/03	Travail du sol	Labour 22 cm	Chisel 12 cm	Chisel 12 cm	Herse rotative 5 cm

Date	Nature de l'intervention	Labour traditionnel	Labour agronomique	Travail réduit	Travail superficiel
05/11/03	Semis Triticale				SD 3000 (290 grains/ha)
07/11/03	Travail du sol		Labour 12-15 cm, charrue 12 pouces, 8 corps		
07/11/03	Semis Triticale	Combiné herse rotative (290 grains/ha)			
16/02/04	Désherbage	Herse étrille 6m (7 km/h)			
20/04/04	Fertilisation N	Farine de plume 400 kg/ha			
27/08/04	Récolte	Toutes les parcelles			
15/04/05	Déchaumage	Rotalabour 5 cm			
18/05/05	Travail du sol	Labour 22 cm, charrue 3 corps	Labour 12 cm, charrue 12 pouces, 8 corps	2 passages vibroculteur 5 cm	2 passages vibroculteur 5 cm
30/05/05	Travail du sol	Vibroculteur 5 cm		Chisel 5 cm	
30/05/05	Désherbage			Herse étrille 6 m (7 km/h)	
31/05/05	Travail du sol			Chisel 8 cm	Chisel 5 cm
02/06/05	Semis blé noir	Combiné herse rotative			SD 3000
03/10/05	Récolte	Toutes les parcelles			
04/10/05	Broyage résidus	Toutes les parcelles			
05/11/05	Déchaumage	Chisel 5 cm			
14/11/05	Travail du sol	Labour 22 cm, charrue 3 corps	Labour 15 cm, charrue 12 pouces, 8 corps	Chisel 12 cm	
16/11/05	Semis pois	Combiné herse rotative			Combiné disques + dents
09/02/06	Désherbage	Herse étrille 6m (7 km/h)			
10/02/06	Désherbage	Herse étrille 6m (7 km/h)			
22/07/06	Récolte	Toutes les parcelles			
18/08/06	Déchaumage	Chisel 5 cm			

Date	Nature de l'intervention	Labour traditionnel	Labour agronomique	Travail réduit	Travail superficiel
22/08/06	Amendement organique	20 tonnes de compost			
25/08/06	Déchaumage	Chisel 5 cm			
30/10/06	Travail du sol	Labour 22 cm, charrue 3 corps	Labour 15 cm, charrue 12 pouces, 8 corps		
03/11/06	Travail du sol			Chisel 12 cm	Chisel 07 cm
06/11/06	Semis triticale	Combiné herse rotative 115 kg/ha			
06/02/07	Désherbage	Herse étrille 6m (7 km/h)			
12/03/07	Fertilisation N	Nitravi 390 kg/ha			
04/04/07	Désherbage	Herse étrille 6m (7 km/h)			
03/05/07	Fertilisation N	Nitravi 150 kg/ha			
01/08/07	Récolte	Toutes les parcelles			
22/08/07	Amendement organique	12 tonnes de compost			
25/08/07	Déchaumage	Chisel 5 cm			

Annexe 2: Effets du mode de préparation et de conservation des échantillons sur les paramètres microbiens quantitatifs mesurés

Tableau 1 : Effet du mode de préparation des échantillons sur la biomasse microbienne (BM) et le potentiel de minéralisation du carbone (Cmin) par horizon.

	Horizons	Γ	Δ	Γ tamisé	Δ tamisé	$\Gamma + \Delta$
BM (mgC.kg ⁻¹)	0-7 cm	333 ± 72 ^a	268 ± 50 ^b	360 ± 28 ^a	355 ± 93 ^a	323 ± 15 ^a
	7-12 cm	252 ± 58 ^a	170 ± 18 ^b	197 ± 16 ^{ab}	207 ± 7 ^{ab}	199 ± 7 ^{ab}
	12-20 cm	177 ± 10 ^a	157 ± 19 ^a	169 ± 8 ^a	165 ± 17 ^a	169 ± 4 ^a

Les chiffres suivi d'une lettre commune indique que le mode de préparation des échantillons n'influe pas significativement ($p < 0,05$) sur le paramètre mesuré (lecture horizontale du tableau).

Tableau 2 : Effet du mode de préparation des échantillons sur le potentiel de minéralisation du carbone (Cmin) par horizon.

	Horizons	Γ	Δ	Γ tamisé	Δ tamisé	$\Gamma + \Delta$
Cmin (mgC.kg ⁻¹)	0-7 cm	610 ± 72 ^a	610 ± 114 ^a	604 ± 20 ^a	522 ± 4 ^b	556 ± 28 ^{ab}
	7-12 cm	274 ± 44 ^a	258 ± 17 ^a	246 ± 21 ^a	247 ± 21 ^a	261 ± 11 ^a
	12-20 cm	202 ± 31 ^a	177 ± 33 ^a	205 ± 6 ^a	193 ± 37 ^a	202 ± 24 ^a

Les chiffres suivi d'une lettre commune indique que le mode de préparation des échantillons n'influe pas significativement ($p < 0,05$) sur le paramètre mesuré (lecture horizontale du tableau).

Annexe 3 : Photos assemblées des profils culturaux du site de Lyon en mars 2007



a



b

Photos assemblées des profils culturaux de la modalité labour traditionnel (LT) blocs 1 (a) et 2 (b)



a



b

Photos assemblées des profils culturaux de la modalité labour agronomique (LA) blocs 1 (a) et 2 (b)



a



b

Photos assemblées des profils culturaux de la modalité travail du sol réduit (TR) blocs 1 (a) et 2 (b)



a



b

Photos assemblées des profils culturaux de la modalité travail du sol superficiel (TS) blocs 1 (a) et 2 (b)

Annexe 4 : Photos assemblées de profils culturaux du site de Kerguéhennec en mars 2007



Photos assemblées du profil cultural de la modalité labour traditionnel (LT), bloc 2



Photos assemblées du profil cultural de la modalité labour agricole (LA), bloc 2



Photos assemblées du profil cultural de la modalité travail du sol réduit (TR), bloc 2



Photos assemblées du profil cultural de la modalité travail du sol superficiel (TS), bloc 2

Annexe 5 : Teneurs en eau massique des différents traitements par horizon et par année

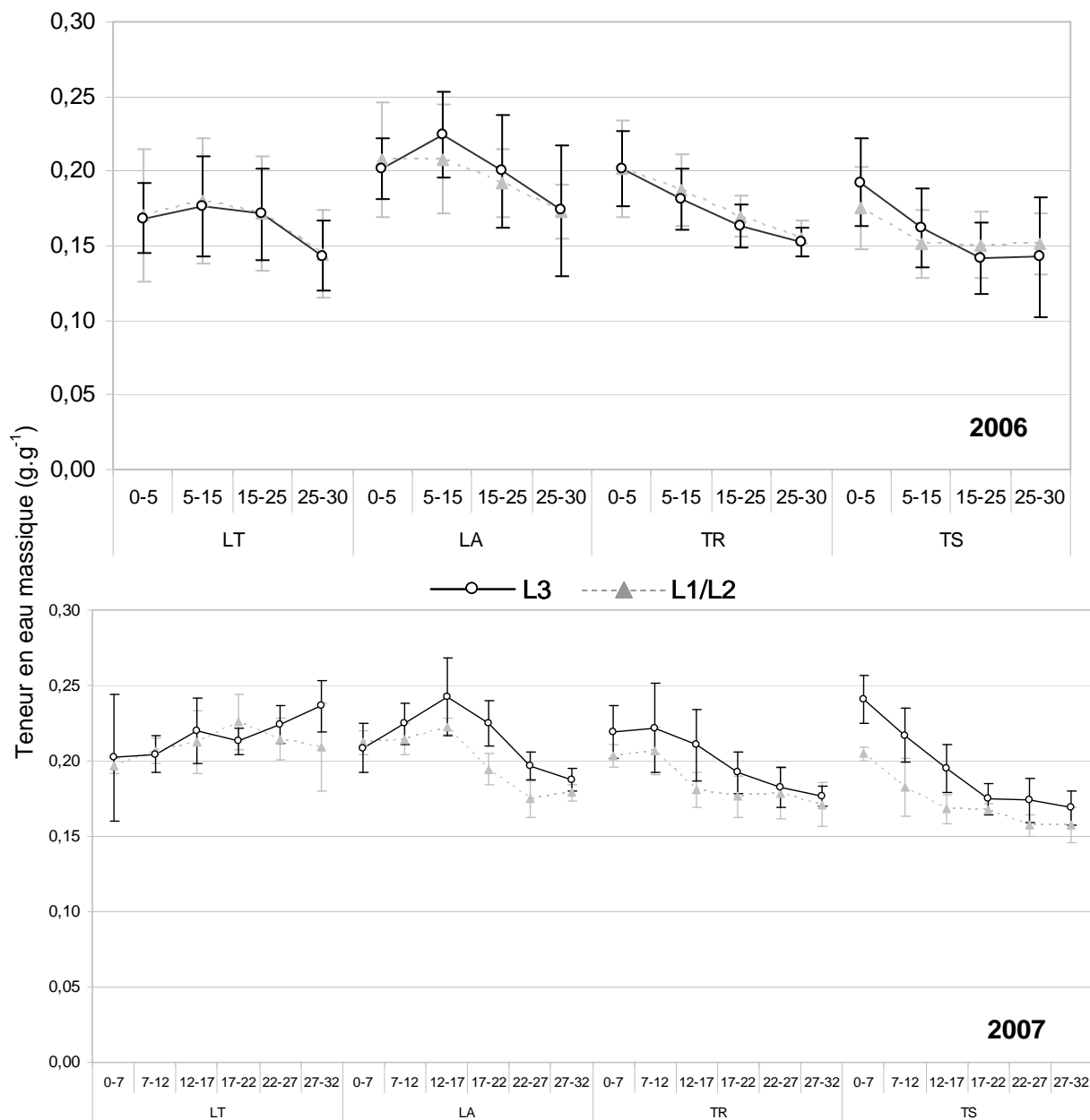


Figure 1 : Teneurs en eau massique (g.g⁻¹) par modalité des différents horizons en mars 2006 et 2007 sur le site de Lyon.

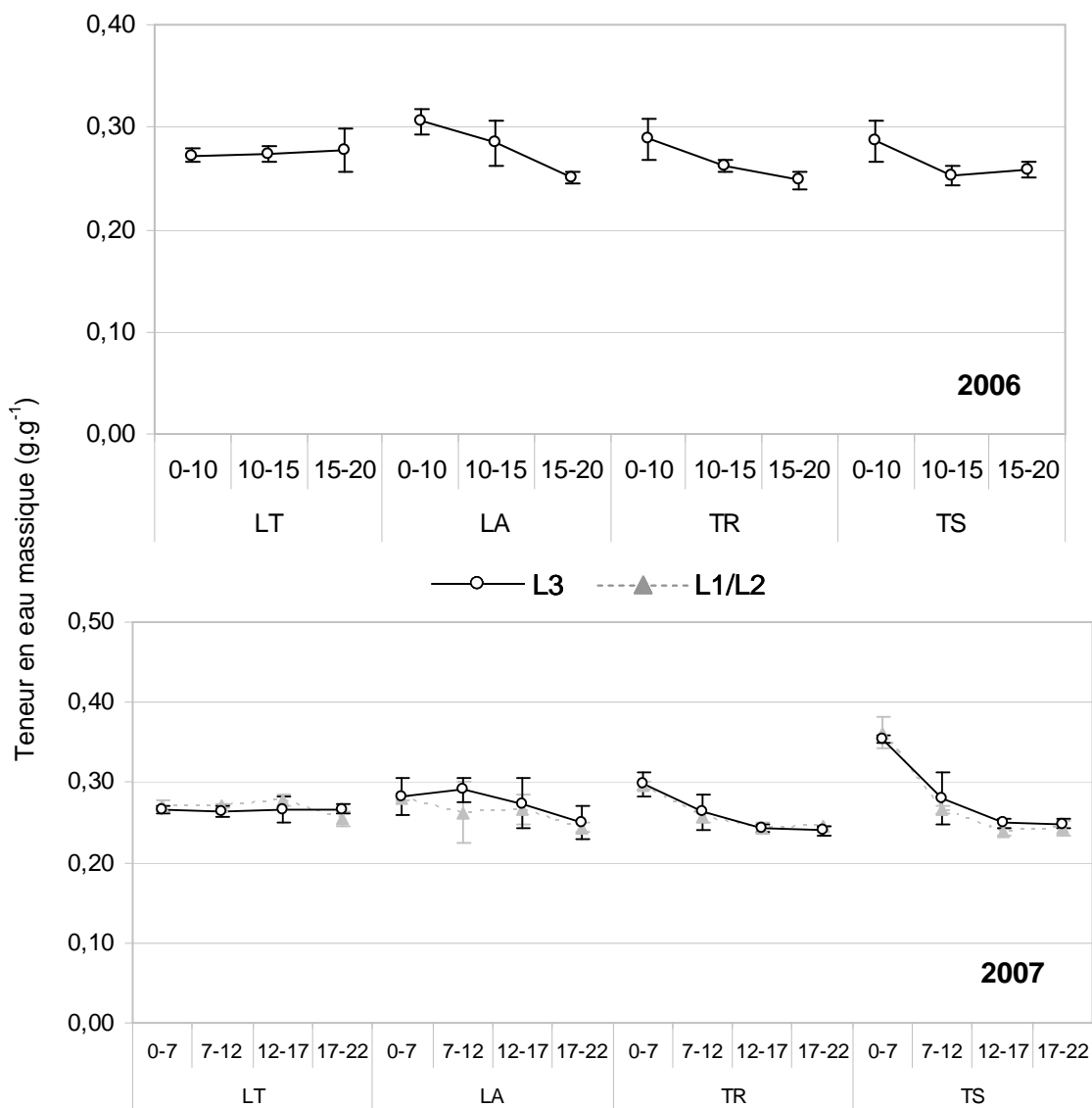


Figure 2 : Teneurs en eau massique (g.g⁻¹) par modalité des différents horizons en mars 2006 et 2007 sur le site de Kerguéhenec.

Annexe 6 : Données météorologiques relevées sur les sites expérimentaux

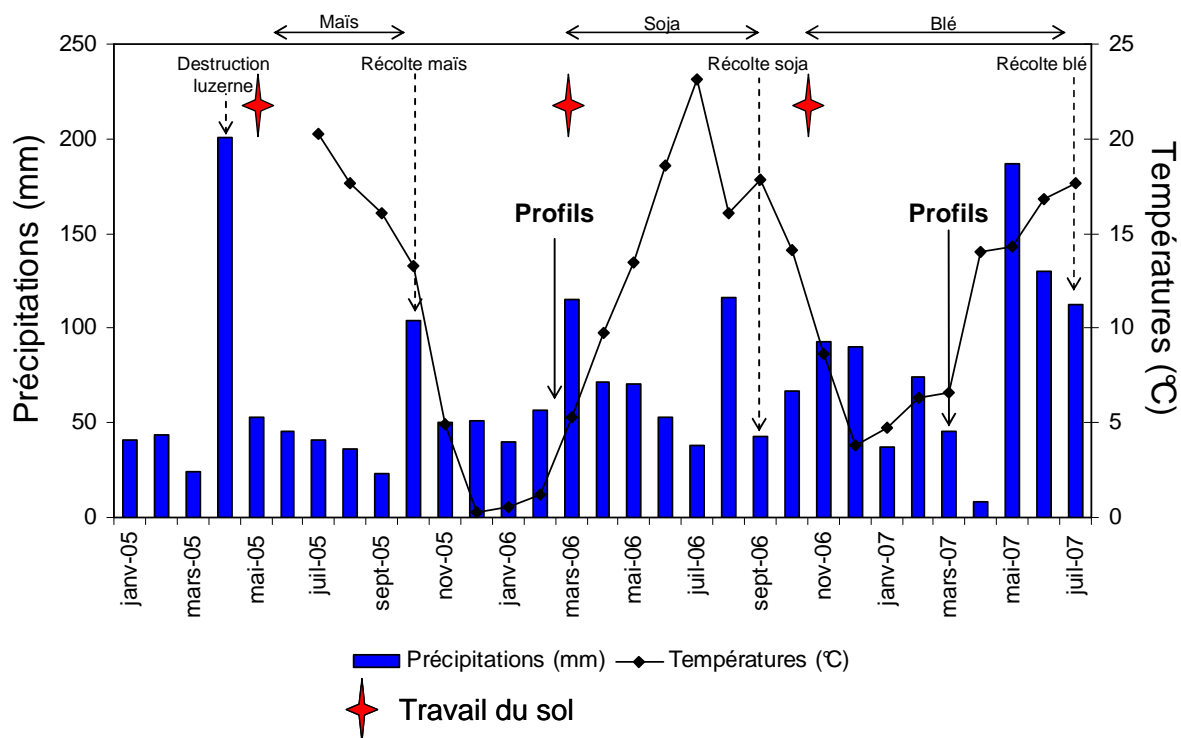


Figure 1 : Données météorologiques du site de Lyon et dates des interventions mécaniques sur les parcelles et des observations de la structure du sol (profils).

Les précipitations ont été relevées sur le site expérimental et les températures sont des moyennes mensuelles issues de la station météorologique de la station de Bron à proximité de Lyon.

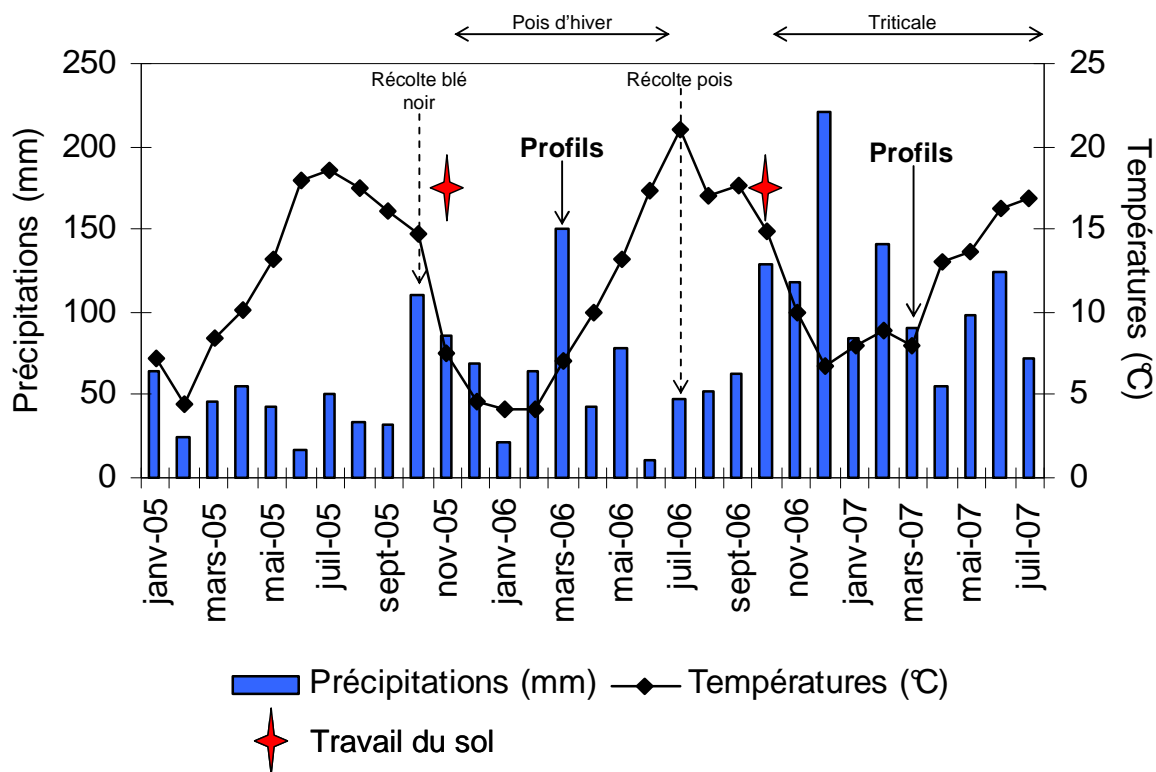


Figure 2 : Données météorologiques du site de Kerguéhennec et dates des interventions mécaniques sur les parcelles et des observations de la structure du sol (profils).

Les précipitations et les températures moyennes ont été relevées sur le site expérimental de Kerguéhennec.

Annexe 7 : Fractionnement granulométrique des MOS.

Dosage des teneurs en C et N des fractions organo-minérales et minérales

Les Figures 1 et 2 présentent les résultats des dosages de C et N réalisés sur les fractions organo-minérales (<0,05 mm) et minérales.

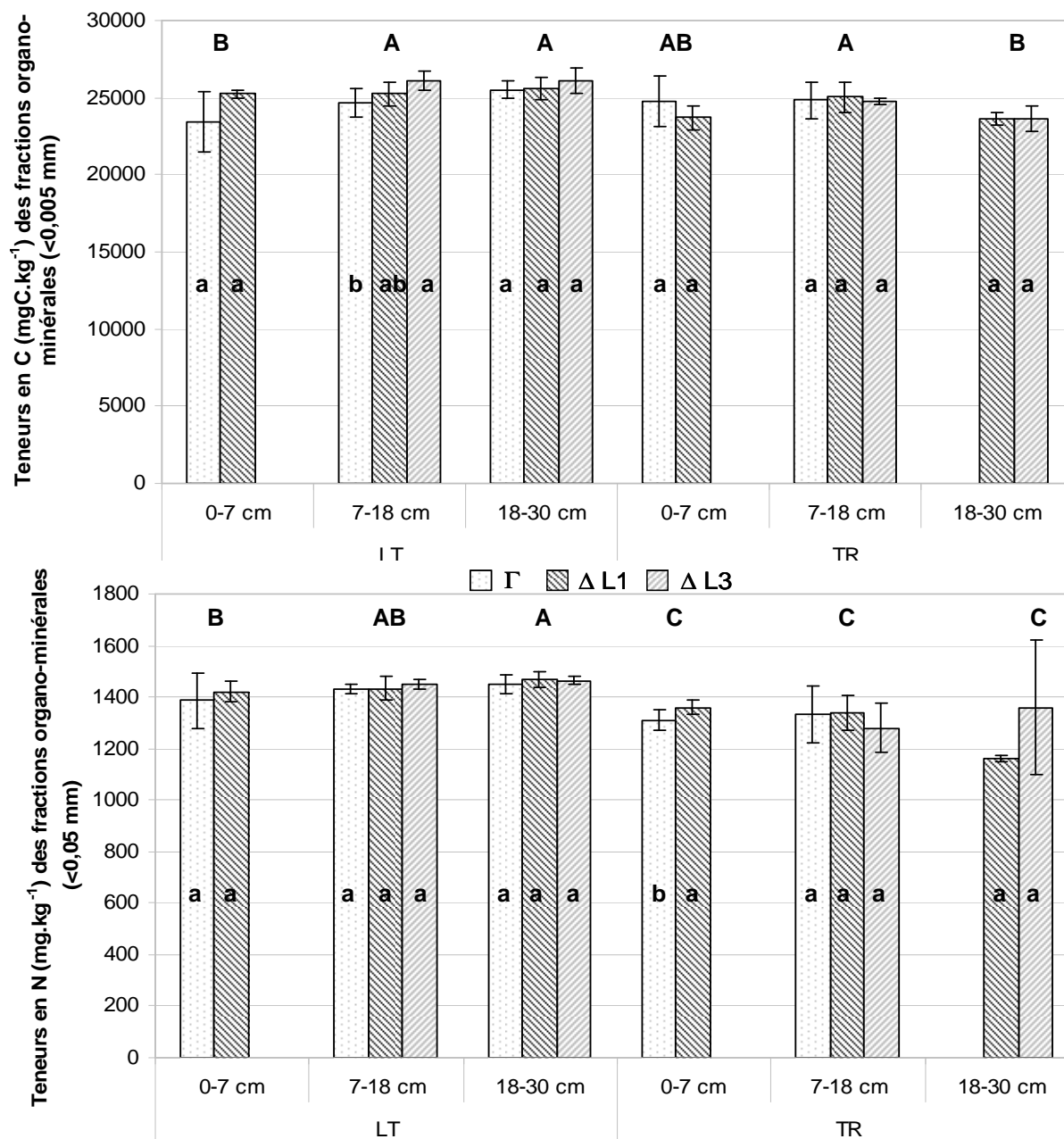


Figure 1 : Comparaison des teneurs en C et N (mg.kg⁻¹ de sol) des fractions organo-minérales (<0,05 mm) des traitements, horizons et des zones de prélèvement.

a-b: comparaison des teneurs entre type de motte par traitement et horizon; A-D: comparaison des teneurs entre horizons et traitements sans distinction du type de motte.

Cette figure montre que le type de motte (Γ/Δ) et la zone de prélèvement (L3/L1) n'ont pas d'influence (ou une influence très faible) sur les teneurs en C et en N de la fraction organo-minérale ($<0,05$ mm). En revanche, quelques différences entre les horizons apparaissent. Pour la modalité LT, la teneur en C et N de l'horizon 0-7 cm est significativement inférieure à celle des autres horizons (la différence des teneurs en N entre les horizons 0-7 et 7-18 cm est significative à $p=0,055$). Pour la modalité TR, la teneur en C de l'horizon 7-18 cm est significativement supérieure à celle de l'horizon 18-30 cm ($p=0,0015$) et dans une moindre mesure à celle de l'horizon 0-7 cm ($p=0,082$). Les teneurs en N quant à elles ne sont pas différentes entre les horizons de la modalité TR.

Lorsque l'on compare les teneurs en C et en N des fractions organo-minérales des modalités LT et TR, on peut noter que globalement les teneurs mesurées sont supérieures pour LT ($p<0,0003$). La teneur en C de l'horizon 18-30 cm de la modalité LT est significativement supérieure à celle de TR ($p<0,0001$) tandis que les teneurs en N de tous les horizons de la modalité LT sont supérieurs aux teneurs de la modalité TR ($p=0,013$, $<0,0001$ et $0,0003$ pour les horizons 0-7, 7-18 et 18-30 cm respectivement).

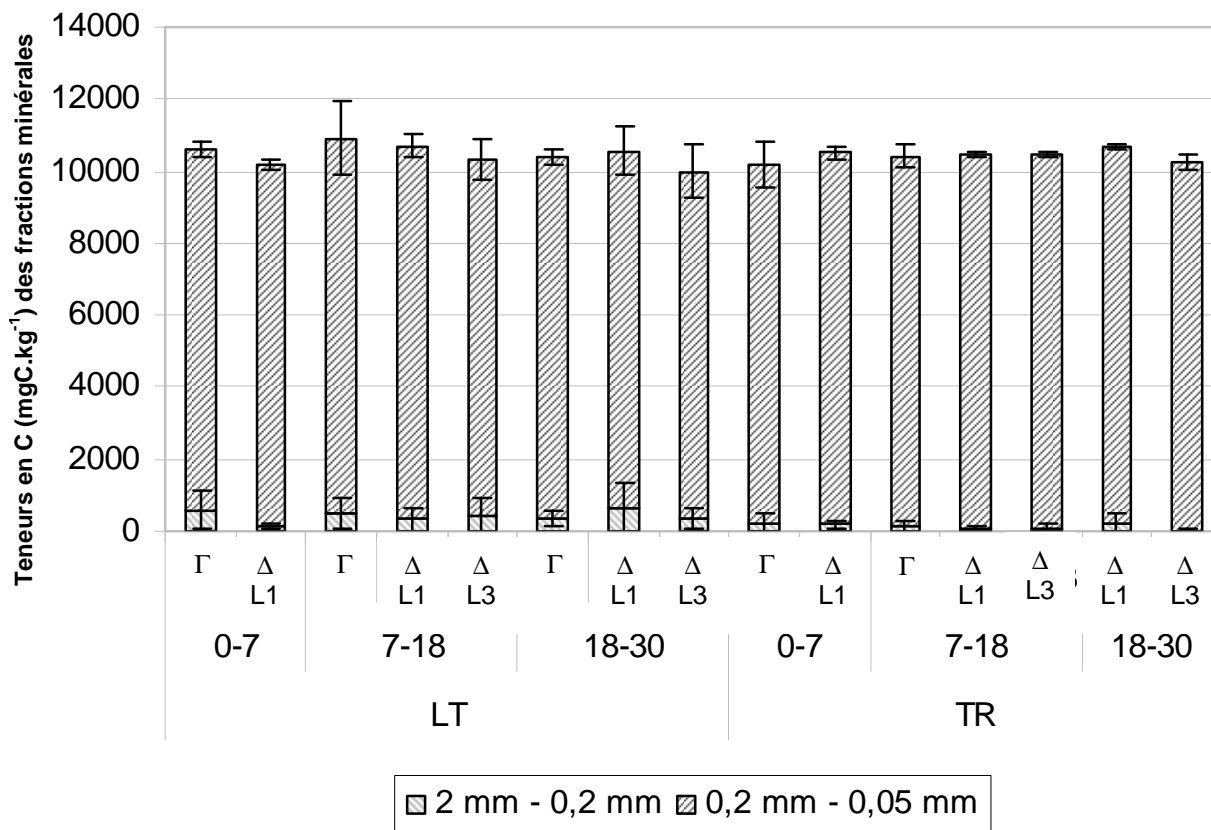


Figure 2 : Teneurs en C (mg.kg⁻¹ de sol) des fractions minérales comprises entre 2 et 0,2 mm et entre 0,2 et 0,05 mm.

Les teneurs en C des fractions minérales comprises entre 0,2 mm et 0,05 mm sont élevées. Des résidus de C, malgré le lavage à l'eau répété des différentes fractions, sont encore présents. Ces teneurs sont identiques, quels que soient le traitement, la profondeur ou le type de motte considéré.

Les teneurs en N de ces fractions sont nulles.

Annexe 8 : Effet du mode de travail du sol sur la respiration spécifique apparente

Site de Lyon

Tableau 1: Respiration spécifique apparente (RS) des différentes modalités du site de Lyon en mars 2006 et 2007 : effets de la profondeur de prélèvement et du type de motte.

Horizons (cm)	2006		2007			
	Γ	Δ	Γ	Δ L1	Δ L3	
LT	0-7	0,040 ± 0,008 ^b	0,040 ± 0,005 ^b	0,041 ± 0,004 ^a	0,038 ± 0,006 ^a	
	7-18	0,047 ± 0,012 ^a	0,057 ± 0,004 ^a	0,043 ± 0,006 ^a	0,037 ± 0,003 ^a	0,042 ± 0,009 ^a
	18-30	0,033 ± 0,004 ^c	0,028 ± 0,004 ^c	0,042 ± 0,010 ^a	0,039 ± 0,008 ^a	0,033 ± 0,008 ^a
LA	0-7	0,043 ± 0,004 ^b	0,043 ± 0,002 ^b	0,033 ± 0,004 ^b	0,039 ± 0,005 ^a	
	7-18	0,034 ± 0,002 ^c	0,042 ± 0,005 ^b	0,038 ± 0,006 ^a	0,033 ± 0,005 ^b	0,029 ± 0,004 ^b
	18-30	0,053 ± 0,012 ^a	0,052 ± 0,007 ^a		0,040 ± 0,006 ^a	0,043 ± 0,005 ^a
TR	0-7	0,030 ± 0,007 ^c	0,051 ± 0,010 ^a	0,043 ± 0,006 ^a	0,037 ± 0,004 ^{ab}	
	7-18	0,041 ± 0,006 ^b	0,046 ± 0,005 ^{ab}	0,048 ± 0,015 ^a	0,036 ± 0,009 ^b	0,044 ± 0,005 ^a
	18-30	0,045 ± 0,002 ^a	0,039 ± 0,007 ^b		0,044 ± 0,008 ^a	0,042 ± 0,005 ^a
TS	0-7	0,058 ± 0,012 ^a		0,049 ± 0,008	0,044 ± 0,004 ^b	
	7-18	0,042 ± 0,005 ^b	0,044 ± 0,002 ^b		0,044 ± 0,005 ^b	0,037 ± 0,003 ^b
	18-30	0,046 ± 0,003 ^b	0,063 ± 0,010 ^a		0,054 ± 0,008 ^a	0,049 ± 0,008 ^a

a-c: différences entre les horizons par traitement et type de motte ; les chiffres en gras sont significativement supérieurs à la RS mesurée sur les autres types de mottes.

Site de Kerguéhenec

Tableau 2 : Respiration spécifique (RS) des différentes modalités du site de Kerguéhenec en mars 2006 et 2007 : effets de la profondeur de prélèvement et du type de motte.

Horizons (cm)	2006		2007		
	Γ	Δ	Γ	Δ	
LT	0-7	0,045 ± 0,006 ^b	0,047 ± 0,003 ^b	0,070 ± 0,004 ^a	0,062 ± 0,002 ^b
	7-17	0,042 ± 0,003 ^b	0,048 ± 0,003 ^b	0,080 ± 0,008 ^a	0,053 ± 0,001 ^c
	17-22	0,058 ± 0,004 ^a	0,062 ± 0,003 ^a	0,073 ± 0,016 ^a	0,066 ± 0,002 ^a
LA	0-7	0,064 ± 0,003 ^{ab}	0,055 ± 0,008 ^a	0,067 ± 0,016 ^a	0,063 ± 0,006 ^a
	7-17	0,069 ± 0,008 ^a	0,056 ± 0,012 ^a	0,053 ± 0,006 ^a	0,052 ± 0,002 ^b
	17-22	0,057 ± 0,008 ^b	0,050 ± 0,006 ^a	0,051 ± 0,005 ^a	0,054 ± 0,008 ^{ab}
TR	0-7	0,073 ± 0,009 ^a	0,088 ± 0,016 ^a	0,063 ± 0,006 ^a	0,066 ± 0,005 ^a
	7-17	0,035 ± 0,006 ^b	0,054 ± 0,003 ^b	0,053 ± 0,015 ^a	0,043 ± 0,006 ^b
	17-22	0,041 ± 0,006 ^b	0,041 ± 0,008 ^b	0,050 ± 0,003 ^a	0,057 ± 0,006 ^a
TS	0-7	0,064 ± 0,007 ^a	0,039 ± 0,005 ^b	0,049 ± 0,004 ^b	0,051 ± 0,007 ^a
	7-17	0,055 ± 0,007 ^a	0,053 ± 0,003 ^a	0,076 ± 0,005 ^a	0,065 ± 0,031 ^a
	17-22	0,057 ± 0,009 ^a	0,045 ± 0,003 ^b	0,033 ± 0,004 ^c	0,039 ± 0,007 ^a

a-c: différences entre les horizons par traitement et type de motte; les chiffres en gras sont significativement supérieur au ratio mesuré sur les autres types de mottes.

Annexe 9 : Influence de la profondeur d'enfouissement des résidus de culture et de la structure du sol sur les communautés microbiennes en mars 2006

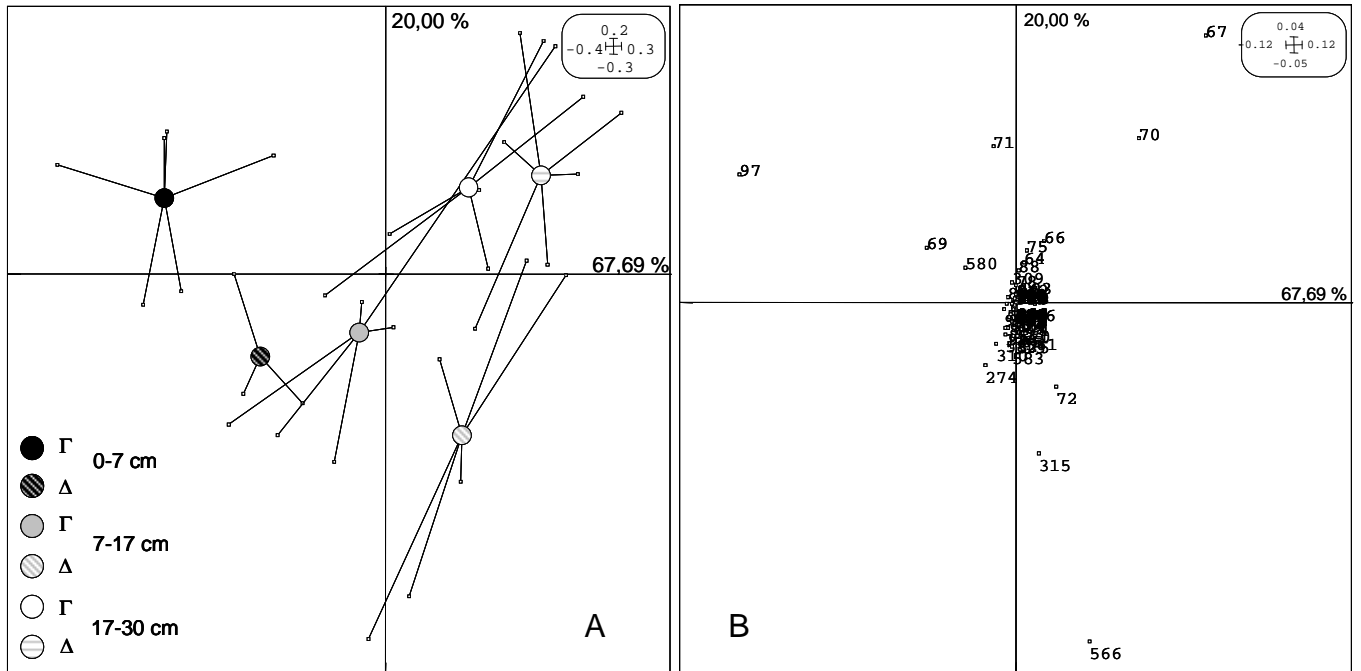


Figure 1 : Structure des communautés fongiques du labour traditionnel à T1 : ACP inter-classes (horizon-motte) des données de T-RFLP 18S. A : carte factorielle des points ; B : carte factorielle des variables.

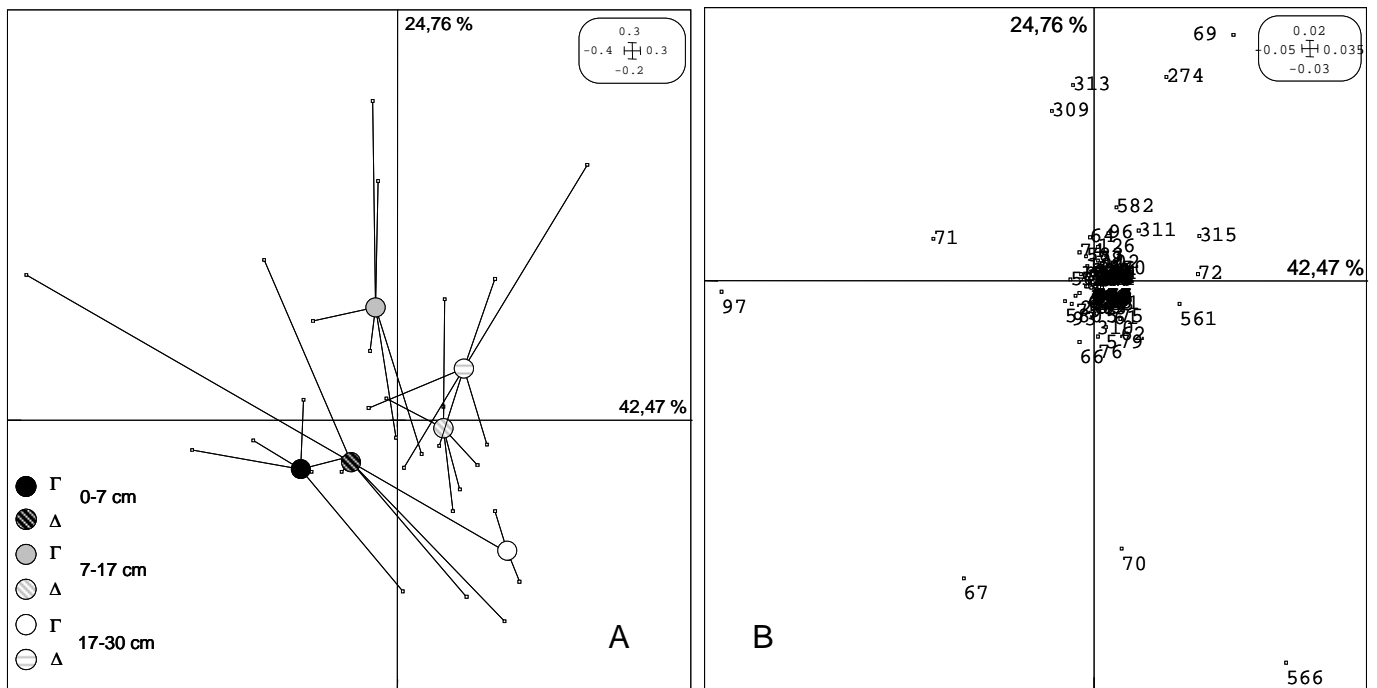


Figure 2 : Structure des communautés fongiques du travail du sol réduit à T1 : ACP inter-classes (horizon-motte) des données de T-RFLP 18S. A : carte factorielle des points ; B : carte factorielle des variables.

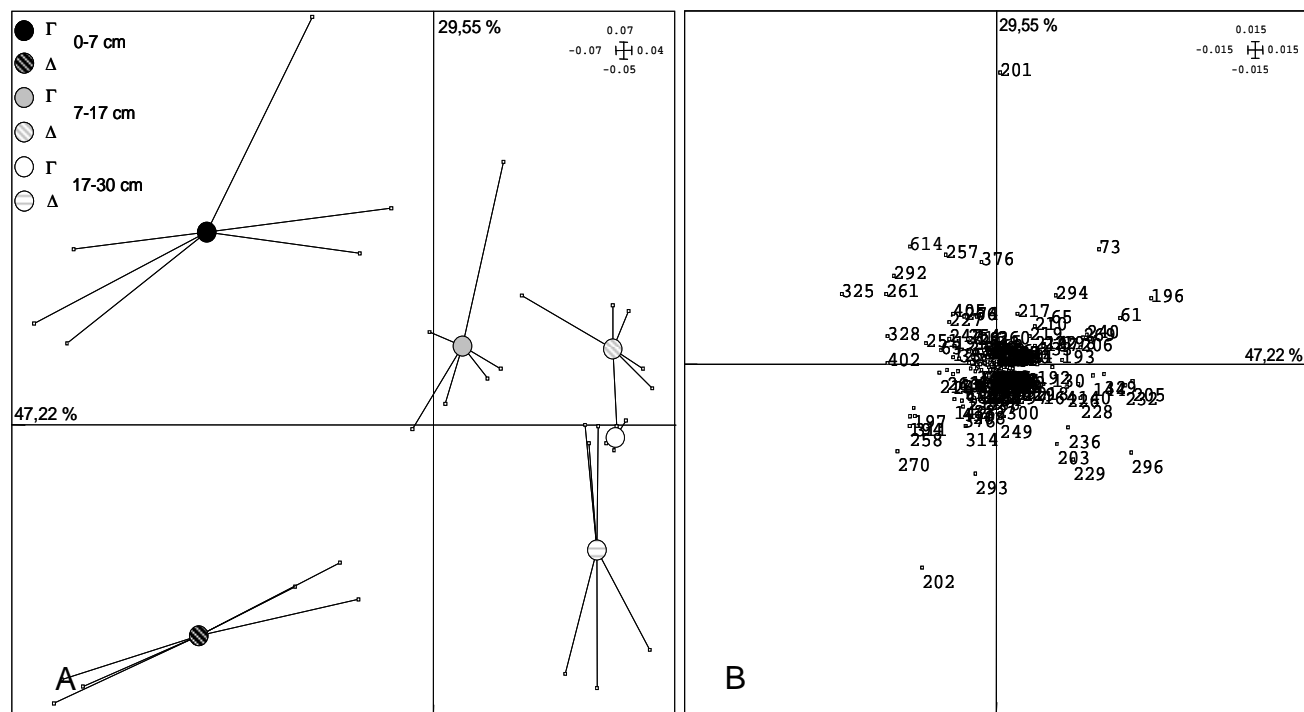
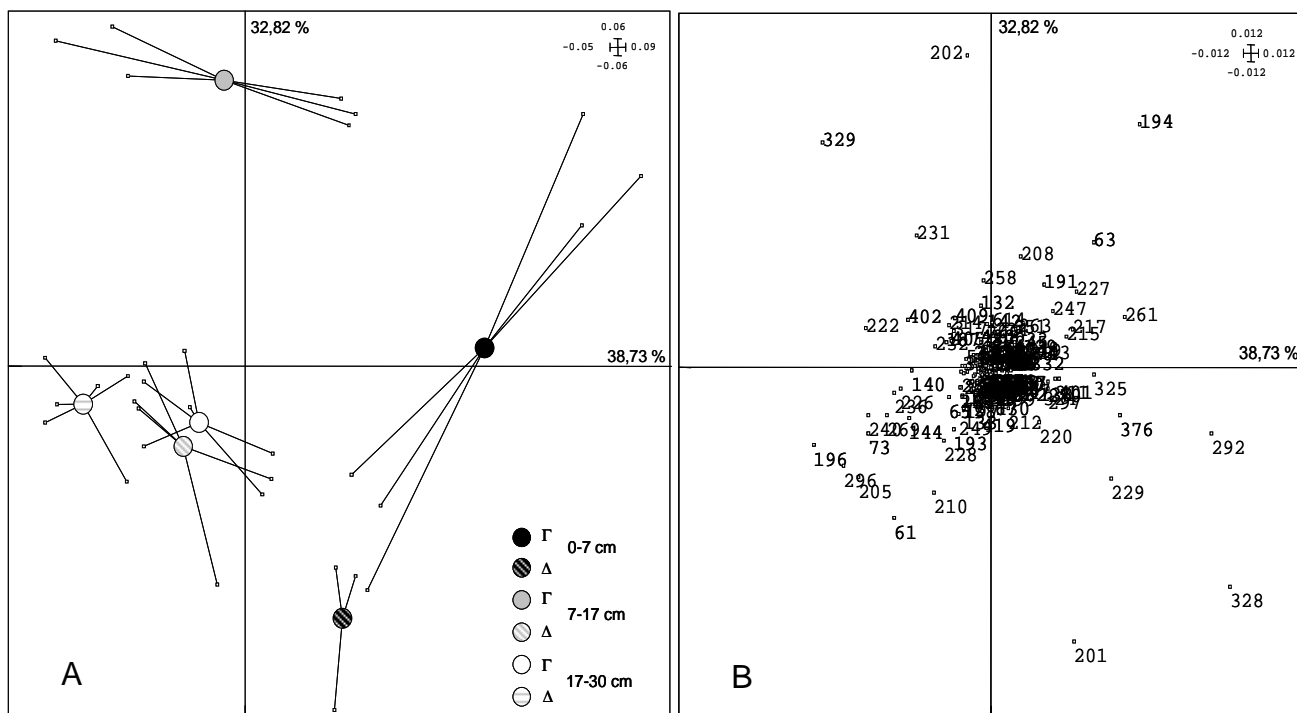


Figure 4 : Structure des communautés bactériennes du travail du sol réduit à T1 : ACP inter-classes (horizon-motte) des données de T-RFLP 16S. A : carte factorielle des points ; B : carte factorielle des variables.

